HELMUT PULTE

AXIOMATIK UND EMPIRIE

Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Untersuchung zur Mathematischen Naturphilosophie von Newton bis Neumann

Helmut Pulte

Axiomatik und Empirie

Errata

Beim Verlagsdruck haben sich – insbes. bei mathematischen Formeln – einige Fehler eingeschlichen, die hier neben anderen Schreibfehlern des Autors korrigiert sind:

• S. 7, Pkt. 4.1:	... Methode der Analyse und Synthese ...
• S. 41, Zeilen 12 / 13	... erfahrungs-unabhängige ...
• S. 57, Anm. 145, Zeile 3 v.u.:	(vgl. auch Teil 2.1, Anm. 110)
• S. 97, Formel:	$F \sim \Delta (mv)$ und nicht $F \sim ma$
• S. 100, Zeile 6:	$F \sim \Delta (mv)$
• S. 110, Zeile 2:	... handelt es sich ...
• S. 114 / 115:	[Seitenumbruch]
• S. 133, Anm. 364, Zeile 2:	... the methods of ...
• S. 164, Zeilen 1 / 2:	... Vermittlung von Evidenz ...
• S. 165, erste Formel:	$F \sim \Delta (mv)$ und nicht ...
• S, 211, Zeile 4:	... und die Schwerpunktverlagerung ...
• S. 220, Zeilen 6 / 7:	... an erklärungs-, nicht aber an ...
• S. 282, Zeile 13:	... (Kap. V, Teil 4.4) ...
• S. 302, Anm. 1018:	Vgl. Kap. IV, Teil 7.3, Anm. 777.
• S. 305, Anm. 1029:	... vgl. 20f. sowie Jahnke 1985.
• S. 306, Anm. 1032, Z. 2 v.u.:	... das Gauß-Zitat oben in Anm. 1028; ...
• S. 355, Zeilen 10/11:	... nicht-euklidianistischen ...
• S. 355, Zeile 12:	... und dabei vorgenommene ...
• S. 362, Anm. 1256, Zeile 2:	... auf die in Anm. 1253 ...
• S. 375, Anm. 1313, Zeile 1:	... wichtigsten widerstreitenden Aspekte ...
• S. 378, Anm. 1325, Z. 1 v.u.:	... as seen by Riemann" ...
• S. 391, Formel *(5)*:	$L_1 = G_1 - 1, \quad L_2 = G_2 - 1, \quad L_3 = G_3 - 1$
• S. 415, Zeilen 2 / 3:	... Induk-tion ...
• S. 444, Zeile 28:	Bernoulli, Daniel (1726): „Examen ..."
• S. 463, Zeile 24:	... der speziellen und allgemeinen ...
• S. 467, Zeile 7:	Jahnke, Hans N. (1990): ...
• S. 468, Zeile 15:	... *(Harmonice mundi. ...*
• S. 470, Zeile 7:	... Art. „Naturwissenschaften", in ...
• S. 475, nach Zeile 24 (Erg.):	MacLaurin, Colin (1746): *An Account of Sir Isaac Newton's Philosophical Discoveries.* London.

Edition Universität

Helmut Pulte

Axiomatik und Empirie

Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Untersuchung zur Mathematischen Naturphilosophie von Newton bis Neumann

Wissenschaftliche Buchgesellschaft

Einbandgestaltung: Neil McBeath, Stuttgart.

Ruhr-Universität Bochum
Institut für Philosophie
1956. PUL. E. 2005
20057138
B

SLS: Naturphilosophie / Mathematik
Mathematik / Naturphilosophie
Wissenschaftstheorie

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
http://dnb.ddb.de abrufbar.

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig.
Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen,
Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in
und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

© 2005 by Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
Die Herausgabe des Werkes wurde durch
die Vereinsmitglieder der WBG ermöglicht.
Gedruckt auf säurefreiem und alterungsbeständigem Papier
Printed in Germany

Besuchen Sie uns im Internet: www.wbg-darmstadt.de

ISBN 3-534-15894-6

Es ist nemlich diese Wissenschaft [Newtons mathematische Naturphilosophie] eigentlich die Rüstkammer aller derjenigen Hypothesen, aus welchen nachher in der Erfahrung die Erklärungen gelingen. Darin ist bei weitem das meiste von mathematischer Entwicklung, aber die Grundbegriffe sind philosophisch, und sollte es gelingen, die Naturkundigen über diese zu verständigen, so würden wir dadurch für die Disciplin der Hypothesen ungemein viel gewinnen.
(Jakob Friedrich Fries)

Inhalt

Vorwort 11

I Zur Einleitung: ‚Mathematische Naturphilosophie' und ‚Wissenschaftstheorie' als begriffsgeschichtliche Problemindikatoren 14

II Klassischer und moderner Wissenschaftsbegriff: Metatheoretische und metahistorische Vorüberlegungen 22

1. Der klassische Wissenschaftsbegriff 22
   1.1 Kriterien klassischer Wissenschaft 25
   1.2 Die AFE-Interpretation Aristotelischer Wissenschaft 29
   1.3 Klassische und Baconsche Wissenschaft 33
2. Klassische Mathematische Naturphilosophie (KMN) 40
   2.1 Funktionen der Mathematik 44
   2.2 Eine AFE-Charakterisierung der KMN 54
   2.3 Laplacesche Wissenschaft: Eine kleine Dämonologie 59
   2.4 Mechanischer Euklidianismus als Wissenschaftsideal und dessen Auflösung 66
3. Zielsetzung, Methode und Plan der Untersuchung 76
   3.1 Zielsetzung: Analyse der Auflösung des axiomatischen Denkens in der KMN 76
   3.2 Methode: Analytisch-genetische Rekonstruktion der Vergangenheit 78
   3.3 Plan: Aufbau und Grenzen der Untersuchung 83

III Axiomatik und Empirie bei I. Newton 89

1. Einführung 89
2. Der axiomatische Aufbau der Principia 94
   2.1 Zur Stellung der Axiome in den Principia 94
   2.2 Ein Beispiel: Liber I, Sectio II, Theorema I 98
   2.3 Die Kritik Duhems und Poppers 102
3. Trägheitsprinzip, absoluter Raum und die ‚axiomatisierende' Funktion der Mathematik 107
   3.1 ‚Axiomatisierende' Funktion der Mathematik 107
   3.2 Empirischer Charakter des Trägheitsprinzips 112
   3.3 Das ‚Paradox der modernen Mechanik' im Rahmen der KMN 118
4. Prinzipiencertismus und empiristische Methodologie 119
   4.1 Methode der Analyse und Syntheses 120
   4.2 Hypothesenbegriff 123
   4.3 Prinzipiencertismus 126
5. Zusammenfassung und Ausblick 132

IV Stationen und Entwicklungen Klassischer Mathematischer Naturphilosophie im Zeitalter der Aufklärung ... 135
1. Einführung ... 135
2. Zur allgemeinen Entwicklungsstruktur der rationalen Mechanik ... 138
2.1 Rationale Mechanik als Mathematik ... 139
2.2 Drei Programme der rationalen Mechanik ... 141
2.3 Rivalisierende Euklidianismen: Drei Kontroversen ... 145
2.4 Mechanischer Euklidianismus und Humescher Skeptizismus ... 147
2.5 Prinzipieninflation und systematisch-deduktive Organisation ... 151
2.6 Prinzipienbegründungen und Begründungsprinzipien ... 156
2.7 Begründungen des zweiten Bewegungsgesetzes ... 164
2.8 Mach, Truesdell und die Entwicklung des 18. Jahrhunderts ... 168
3. Zwischen Mathematik und Metaphysik: Eulers rationale Mechanik ... 170
3.1 AFE-Charakter der Eulerschen Mechanik und Probleme ihrer Axiomatisierung ... 171
3.2 Newtonsche Axiomatik und Integration von Erhaltungssätzen ... 176
3.3 Metaphysische Begründung und Autonomisierung der rationalen Mechanik ... 178
3.4 Zusammenfassung ... 185
4. Analytische Mechanik und analytische Prinzipien ... 187
4.1 Analytische Mechanik ... 187
4.2 Analytische Prinzipien ... 189
4.3 Ausblick ... 197
5. Mechanik als Mathematik: Lagranges Méchanique Analitique ... 198
5.1 Wandelnde Prinzipien und Konzepte: Lagranges frühe Arbeiten ... 199
5.2 Die Argumentation der Méchanique Analitique ... 204
5.3 Evidenzprobleme und ‚Gummi-Euklidianismus': Der späte Lagrange und die Lagrange-Rezeption ... 211
6. Mechanischer Euklidianismus und konstruktivistische ‚Mythen des wissenschaftshistorischen Geistes' ... 217
6.1 Eine konstruktivistische Rekonstruktion ... 217
6.2 Eine analytisch-genetische Kritik ... 219
7. Kant und die rationale Mechanik des 18. Jahrhunderts: Zwei Projektionen ... 224
7.1 Die ‚synthetische' Projektion: *Metaphysische Anfangsgründe* ... 228
7.2 Die ‚analytische' Projektion: *Kritik der Urteilskraft* ... 237
7.3 Kritik und Ausblick ... 238
V System, Theorie und Heuristik: Zur Transformation von nomothetischer Teleologie und Systemdenken bei Kant und Fries ... 240
1. Einführung ... 240
2. Nomothetische Teleologie im 18. Jahrhundert ... 245
2.1 Zwei Formen von Teleologie ... 245
2.2 Zur teleologischen Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung ... 248
3. Nomothetische und subjektive formale Teleologie bei Kant ... 252

3.1 Vorkritische Rezeption der Physikotheologie ... 252
3.2 Subjektive formale Teleologie im Rahmen des kritischen Systems ... 257
3.3 System und Gesetzesnotwendigkeit ... 260
4. Fries' methodologische Auflösung von Kants subjektiver formaler Teleologie ... 264
4.1 Funktionale Spaltung der subjektiven formalen Teleologie ... 264
4.2 System, Theorie und heuristische Maximen ... 269
4.3 Die Teleologie der Natur als bildliche Umkehrung der Kausalreihe ... 273
4.4 Das Prinzip der kleinsten Wirkung als allgemeinstes indirektes Gesetz der Bewegung ... 275
5. Zusammenfassung ... 279
VI Die ‚rein mathematische' Auflösung der Klassischen Mathematischen Naturphilosophie ... 281
1. Das Problem der Anwendung von Mathematik: Rückblick, Problemstellung und Einordnung ... 281
1.1 Positivismus: Auguste Comte ... 284
1.2 Empirismus: John Herschel ... 287
1.3 ‚Semi-Kantianismus': W.R. Hamilton ... 290
1.4 Zusammenfassung ... 293
2. Jacobi und die reine Mathematik ... 295
2.1 Reine Mathematik und Anwendungsproblem ... 296
2.2 Mathematische Naturgesetzlichkeit und Anwendungsproblem beim ‚jungen' Jacobi ... 309
2.3 Physikalisierung und Historisierung: Jacobis Weg zu einer neuen Sicht des Anwendungsproblems ... 314
3. ‚Vom Standpunkt der reinen Mathematik': Jacobis konventionale Mechanik ... 322
3.1 Die neue Sicht der analytischen Tradition ... 323
3.2 Mechanische Prinzipien als ‚bloße Conventionen' ... 326
3.3 Konventionen bei Jacobi und Poincaré ... 330
4. Beweise und Widerlegungen: Jacobis Kritik an Lagrange ... 334
4.1 Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten nach Jacobi ... 334
4.2 Lagranges erster Beweis ... 336
4.3 Jacobis erste Widerlegung ... 338
4.4 Lagranges zweiter Beweis ... 342
4.5 Jacobis zweite Widerlegung ... 346
5. Zusammenfassung und Bewertung ... 355
VII Die weitere Hypothesierung und Konventionalisierung der Mathematischen Naturphilosophie bei B. Riemann und C. Neumann ... 359
1. Einleitung: Riemann, Neumann und der Einfluß Jacobis ... 359
2. Riemanns neue Mathematische Naturphilosophie vor dem Hintergrund der Newtonschen und der analytischen Tradition ... 361
2.1 Trägheitsprinzip, Geometrie und Nahwirkung: Kritik der Newtonschen Mechanik ... 363

2.2 ‚An der Grenze des Vorstellbaren': Wissenschaftlicher Realismus, Mathematik und der Status der neuen Mathematischen Naturphilosophie 375
2.3 ‚Höhere Mechanik', Äthertheorie und Einheit der Kräfte: Ansätze zur neuen Mathematischen Naturphilosophie 388
2.4 Die physikalische Geometrie in Riemanns ‚Hypothesen': Eine spekulative Interpretation 395
2.5 Zusammenfassung: Riemann als Vorläufer Einsteins? 399
3. Neumanns Kritik der ‚Principien der Galilei-Newton'schen Theorie' 402
3.1 Wendezeit und Neumanns Weg zum ‚Körper Alpha' 402
3.2 ‚Niemals wahr oder wahrscheinlich': Prinzipienfallibilismus der mathematischen Physik und Certismus der Mathematik 413
3.3 Prinzipienprüfung und der neue wissenschaftstheoretische Status der Mechanik 418
3.4 Hypothesierung, Konditionalisierung und Konventionalisierung des Trägheitsprinzips: Neumanns Körper ‚Alpha' und der absolute Raum 421
3.5 Zusammenfassung: Neumann als Vorläufer Machs und Poppers 429
VIII Schluß: Die Evolution vor Einstein 432
Quellen 439
Namensregister 496

Vorwort

Bereits in ihren frühen verbrieften Anfängen, bei Archytas von Tarent und Archimedes, wurde Mechanik nicht allein als eine praktische Gerätelehre, sondern auch als eine *theoretische* Wissenschaft aufgefaßt und betrieben. Mit dem Anspruch, ihr Wissen durch Angabe erster, unbezweifelbarer Prinzipien begründen zu können und mit ihrer axiomatisch-deduktiven Methode stand diese Wissenschaft von Beginn an in enger Verbindung zur Geometrie.

Erst mit Beginn der *Neuzeit* allerdings konnte die Mechanik von einer naturwidrigen ‚Überlistungskunst' zu einer naturoffenbarenden Wissenschaft werden: Die Vorstellung, daß die Natur einer allgemeinen und mathematisch formulierbaren Gesetzlichkeit unterliegt, ist neben der Ausbildung einer systematischen Experimentierpraxis *das* entscheidende Charakteristikum der neuzeitlichen Wissenschaft. Die Vorstellung hingegen, daß eine Anzahl wahrer Sätze über ein- und denselben Gegenstandsbereich nicht nur einer logischen Ordnung, sondern einer ganz bestimmten, nämlich axiomatisch-deduktiven Anordnung bedürfe, um Wissenschaft zu heißen, gehört zum antiken Erbe des Wissenschaftsverständnisses der Neuzeit. Die Koexistenz beider Vorstellungen im 17. und 18. Jahrhundert läßt sich, allerdings erst *post festum*, als eine *Ungleichzeitigkeit* zweier verschiedener Wissenschaftsauffassungen kennzeichnen, die nicht mit einem *modernen* Wissenschaftstypus verwechselt werden sollte: Zwischen Euklids *Elementen* und Newtons *Principia* liegen zwei Jahrtausende, die zur Ausbildung eines solchen Typus eben *nicht* hinreichten.

Ich führe diese beiden Werke hier nicht nur an, weil das erste als Paradigma klas*sischer*, das zweite hingegen gemeinhin — nach meiner Auffassung aber ohne hinreichenden Grund — als Paradigma *moderner* Wissenschaft fungiert, sondern auch, weil ihre Nennung in einem Atemzug geradewegs auf jenen Problemkomplex verweist, um den es hier geht: Die Adaption einer der Mathematik entnommenen *euklidischen* Wissenschaftsauffassung an den Bereich der *philosophia naturalis* macht die mathematische Physik im 18. Jahrhundert zum Kristallisationspunkt der Erwartung, Erkenntnis von einer Qualität erlangen und in einer Organisationsform darstellen zu können, wie sie bis dahin nur der Mathematik selbst zugestanden wurde.

Diejenige Wissenschaft, die die Möglichkeit einer wahren und universellen und mathematischen Naturbeschreibung und -erklärung versprach, wird heute — ebenso gängig wie vereinfachend und irreführend — die ‚Newtonsche Mechanik' genannt. Ihr genuines Phänomen ist die Bewegung diskreter Massen, und als Theorie der Bewegung

solcher Massen kommt sie hier vorwiegend zur Sprache. Bereits bevor sie überholt war, wurde sie auch als ‚klassisch' bezeichnet — nicht also, um sie begrifflich zu archivieren und von ihren Nachfolgern, der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, abzugrenzen, sondern im Gegenteil, um ihre Leitbildfunktion für künftige Theoriebildung zu unterstreichen. Besondere wissenschaftstheoriegeschichtliche Aufmerksamkeit verdient diese Theorie, weil sie das Wissenschaftsverständnis der Neuzeit bis in unser Jahrhundert hinein prägte und Weltbildfunktion weit über den Kreis derjenigen Wissenschaftler und Philosophen hinaus erlangte, die sich mit ihr aktiv und kreativ auseinandersetzten. Sie war — und ist in abgeschwächter Form bis heute — Eingangspforte in die Wissenschaft und Wegweiser zugleich: Sie lieferte dem Physiker ein Paradigma seiner theoretischen Forschung, dem Mathematiker einen Beweis für die Leistungsfähigkeit seiner Disziplin jenseits ihrer eigenen Grenzen und gab dem Philosophen die Frage auf, wie eine Naturwissenschaft möglich sein kann, die offenkundig *mehr* ist als beschreibende Naturgeschichte. Die von E.J. Dijksterhuis beschriebene *Mechanisierung des Weltbildes* beruhte in ihrer entscheidenden Phase, dem 17. Jahrhundert, auf dem Glauben an die Möglichkeit einer umfassenden mathematischen Theorie der Naturphänomene, und der Mechanismus des 18. und 19. Jahrhunderts auf dem Glauben an ihre Wirklichkeit in Gestalt der klassischen Mechanik.

Eine Analyse dieser Wissenschaft, die deren *Modernisierung* innerhalb ihrer ‚klassischen' Periode untersucht, hat besonders den Wandel des Verhältnisses von *Axiomatik und Empirie* ins Auge zu fassen und ist bisher nicht unternommen worden. Das vorliegende Buch soll zur Behebung dieses Desiderats beitragen. Es ist über eine Reihe von Jahren entstanden und schuldet einer Reihe von Personen und Institutionen Dank für Unterstützung und Rat: Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Bewilligung eines Stipendiums, das den ‚Einstieg' in die skizzierte Problematik ermöglichte. Ein erster Teil des Buches ist während eines Forschungsaufenthalts an der *University of Cambridge*, der Wiege der ‚wirklichen' Newtonschen Mechanik, entstanden. Ich danke den dortigen Kollegen, insbesondere Jeremy Butterfield und Michael Redhead, für ihre freundliche Aufnahme und für anregende Diskussionen, sowie der *Alexander von Humboldt-Stiftung*, die den Aufenthalt in Cambridge ermöglichte. Dem Bochumer Institut für Philosophie danke ich für die Möglichkeit, diese Untersuchung im Anschluß weiterführen zu können, für eine gute Arbeitsatmosphäre und vielfältige Hilfestellungen und Unterstützung bei der Fertigstellung. Frau Gisela Jäger-Neumann und Frau Erika Töller halfen umsichtig bei der Texteinrichtung und Fehlerkorrektur; bei technischen Problemen aller Art durfte ich stets auf den kompetenten Beistand von Herrn Dr. Michael Anacker, Herrn Ralf Kuklik, M. A. und Herrn Carsten Seck, M. A., rechnen. Ihnen danke ich ebenso wie der Hugo-Dingler-Stiftung, deren Namensgeber mit seinem Werk *Die Grundlagen der Physik. Synthetische Prinzipien der mathematischen Naturphilosophie* von 1923 in die Tradition gehört, deren wissenschaftstheoretischer Wandel hier untersucht wird. Einzelne Thesen und Teile des Buches wurden zu

unterschiedlichen Anlässen in Berlin, Bochum, Cambridge, Erlangen, Göttingen, Jena, Milton Keynes, Münster, Nancy und Wuppertal vorgestellt und ‚erprobt'. Zweifellos hat die vorliegende Endfassung durch die Diskussionen mit und Hinweise von zahlreichen beteiligten Kolleginnen und Kollegen gewonnen. Auch ihnen danke ich herzlich. Der Wissenschaftlichen Buchgesellschaft bin ich nicht nur Dank dafür schuldig, daß sie das Buch bereitwillig in ihre Reihe *Edition Universität* aufgenommen hat, sondern auch für ihre Geduld, die dadurch sehr strapaziert wurde, daß ein ‚fast fertiges' Manuskript wegen anderer Verpflichtungen, vor allem der Mitherausgebertätigkeit beim *Historischen Wörterbuch der Philosophie*, nicht früher in ein ‚fertiges' Manuskript transformiert werden konnte.

Zuletzt und besonders gerne möchte ich darauf hinweisen, daß Herr Prof. Dr. Gert König die Entstehung und Fertigstellung dieser Untersuchung nicht nur durch vielfältige Hilfestellungen erst ermöglicht, sondern auch mit sachkundigem Rat und kompetenter Kritik gleichsam ‚von der Wiege bis zur Presse' inhaltlich begleitet hat. Meine Hoffnung ist, daß diese Arbeit ein wenig zur Weiterbildung der wissenschaftstheoriegeschichtlichen Forschungstradition beiträgt, die mit den Namen Alwin Diemer und Gert König verbunden ist – und auch, daß sie etwas von der Offenheit einer *Allgemeinen Wissenschaftstheorie* widerspiegelt, die diese Richtung stets daran gehindert hat, die komplexen und faszinierenden Fragen der Wissenschaftstheorie und -geschichte mit einfachen schulphilosophischen ‚Antworten' zu ersticken. Gert König gilt mein besonders herzlicher Dank. Dieser Dank ist kein ‚assertorisch-empirischer', kein ‚hypothetisch-konjekturaler', sondern – er wird es mir hoffentlich verzeihen – ein ‚apodiktisch-apriorischer'.

Bochum, den 29. November 2004 Helmut Pulte

I Zur Einleitung: ‚Mathematische Naturphilosophie' und ‚Wissenschaftstheorie' als begriffsgeschichtliche Problemindikatoren

Weil nun der Verlust eines Begriffs von großer Anwendung in der spekulativen Weltweisheit dem Philosophen niemals gleichgültig sein kann, so hoffe ich, es werde ihm die Bestimmung und sorgfältige Aufbewahrung des Ausdrucks, an dem der Begriff hängt, auch nicht gleichgültig sein.[1] (Immanuel Kant)

In allen Dingen der Welt gibt es ein Coup d'Œil, das heißt, jeder vernünftige Mensch der etwas hört oder sieht, urteilt instinktmäßig darüber. Er schließt zum Beispiel aus dem Titel des Buches und dessen Dicke auf den inneren Wert. Wohlverstanden, ich sage nicht, daß diese Dinge sein eigentliches Urteil lenken, sondern nur, daß er mit dem ersten Anblicke einer Sache auch ein dieser geringen Information proportioniertes Urteil von ihr verbindet, oft ohne daß er sich dessen deutlich bewußt wird. Auch hebt die Erfahrung der nächsten Sekunde das Urteil oft wieder auf [..].[2]
Jeder arme Teufel sollte wenigstens zwei ehrliche Namen haben, damit er den einen dran wagen könnte, um den andern ins Brot zu bringen; so haben Schriftsteller anonymisch geschrieben. Wenn man zwei ehrliche Namen hätte, so könnte man sich mit dem einen noch wehren, wenn einem der andere abgeschnitten wäre.[3] (Georg Christoph Lichtenberg)

Wenn jeder ‚arme Teufel' wenigstens zwei ehrliche Namen haben sollte, wird man dies einer Schrift vielleicht auch zubilligen dürfen, und wenn denn ihr Titel tatsächlich das erste Urteil über den ‚inneren Wert' bestimmt, scheint doppelte Vorsicht geboten: Namen sollten hier Vorzeichen sein für das, was kommt. Bei einer historischen Studie liegt es nun nahe, *historische* Namen als erste Kandidaten ‚ehrlicher Namen' in Betracht zu ziehen — sei es, daß diese sich bis in die Gegenwart hinein gerettet haben, oder sei es, daß sie im Laufe der Zeit durch andere, darum aber nicht unbedingt bessere Ausdrücke verdrängt wurden.

[1] Kant 1787, A325/B382 (*AA* 3, S. 253).
[2] Lichtenberg 1963, S. 195.
[3] Ebd., S. 161.

Der Titel dieses Buches bringt seine Grundproblematik zum Ausdruck, nämlich den Anspruch auf axiomatische Darstellbarkeit und Begründbarkeit empirischer Sachverhalte (vgl. Teil 2.4). Im inhaltserklärenden Untertitel sind Ausdrücke beider von Lichtenberg ausgesprochener Art enthalten: *Wissenschaftstheorie* und *Mathematische Naturphilosophie*. Auch wenn, wie sich später zeigen wird, die Fragestellungen der durch sie bezeichneten Untersuchung erst durch die *neuere* Wissenschaftstheorie ermöglicht wurden, erscheint es sinnvoll, einige Bemerkungen über deren Auftauchen vorwegzuschicken — nicht mit Anspruch auf begriffsgeschichtliche Vollständigkeit, sondern mit der Absicht, auf die folgende Untersuchung einzustimmen, bevor (im folgenden Kapitel) deren Gegenstand, Ziele und Methoden näher dargelegt werden.

Der zweite Begriff nimmt Bezug auf *Die mathematische Naturphilosophie nach philosophischer Methode bearbeitet* (1822) des Philosophen, Mathematikers und Physikers Jakob Friedrich Fries, und der Untertitel jenes Werkes möchte auch hier mitbedacht werden: *Ein Versuch.* Fries führt zwei Gründe an, warum er diesen Versuch „*mathematische Naturphilosophie* und nicht schlechthin Naturphilosophie" nennt: „Erstens nemlich die Naturphilosophie enthält unter den allgemeinsten Naturgesetzen der *metaphysischen allgemeinen Naturlehre* theils die Naturgesetze der Körperwelt, theils die Naturgesetze des menschlichen Geistes. Die letztern gehören der *Anthropologie*, auf die erstern ist hier unsre Absicht gerichtet".[4] Es geht also in seiner Naturphilosophie um die philosophischen Grundlagen der *äußeren* Natur, und in deren Zentrum stehen die ‚allgemeinsten *Naturgesetze* der Körperwelt'. Der „zweyte Grund, die Wissenschaft, auf welche mein Versuch gerichtet ist, bestimmt *mathematische* Naturphilosophie zu nennen", ist der, diese Naturphilosophie als eine spezifische gegenüber anderen abzugrenzen, also gleichsam nach dem Mittelpunkt auch die Peripherie des Kreises seiner Untersuchungen zu bestimmen. Fries will hier vor allem eine klare Trennungslinie ziehen zu der „dynamischen Naturlehre" oder, wie er später sagt, der „combinirenden" Naturphilosophie, „so wie diese aus den Kantischen Lehren von Schelling und in Schelling's Schule entwickelt worden ist"[5]. Und es ist der andersartige Status wiederum der *allgemeinen mathematischen Naturgesetze*, der ihm dabei als ein erstes Abgrenzungskriterium dient: „Ich unterscheide mit dem Namen mathematische Naturphilosophie die metaphysisch-mathematische Untersuchung der Gesetze der Körperwelt von der hier genannten combinirenden Naturphilosophie, welche sich der allgemeinen Naturgesetze nur als leitender Regulative für Vergleichungen und nicht als eigentlicher Erklärungsgründe bedienen kann".[6]

Beiden Begriffsbegründungen Fries' ist implizit, was im Titel des ‚heimlichen' Namensgebers seiner Untersuchung, „Newton's Meisterwerk"[7] *Philosophiae naturalis*

[4] Fries 1822, S. III.
[5] Ebd., S. V.
[6] Ebd., S. VI.
[7] Ebd., S. IV.

principia mathematica aus dem Jahre 1687, explizit als Gegenstand genannt ist, nämlich die mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie. Newton greift den antiken Begriff *philosophia naturalis* in seinem ganzen Umfang und seiner Traditionsbeladenheit auf, und es wäre falsch, ihn schlichtweg als ‚Naturlehre' oder ‚Physik' im Sinne des späten 18. bzw. 19. Jahrhunderts übersetzen zu wollen. Den Anspruch auf *Neuheit* bringt er nicht emphatisch zum Ausdruck, wie zuvor Bacon (*Novum organum*), Kepler (*Astronomia nova*) oder Galilei (*Discorsi e dimostrazioni matematiche in torno a due nuove scienze* ...), sondern in Form eines schlichten Zusatzes: *principia mathematica*. Unter mathematischen Prinzipien, und nur unter diesen, ist nach Newton Naturphilosophie zu verstehen.[8] Fries macht sich diesen Standpunkt zu eigen. Sein Ziel ist es, eine solche Naturphilosophie nicht nur nach „mathematischen Methoden" zu behandeln, wie er sie bei Newton hauptsächlich am Werke sah, sondern vor allem „nach philosophischer Methode"[9]. Mit dieser Absicht wiederum geht er auf Kants *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786) zurück. Die dort entfaltete „Metaphysik der Natur" heißt, wie Kant bereits in der „Architektonik" der *Kritik der reinen Vernunft* klarmacht, „Physik, aber, weil sie nur die Prinzipien ihrer Erkenntnis a priori enthalten soll, *rationale* Physik"; jenseits traditioneller Metaphysik geht es ihr um die transzendentalphilosophische Aufgabe, „die Möglichkeit einer mathematischen Naturlehre selbst in einem System darzustellen"[10].

Vor diesem Newton-Kantischen Hintergrund ist Fries' *Mathematische Naturphilosophie* am besten zu verstehen als eine *Wissenschaftstheorie*[11] der damaligen, im Zeichen der Newtonschen Lehre stehenden mathematischen Physik, und zwar in einem ganz bestimmten Sinne: Unter den Prämissen des Mechanismus[12] fragt sie nach der

[8] So knüpfen denn auch spätere Verwendungen der Begriffsbildung ‚Mathematische Naturphilosophie' direkt an Newtons *Principia* an — sei es in erweiternder Absicht wie in Bernhard Riemanns 1853 entstandenem Fragment über *Neue mathematische Principien der Naturphilosophie* (Riemann 1853a; s. hierzu Kap. VII, Teil 2), sei es in begründender Absicht wie in Hugo Dinglers Werk *Die Grundlagen der Physik. Synthetische Prinzipien der mathematischen Naturphilosophie* (Dingler 1923a).

[9] Fries 1822, S. IV.

[10] Kant 187, A846/B874 (*AA* 3, S. 547) bzw. Kant 1786, AXIV (*AA* 4, S. 473).

[11] Zur Abgrenzung der Friesschen Naturphilosophie gegenüber derjenigen Schellings und Hegels s. König/Geldsetzer 1979, S. 15*f., sowie die Hinweise auf die wissenschaftstheoretische Aktualität der *Mathematischen Naturphilosophie* von Fries ebd., S. 25*-36*, 69*-86*; Näheres hierzu in Kap. V dieser Arbeit.

[12] Aufgrund der vorhandenen Vorarbeiten braucht dieser Begriff hier nicht weiter verfolgt zu werden; ich verweise insbes. auf Maier 1938 und 1958 sowie Dijksterhuis 1956. Ich teile insbesondere die von Dijksterhuis vertretene Auffassung, daß neuzeitliche Mechanik nicht allein als „Bewegungslehre materieller Körper" definierbar ist: „Bewegung war ja auch der Grundbegriff der peripatetischen Naturwissenschaft; der Prozeß, den wir als Mechanisierung des Weltbildes anzudeuten pflegen, kann also nicht einfach durch die Aussage charakterisiert werden, daß er

Möglichkeit einer rationalen Mechanik, zunächst nach der Möglichkeit erster mathematischer Gesetze dieser Mechanik als Erklärungsgründen der Natur.[13] Die Geschichte der klassischen Mechanik hat gezeigt, daß es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten solcher Gesetze gibt: Newtons drei *axiomata sive leges motus*, aber auch die im 18. und 19. Jahrhundert formulierten analytischen Prinzipien der Mechanik wie das Prinzip der kleinsten Wirkung, das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, Gauß' Prinzip des kleinsten Zwanges, Hamiltons Prinzip oder Hertz' Prinzip der geradesten Bahn sind hier zu nennen.[14] Solche Prinzipien und ihr Statuswandel im Rahmen der Mathematischen Naturphilosophie stehen im Mittelpunkt dieser Untersuchung.

Damit wäre, soweit Fries' Begriffsschöpfung *Mathematische Naturphilosophie* den Bereich der folgenden Untersuchung benennt[15] und sein Werk selber zu einem Gegenstand innerhalb dieser Untersuchung werden wird, zugleich auch das Auftreten des zweiten im Untertitel enthaltenen Begriffs *Wissenschaftstheorie* erklärt, wenngleich noch nicht historisch aufgeklärt. Letzteres ist sinnvoll, um sich dem Gegenstand der Untersuchung aus einer anderen Richtung zu nähern und ihn unter anderer Perspektive zu betrachten:

Daß Wissenschaft, nach der ‚klassischen' Definition von Kant „eine jede Lehre, wenn sie ein System, d.i. ein nach Prinzipien geordnetes Ganze[s] der Erkenntnis sein soll"[16], noch einer von ihr selbst verschiedenen und über sie handelnden *Theorie* bedarf, ist eine relativ junge Ansicht. ‚Theorie' meint ja zunächst ‚philosophische Schau' oder ‚denkende Betrachtung'[17], d.h. sie richtet sich kontemplativ auf ein *gegebenes*

kinetische Betrachtungen in den Vordergrund stellt. Diese Charakterisierung wird erst völlig gegeben und der wahre Gegensatz zwischen klassischer und mittelalterlicher Naturwissenschaft erst vollkommen klargemacht, wenn man in die Umschreibung von Mechanik als Bewegungslehre noch das Kennzeichen der mathematischen Behandlung aufnimmt [...]" (Dijksterhuis 1956, S. 554f.); vgl. hierzu auch Kap. II, Teil 2.1.

[13] Vgl. Fries 1822, S. 400f.

[14] Bis auf die Prinzipien von Gauß, Hamilton und Hertz waren sie bereits Fries bekannt (s. Fries 1822, insbes. Teile II und III der ‚Reinen Bewegungslehre'). Es ist für diese Untersuchung nicht sinnvoll, die *mathematischen* und naturphilosophischen Differenzen zwischen den verschiedenen Formulierungen vorab herauszuarbeiten; soweit sie für diese Untersuchung wichtig werden, gehe ich an Ort und Stelle auf sie ein. Gute mathematische Gesamtdarstellungen zu den Prinzipien der Mechanik geben Koenigsberger 1901, Voss 1901 und Päsler 1968; für historische, aber (mit der Ausnahme von Ernst Machs ‚Klassiker') in der Regel kaum wissenschaftstheoriegeschichtlich interessierte Gesamtuntersuchungen verweise ich insbes. auf Klein 1872, Dühring 1877, Voss 1901, Mach 1933, Dugas 1955 und Szabó 1979; für die zahlreichen Detailstudien muß auf die Bibliographie am Ende verwiesen werden.

[15] Auf eine stärker inhaltliche Begründung, warum ich mich dieser Begriffsbildung bediene, komme ich in Kap. II, Teil 3.1 zurück.

[16] Kant 1786, AIV (*AA* 4, S. 467).

[17] Vgl. Met. VI.1,1025b und XII.7,1072b (Aristoteles *Schriften* V, S. 125 und 257f.).

Faktum und setzt dieses voraus: „Wissenschaftstheorie im allgemeinsten Sinne ist also Meta-Disziplin“[18]. Anknüpfend an seinen Lehrer Friedrich Adolf Trendelenburg, der ab 1861 von einer „Theorie der Wissenschaft“ spricht, die „die Wissenschaft in ihrem Wesen begreifen“ und zu diesem Zwecke „die Metaphysik und Logik gemeinsam umfassen“ müsse[19], führt Eugen Dühring die Begriffssynthese ein und nimmt sie 1878 in seiner *Logik und Wissenschaftstheorie* erstmals in den Titel einer Abhandlung auf[20], obwohl zu diesem Zeitpunkt die philosophische Reflexion auf den Komplex ‚Wissenschaft' bereits zu einem Alltagsgeschäft der Philosophie wie auch der Wissenschaften selber geworden war. Dühring wollte offenbar einer als geradezu zwangsläufig verstandenen Entwicklung ihren Namen geben: „Die Vollendung der Logik in einer umfassenden Wissenschaftstheorie ist nichts Willkürliches, was im Fortgange der Sache auch hätte ausbleiben können. Anfänge in diese Richtung sind bereits vorhanden. Wo man auch immer, sei es nun im Zusammenhang der Logik oder ausserhalb desselben, von der Eintheilung und Gliederung der Wissenschaften handelte, that man den ersten Schritt in das neue Gebiet“[21].

Geht jener erste Schritt bis auf die Anfänge von Wissenschaft und Philosophie selber zurück, wird er doch erst besonders *bezeichnet*, als man wissenschaftlichem Wissen eine besondere Organisationsform zuerkennt, die der ‚Betrachtung' eine eigene Untersuchungsart abfordert. Ab der Mitte des 18. Jahrhunderts finden sich im deutschsprachigen Raum Buch- und Vorlesungstitel wie „Wissenschaftskunde“, „Philosophie“ bzw. „Theorie der (schönen) Wissenschaften“ und später auch „Wissenschaftslehre“, „Wissenschaft des Wissens“ und „Wissenslehre“[22], die diese Entwicklung benennen und bereits die Ablösung einer ‚klassifikatorisch-kumulativen' Sicht auf Wissenschaft im Sinne des Enzyklopädie-Gedankens durch eine eher ‚integratorisch-komparative'

[18] König 1971, S. 32.

[19] Trendelenburg 1870 I, S. 11 (1. Aufl. 1840). S. hierzu und zu Dühring die Ausführungen bei Köhnke 1986, S. 38 und S. 443, Anm. 2.

[20] Wörtlich taucht diese Synthese bei ihm bereits 1875 auf, z.B.: „Die Logik und Wissenschaftstheorie in ausführlicher Darstellung zu geben, ist nicht die Sache eines Gesammtcursus der Philosophie“ (Dühring 1875, S. III; vgl. Dühring 1878). Näheres zur Begrifffsgeschichte bei Köhnke 1986, S. 35-48, sowie Pulte 2004b.

[21] Wobei, wie Dühring hinzufügt, „dieser Stoff [...] aber nicht im Entferntesten hinreichend“ sei (Dühring 1878, S. 7). Die vier von ihm „neu und selbständig eingeführten weiteren Lehren der Wissenschaftstheorie“ (ebd., S. 7) haben allerdings ebenso und ausnahmslos ihre Vorläufer und sind deshalb hier nicht von Interesse. Der eigentliche Grund, diese verschiedenen Lehren integriert innerhalb einer „Theorie der Wissenschaften selbst und nicht den ausserhalb belegenen [sic!] Rücksichten“ abzuhandeln, liegt für Dühring in der besonderen Form wissenschaftlichen Wissens: „Das Wissen existiert nur vermöge einer bestimmten Verfassung seiner Bestandtheile und durch einen besonders gearteten Geistesverkehr“ (ebd., S. 7).

[22] Für Belege s. Diemer 1968b, S. 11-13.

Sicht im Sinne moderner allgemeiner Wissenschaftstheorie andeuten.[23] Nur am Rande kann hier darauf hingewiesen werden, daß es neben der zunehmenden Ausdifferenzierung der Wissenschaften ein Wandel des Theorieverständnisses von ‚Theorie eines Objekt- bzw. Phänomenbereichs' in Richtung auf ‚Theorie einer Praxis' ist, wie er bei Kant am deutlichsten zum Ausdruck kommt, der eine *Metatheorie* der Wissenschaft erst möglich macht.[24] Es ist daher auch kaum überraschend, daß es ein Vertreter der Kantischen Philosophie ist, der wohl erstmals allgemein und systematisch von einer ‚Theorie der Wissenschaft' spricht: Karl Christian Erhard Schmid führt diese Wendung 1794 in seinem Aufsatz über *Erste Linien einer reinen Theorie der Wissenschaft* ein.[25]

[23] Zur Geschichte des Enzyklopädie-Gedankens s. Dierse 1977. Stichweh (1984, S. 9) weist darauf hin, daß die Tradition der Wissenschaftsklassifikation — nach Dühring ein Ausgangspunkt von Wissenschaftstheorie — in Deutschland von einer systematischen Wissenschaftskunde abgelöst wird, „die sich für das allen Wissenschaften *Gemeinsame* interessiert". Ebenso legt Köhnke (1986, S. 37) dar, daß der Begriff ‚Wissenschaftskunde' als ein Vorläufer der späteren ‚Wissenschaftstheorie' zu verstehen sei.

[24] Der Prozeß der Ausdifferenzierung der Wissenschaften findet sich am Beispiel der Physik mustergültig historisch analysiert bei Stichweh 1984. Den Hinweis auf die Bedeutung des Kantischen Theoriebegriffs für die Entstehung von Wissenschaftstheorie im modernen Sinne verdanke ich Gert König: Erst als Theorie nicht mehr auf spezifische Objekt- oder Phänomenbereiche, sondern auf eine bestimmte *Praxis* bezogen wurde und zur Begründung dieser Praxis diente, konnte sich eine Theorie der Wissenschaft etablieren: „Man nennt einen Inbegriff selbst von practischen Regeln alsdann *Theorie*, wenn diese Regeln als *Principien* in einer gewissen Allgemeinheit gedacht werden, und dabei von einer Menge Bedingungen abstrahirt wird, die doch auf ihre Ausübung nothwendig Einfluß haben. Umgekehrt heißt nicht jede Hantierung, sondern nur diejenige Bewirkung eines Zwecks *Praxis*, welche als Befolgung gewisser im Allgemeinen vorgestellten Principien des Verfahrens gedacht wird" (Kant 1793, Einleitung; *AA* VIII, S. 275).

J. Mittelstraß betont zu Recht, daß bereits die *theoria* des Aristoteles „nicht einfach als Gegensatz zu Praxis", sondern als „praxisstabilisierendes Wissen" mit Begründungscharakter aufzufassen sei: „Entsprechend stabilisiert im griechischen Sinne z.B. Physik das erfahrungsmäßige Wissen von der physischen Welt, Geometrie den Umgang mit Formen und Größen, Logik das argumentierende Reden" (Mittelstraß 1996, S. 259; s. hierzu auch Rausch 1982, S. 159-165). Faßte man hier Praxis als *wissenschaftliche* Praxis (Wissenschaft) auf, würde es guten Sinn machen, auch den antiken Theoriebegriff als potentiell *metatheoretisches* Konstrukt zu interpretieren. Dem ist aber entgegenzuhalten, daß Aristoteles' Unterscheidung von praktischem, poietischem und theoretischem Wissen klar auf eine Nebenordnung abzielt, nicht auf eine Unterordnung des ersten und zweiten unter das dritte. Dies ist zumindest der Standpunkt Aristoteles' in der *Metaphysik*: „Wenn also jedes Denkverfahren entweder auf Handeln oder auf Hervorbringen oder auf Betrachtung geht, so muß hiernach die Physik eine betrachtende (theoretische) sein [...]" (Met. VI.1,1025b; Aristoteles *Schriften* V, S. 125). Eine Physik *als* Theorie ist bei Aristoteles möglich, eine Theorie *der* Physik hingegen nicht.

[25] Schmid 1794; s. hierzu näher Diemer 1968b, S. 10 und König 1971, S. 34f. ‚Theorie der Wissenschaft' wird hier synonym mit ‚Wissenschaftstheorie' gebraucht, wie es ja auch bei Dühring der Fall ist. Ergänzend zu Schmids Begriffsbildung ‚Theorie der Wissenschaft' ist zu be-

Unter Wissenschaft versteht er „die vollkommenste Form der Erkenntniß. Diese ist das Produkt von dem vollkommensten Gebrauche des ganzen Erkenntnisvermögens überhaupt, und in so ferne man die Form der Erkenntniß in Betracht zieht, des Denkvermögens“[26].

Wie sich in diesen Sätzen bereits andeutet, ist hier die metatheoretische Perspektive verschieden von derjenigen der *Mathematischen Naturphilosophie* bzw. der *Metaphysischen Anfangsgründe*. Typisierend kann man sagen, daß es Schmid primär nicht um den Nachweis der Möglichkeit, sondern um die Analyse der Wirklichkeit von Wissenschaft geht: Wissenschaft selber wird als Resultat vorausgesetzt, liegt als System schon vor[27], und die Theorie der Wissenschaft hat dieses System zum Gegenstand.

Schmid definiert nun diese neue Metatheorie zunächst ganz allgemein als die „Wissenschaft von den Regeln der Wissenschaft“[28]. Sein näheres Interesse richtet sich sodann auf deren reinen, apriorischen Teil, der es nicht mit den zufälligen, sondern nur mit den notwendigen Regeln oder *Gesetzen* der Wissenschaft zu tun habe: „Die Wissenschaft der Gesetze der Wissenschaft nennen wir *reine Theorie der Wissenschaft* [...]. Ihr Objekt ist also blos die formale und zwar logische Vollkommenheit der Erkenntniß d.i. die *wissenschaftliche Form*“.[29] Die wichtigsten Merkmale wissenschaftlicher Erkenntnis sind nach Schmid „Vollständigkeit oder Allgemeinheit“, „reine Wahrheit“, „Unveränderlichkeit“, „Gründlichkeit“, „systematische Einheit“ sowie „Nothwendigkeit“. Die von ihm proklamierte Theorie der Wissenschaft hat es wesentlich mit der Sicherstellung dieser Eigenschaften zu tun. Für den Augenblick reicht es aus, besonders auf zwei der genannten „Merkmahle der Wissenschaft“ hinzuweisen, nämlich die „*Gründlichkeit*: in der Wissenschaft muß jede abgeleitete Erkenntniß aus den höchsten Erkenntnisgründen hergeleitet seyn“ und die „*Nothwendigkeit*: Alle wissenschaftliche Erkenntniß ist apodiktisch gewiß“[30]. Um solcher wissenschaftlichen Erkenntnis möglichst nahe zu kommen, schreibt die Theorie der Wissenschaft der Wissenschaft selber bestimmte „Bedingungen der Ausführung“ vor[31]. Schmid fordert hier unter anderem

merken, daß Johann Heinrich Lambert bereits 1782 von einer „Theorie des Systems“ spricht, wobei er unter seinen allgemeinen Systembegriff auch die Wissenschaften subsumiert: „Jede Wissenschaft und jeder Theil derselben, kann als ein System angesehen werden, in so ferne ein System der Inbegriff von Ideen und Sätzen ist, die zusammengenommen als ein Ganzes betrachtet werden können“ (Lambert 1782/1787 I, S. 510; vgl. II, S. 395f.). Zu Lamberts „Systematologie“ allgemein s. von der Stein 1968, S. 10-13.

[26] Schmid 1794, S. 349.

[27] „Die Einheit der Erkenntnisse h[eißt] *logisches System*. Die Wissenschaft ist ihrer wesentlichen Form nach ein System“ (ebd., S. 353).

[28] Ebd., S. 349.

[29] Ebd., S. 349f.

[30] Ebd., S. 359 und 360.

[31] Ebd. S. 361f. Ganz analog ist übrigens in einer neueren Untersuchung des Wissenschaftsbegriffs von einer „Gesamtheit von Anwendungsbedingungen“ die Rede — einem „Forderungs-

„durchaus wahre, bestimmte, alles erschöpfende und ursprünglich gewisse Grundsätze, *d.i. Axiome*" und „durchaus logisch-wahre, direkte, einfache und apodiktische Beweise für alle erweisliche Lehrsätze *d.i. Demonstrationen*"[32]. Ich werde ein solches Wissenschaftsverständnis als *axiomatisch-deduktiv* oder (mit Lakatos) als *euklidianistisch* bezeichnen, denn es orientiert sich ganz offenkundig an der Mathematik, genauer gesagt am Vorbild der Euklidischen Geometrie.[33] Aber Schmid formuliert es ausdrücklich für *jedes* Gesamt von Erkenntnis, das den Titel ‚Wissenschaft' für sich in Anspruch nimmt.

Ein ‚klassisches' Wissenschaftsverständnis, wie es bei Schmid zum Ausdruck kommt, hat die Entwicklung der Mathematischen Naturphilosophie lange Zeit dominiert. Daher ist das folgende Kapitel der näheren Kennzeichnung dieses Wissenschaftstypus und seiner Implikationen für die Entwicklung der Mathematischen Naturphilosophie gewidmet. Zuvor bleibt als Ergebnis dieser begriffsgeschichtlichen Einstimmung festzuhalten:

Der Theorie der Wissenschaft (Wissenschaftstheorie) geht es bereits in ihrer frühesten programmatischen Formulierung um ‚erste' und allgemeinste Gesetze. Anders als die *Mathematische Naturphilosophie* interessiert sie sich für diese Gesetze jedoch primär nicht, insofern es sich bei ihnen um ‚Erklärungsgründe' der *Natur* bzw. ‚Naturgesetze' handelt (Fries), sondern insofern sie ‚Axiome' eines wissenschaftlichen Systems darstellen (Schmid), d.h. es geht ihr um deren wahrheits- und gewißheitsvermittelnde Funktion an der Spitze eines deduktiv geordneten Systems von Sätzen. In der Zusammenschau werden hier zwei verschiedene Perspektiven auf die gleiche Sache[34] sichtbar: allgemeinste Gesetze der Natur bzw. ‚oberste' Sätze eines wissenschaftlichen Systems. *Mathematische Naturphilosophie* und *Wissenschaftstheorie* bezeichnen somit, historisch betrachtet, zwei verschiedene Seiten einer Medaille: Mathematische Gesetzlichkeit der Natur *und* axiomatische Ordnung von Wissenschaft, darum geht es in dieser Untersuchung.

programm, dessen Erfüllung es erst sinnvoll macht, von Wissenschaft zu sprechen" (Wohlgenannt 1969, S. 197). Die Differenz zwischen ‚klassischer' und ‚moderner' Wissenschaft ließe sich im wesentlichen anhand der Unterschiede dieser im Zeitabstand von 175 Jahren formulierten Anwendungsbedingungen darstellen.

[32] Schmid 1794, S. 361.

[33] S. hierzu näher Kap. II, Teil 2.4.

[34] Genauer gesagt: von etwas, das im ‚klassischen' Verständnis zusammenfällt. Für eine ‚moderne' Unterscheidung von „Laws of Nature - Laws of Science" s. Weinert 1995b.

II Klassischer und moderner Wissenschaftsbegriff: Metatheoretische und metahistorische Vorüberlegungen

II.1 Der klassische Wissenschaftsbegriff

„Keine Epoche ist in sich homogen. Was immer man als das vorwiegende Merkmal einer längeren Periode bestimmen mag, es wird stets möglich sein, Menschen, und auch große Menschen zu finden, die dieser Periode angehören, aber dem Grundton der Zeit widerstreben"[35]. Auf den ersten Blick scheint Whitehead hier ein unlösbares historiographisches Dilemma zu konstatieren: einerseits benötigt jede historische Untersuchung, die über bloße Chronologie hinausgehen will, Kriterien der Periodisierung bzw. Epochengliederung; andererseits wird man keine Epoche angeben können, die die unter ihre Zeit fallenden Begebenheiten vollständig und ausnahmslos erfaßt. Historische Gesamtheiten sind eben nicht nach ‚Kopf oder Zahl' zu beurteilen.

So verhält es sich auch mit der Unterscheidung von klassischer und moderner Wissenschaft. Man sollte von solchen Konstrukten also *weniger* als eine kategorische Einteilung historischer Entwicklungen verlangen, und Whitehead zeigt — auf den zweiten Blick — auch, was dies sein kann: Sie sollten den ‚Grundton ihrer Zeit' treffen, sind also nicht kategorisierend, sondern typisierend zu verstehen — regulative Ideen der Geschichtsschreibung, aber mit weitreichenden Folgen für Inhalt und Struktur der zu erzählenden Geschichte selber.[36] Es ist müßig, die Vielzahl der Epocheneinteilungen in Philosophie- und Wissenschaftsgeschichtsschreibung von Comte bis zur Gegenwart auf ihre Kriterien hin zu befragen, denn diese sind nie allein durch das ‚historische Material' gegeben, sondern immer auch Spiegel eines systematischen Interesses. Gerade darum ist es wichtig, auf einige leitende Gesichtspunkte der hier vorgenommenen Unterscheidung vorab hinzuweisen: Erstens geht es *nicht* darum, *Abgrenzungskriterien* zu formulieren, die Wissenschaft und ihre Theorie von einer außerhalb liegenden ‚Nichtwissenschaft' trennen, sondern darum, innerhalb akzeptierter Wissenschaft *Unterscheidungskriterien* aufzuzeigen, die klassische und moderne Wissenschaft in systematisch

[35] Whitehead 1949, S. 85.

[36] Epocheneinteilungen definieren z.B., was als Normalfall gilt bzw. als Ausnahme erklärt werden muß. Hier geht es mir jedoch zunächst nur um die wissenschaftstheoretische Kennzeichnung klassischer und moderner Wissenschaft. Daß diese auch Teil einer historischen Theorie ist und wichtige historiographische Vorentscheidungen beinhaltet, diskutiere ich später (Teil 3.2).

signifikanter und historisch fruchtbarer Weise charakterisieren. Zweitens sollten solche Kriterien nicht isoliert in Hinblick auf die hier zur Diskussion stehende Disziplin, d.i. die rationale Mechanik, formuliert werden, sondern allgemeinerer Art sein, um wissenschaftstheoretischen Wandel einer Disziplin in einen größeren Kontext wissenschaftlichen und wissenschaftstheoretischen Wandels stellen zu können. Sie sollten dabei aber zugleich drittens für die Mechanik so konkretisiert werden können, daß deren spezifischer Charakter innerhalb des größeren Kontextes der empirischen Wissenschaften zur Geltung gebracht wird, und hier kommen gerade spezifische Funktionen der *Mathematik* ins Spiel. Es erweist sich daher als zweckmäßig, allgemeine Kennzeichnung und Konkretisierung in getrennten Schritten anzugehen: Der allgemeinen Kennzeichnung klassischer Wissenschaft sind die Ausführungen dieses Teils gewidmet, der Konkretisierung der folgende Teil. Die Auflösung klassischer Wissenschaft scheint mir ein historisch zu komplexes Phänomen zu sein, um es ‚global' zu behandeln. Ich schränke dieses Problem von vornherein auf den Bereich der Mathematischen Naturphilosophie ein und diskutiere es an Ort und Stelle.[37]

Herbert Schnädelbach beschreibt in seiner Geschichte der *Philosophie in Deutschland 1831-1933* die Modernisierung der Wissenschaft als einen „Ablösungsprozeß von der Philosophie des deutschen Idealismus und gegen deren Monopolanspruch auf Wissenschaftlichkeit"[38]. Diese These wird, ergänzt um die These von der Etablierung eines *positiven* Autonomieanspruchs gerade der *mathematischen* Wissenschaften, auch in dieser Untersuchung eine gewisse Rolle spielen.[39] Den hier als *klassisch* bezeichneten Wissenschaftstypus sieht Schnädelbach durch die „Bestimmungen ‚Allgemeinheit', ‚Notwendigkeit' und ‚Wahrheit'" definiert; dieser „fällt der Dynamisierung der Wissenschaft zum Opfer und wird durch ein *neues* Leitmodell ersetzt"[40]. Die Trias *Wahrheit, Allgemeinheit und Notwendigkeit* des Wissens kann, unbeschadet ihrer Bestimmung im einzelnen, in der Tat als eine nicht zu unterbietende *Minimalcharakterisierung* klassischer Wissenschaftsauffassung angesehen werden, die von Aristoteles[41] über Kant[42] bis in die Philosophie und Wissenschaften des 19. Jahrhunderts[43] hinein vor-

[37] S. hierzu Teil 2.4.

[38] Schnädelbach 1991, S. 88; vgl. auch Hans Michael Baumgartners (zeitlich weniger spezifizierte) Rede vom „Auswanderungsprozeß der Wissenschaft aus der Philosophie" (Baumgartner 1974, S. 1741).

[39] S. hierzu insbes. Kap. VI.

[40] Schnädelbach 1991, S. 107.

[41] „Das Objekt der Wissenschaft und diese selbst ist verschieden von dem Objekt der Meinung und dieser selbst, sofern die Wissenschft allgemein und notwendig ist und auf Notwendigem beruht. Notwendig aber ist, was sich nicht anders verhalten kann" (*Zweite Analytik* I 33, 88b30ff.; Aristoteles *Schriften* I, S. 65); vgl. hierzu auch Teil 1.2.

[42] Vgl. insbes. die Vorrede der *Metaphysischen Anfangsgründe*: „Eigentliche Wissenschaft kann nur diejenige genannt werden, deren Gewißheit apodiktisch ist; Erkenntnis, die bloß empirische Gewißheit enthalten kann, ist ein nur uneigentlich so genanntes Wissen. Dasjenige Ganze

herrschte. Statt diese Minimalcharakterisierung durch weitere, wohlfeile Beispiele historisch zu untermauern[44], sollen nunmehr systematische Gesichtspunkte des klassischen Wissenschaftsbegriffes herausgestellt werden, die für diese Untersuchung leitend sind. Vor allem die Untersuchungen zum Wandel des Wissenschaftsbegriffs, die von und im Anschluß an Diemer durchgeführt wurden[45], Poppers Kritik des Essentialismus[46] und die von Popper inspirierten Reflexionen zum Begründungsproblem bei Lakatos und Albert[47] liefern hierfür wichtige Hinweise, aber auch Kritiken des ‚aprioristischen Programms' in der neueren Philosophie der Mathematik[48].

der Erkenntnis, was systematisch ist, kann schon darum Wissenschaft heißen, und, wenn die Verknüpfung der Erkenntnis in diesem System ein Zusammenhang von Gründen und Folgen ist, so gar rationale Wissenschaft. Wenn aber diese Gründe oder Prinzipien in ihr [...] doch zuletzt bloß empirisch sind, und die Gesetze, aus denen die gegebene [sic!] durch Vernunft erklärt werden, bloß Erfahrungsgesetze sind, so führen sie kein Bewußtsein ihrer Notwendigkeit bei sich (sind nicht apodiktisch-gewiß) und alsdenn verdient das Ganze in strengem Sinne nicht den Namen einer Wissenschaft [...]" (Kant 1786, AIV; *AA* IV, S. 267). Näheres hierzu in Kap. III, Teil 4 und in den Kap. IV und V.

[43] So z.B. bei Hegel, wenn er in seiner frühen *Differenzschrift* (1801) bemerkt: „Es kann [...] nicht von einzelnen Begriffen für sich, einzelnen Erkenntnissen als einem Wissen die Rede sein. Es kann eine Menge einzelner empirischer Kenntnisse geben; als Wissen der Erfahrung zeigen sie ihre Rechtfertigung in der Erfahrung auf, d.h. in der Identität des Begriffs und des Seins, des Subjekts und Objekts. Sie sind eben darum kein wissenschaftliches Wissen, weil sie nur diese Rechtfertigung in einer beschränkten, relativen Identität haben und sich weder als notwendige Teile eines im Bewußtsein organisierten Ganzen der Erkenntnisse legitimieren, noch die absolute Identität, die Beziehung auf das Absolute in ihnen, durch die Spekulation erkannt worden ist" (*Theorie-Werkausgabe* II, S. 30).

[44] Außer auf Aristoteles, Kant und Hegel verweise ich hier nur noch auf K.C.E. Schmids Wissenschaftsbegriff (s. Einleitung). Für weitere Belege s. Diemer 1964, 1968b und Wohlgenannt 1969.

[45] Vgl. insbes. Diemer 1964, 1968b und 1970b sowie Diemer/König 1991. Auch Herbert Schnädelbach bezieht sich in seiner Kennzeichnung verschiedentlich auf deren Ergebnisse (vgl. Schnädelbach 1991, S. 104 Anm. 262, 108 Anm. 284, 111 Anm. 295 und 113 Anm. 302).

[46] Vgl. insbes. Popper 1994/97 I, S. 150-156 und Popper 1993, S. 200-206.

[47] S. Lakatos 1982 und Albert 1991.

[48] S. insbes. Lakatos 1982 I, S. 23-41 und Kitcher 1984, S. 36-48. Hierauf komme ich in Teil 2.4 zurück.

II.1.1 Kriterien klassischer Wissenschaft

Alwin Diemer war wohl der erste, der eine differenzierte Unterscheidung von klassischer und moderner Wissenschaft auf der Grundlage ausgedehnter wissenschaftstheorie- und begriffsgeschichtlicher Analysen unternommen hat. Seine Unterscheidung will er als „eine Art Arbeitshypothese“[49] verstanden wissen, und auch hier soll sie als überprüfungsbedürftiger und modifikationsfähiger Vorschlag an den Anfang gestellt werden. Ich werde zunächst Diemers Kennzeichnung klassischer Wissenschaft darstellen und interpretieren. Anschließend werde ich die Notwendigkeit von Änderungen diskutieren, zunächst allgemein, später in Hinblick auf die Mathematische Naturphilosophie.

Klassische Wissenschaft enthält nach Diemer fünf konstitutive Elemente.[50] Als komplexeste und weitreichendste erweist sich dabei

(1) die Absolutheitsthese: Ihr zufolge gibt es, als unhinterfragte und voraussetzungslose Voraussetzung jeder klassischen Wissenschaft, etwas „Ewiges“, „Unveränderliches“ und „Notwendiges“, das wissenschaftlicher Erkenntnis zugänglich ist, von dem wissenschaftliche Erkenntnis ausgeht und das wissenschaftliche Erkenntnis wahr, gewiß und evident macht. Im Prozeß der Säkularisierung verliert dieses Absolute sowohl objektiv (im Sinne göttlicher Schöpfung) seine Sicherung in Gott als auch subjektiv (im Sinne menschlicher *Teilhabe* an einer göttlichen Offenbarung) seine Vermittlung durch Gott. Wissenschaftliche Erkenntnis wird zum *Problem* des vernünftigen autonomen Subjekts, d.h. es wird erforderlich, *Kriterien* auszuweisen, die sicherstellen, daß wirkliches, unbezweifelbares Wissen (im Sinne aristotelischer *episteme* und im Unterschied zur bloß vermutungshaften *doxa*) erreicht ist.[51] Damit ist nicht gemeint, daß subjektive Erkenntnisgewißheit zu einem fragwürdigen Ideal wird, sondern im Gegenteil, daß dieses Ideal — die Möglichkeit der fortgesetzten Teilhabe an einem Absoluten — durch Benennung (scheinbar) fragloser Indikatoren dem Schattenreich des ‚vernünftig Bezweifelbaren' entzogen wird. Cartesische ‚Klarheit und Deutlichkeit', aber auch andere neuzeitliche Kennzeichnungen *evidenten Wissens* können hier namhaft gemacht werden.

(2) Wahrheitsvoraussetzung: Der Absolutheitsthese ist die wichtige Feststellung implizit, daß im klassischen Wissenschaftsverständnis die Wahrheit wesentlich *materialer* (und nicht bloß formaler) Art ist. Wenn Wissenschaft nämlich Aussagen *über* etwas Ewiges, Unveränderliches etc. macht, hat sie *Gehalt*, und dieser entscheidet über die Wahrheit der Aussagen. Mathematische Aussagen bei Platon, Descartes' Vernunftwahrheiten, Galileis Fallgesetz und Freges Gesetze der Logik werden (von diesen selbst) als gehaltvoll-wahre Sätze verstanden. Das Problem der *Wahrheitsbegründung*

[49] Diemer 1968b, S. 3.

[50] Den zunächst von ihm angeführten vier ‚positiven' Kriterien (ebd. S. 24) wird später ein fünftes, ‚negatives' bzw. ausschließendes Kriterium angefügt (ebd., S. 31f.).

[51] Vgl. ebd., S. 24-27.

tritt erst auf, wenn eine (vermeintlich) privilegierte Wahrheitsquelle (z.B. die göttliche Offenbarung) versiegt oder wenn der Gehalt der fraglichen Aussage nicht erkennbar von einer solchen Quelle gespeist wird. Im ersten Fall liegt eine Wahrheits- und Rationalitätskrise größten Ausmaßes vor: Die sog. ‚Wissenschaftliche Revolution' des 16. bis 18. Jahrhunderts kann als Versuch verstanden werden, verlorengegangene Offenbarungswahrheit durch Erfahrungs- und Vernunftwahrheit zu ersetzen. Im zweiten Fall tritt der — im klassischen Wissenschaftsverständnis immer *auch* schon präsente — „formal-funktionale Begriff"[52] von Wahrheit in Aktion: Auf logisch-deduktivem Wege wird Wahrheit aus ‚obersten', evidenten Wahrheiten ab- und zu der fraglichen Aussage hingeleitet. Zwischen materialer Wahrheit und formaler Wahrheitsvermittlung ist dabei im Prozeß der Wissenschaftsentwicklung eine Bedeutungsverschiebung zu konstatieren. In dem Maße nämlich, wie sich Wissenschaft als „Gesamt von Wahrheiten" etabliert und ihre Ableitungstechniken verfeinert, wird nicht mehr nur den als evident angesehenen, materialen ‚Ausgangswahrheiten', sondern *auch* den formalen Ableitungen selber sowie den mit ihrer Hilfe abgeleiteten Resultaten Sicherheit zugeschrieben: „Die Certitudo tritt mehr und mehr an die Stelle der Evidenz. Die subjektive Gewißheit wird in der objektiven Notwendigkeit der Ableitung begründet; das Notwendige aber wird [...] negativ bestimmt als dasjenige, das nicht anders sein kann. Diese Forderung aber ist die Idee des neuzeitlichen Satzes de[s] Widerspruches [...]".[53]

Die *Deduktivität*, so könnte man sagen, entwickelt sich zu einem konstitutiven Merkmal klassischer Wissenschaft. Sie wird es aber nicht als ein bloß formales Merkmal, wie es in modernen Axiomatisierungen im Anschluß an Hilbert der Fall ist, sondern als *Vermittlungsinstanz materialer Wahrheit*. Dieser Gedanke manifestiert sich besonders deutlich im *Systembegriff*, der seit dem 18. Jahrhundert zum Bestandteil der meisten Wissenschaftsdefinitionen wird.[54] Dieser Begriff, seinerseits alles andere als eindeutig[55], wird in der klassischen Wissenschaft ganz überwiegend in seiner Kanti-

[52] Ebd., S. 27.

[53] Ebd., S. 28. Der Satz des Widerspruchs als „Grundsatz der neuzeitlichen Philosophie und Wissenschaft" (ebd., S. 28) bleibt allerdings in der klassischen Wissenschaft unfruchtbar, wie Hans Albert (1991, S. 53, Anm. 23) zu Recht betont: „Methodisch interessant wird die Forderung nach Widerspruchsfreiheit erst dann, wenn man die aktive Suche nach relevanten, aber mit bisherigen Erkenntnissen unvereinbaren Ideen und Beobachtungen in sie aufnimmt". Daß eine solche methodisch-heuristische Interpretation der Widerspruchsfreiheit in der klassischen Wissenschaftskonzeption geradezu ausgeschlossen ist, wird die weitere Diskussion dieser Konzeption deutlich machen.

[54] „Hinsichtlich der Betonung des systematischen Charakters der Wissenschaft stellen wir ein Maß von Übereinstimmung zwischen Einzelwissenschaftlern und Philosophen fest, das bezüglich anderer Kriterien nicht erreicht wird" (Wohlgenannt 1969, S. 139).

[55] Vgl. hierzu Diemer 1964, S. 73f., sowie die Beiträge in Diemer 1968d.

schen, d.h. „logisch-deduktiven" Bedeutung[56] gebraucht: Die Ableitung aus „absolut gültigen Grundsätzen, den Axiomen (im klassischen Sinne)"[57], garantiert die Wahrheit, Sicherheit und Notwendigkeit aller Aussagen der Wissenschaft — natürlich mit Ausnahme dieser Grundsätze selber. Der logische Ableitungszusammenhang aus ersten Grundsätzen sichert zudem die *Einheit* des Gesamts wissenschaftlicher Erkenntnis. Einheit meint dabei auch *Einzigartigkeit*: Die ‚absolute' Gültigkeit der Grundsätze impliziert *deren* Notwendigkeit, so daß andere Grundsätze und damit andere Systeme zu einem bestimmten Gegenstandsbereich *nicht* möglich sind. Der Systembegriff der klassischen Wissenschaft ist monistisch und folglich auch die klassische Wissenschaft selber.[58] Dieser wissenschaftstheoretische *Monismus* ist eine der weitreichendsten Konsequenzen der ‚materialen' Wahrheitsvoraussetzung und wird im Kontext der Mathematischen Naturphilosophie eine wichtige Rolle spielen.

(3) Allgemeinheitspostulat: Dieses Postulat bringt die seit der Antike verbindliche Überzeugung zum Ausdruck, daß es Wissenschaft nicht vom Einzelnen, sondern nur vom Allgemeinen geben kann, womit in der klassischen Wissenschaft stets „ein ‚Wesensallgemeines' gemeint ist"[59]. Das Einzelne kann nur soweit Gegenstand von Wissenschaft sein, als es unter ein solches Allgemeines fällt und dieses Allgemeine illustriert. Es hat keinerlei weiterreichende Funktion. Insofern Allgemeingültigkeit sich sowohl auf die räumliche als auch auf die *zeitliche* Ausdehnung des Gegenstandsbereichs klassischer Wissenschaft bezieht, sind auch *Voraussagen* — anders als im modernen Verständnis — bloße Feststellungen, d.h. sie können eine Allaussage nicht

[56] Vgl. die ‚klassische' Definition Kants oben (Anm. 42). Diemer (1968b, S. 28) kennzeichnet die klassische Wissenschaft als ein „kategorisch-deduktives System", wobei das Attribut „kategorisch" gerade den Unterschied zum „hypothetisch-deduktiven" Charakter moderner Wissenschaft markiert. Ich werde stattdessen vom „axiomatisch-deduktiven" Charakter klassischer Mathematischer Naturphilosophie sprechen, um die Gemeinsamkeiten der Prinzipien nach klassischer Wissenschaftsauffassung mit dem traditionellen Axiombegriff der Mathematik zu unterstreichen; vgl. hierzu insbes. die Teile 2.2 und 2.4.

[57] Diemer 1968b, S. 73.

[58] Zu einem Gegenstandsbereich kann es also nur *genau eine* Wissenschaft geben. Dies spiegelt sich z.B. bei Kant darin wider, daß er von den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* (und nicht: ... *der Naturwissenschaften*) spricht. Es ist charakteristisch für den Wandel der Wissenschaftsauffassung, daß in der neueren Auseinandersetzung mit Kant immer wieder und beinahe ‚zwanghaft' der Plural ins Spiel kommt. Dieser ‚Pluralisierungsfehler' ist vielfach, z.B. auch in Texteditionen der *Metaphysischen Anfangsgründe*, nachzuweisen — nicht einmal Diemer (1968b, S. 14) bleibt von ihm verschont.

[59] Diemer 1968b, S. 28. Unter ‚Wesensallgemeinem' versteht er, offenkundig in Anspielung auf Descartes und unter Ausschließung von Bacon (vgl. Teil 1.3), ein solches Allgemeines, „das durch Vernunfteinsicht und begriffliche Fassung ‚klar und deutlich' konzipiert ist und insofern ‚universal' gilt", während das Allgemeine im modernen Wissenschaftsverständnis stets ‚intentional' bleibe, weil es nicht erreichbar sei (ebd., S. 29; vgl. auch Diemer 1964, S. 22f.). Vgl. hierzu auch Teil 1.3.

verifizieren oder auch nur bewähren, weil diese bereits wahr ist: „Denn gilt das Allgemeinurteil allgemein, dann gilt es, weil es eben wahr ist, auch in allen zukünftigen Fällen; die kategorische Aussage: ‚Alle A sind B' impliziert die kategorische Feststellung über jeden möglichen Einzelfall".[60]

Für Diemers Bestimmung des klassischen Wissenschaftsbegriffs ist das Allgemeinheitspostulat von solcher Bedeutung, daß er es gleichsam als implizites *Ausschliessungspostulat* in die Definition dieses Begriffs aufnimmt. Seine apodiktische Feststellung lautet nämlich, daß in der klassischen Wissenschaft „individuelle und empirische Sätze [...] nicht von wissenschaftlichem Belang" sind[61] — überall dort, wo dies der Fall ist, dürfte also im Umkehrschluß nicht mehr von klassischer Wissenschaft gesprochen werden. Auf diesen Punkt komme ich im nächsten Teil zurück.

(4) Logischer Ableitungs-Evidenz-Charakter: Diemer mißt diesem Kriterium nur partielle Gültigkeit bei. Es gilt nämlich „genau genommen [...] nur für die frühe Wissenschaft, später tritt mehr und mehr die Idee der logischen Struktur, schließlich der logischen Ordnung als System an seine Stelle"[62]. Was da später durch den (bereits ausgeführten) Systemcharakter klassischer Wissenschaft abgelöst wird, ist die „geistige und logische Evidenz" von Wissenschaft. Näher ist darunter folgendes zu verstehen: Wissenschaft *per se* wurde traditionell nie Evidenz zugebilligt, sondern diese Evidenz mußte immer durch ein ‚höheres', der Wissenschaft selber nicht zugängliches Prinzip (den *nous* bei Aristoteles, der *intuitio* bei Descartes etc.) vermittelt sein, aus ihm *abgeleitet* werden können: *„Die wissenschaftliche Gewißheit und insofern die Wissenschaftlichkeit liegt also nicht so sehr in der ursprünglichen Schau als der gesicherten, d.h. systematischen Ableitung"*.[63] Die damit angesprochene ‚ursprüngliche' Evidenzableitung, wie man sie nennen könnte, verliert mit zunehmender Entfaltung und Organisation von Wissenschaft, aber auch mit ihrer Säkularisierung, an Bedeutung, verlagert sich auf die Überzeugung von der Wahrheit eines ‚autonomen' Wissenschaftsgesamts und ist schließlich nur noch in Gestalt der (oben ausgeführten) Systemforderung erkennbar — gleichsam eine ‚Abwärtsbewegung des Schwerpunktes', wie Diemer diesen Vorgang anschaulich beschreibt.

[60] Diemer 1968b, S. 29.

[61] „Zur primären Orientierung läßt sich der klassische Wissenschaftsbegriff wie folgt umschreiben:

Wissenschaft ist ein System, d.h. ein nach Prinzipien der (klassischen) Logik geordnetes Ganzes allgemeiner, d.h. begründeter und wahrer Sätze über einen thematischen Bereich. Individuelle und empirische Sätze sind nicht von wissenschaftlichem Belang" (Diemer 1964, S. 22).

[62] Diemer 1968b, S. 29. Da die vorliegende Untersuchung sich auf einen Bereich ‚späterer' (nämlich neuzeitlicher) Wissenschaft bezieht und der Systemcharakter von Wissenschaft bereits in *(2)* angesprochen wurde, führe ich dieses Kriterium nur knapp und der Vollständigkeit halber an.

[63] Ebd., S. 29.

(5) Methoden- und Darstellungsirrelevanz: Hierunter fasse *ich* die wichtigsten (negativen) Ergebnisse von Diemers Versuch zusammen, weitere Kriterien klassischer Wissenschaft zu explizieren. Methoden im weitesten Sinne finden (trivialerweise) überall Eingang in klassische Wissenschaft, werden aber nirgendwo konstitutiv — sie sind nach Diemer *„wohl Elemente, aber nicht Fundamente einer Wissenschaft"*[64]. Sowenig er eine begründungsrelevante Methodenreflexion in der klassischen Wissenschaft ausmacht, sowenig findet er in ihr das Problem der *Darstellung* wissenschaftlicher Erkenntnis bedeutsam — ganz im Unterschied zur modernen Wissenschaft.[65] Auch auf diese Negativbestimmungen wird später zurückzukommen sein.

Sieht Diemer den klassischen Wissenschaftsbegriff im wesentlichen durch diese fünf Kriterien bestimmt, so beschreiben er und Gert König dessen Auflösung bzw. Ersetzung durch einen modernen Wissenschaftsbegriff mit Hilfe einer Reihe von „Kriterien-Tendenzen, [die] sich durch die Stichwörter: Reflexionscharakter, Positivierung, Entmetaphysierung, Autonomisierung, Operationalisierung, Problematisierung, Konditionalisierung, Hypothesierung, Propositionalisierung, Intersubjektivierung und abstrahierende Theoretisierung" skizzieren lassen[66]. Im Ergebnis wird hierdurch der Begriff von Wissenschaft „als ein kategorisch-deduktives System absoluter Wahrheiten bzw. Erkenntnisse" aufgelöst bzw. durch den von Wissenschaft als „ein hypothetisch-deduktives System problematisch-konditionaler Sätze" ersetzt.[67]

II.1.2 Die AFE-Interpretation Aristotelischer Wissenschaft

Diemer untermauert sowohl den aufgeführten Kriterienkatalog klassischer Wissenschaft als auch den ‚Kriterientendenzen'-Katalog ihrer Auflösung mit umfangreichem Belegmaterial. Die Belege zum klassischen Wissenschaftsbegriff reichen von Aristoteles bis Kant, womit klargestellt wird, daß die aristotelische Wissenschaftstheorie die erste klare Artikulation einer *klassisch* zu nennenden Wissenschaftskonzeption, diejenige Kants deren „Höhepunkt" und zugleich „Umschlagspunkt" darstellt[68]. Aristoteles'

[64] Ebd., S. 31.

[65] Vgl. ebd., S. 31 und 42. Diemer schränkt diese These durch den Hinweis ein, daß entsprechende Untersuchungen noch nicht vorliegen. Auf die Darstellungsfunktion der *Mathematik*, der er für die Unterscheidung von klassischer und moderner Wissenschaft große Bedeutung beimißt, gehe ich in Kap. I, Teil 2.1 ein.

[66] Diemer/König 1991, S. 4f. und Diemer 1968b, S. 36, wo die letztgenannte Tendenz, d.h. die „abstrahierende Theoretisierung", noch nicht mit aufgeführt wird.

[67] Diemer/König 1991, S. 4; vgl. zu diesem Auflösungsprozeß auch Pulte 2004a.

[68] Diemer 1968b, S. 4; vgl. auch Diemer/König 1991, S. 4. Damit soll natürlich weder suggeriert werden, klassische Wissenschaft werde erst durch Aristoteles ‚geschaffen' — man denke hier nur an die voraristotelische Mathematik der Griechen —, noch, sie werde nach Kant belanglos. Da es hier nicht um eine historisch adäquate Rekonstruktion des Wissenschaftsverständnis

Wissenschaftsverständnis, wie es sich vor allem in der *Zweiten Analytik* manifestiert, erscheint mir besonders geeignet, den aufgeführten Kriterienkatalog zu überprüfen und zu spezifizieren, wobei in Hinblick auf die weitere Untersuchung besonders die Funktion der *Prinzipien* herausgestellt werden soll. Neben den Gesetzen der Logik sind sie es ja, die klassische aristotelische Wissenschaft ausmachen, insofern es sich bei ihr um eine *Einheit begründeten Wissens* handelt.

Wolfgang Detel liefert in einer neueren Untersuchung der hier maßgeblichen *Zweiten Analytik* des Aristoteles u.a. auch eine gute Übersicht über deren Auslegungs- und Wirkungsgeschichte, die „so lang und eindrucksvoll [ist], daß sie fast einer Geschichte der Wissenschaftstheorie gleichkommt"[69]. Die „vorherrschende klassische Interpretation der aristotelischen Wissenschaftstheorie" — eine geradezu „übermächtige und mehr als zweitausend Jahre alte und bewährte Einschätzung der *Zweiten Analytik*"[70] — faßt er so zusammen:[71]

> Eine aristotelische Wissenschaft W zielt auf die Entdeckung von Prinzipien, die
> *(i)* alle Theoreme von W logisch implizieren und den logischen Gehalt von W in Gestalt weniger Axiome komprimieren;
> *(ii)* weder innerhalb noch außerhalb von W argumentativ begründet werden können;
> *(iii)* durch Induktion und Intuition erfaßt werden können und müssen;
> *(iv)* immer wahr sind und niemals falsch sein können;
> *(v)* sich auf ontologisch notwendige Strukturen oder Essenzen im Gegenstandsbereich von W beziehen;
> *(vi)* auf kausale, naturgesetzliche Relationen in der Welt verweisen.

Weil die beiden ersten Kriterien den *axiomatischen*, die beiden folgenden Kriterien den *fundamentalistischen* und die beiden letzten Kriterien den *essentialistischen* Charakter aristotelischer Wissenschaft repräsentieren, spricht Detel hier von der „AFE-Interpretation"[72] der *Zweiten Analytik*. Sie erscheint mir gut geeignet, die konstitutiven

des Aristoteles geht, sondern um eine Präferenz der Aristoteles-Rezeption, stelle ich einzig diesen Bezug zur *Zweiten Analytik* her und nehme deren Position *pro toto*. Zum Beispiel wird der *apodeixis*-Begriff u.a. in der *Topik*, *Eudemischen Ethik* und den physikalischen Schriften anders akzentuiert als in der *Zweiten Analytik*, und auch in der *Metaphysik* gibt es abweichende Verwendungen, die im weiteren ignoriert werden. Zur Vertretbarkeit der Deutung der *Zweiten Analytik* als Artikulation eines Ideals s. Lloyd 1996, S. 7-37.

[69] Detel 1993 I, S. 263.

[70] Ebd., S. 8.

[71] Ebd., S. 266. Der Zusatz in *(iv)* „... und niemals falsch sein können" erscheint mir überflüssig und wird in den folgenden ‚Transformationen' nicht weiter verfolgt.

[72] Ebd., S. 266. Detel belegt ausführlich deren Dominanz nicht nur bei neuzeitlichen Philosophen wie Descartes, sondern auch, wie „überaus verbreitet AFE noch in unserem Jahrhundert als Auslegung der aristotelischen Wissenschaftstheorie ist" (ebd., S. 266-279, insbes. S. 267). Er selbst schließt sich weder dieser noch der sog. „induktiv-pädagogischen Auslegung" (IP) an

Funktionen der Prinzipien innerhalb klassischer Wissenschaft Diemerscher Prägung zum Ausdruck zu bringen; es lohnt sich daher, die o.g. Bedingungen *(i-vi)* zu Diemers Kriterien *(1-5)* in Beziehung zu setzen. Lassen wir hier das Negativkriterium *(5)* zunächst außer acht, kann folgendes konstatiert werden:

Diemers Ableitungs-Evidenz-Kriterium *(4)* geht nicht in *(i-vi)*, sondern in die nähere Bestimmung der aristotelischen Prinzipien selber ein, genauer gesagt, in die Forderungen nach Unbeweisbarkeit, Beweisunbedürftigkeit bzw. Evidenz und Hinlänglichkeit (Vollständigkeit) auf seiten der *Axiome* sowie in die Forderungen nach Undefinierbarkeit, Definier-Unbedürftigkeit bzw. Verständlichkeit und Hinlänglichkeit (Vollständigkeit) auf seiten der *Definitionen.*[73] Diemers zusammengehörende Kriterien *(1,2)* können von *keiner* der Prinzipienbedingungen *(i-vi)* sinnvoll abgetrennt werden. Genauer ge-

(ebd., S. 284). Letztere läuft hinaus auf eine Differenzierung zwischen faktischer aristotelischer Wissenschaft, deren Hauptziel die induktive Ermittlung von Prinzipien ist (und in der *Zweiten Analytik* kaum thematisiert wird), und eine anschließende ‚pädagogische' Aufbereitung, die die wissenschaftlichen Erkenntnisse in axiomatisch-deduktiver Form präsentiert (wie dies in der *Zweiten Analytik* der Fall ist). Auch schließt sich Detel nicht dem — mit AFE und IP inkompatiblen — „Vertiefungstheorem" (VT) an (ebd., S. 285f.), wonach die durch Induktion und Intuition ermittelten Prinzipien einer aristotelischen Wissenschaft nicht nur in einem zweiten Schritt *als Prinzipien* (d.h. als *erste* Sätze) durch eine — über Induktion und Intuition hinausgehende — Konstruktion von Demonstrationen (bekannter Theoreme von W) nachzuweisen sind, sondern auch in einem dritten Schritt, ausgehend von etabliertem Wissen, eine *Vertiefung* dieses Wissens durch Aufdeckung neuer Erklärungen für bekannte Tatsachen liefern müssen. Vielmehr spricht sich Detel für „ein neues Bild der aristotelischen Wissenschaftstheorie" (ebd., S. 289) aus, das „weder fundamentalistisch noch pädagogisch, sondern [...] methodologisch fragil und metaphysisch weich ausfällt" (ebd., S. 290).

Es ist für meine Argumentation nicht erforderlich, den hier angedeuteten Interpretationsdifferenzen im einzelnen nachzugehen. Vielmehr reichen die folgenden Feststellungen aus: *(a)* Die mit der AFE-Interpretation rivalisierenden Interpretationen räumen durchweg der *Erfahrung* (in Gestalt der Induktion im aristotelischen Sinne) eine größere Bedeutung bei der Erlangung von Prinzipien ein, als dies die AFE-Interpretation tut. *(b)* Selbst nach der ‚orthodoxen' AFE-Interpretation handelt es sich hier nicht um einen rein intuitiven (nur durch den *nous* vermittelten) Akt, sondern um einen durch Induktion gestützten (s. Bedingung *(iii)* oben). *(c)* Allgemeine Sätze als solche sind nach Aristoteles prinzipiell fehlbar (vgl. etwa *Topik* VIII 2, 157a; *Schriften* II, S. 178f.; ausführlicher hierzu Detel 1993 I, S. 296f.), was bedeutet, daß die Induktion *allein* nie sichere Prinzipien und damit eigentliches Wissen (*episteme*) begründen kann, sondern hierzu notwendig der Einsicht (und also des *nous*) bedarf. Aus *(a-c)* schließe ich, daß noch die ‚empirisch schwächste', nämlich die AFE-Interpretation der *Zweiten Analytik* eine Revision des Diemerschen Kriteriums *(3)* erzwingt, aber auch, daß diese Revision nicht ‚automatisch' den älteren Induktivismus (s. Teil 1.3) als ‚klassische' Wissenschaft ausweisen wird.

[73] Vgl. für eine genauere Differenzierung der aristotelischen Prinzipien, als sie hier gegeben werden kann, wie auch für die fraglichen Bestimmungen im einzelnen Scholz 1931 und von Fritz 1971, S. 342-366.

sagt: *(i-vi)* lassen sich als notwendige und hinreichende Prinzipienbedingungen für *(1,2)* verstehen.

Ein Problem stellt das verbleibende Kriterium *(3)* dar, und zwar in Beziehung zu *(i-ii)*. Detel bemerkt: „Systematisch pikant ist vor allem der rätselhafte Umstand, daß der fundamentalistische, auf endgültige Sicherheit zielende Aspekt von AFE nach *(iii)* sowohl auf Induktion (*epagoge*) als auch auf Intuition oder Einsicht (*nous*) rekurriert".[74] ‚Rätselhaft' erscheint dieser Umstand jedoch nur, wenn er auf die Sicherheitsforderung *isoliert* bezogen wird (weil nicht ersichtlich ist, was die Induktion hier beitragen kann), aber nicht zusammen mit einer Allgemeinheitsforderung für die *Prinzipien*: ohne Intuition keine Sicherheit, ohne Induktion keine Allgemeinheit dieser Prinzipien.

Auf eine Allgemeinheitsforderung, die *nur* für die Prinzipien von W formuliert wird (nennen wir sie *(3')*) und die von Diemers ‚allgemeinerem' Allgemeinheitspostulat *(3)* zu unterscheiden ist, kann eine aristotelische Wissenschaft offenkundig nicht verzichten. Daher kann auch bei *(iii)* die Induktion nicht ausgeschlossen werden, denn nach Aristoteles gilt, „daß wir die ersten Prinzipien durch Induktion kennen lernen müssen"[75]. Die Induktion ist in *(iii)* deshalb, allerdings auch *nur* deshalb, erforderlich, um die Allgemeinheit der Prinzipien *(3')* zu etablieren.

Wenn dies zutrifft, kann aber — *auch* nach Aristoteles' Begriff der Induktion — nicht mehr die Rede davon sein, daß ‚individuelle und empirische Sätze nicht von wissenschaftlichem Belang' seien (vgl. Diemers Kriterium *(3)* oben). Soll eine Wissenschaft nach Vorbild der *Zweiten Analytik*, geradezu *dem* Paradigma klassischer Wissenschaft, unter den klassischen Wissenschaftsbegriff fallen, was sicherlich wünschenswert ist, kann *(3)* nicht aufrechterhalten werden, sondern muß (mindestens) durch *(3')* ersetzt werden. Mit dieser Modifikation kann man die Forderungen *(i-vi)* gewissermaßen als ‚Prinzipienexplikation' klassischer Wissenschaft nach Diemer auffassen.

Natürlich wird schon mit dem ‚*(3)-(3')*-Problem' auf die Frage hingewiesen, inwiefern sich eine *empirische* Wissenschaft dergestalt explizieren läßt. Der ältere Induktivismus, beispielhaft durch Bacon vertreten, verspricht Sicherheit *und* Allgemeinheit *qua* Induktion allein. Es ist die Frage, wieweit *(1, 2, 3', 4, 5)* bzw. *(i-vi)* abgeändert werden müssen, wenn man diese Position integrieren möchte — und dies wird in der Tat erforderlich sein, um zu einer hinreichend weiten, gleichwohl noch genügend präzisen Bestimmung von Klassischer Mathematischer Naturphilosophie (KMN) gelangen zu können.

[74] Detel 1993 I, S. 266; Detel selbst liefert die ‚Enträtselung' dieses Problems (s. Anm. 41).

[75] *Zweite Analytik* II 19, 100b3-4; (Aristoteles *Schriften* I, S. 107). Detel (1993 I, S. 294f.) legt dar, daß es hierbei um Prinzipien in einem weiten Sinne (‚ursprüngliche Dinge') geht, sofern sie *allgemein* sind — d.h., daß die Induktion gerade nur soweit wichtig ist, als sie der „Etablierung des Allgemeinen" dient.

II.1.3 Klassische und Baconsche Wissenschaft

Diemers Absolutheitsthese *(1)* und Wahrheitsvoraussetzung *(2)* zielen darauf ab, klassische Wissenschaft als ein System wahrer, gewisser und allgemeiner Erkenntnis zu kennzeichnen, deren Geltung *begründet* ist. Bereits die *Zweite Analytik* zeigte jedoch, daß *(1,2)* in einem problematischen Verhältnis zum ursprünglichen Allgemeinheitspostulat *(3)* stehen. Wie besonders der in *(3)* zugrunde gelegte Begriff der ‚Wesensallgemeinheit' sinnfällig macht[76], beinhaltet dieses Postulat ein ‚rationalistisches Präjudiz', das empiristische Wissenschaftsbegründungen im weitesten Sinne vom klassischen Wissenschaftsbegriff ausschließt. Das Beispiel des Baconschen Induktivismus soll nicht nur die Problematik eines solchen Ausschlusses verdeutlichen, sondern auch die Problematik jeder Charakterisierung, die über eine ‚Kernbestimmung' in Form von *(1,2, 3')* hinausgeht. Betrachten wir dessen wirkungsmächtigen Wissenschaftsbegriff etwas genauer:

Hans Albert beschreibt im Anschluß an Popper das Verhältnis von Wahrheit und Gewißheit für die „klassische Erkenntnislehre", die er durch Descartes (für den Rationalismus) und Bacon (für den Empirismus) geradezu idealtypisch vertreten sieht, folgendermaßen:[77]

> Es sieht [...] so aus, als ob Wahrheit und Gewißheit für die menschliche Erkenntnis eng miteinander zusammenhingen. Mit der Suche nach Wahrheit, nach wahren Auffassungen, Überzeugungen oder Aussagen — und damit auch: nach wahren Theorien — scheint also die Suche nach sicheren Gründen untrennbar verbunden zu sein, die Suche nach einer absoluten Begründung und damit Rechtfertigung unserer Überzeugungen, nach einem *archimedischem Punkt* für den Bereich der Erkenntnis.

Popper und Albert ist darin recht zu geben, daß auch der ältere, von Bacon geprägte Induktivismus einen solchen archimedischen Punkt beansprucht: Er benötigt allerdings das Besondere (die von Vorurteilen ‚gereinigte' Erfahrung des einzelnen Phänomens), um mit Hilfe einer Induktionslogik schrittweise das Allgemeine zu gewinnen und — dies im Unterschied zu Aristoteles — das Allgemeine als wahr und gewiß zu begründen. Wenn Bacon „Begriffe sowohl als Axiome auf einem sichern Weg von den Dingen herleiten"[78] will, geht es auch ihm um die Erkenntnis von Wesensallgemeinheit:

[76] Vgl. oben Anm. 59.

[77] Albert 1991, S. 10.

[78] S. Bacon 1830, S. 28; Aph. I, 18 (Vgl. Bacon 1990 I, S. 88: „[...] ut vero ad interiora et remotiora naturae penetretur, necesse est ut tam notiones quam axiomata magis certa et munita via a rebus abstrahantur [...]". — Ich zitiere, mit wenigen Ausnahmen, hier und im folgenden nach der Übersetzung des *Novum Organum* von Anthon Th. Brück, d.h. nach Bacon 1830, und verweise ggf. auf Bacon 1990 für den lateinischen Originaltext). Weiter heißt es zu diesem „sichern Weg": Er „leitet von der sinnlichen Wahrnehmung und vom Einzelnen ebenfalls Grundsätze her;

Der schrittweise Induktionsprozeß durchläuft eine Hierarchie immer allgemeinerer formaler Ursachen oder ‚Formen' und kulminiert — ganz im Sinne der im 17. Jahrhundert (wieder-)aufblühenden Korpuskularphilosophie — schließlich im „Gesetz, welches in der Bewegung besteht", und den mit diesem Gesetz korrespondierenden „Formen"[79]. Dies sind Bacons wahre, gewisse und allgemeine Prinzipien.

Das Besondere ist bei ihm also nicht mehr nur — was *(3)* noch erlauben würde — ‚der Fall unter ...' oder das ‚Beispiel für ...', sondern — was *(3)* verbietet, aber mit *(3')* vereinbar ist — ‚ein Fall *aufgrund dessen* ...'[80]. Zweifellos steht daher bei einer Wis-

aber er steigt dann allmählich und stufenweise höher, bis er erst ganz zuletzt zu den allgemeinsten, höchsten gelangt — das ist der wahre Weg, aber noch unbetreten" (ebd., S. 29; Aph. I, 19).

[79] Bacon 1830, S. 37 und 100 (Aph. I, 51 bzw. II, 2); Näheres zu Bacons Gesetzesbegriff bei Steinle 1995, S. 329-334. Auf Bacons problematische Versuche, zwischen Physik und Metaphysik zu unterscheiden, die in diesem Zusammenhang zu diskutieren wären, kann ich hier ebenfalls nicht näher eingehen. Offenkundig versteht Bacon Gesetz und Formen als Prinzipien einer noch zu etablierenden mechanischen Naturwissenschaft. Wenn man ‚Wesensallgemeinheit' nicht ‚rationalistisch präjudiziert' (vgl. Anm. 25 und 80), sondern erkenntnistheoretisch ‚neutral' versteht, besteht kein Grund, Bacons Gesetze und Formen *nicht* als Wesensallgemeine zu fassen: Sie sind offenkundig allgemein, d.h. kommen allen Körpern zu, zudem sind sie „ewig" und „unabänderlich" (Bacon 1830, S. 106; Aph. II, 9), und sie sind durch die Erfahrung als wahr und gewiß erweisbar. Um noch einmal Hans Albert zu Descartes und Bacon zu Wort kommen zu lassen: „Beiden Versionen der klassischen Erkenntnislehre ist die Vorstellung eines unmittelbaren Zugangs zur Wahrheit — durch evidente Vernunfteinsicht oder sorgfältige Beobachtung — gemeinsam. Irgendwelche Wahrheiten sind für die Erkenntnis ‚gegeben' und müssen daher hingenommen werden. In dieser Konzeption wird offenbar eine Anschauung über die Quellen der Erkenntnis mit einem Gültigkeitskriterium verbunden, so daß eine gleichzeitige Lösung des Ursprungs- und des Geltungsproblems resultiert. Die Abstammung aus der Vernunft oder der Wahrnehmung wird für die Legitimation der Erkenntnis als entscheidend angesehen. Sie scheint sie mit einer Wahrheitsgarantie zu versehen und ihr damit die erstrebte Sicherheit zu verleihen, denn: auf irgendeinen sicheren Grund, auf irgendein unerschütterliches Fundament, muß man wohl zurückgehen können, um alles zu begründen. Im *Ursprung* der Erkenntnis hängen *Wahrheit* und *Gewißheit* zusammen, und die Gewißheit wird zusammen mit der Wahrheit durch das jeweils bevorzugte Ableitungsverfahren auf alle anderen Erkenntnisse *übertragen*" (Albert 1991, S. 28).

[80] Die Intention des Induktivismus, die Gültigkeit allgemeiner Aussagen durch Untersuchung von Einzelerfahrung zu begründen, ist für Diemer offenbar bereits ein Kennzeichen moderner Wissenschaft, insofern es sich hier nur um eine „intendierte", niemals aber „voll verifizierte" Gültigkeit handeln kann: „[...] das heißt, daß das Allgemeine nicht im Modus der kategorischen Aussage vorgegeben ist, sondern nur im Gültigkeitsmodus des Hypothetischen und Konditionalen" (Diemer 1968b, S. 29). Diese Definition gibt Diemers Verständnis von empirischen Allaussagen wieder, aber nicht Bacons: Einem ‚klassischen' Induktivisten wie Bacon aufgrund einer solchen Definition bereits ein modernes Wissenschaftsverständnis zu unterstellen, hieße, die Anwendung der (tatsächlich zentralen) Kriterien *(1,2)* zugunsten der Applizierung eines unhistorischen — weil ‚modernisierenden' — Empirismusbegriffes zurückzustellen.

senschaft Baconscher Prägung immer das *Besondere* im Mittelpunkt. Es ist jedoch auch zu beachten, daß *ohne* Verallgemeinerung eine solche Wissenschaft nicht schöpferisch sein[81] und vor allem, daß sie *ohne* die Aufdeckung von Wesensallgemeinem keine Wahrheit und Gewißheit besitzen kann — wohl aber *mit* ihr, denn gerade hierdurch erst kommt sie der ewigen Ordnung der Natur auf die Spur: „So nämlich verfährt eben die echte Erfahrung; sie sorgt zuerst für das Licht und beleuchtet damit ihren Weg. Sie geht nicht von einer verkehrten, sondern treuen und wohlbegriffenen Wahrnehmung aus; daraus leitet sie ihre Grundsätze her, auf diese bauet sie neue Versuche; — wie ja selbst das göttliche Wort nach einer gewissen Ordnung auf das Chaos der Dinge wirkte".[82]

Bacon versteht die Forderung, keine „sichren Principien festzusetzen", also *nicht* kategorisch, sondern will nur solchen Prinzipien, die auf dem methodisch richtigen, nämlich induktiven Weg gewonnen werden, Gewißheit zubilligen.[83] Es ist zutreffend, daß wissenschaftliche Erkenntnis hierdurch *dynamisiert* wird — die „Wahrheit als eine Tochter der Zeit", wie Bacon gerne zitiert wird.[84] Aber bei diesem Zitat fehlt oft der Zusatz: „[...] und nicht der menschlichen Autoritäten"[85]. Bacons ‚Verzeitlichungsthese' impliziert *keinen* Relativismus in dem Sinne, daß jede Zeit ihre eigene Wahrheit hätte und daher Erkenntnisgewißheit nicht möglich sei. Vielmehr entzieht er das Wahrheitsmonopol den ‚menschlichen Autoritäten', die es zu seiner Zeit inne hatten (scholastischen Philosophen und Theologen), um es der menschlichen Sinneswahrnehmung und

Wie Albert zu Bacon zutreffend bemerkt: „Das Ziel besteht wie bei Descartes darin, wahre und begründete Urteile zu fällen und dadurch zu Sicherheit und Gewißheit der Erkenntnis zu gelangen" (Albert 1991, S. 27). Diemers Argumentation zufolge könnte man auch Descartes einen klassischen Wissenschaftsbegriff absprechen, indem man zeigt, daß dessen ‚Vernunftwahrheiten' *tatsächlich* nicht „im Modus der kategorischen Aussage" angebbar sind, sondern hypothetische und konditionale Elemente enthalten. Anders formuliert: Diemer argumentiert bei Descartes historisch deskriptiv, bei Bacon normativ.

[81] „Allein Axiome, aus den Einzelheiten ordnungsgemäß und folgerecht entwickelt, führen leicht zu neuen Einzelheiten, und so wird die Wissenschaft fruchtbar" (Bacon 1830, S. 30; Aph. I, 24).

[82] Ebd., S. 61 (Aph. I, 82).

[83] Vgl. ebd., S. 93 (Aph. I, 126). Diese und andere Belege stützen eine Interpretation, die einer Baconschen Wissenschaft zumindest das Streben nach und den Glauben an die Erreichbarkeit von infallibler, gewisser Erkenntnis zubilligt (vgl. z.B. Popper 1994/97 I, S. 17-23 und im Anschluß daran Albert 1991, S. 26-34); sie widersprechen indessen klar einer ‚modernisierenden' Interpretation, die Bacon geradezu in die Nähe eines Popperschen Falsifikationismus rückt (vgl. Urbach 1993, insbes. S. 49-58 und 187-192).

[84] Bacon 1830, S. 63 bzw. 1990 I, S. 181 (Aph. I, 84). Daher bekommt auch die Voraussage bei Bacon eine wissenschaftstheoretische Bedeutung, nämlich die der Verifikation, die die klassische Wissenschaft nach Diemer nicht kennt.

[85] „Recte enim Veritas Temporis filia dicitur, non Authoritatis" (ebd., S. 181 bzw. 180; Aph. I, 84).

damit der Autorität der neuformierten Naturwissenschaft zu überantworten. Zweitens wird wissenschaftliche Erkenntnis bei Bacon — und in der neuzeitlichen Wissenschaft *generell*[86] — in einer wesentlichen Hinsicht *methodisiert*: Begründungsansprüche müssen mit der Ausweisung begründungslegitimierender methodischer Regeln verbunden werden. Diemers Kriterium der Methoden — und, wie sich zeigt, der Darstellungsirrelevanz *(5)* – kann daher auf die frühneuzeitliche klassische Wissenschaft eines Bacon, aber auch eines Descartes, *generell* nicht mehr angewandt werden.[87] Die ‚Kern-Kriterien' klassischer Wissenschaft *(1, 2, 3')* bleiben jedoch für Bacon in einem gewissen, näher zu bestimmenden Sinne gültig, denn steht wissenschaftliche Erkenntnis bei ihm auch erst am Ende eines kontinuierlichen, methodisch geregelten und möglicherweise langdauernden Aneignungsprozesses, so hat sie doch grundsätzlich keine andere Qualität als bei Aristoteles oder Descartes: Sie ist erreichbar, essentiell und gewiß.[88]

[86] S. hierzu ausführlich Mittelstraß 1970 (aber auch Teil 2.1); zur Diskussion insbes. um die ‚axiomatische Methode' im 16. und 17. Jahrhundert vgl. auch Schüling 1969.

[87] Zu Recht weist z.B. I. Bernard Cohen auf die Bedeutung der Methodendiskussion dieser Zeit hin: „Kein Aspekt der Wissenschaft des siebzehnten Jahrhunderts war so umwerfend revolutionär wie die Methode und ihre Konsequenzen. Die Wissenschaftliche Revolution brachte zwei herausragende Systematiker der Methode hervor, Francis Bacon und René Descartes [...]" (Cohen 1994, S. 223). Ich werde im Kontext der klassischen Mathematischen Naturphilosophie auf die Wichtigkeit methodischer Fragen zurückkommen, aber auch begründen, warum Diemers Kriterium nicht völlig außer Kraft gesetzt werden sollte (vgl. Teil 2.4).

[88] Popper kann daher zu Bacon und Descartes treffend bemerken: „Sie konnten nur die eine Autorität — die Autorität des Aristoteles und die Autorität der Bibel — durch die andere ersetzen. Beide appellierten an neue Autoritäten, der eine an *die Autorität unserer Sinne*, der andere an *die Autorität unseres Intellekts*" (Popper 1994/97 I, S. 22). Gegen die hier von Popper, aber auch gegen die oben vorgenommenene Parallelisierung gemäß der Kriterien *(1, 2, 3')* könnte eingewandt werden, daß die *Evidenz* der Prinzipien bei Bacon, anders als etwa bei Descartes, nicht unmittelbar in dem Sinne ist, daß sie nicht auf ‚höherer' Einsicht in einen Sachverhalt beruht, sondern durch einen — u.U. recht langen und mühsamen — Forschungsprozeß (einschließlich der Vorhersage) vermittelt ist. Dem ist entgegenzuhalten, daß sich auch bei Descartes die Evidenz der Prinzipien nicht gleich dem ‚Licht der Vernunft' enthüllt, sondern erst in einem Prozeß des methodischen Zweifelns erarbeitet werden muß — um dann in einem langwierigen Vorgang an alle wissenschaftliche Erkenntnis weitervermittelt werden zu können: „Ich weiß auch sehr gut, daß mehrere Jahrhunderte werden verfließen müssen, bevor man aus diesen Prinzipien alle die Wahrheiten so abgeleitet hat, wie sie abgeleitet werden können [...]" (Descartes 1955, S. XLVI; Schreiben an Picot). Desweiteren könnte gegen diese Parallele mit Descartes eingewandt werden, daß Bacon nirgendwo von der ‚Notwendigkeit' seiner Prinzipien spricht (Urbach 1993, S. 188 benutzt u.a. dieses Argument gegen die „'standard' interpretation of Bacon, namely that he thought his method infallible"). Dem ist entgegenzuhalten, daß es bei Bacon für eine solche Notwendigkeitszuschreibung keine Notwendigkeit gibt: Rationalistische Systementwürfe der Naturphilosophie, wie etwa derjenige Descartes', müssen sich der Notwendigkeit ihrer Prinzipien versichern, weil nicht diese selbst, sondern nur ihre deduktiven Konsequenzen mit der Erfahrung konfrontiert werden können. *Ohne* Notwendigkeitsausweisung wäre denkbar,

Wie könnte nun eine ‚Baconsche Erweiterung' des klassischen Wissenschaftsbegriffes aussehen? Versuchen wir, analog zur AFE-Interpretation der *Zweiten Analytik*, Bacons Wissenschaftsbegriff mit Hilfe des Prinzipienbegriffs zu explizieren, liegt folgende Schwierigkeit auf der Hand: Obwohl Bacon seine Prinzipien immer wieder als *axiomata* anspricht, erfüllen sie für die Wissenschaft keine axiomatische Funktion im Sinne der AFE-Bedingungen *(i, ii)*. Für die Baconschen Prinzipien gilt nämlich, daß sie *nicht* alle Theoreme der Wissenschaft W' implizieren, sondern, daß sie *(i')* (induktionslogisch) von jenen impliziert werden. Es gilt von ihnen ferner *nicht*, daß sie weder innerhalb noch außerhalb von W argumentativ begründet werden können, sondern vielmehr, daß sie *(ii')* innerhalb von W begründet werden können und müssen. Wohl aber gelten — mit der Einschränkung, daß in der dritten Bedingung die Rede davon sein sollte, daß die Prinzipien *(iii')* durch Induktion (allein) erfaßt werden können und müssen — die weiteren Bedingungen der AFE-Interpretation, die den fundamentalistischen und essentialistischen Zug klassischer Wissenschaft zum Ausdruck bringen. Eine AFE-Charakterisierung Baconscher Wissenschaft sieht somit folgendermaßen aus:

Eine Baconsche Wissenschaft W' zielt ab auf die Entdeckung von Prinzipien, die

(i') durch alle Einzelbeobachtungen und Theoreme von W' (induktions-) logisch impliziert werden und den empirischen Gehalt von W' in Gestalt weniger Axiome komprimieren;

(ii') nur innerhalb von W' argumentativ begründet werden können und müssen;

(iii') durch Induktion erfaßt werden können und müssen;

(iv') immer wahr sind;

(v') sich auf ontologisch notwendige Strukturen oder Essenzen im Gegenstandsbereich von W beziehen;

(vi') auf kausale, naturgesetzliche Relationen in der Welt verweisen.

Die Gründe dafür, daß die Bedingungen *(i)* und *(ii)* der früheren AFE-Interpretation auf eine Baconsche Wissenschaft nicht zutreffen, sind grundverschieden. *(i')* geht darauf zurück, daß Bacon der Anwendung der Logik, genauer gesagt der aristotelischen Syllogistik, in den Wissenschaften mißtraut: „Der Syllogismus wird auf die höchsten Grundsätze der Wissenschaft gar nicht, auf die Mittelsätze vergeblich angewandt, indem er der Subtilität der Natur bei weitem nachsteht; er bemächtigt sich also des Beifalls, nicht der Sache selbst".[89] Während die Induktionslogik eine sichere Leiter ‚nach oben' abgibt, fehlt eine deduktive Logik und, im weiteren Sinne, eine Mathematik, die

daß wesentlich *andere* Prinzipien zu den gleichen Konsequenzen führen könnten — eine Verletzung des ‚Monismus' der klassischen Wissenschaftsauffassung (vgl. Teil 1.1). Empiristischen Entwürfen, die von ‚bereinigter' Erfahrung vermittels Induktionslogik zu allgemeinen Prinzipien aufsteigen, ist dagegen die Notwendigkeitsbedingung implizit und muß nicht eigens artikuliert werden: Ihre theoretischen Prinzipien sind notwendig, weil es sich um die wesentlichen, auf *eindeutigem* Wege ermittelten Prinzipien der *einen* Natur handelt.

[89] Bacon 1830, S. 27 (Aph. I, 13), vgl. auch S. 233f. (Aph. II, 52).

eine ebenso sichere Leiter ‚nach unten' liefern würde. Deduktion birgt für Bacon immer die Gefahr, die ‚empirisch reinen' Allgemeinbegriffe und -gesetze mit theoretischen Vorurteilen zu durchsetzen; Logik und Mathematik stehen bei ihm in Verdacht, eher sterile und verfälschende Antizipationen denn fruchtbare und ‚buchstäbliche' Interpretationen der Natur zu liefern. Er betrachtet beide Disziplinen nicht als wissenschaftskonstitutiv und -leitend, sondern als grundsätzlich entbehrliche „Anhänge" und „Handlanger" der Wissenschaft.[90]

Hierin liegt ein wichtiger Unterschied zur aristotelischen Wissenschaft, der nach den Ausführungen zu Diemers Kriterium *(2)* sogar ausschließt, eine Baconsche Wissenschaft als ‚klassisch' anzusprechen, denn ihr fehlt die ‚Deduktivität', der Systemcharakter. Es ist jedoch *erstens* zu beachten, daß dieser Mangel nicht aus dem in *(2)* unterstellten materialen Wahrheitsverständnis selber herrührt, sondern wiederum aus einer ‚rationalistischen Präsumption' — daß nämlich Wahrheit von Systemprinzipien nur abwärts, zu den weniger allgemeinen Theoremen und Einzelaussagen fließen kann, nicht aber aufwärts, hin zu den Prinzipien. Aber auch ein solcher Aufwärtsfluß, wäre er denn erweisbar, würde einen systemähnlichen, nämlich induktionslogischen *Zusammenhang* aller Sätze ergeben und die Vorstellung einer Wissenschaft als geordnete Gesamtheit wahrer Aussagen über einen Gegenstandsbereich ‚retten'. *(2)* könnte also durch Berücksichtigung einer Induktionslogik zu einem Kriterium *(2')* ausgeweitet werden, um eine Baconsche Wissenschaft ‚klassisch' zu machen[91]. Wenn ich eine solche Ausweitung *nicht* vorschlage, dann deshalb, weil es sich hier nicht um einen ‚notwendigen' Unterschied zwischen aristotelischer und Baconscher Wissenschaft handelt: Es ist Bacons Skeptizismus gegenüber Logik und Mathematik, der ihn hindert, seine Wissenschaft in die Form eines deduktiven Systems zu bringen, nicht sein Induktivismus — viele spätere Induktivisten bis hin zu einigen Vertretern des logischen Empirismus sind ihm hierin nicht gefolgt. Für die Charakterisierung klassischer mathematischer Naturphilosophie, der zwar nicht Bacon, wohl aber wichtige spätere Induktivisten

[90] Vgl. z.B. ebd., S. 59 und 75 (Aph. I, 80 und I, 96). Für weitere, z.T. auch etwas günstigere Urteile über Logik und Mathematik vgl. Urbach 1993, S. 138-143. Bacons kritische Haltung zu theoretischen Wissenschaften wie der Astronomie und Optik, insbes. zu den dort verwendeten (mathematischen) Hypothesen, rechtfertigt es historisch durchaus, mit Kuhn die Unterscheidung der mathematischen und experimentellen Tradition der physikalischen Wissenschaften durch die Begriffe „klassische" und „*Baconsche* Wissenschaft" zu kennzeichnen (s. Kuhn 1977, S. 84-124). Bezeichnet man mit Bacons Namen eine solche Wissenschaftstradition, nicht aber (anachronistischerweise) eine Epoche der Naturbeherrschung und -zerstörung aufgrund eines fehlgeleiteten wissenschaftlich-technischen Fortschrittsbegriffs, kann von einem „Ende des Baconschen Zeitalters" (Böhme 1993) wohl kaum die Rede sein.

[91] In der Tat ist es diese Vorstellung, die den Charakterisierungen der ‚Offenbarungstheorie der Wahrheit' (Popper), der ‚klassischen Erkenntnislehre' (Albert) und des ‚Ideals bewiesener Wahrheit' (Lakatos) gemeinsam ist.

angehörten, wird es sich als sinnvoll erweisen, an *(2)* in seiner ursprünglichen Form festzuhalten.

Im Unterschied zu *(i')* ist Bedingung *(ii')* jedoch eine *notwendige* Konsequenz des Induktivismus, weil dieser eine innerwissenschaftliche Begründung wissenschaftlicher Prinzipien fordert. Auf diese Auflösung der aristotelischen Bedingung *(ii)* kann eine Baconsche Wissenschaft also keineswegs verzichten. Ich werde im nächsten Teil Klassische Mathematische Naturphilosophie *formal* als eine Erweiterung des aristotelischen Wissenschaftsideals (in der AFE-Form) um die erkenntnistheoretischen Prämissen der Baconschen Wissenschaft darstellen und dazu eine *weitere* Modifikation der Bedingungen *(i-vi)* bzw. *(i'-vi')* vorschlagen.

II.2 Klassische Mathematische Naturphilosophie (KMN)

„Nur die Beziehung der Zeit, des Raumes, der Gleichheit, und die davon abgeleiteten Beziehungen der Zahl, der Grösse, der Gesetzlichkeit, kurz das *Mathematische*, sind der äusseren und inneren Welt gemeinsam, und in diesen kann in der That eine volle Uebereinstimmung der Vorstellungen mit den abgebildeten Dingen erstrebt werden".[92] Helmholtz' Bemerkung bringt eine Überzeugung zum Ausdruck, die *allen* Vertretern Mathematischer Naturphilosophie, klassischer wie moderner, gemeinsam ist: daß nämlich die Mathematik einen bevorzugten Zugang zur Erfassung der Wirklichkeit eröffnet. Von Galileis berühmter Buch-Metapher im *Il Saggiatore*[93] über Fries' naturphilosophisches Diktum: „wir müssen den mathematischen Weg gehen, wie viel oder wenig uns auch darauf gelingen mag"[94], bis hin zu Richard Feynmans lapidarer Feststellung: „The strange thing about physics is that for the fundamental laws we still need mathematics"[95], findet man in der neuzeitlichen Physik und deren Wissenschaftstheorie weitestgehende Übereinstimmung darüber, daß die Mathematik *unverzichtbar* sei, um Naturphänomene zu beschreiben und zu erklären. Diese Übereinstimmung erweist sich allerdings als eine recht problematische, sobald man den diversen Begründungen dafür

[92] Helmholtz *Vorträge und Reden* I, S. 365 (Hervorhebung von H.P.).

[93] „La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cherchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un obscuro laberinto" (Galilei *Opere* VI, S. 232; vgl. zu dieser Metapher auch Burtt 1932, S. 64f. und Dijksterhuis 1956, S. 403). Besonders der letzte Satz — wonach ohne Mathematik der Mensch zu ‚sinnlosem Herumirren in einem finsteren Labyrinth' verurteilt ist — lädt zu einem Vergleich mit Bacon ein, der die Labyrinth-Metapher (vgl. Krohn 1994, insbes. S. 69-75) verschiedentlich benutzt, aber Galileis ‚mathematischen Ariadnefaden' nicht zur Hand hat, sondern (vgl. Teil 1.3) nur die ‚erste sinnliche Wahrnehmung': „Der Bau des Weltalls aber erscheint seiner Struktur nach dem Menschengeist, der es betrachtet, wie ein Labyrinth, wo überall unsichere Wege, täuschende Ähnlichkeiten zwischen Dingen und Merkmalen, krumme und verwickelte Windungen und Verschlingungen der Eigenschaften sich zeigen. [...] weder die höchsten Vorzüge des Geistes noch das oft wiederholte Würfelspiel der Erfahrung vermögen diese Schwierigkeiten zu besiegen. Die Spuren müssen an einem Faden festgehalten werden: Jeder Schritt muß von der ersten sinnlichen Wahrnehmung an in fester Weise gesichert sein" (Bacon 1990 I, S. 25f.; Vorrede).

[94] Mit diesen Worten wendet sich Fries gegen die konkurrierende Schellingsche Naturphilosophie: „So kommt die phantasirende Naturphilosophie mit ihrer Auffassung des Lebens der alten griechischen wieder näher, in der auch das Leben die höchsten Gesetze gab: allein ohne die mathematische Unterlage wird dies nie zur Wissenschaft, wir müssen den mathematischen Weg gehen, wie viel oder wenig uns auch darauf gelingen mag" (So Fries in seiner noch unveröffentlichten Autobiographie; zitiert nach König/Geldsetzer 1979, S. 22*).

[95] Feynman 1965, S. 36

nachgeht, *warum* Mathematik zur Wirklichkeitserfassung notwendig sei oder, schwächer formuliert, warum sie sich überhaupt dazu eigne[96] — und erst recht, wenn man resignative Behauptungen von der Art hinzunimmt, es handle sich hierbei um ein schlechterdings unbegreifliches *Wunder*.[97] Wenn eine konsensfähige Lösung des *Anwendungsproblem* bis heute nicht in Sicht ist[98], dürfte dies nicht nur auf grundlegende wissenschafts- und erkenntnistheoretische Differenzen über den Status naturwissenschaftlicher und mathematischer Sätze zurückzuführen sein, sondern auch darauf, daß die ganz *unterschiedlichen* Funktionen, die die Mathematik in den empirischen Wissenschaften wahrnimmt, nicht hinreichend unterschieden wurden und werden.

Für das Folgende wird diese Frage wichtig. Dabei ist aber zu beachten, daß sich für die Klassische Mathematische Naturphilosophie (KMN) ein Anwendungsproblem in der üblicherweise vorgebrachten modernen Form — Warum ‚paßt' eine erfahrungsunabhängige, apriorische Mathematik auf die ganz anders geartete Welt der Erscheinungen? — nicht stellt und daher von *Funktionen*, die die Mathematik *für* die Wirklichkeitsbeschreibung wahrnimmt, nicht in dem Sinne die Rede sein kann, als ob es darum ginge, sich ein schon vorhandenes Instrument der Vernunft so zu Recht zu machen, daß es auf eine davon verschiedene Erfahrung *angewandt* werden könnte und vorab festliegende Anforderungen an eine Theorie der Erfahrung erfüllt werden könnten. Die *Geschichte* sieht anders aus:

Wie eingangs dargelegt, geht es der Mathematischen Naturphilosophie um die Aufdeckung allgemeinster und ‚fundamentaler' mathematischer Naturgesetze.[99] Diese Gesetze sind, unter der Voraussetzung des Mechanismus, zunächst Gesetze der *Bewegung* natürlicher Körper. Man kann daher das Charakteristikum neuzeitlicher Mechanik, sofern sie sich als eine umfassende Wissenschaft der *Natur* versteht und von der älteren Naturphilosophie abgrenzt, nicht prägnanter zum Ausdruck bringen, als dies Alexandre Koyré in Hinblick auf Galilei getan hat: „Bewegung gehorcht dem Gesetz der Zahl: damit war der aristotelische Einwand widerlegt".[100]

Den Vertretern der KMN ist bei allen ontologischen, erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Differenzen gemeinsam, daß sie *Bewegung* von vornherein als eine ma-

[96] Vgl. hierzu etwa Frey 1967, Körner 1968, Strubecker 1969, Ruzavin 1977, Hoyningen-Huene 1983, Davis/Hersh 1986, Röseberg 1991 und Thiel 1995.

[97] Stellvertretend sei hier verwiesen auf Eugene Wigner: „The first point is that the enormous usefulness of mathematics in the natural sciences is something bordering on the mysterious and that there is no rational explanation for it" (Wigner 1960, S. 223).

[98] Christian Thiel faßt eine längere Diskussion verschiedener Lösungsansätze des Anwendungsproblems treffend so zusammen: „Blicken wir zurück, so ist es wohl keine Übertreibung, wenn wir feststellen, daß das Problem des Verhältnisses von Mathematik und Wirklichkeit in der gegenwärtigen Philosophie der Mathematik von einer Lösung weit entfernt erscheint" (Thiel 1995, S. 47).

[99] Vgl. den Einleitungsteil.

[100] Koyré 1988, S. 48.

thematische Konzeption auffassen.[101] Galilei läßt am dritten Tage seiner *Discorsi* der berühmten Ankündigung „Ueber einen sehr alten Gegenstand bringen wir eine ganz neue Wissenschaft. Nichts ist älter in der Natur als die Bewegung [...]", sogleich das Gesetz folgen: „[...] soviel ich weiss, hat Niemand bewiesen, dass die vom fallenden Körper in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zu einander verhalten wie die ungeraden Zahlen"[102]; Descartes wendet sich gegen die traditionelle Nomenklatur, „all' das, was genau und scharf ist, als geometrisch, und all' das, was das nicht ist, als mechanisch" zu bezeichnen, und läßt in seiner neuen *Geometrie* alle Kurven zu, „die man sich beschrieben denken kann durch eine stetige Bewegung oder durch mehrere aufeinander folgende solche Bewegungen"[103]; Newton konstatiert im Vorwort seiner *Principia*: „[...] geometry is founded in mechanical practice, and is nothing but that part of universal mechanics which accurately proposes and demonstrates the art of measuring. But since the manual arts are chiefly employed in the moving of bodiese, it happens that geometry is commonly referred to their magnitude, and mechanics to their motion. In this sense rational mechanics will be the science of motions resulting from any forces whatsoever, and of the forces required to produce motions, accurately proposed and demonstrated"[104], und gründet weiter seine ganze Fluxionsrechnung auf den Bewegungsbegriff. Diese und andere Beispiele bedeuten uns, daß mit der KMN Bewegung zu einem grundlegenden mathematischen Konzept wird: Bewegung ist *mathematisch*, daher ist auch die Untersuchung ihrer Gesetze — rationale Mechanik, wie Newton sie nennt — zunächst und vor allem *Mathematik*.[105]

Die Rede von einer Mathematik, die auf Mechanik ‚angewandt' wird, geht daher historisch im wesentlichen an der Sache vorbei. Angemessener als die Unterscheidung *mathesis pura - mathesis* applicata ist die im 18. Jahrhundert auch anzutreffende Unterscheidung *mathesis pura - mathesis mixta*: Während die *mathesis pura* Beziehungen zwischen mathematischen Größen unabhängig von irgendwelchen Objekten untersucht,

[101] Und daher das Ideal entstehen konnte, alle *bewegungsbestimmenden* Faktoren seien selbst mathematisch bestimmbar.

[102] Galilei 1973, S. 140 (3. Tag).

[103] Descartes 1981, S. 20. Abweichend von Descartes' Auffassung wurden Archimedes' Spiralen, die durch eine Zusammensetzung gleichförmiger linearer und kreisförmiger Bewegungen konstruiert sind, in der älteren Geometrie gerade *nicht* als strikt geometrisch anerkannt (s. Tiles 1991, S. 12f.). Auch Galilei setzte sich mit diesem Problem auseinander (s. Drake 1978, insbes. S. 376-379 und 395-396).

[104] Newton 1934 I, S. XVII.

[105] Wie Dijksterhuis bemerkt: „[...] und zwar ist die klassische Mechanik mathematisch nicht nur in dem Sinne, daß sie sich der Hilfsmittel der Mathematik bedient, um Argumentationen, die sich zur Not auch in der gewöhnlichen Umgangssprache ausdrücken lassen könnten, kürzer und übersichtlicher wiederzugeben; sondern sie ist es in dem viel einschränkenderen Sinne, daß ihre fundamentalen Begriffe mathematische Begriffe sind, daß sie selbst eine Mathematik ist" (Dijksterhuis 1956, S. 555).

geht es der *mathesis mixta* um solche Größen und Größenbeziehungen, die *in* natürlichen, der Zählung und Messung zugänglichen Objekten angetroffen werden.[106] *Mathesis mixta* kann nicht in eine formale Struktur einerseits und einen physikalischen Anwendungsfall andererseits zerlegt werden, so daß erstere erst durch letzteren ‚interpretiert' werden müßte, um als wahr gelten zu können, sondern sie ist *als Mathematik* bereits wahr. Damit ist nicht gesagt, daß hier die Übereinstimmung von Kalkül und Erfahrung keine Rolle spielt, sondern vielmehr, daß diese Übereinstimmung keine eigentliche Verifikationsinstanz darstellt: Diskrepanzen verweisen auf fehlerhafte Beobachtungen oder auch auf fehlerhafte einzelne Rechnungsschritte, Übereinstimmungen bestätigen oder illustrieren in der Regel ‚nur' die von vornherein unterstellte Wahrheit der zugrunde gelegten mathematischen Sätze und Strukturen.

Ein zweiter Punkt ist von nicht minder großer Bedeutung: Erstmals erkennbar bereits im 17. Jahrhundert, in aller Klarheit hervortretend aber erst in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, betrifft die ‚Mathematizität' der Mechanik nicht nur den erkenntnistheoretischen Status einzelner Sätze, sondern den wissenschaftstheoretischen Status ganzer deduktiv organisierter Systeme, d.h. Theorien. Wenn es also der KMN um die Aufdeckung allgemeinster und ‚fundamentaler' mathematischer Naturgesetze geht und ihre wissenschaftstheoretische Analyse den axiomatischen Charakter solcher Gesetze zum Gegenstand hat, ist diese Analyse nicht nur an die Bedingungen gebunden, die die Ausbildung des neuzeitlichen Naturgesetzbegriffs überhaupt erst ermöglichten[107], sondern auch an die Ausbildung einer Praxis der mathematischen Physik, in der die systematische Ordnung solcher Gesetze zum Problem werden konnte. Galilei, Descartes, Leibniz und Huygens gehören zu den frühen Wissenschaftler-Philosophen, bei denen sich Ansätze einer deduktiven Organisation der Mechanik finden[108], aber erst in Newtons *Principia* wird diese, wie ich später deutlich machen werde, zu einem eigentlichen Problem und erst in Lagranges *Méchanique Analitique* zur Hauptaufgabe.

Sowohl als Teildisziplin einer *mathesis mixta* als auch aufgrund ihres Organisationscharakters werden für die rationale Mechanik im allgemeinen und ihre Sätze im beson-

[106] Vgl. etwa: „Mathematicks are commonly distinguished into pure and speculative, which consider quantity abstractedly; and mixed, which treat of magnitude as subsisting in material bodies, and consequently are interwoven every where with physical considerations. Mixed mathematics are very comprehensive; since to them may be referred Astronomy, Optics, Geography, Hydrostatics, Mechanics, Fortification, Navigation, etc. [...] „ (Encyclopaedia Britannica III, S. 30) Vgl. hierzu auch Bos 1980, S. 328f. und Daston 1988, S. 222-224.

[107] S. hierzu insbes. Kelsen 1941, Zilsel 1976, Krohn 1981 und Steinle 1995, i.w.S. auch Dijksterhuis 1956 und Maier 1938.

[108] Ich erwähne hier weder die früharistotelischen *Mechanischen Probleme* noch Archimedes' Beiträge zur Mechanik, da sie zur deduktiven Entwicklung einer umfassenden (d.h. ‚sub-' und ‚supralunare' Bereiche im Sinne von Aristoteles einschließenden) Mechanik als Wissenschaft von der *Natur* nicht unmittelbar beitragen. Zur antiken und mittelalterlichen Mechanik s. Clagett 1959, Dijksterhuis 1956, Krafft 1970, Maier 1938 und 1958.

deren erkenntnistheoretische Standardklassifizierungen von der Art ‚Empirismus-Rationalismus', ‚analytisch-synthetisch' und ‚a priori-a posteriori' zunehmend unbrauchbar[109]. Sie sind auch eher irreführend als hilfreich, um darzustellen, worin der *mathematische* Charakter der KMN liegt. Daher werde ich hier — erkenntnistheoretisch weitgehend ‚neutral' — nur von verschiedenen *Funktionen* sprechen, die die Mathematik für und innerhalb von Theorie wahrnimmt.

II.2.1 Funktionen der Mathematik

Systematisch lassen sich, in Anlehnung an die bisherige Diskussion klassischer Wissenschaft im allgemeinen und die AFE-Kennzeichnung aristotelischer Wissenschaft im besonderen, hauptsächlich drei Funktionen der Mathematik unterscheiden. Sie sollen im folgenden näher ausgeführt werden.

(a) Quantitative Erfassung von ‚Wesensallgemeinheiten': Der Mathematik wird ein privilegierter Erkenntniszugang zu den wesentlichen und (oder) allgemeinsten[110] Eigenschaften der Dinge eingeräumt. Die Beweglichkeit der Körper in einem ‚geometrisierten Raum' (A. Koyré) und durch eine ‚chronometrisierte Zeit', Cartesische undurchdringliche Ausdehnung, Lockes primäre Qualitäten, Leibnizsche ‚vis viva', Newtons ‚quantitas materiae' etc. sind solche Eigenschaften, die der mathematischen Bestimmung zugänglich sind und als je ‚letzte' Bestandteile einer theoretischen Erklärung der Naturphänomene angesehen werden. Wissenschaftstheoriegeschichtlich wirksam wird dabei primär *nicht* der jeweils unterstellte ontologische Status dieser Eigenschaften: Ob es sich, um an den zu Galileis Zeiten wieder aufflackernden Streit zwischen Platonikern und Aristotelikern anzuknüpfen[111], hier um ontologisch primäre Ideen handelt, die der Wissenschaftler nicht in einem empirischen Forschungsprozeß aufdek-

[109] Lakatos scheint, Bezug nehmend auf die zweitgenannte Begründung, als erster dieses Problem deutlich artikuliert zu haben (vgl. unten, Anm. 194).

[110] Wenn ich hier neben solchen Eigenschaften, die als *wesentlich* angesehen werden (in dem Sinne, daß bei ihrem gemeinsamen Vorhandensein notwendig von einem Körper bzw. einer Materie gesprochen werden muß), auch *allgemeinste* Eigenschaften aufnehme, ist dies eine Konzession an die Tatsache, daß es im 18. Jahrhundert als ein Problem angesehen wurde, einer ‚allgemeinsten' (d.h. allen Körpern ausnahmslos zukommenden) Eigenschaft auch das Attribut ‚wesentlich' zuzuschreiben, weil sich dieses Attribut traditionell auf einzelne Körper beziehen können muß. Der Begriff der Gravitation — einer ‚allgemeinsten' Eigenschaft im Sinne der Newtonschen Mechanik — ist aber nur sinnvoll anwendbar in bezug auf (mindestens) einen zweiten Körper. Newton selbst hat daher bereits zwischen allgemeinen und wesentlichen Eigenschaften unterschieden — eine Unterscheidung allerdings, die ich im Sinne seines Empirismus nicht für ‚wesentlich' halte: Wäre es denn sinnvoll, von allgemeinen oder wesentlichen Eigenschaften überhaupt nur in Hinblick auf einen *einzelnen* Körper zu sprechen?

[111] Vgl. Koyré 1988, insbes. S. 29-58.

ken muß, sondern an die er gleichsam nur zu ‚erinnern' braucht, oder ob es darum geht, ausgehend von bunten Sinneseindrücken in einem Prozeß der Analyse und Abstraktion sukzessive die Bestandteile der Wahrnehmung von Besonderheiten und ‚Zufälligkeiten' zu reinigen, um zu Abstrakta zu gelangen, denen selber zwar nur eine nachgeordnete Seinsweise zukommt, deren Beziehungen aber gleichwohl wesentliche Elemente der Realität zum Ausdruck bringen können, ist zweitrangig gegenüber der Tatsache, daß die Anwendung der Mathematik auf irreduzible quantitative Allgemeinbegriffe führt, ohne die eine theoretische Naturerklärung nicht möglich erscheint. In diesem (doppelten) Sinne handelt es sich bei ihnen um ‚essentielle' Begriffe. Geometrische Ausdehnung, Zeit und (faktisch) auch Masse bzw. Dichte werden in allen ausgearbeiteten Mechaniken des 17. und 18. Jahrhunderts als primäre quantitative Begriffe anerkannt, wenngleich unterschiedlich bestimmt. Alle Versuche hingegen, weitere primäre Begriffe, z.B. den der Kraft oder (modern gesprochen) den der Energie, einzuführen, waren Gegenstände von Grundlagenkontroversen, die z.T. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts andauerten.

In diesem Kontext wird, gerade mit Bezug auf Galilei, gelegentlich von einer „methodischen Wende hin zu einer Mathematisierung der Natur" gesprochen, die näher bestimmt wird als eine „Explikation des methodologischen Primats einer Theorie des Messens" [112]. In der Tat ist der Prozeß der ‚Meßbarmachung' der Natur aufgrund einer technischen Praxis, die sich in der Renaissance entwickelte, ein wichtiges Element der Ausbildung moderner Naturwissenschaft, er sollte jedoch nicht überbewertet und zu ‚dem' wesentlichen Element der KMN hypostasiert werden: Bis heute haben Philosophie- und Wissenschaftstheoriehistoriker nur partiell zur Kenntnis genommen, daß Meßpraxis und Meßtheorie nur einen relativ geringen Anteil an der Ausbildung der klassischen Mechanik haben. Diese ist hauptsächlich, im 18. Jahrhundert sogar fast ausschließlich, als eine Praxis metaphysisch gelenkter konzeptueller Entwürfe und deduktiver mathematischer Entwicklung zu kennzeichnen. Meßexperimente, wie sie etwa im Kontext der Überprüfung des Fallgesetzes, der Stoßgesetze und auch in der Kontinuums- und Hydromechanik zweifellos wichtig waren, sind für die rationale Mechanik *im ganzen* nicht wesentlich. Um dies am Beispiel Galilei festzumachen: Wenn seine Theorie ein Prototyp protophysikalischer (konstruktivistischer) Methodologie gewesen sein sollte[113], wie konnte er dann die Ansicht vertreten, die Natur operiere stets aufgrund „unwandelbarer Gesetze, die sie nie überschreitet", und es kümmere sie nicht, „ob die Gründe und Methoden ihres Handelns für den Menschen verständlich

[112] Mittelstraß 1995, S. 16 und 17.

[113] „Die Konzeption Galileis entspricht damit ziemlich genau der modernen semantischen Theorieauffassung, um meßtheoretische (‚operationale' oder ‚protophysikalische') Elemente erweitert, womöglich auch den Konzeptionen der Konstruktiven Wissenschaftstheorie" (ebd., S. 21; ausführlicher hierzu Mittelstraß 1970, insbes. S. 167-173).

sind oder nicht"[114]? Wichtiger als die meßtheoretische Seite des Mathematisierungsprozesses als Ausdruck einer ‚konstruktiven' Aneignung der Natur scheint mir — bei Galilei und erst recht in der späteren Entwicklung — der *mathematische Realismus* zu sein, der sich in den meisten Programmen neuzeitlicher Naturphilosophie — Bacon ist da eher die Ausnahme als die Regel — manifestiert. Die Methode soll hier tatsächlich der bereits als *mathematisch* unterstellten Natur folgen, nicht die Natur der Methode.[115]

(b) Entdeckung und Begründung *von Naturgesetzen als Prinzipien:* Die Prinzipien der KMN sind zuerst und vor allem weder normalsprachlich formulierte, empirisch gehaltvolle Aussagen noch metaphysische Festsetzungen, sondern mathematisch formulierte Sätze. Das heißt weder, daß sie nicht metaphysisch motiviert oder begründet sein können, noch, daß sie nicht empirisch gehaltvoll sind, sondern, daß sie in einer wesentlichen Hinsicht *mathematisch* sind und am Charakter anderer mathematischer Erkenntnis teilhaben: Als Prinzipien (oder ‚Axiome') sind sie allgemein, evident und notwendig. In der KMN ist die Mathematik *ein* Instrument der Entdeckung der allgemeinsten und fundamentalen Gesetzmäßigkeiten der Natur wie auch *eine* Begründungsinstanz der Allgemeinheit, Evidenz und Notwendigkeit dieser Gesetzmäßigkeiten. Dabei betone ich vorweg, daß es sich hier nicht um Gesetzeseigenschaften handelt, die in irgendeinem Sinne ‚absolut' zu bestimmen wären, sondern um Eigenschaften, die in die *Praxis* der mathematischen Physik eingehen und sich mit ihr entwickeln:

Während eine heuristische Funktion der Mathematik gewöhnlich als eine selbstverständliche Konsequenz des mathematischen Realismus verstanden wird — um das in den Zeichen der Mathematik geschriebene ‚Buch der Natur' lesen zu können, muß man zuerst diese Zeichen lernen und ihnen in den Naturphänomenen nachspüren —, erweist sich die Begründungsfunktion der Mathematik als wesentlich komplexer und voraussetzungsreicher und ist von metaphysischen und empirischen Argumentationen mit Begründungsabsicht nicht scharf abzugrenzen. In ‚erster Näherung' und generell läßt sich hierzu folgendes feststellen:

Evidenz kommt mathematischen Naturgesetzen in den frühen Programmen[116] der KMN bereits aufgrund ihrer besonderen mathematischen Darstellungsform zu. Damit meine ich zunächst ihre mathematische Gestalt schlechthin: Da mathematische Erkenntnis stets als höchstes Evidenzideal fungiert, findet mit der Formulierung mathematischer Naturgesetze ein — oft wenig reflektierter — ‚Evidenztransport' in die Na-

[114] „[...] ma, all'incontro essendo la natura inesorabile e immutabile e nulla curante che le sue recondite ragioni e modi d'operare sieno o non sieno eposti alla capacità de gli uomini, per lo che ella non trasgedisce mai i termini delle leggi imposteli" (Lettera a D. Benedetto Castelli, 21. Dez. 1613; *Opere* V, S. 283). Vgl. hierzu auch Burtt 1932, S. 64 und Drake 1978, insbes. S. 225.

[115] Vgl. im Gegensatz dazu nochmals Mittelstraß 1995, S. 16.

[116] Damit meine ich etwa die Zeit von Galilei bis zu Euler und d'Alembert, d.h. etwa bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts. Auf die Evidenzprobleme der späteren Mechanik gehe ich in Kap. III näher ein.

turphilosophie statt. Weiterhin beziehe ich ‚Evidenz' auf einen spezifischen Charakter der Naturgesetze der KMN: In die Gesetze gehen gerade jene quantitativen Begriffe ein, die die ‚Wesensallgemeinheiten' des jeweiligen Programms repräsentieren. Newtons *axiomata sive leges motus* beispielsweise enthalten die (nicht weiter reduziblen) Grundbegriffe Raum, Zeit, Kraft und Masse, denen sein naturphilosophisches Bild einer ‚Welt der Zentralkräfte' korrespondiert: Bewegung von Körpern mit Massen in einem absoluten Raum durch eine absolute Zeit unter dem Einfluß bewegungsverändernder Kräfte, die entlang der Verbindungsachsen der Körper wirken. Die Grundgesetze enthalten keine mathematischen Symbole, deren semantischer Gehalt erst mittelbar (durch Ableitungen oder Modellinterpretationen) erschlossen werden müßte. Dieses Charakteristikum ist keineswegs selbstverständlich, wie ein Blick auf die spätere mathematische Physik lehrt: Die Maxwellschen *Gleichungen* etwa — man läßt hier schon Vorsicht bei der Anwendung des Naturgesetzbegriffes walten — waren schon deshalb nicht in dem hier gemeinten Sinne evident, weil das Konzept des Verschiebungsstroms der weiteren theoretischen und empirischen Ausarbeitung bedurfte, bevor diese Gleichungen als ‚verstehbar', geschweige denn evident gelten konnten.

Es ist zu betonen, daß *Evidenz* mechanischer Prinzipien hier nicht ‚unmittelbar einleuchtend für jedermann' bedeutet — warum hätte es sonst von der theoretischen Mechanik der Griechen an zweier Jahrtausende bedurft, um das Trägheitsprinzip zu formulieren?[117] — sie ist vielmehr, wie bereits Ernst Mach feststellte, „ein Produkt des berufsmässigen gelehrten Denkens"[118]. Wie bei der Notwendigkeit, handelt es sich bei ihr um eine Eigenschaft, die sich mit der Praxis und Theorie der Wissenschaft entwikkelt, also nicht statisch, sondern dynamisch zu begreifen ist.[119] (Auch als historisch-deskriptiver Ausdruck wird ‚Evidenz' hier und im folgenden natürlich so gebraucht.)

[117] In diesem Sinne bemerkt bereits Ernst Mach: „Für von vornherein einleuchtend kann man gewiß einen Satz nicht halten, welcher erst seit so kurzer Zeit allgemein anerkannt ist" (Mach 1933, S. 262).

[118] Ebd., S. 263. Weiter heißt es bei Mach: „Die Illusion der axiomatischen Gewißheit üben dieselben [idealisierenden Ansichten] auch nur auf den *Gelehrten*, dessen ganzes gewohntes Gedankensystem durch eine Störung dieser Elemente seines Denkens in Unordnung gerät". Bereits Mach war klar, daß ein Konzept wie ‚Evidenz', angewandt auf eine wissenschaftliche Theorie, nur relativ zu der *scientific community*, die diese Theorie betreibt, gebraucht werden kann.

[119] „This may be seen even in the case of the axioms of geometry. These axioms are self-evident: but to *whom* are they self-evident? [...] To see the truth and necessity of geometrical axioms, we need geometrical culture. Therefore that any axioms are not evident without patient and continued study of the subject, does not disprove their necessity. Principles may be axiomatic and necessary, although they require time, and the progress of thought and of knowledge, to bring them to light. And axioms may be thus gradually brought to light by the progress of knowledge" (Whewell 1860, S. 347f.). Was William Whewell hier unter der Überschrift „Necessary truth is progressive" für die Geometrie reklamiert, will er auch auf die Mechanik angewandt

Die mathematische Darstellbarkeit gilt in der KMN auch als eine Voraussetzung der *Allgemeinheit* der Grundgesetze: Nur Gesetzmäßigkeiten, die einer mathematischen Darstellung fähig sind, können auch Anspruch darauf erheben, für alle Naturdinge und zu jeder Zeit zu gelten. Diese Feststellung ist zunächst tautologieverdächtig, könnte man doch — nach der eingangs vorgenommenen Begriffsanalyse — *ohne* mathematische Grundgesetze gar nicht von einer KMN sprechen. Sie enthält jedoch eine weitergehende Kennzeichnung des Verhältnisses von Erfahrung und Mathematik: Charakteristisch ist nämlich, daß die Analyse und erfolgreiche mathematische Darstellung weniger, für die jeweilige Naturphilosophie als paradigmatische Vorgänge — Galileis Fallbewegung, Descartes' und Huygens' Stoßprozesse etc. — ausreicht, um für *alle* Körper zu gelten, die den gleichen Bedingungen unterliegen. Als Leibniz feststellte, daß die *vis viva* beim elastischen Stoß und beim freien Fall (genauer gesagt: *während* des Fallprozesses) erhalten bleibt, stand für ihn bald außer Frage, daß es sich hier um ein allgemeines und sogar fundamentales Naturgesetz handelt. Die ‚kühne' Verallgemeinerung erfolgt auf dem Hintergrund einer Metaphysik — im Falle Leibniz' insbesondere einer Ontologie der Kräfte[120] —, die bereits ein konzeptuelles Gerüst für die Verallgemeinerung bereitstellt. In einer leicht paradox anmutenden Formulierung könnte man sagen, daß die Mathematik als eine Art ‚metaphysisch geleitete Induktionslogik' fungiert: Metaphysische Annahmen entscheiden darüber, welche Prozesse als ‚elementar' oder ‚grundlegend' anzusehen und welche Größenrelationen dabei primär ins Auge zu fassen sind, Beobachtung und experimentelle Erfahrung liefern diesbezügliche Daten. Diese werden auf ‚einfache' mathematischen Beziehungen hin analysiert und — im Erfolgsfall — *als mathematische Beziehungen* zu allgemeinen Gesetzen erhoben.

Über den bloßen Darstellungscharakter der Mathematik weit hinaus geht schließlich auch die Behauptung, in der KMN trage die Mathematik dazu bei, die *Notwendigkeit* von Gesetzen zu sichern. Zweierlei muß hier vorab betont werden, wenn diese Behauptung mit Anspruch auf Allgemeingültigkeit verbunden wird: Zum einen ist die Mathematik *ein*, aber keineswegs das einzige ‚Notwendigkeitssicherungsinstrument' — handelt es sich doch hier traditionell um eine Aufgabe der philosophischen, insbesondere der logischen Analyse. Zweitens spreche ich nicht von *der*, sondern von (jeweils) *einer* Gesetzesnotwendigkeit, zu der die Mathematik beiträgt. Es steht hier nämlich ein ganzes Spektrum von Bedeutungen in Rede, das von eher logisch-analytischen über aprioristische und ontologische (‚nomic necessity') bis hin zu ‚systemischen' Interpretatio-

wissen: „And the axioms of which the science of mechanics rests, that the cause is measured by the effects, that reaction is equal and opposite to action, and the like, — are not these evident to a mind cultivated by steady thought on such subjects? and do they not require such culture of the mind in order to see them? Are they not obscure or uncertain to those who are not so cultured, that is to common thinkers: to the general bulk of mankind? Thus then it requires the discipline of the science of mechanics to enable the mind to see the axioms of that science" (ebd., S. 348).

[120] Vgl. hierzu näher Stammel 1982.

nen reicht[121]. Diese zweifellos auch historisch komplexeste Seite der Gesetzesproblematik kann hier in ihren systematischen Aspekten nicht im einzelnen entwickelt werden.[122] In der schwächsten Form, in der Notwendigkeit hier zu verstehen ist, besagt die Forderung jedenfalls nicht mehr, als daß die in einem Gesetz ausgesagte Beziehung so und nur so sein kann, wie sie ausgesagt wird. Behauptet wird damit also eine weitere, *eindeutige Begründbarkeit* des Gesetzes. Diese Aussage trägt der in der KMN einhellig vertretenen Überzeugung Rechnung, daß Wahrheit und Allgemeinheit nicht hinreichend sind, um eine empirisch gehaltvolle Aussage bereits als Gesetz anzuerkennen.[123] Andererseits geht sie über das hinaus, was manche Vertreter der KMN ihren Gesetzen als ‚Surplus' gegenüber bloßer Wahrheit und Allgemeinheit zugestehen möchten: Nicht immer nämlich, insbesondere nicht bei ‚empiristischen' Vertretern der KMN, wird überhaupt explizit von Notwendigkeit gesprochen.[124] Überall aber werden den mathematischen Grundgesetzen Merkmale zugeschrieben, die einer Gesetzesnotwendigkeit auch im obigen, schwachen Sinne implizit sind: Sicherheit, ewige Gültigkeit, Unwiderlegbarkeit, kurz: *Infallibilität.*

Certismus in Hinblick auf einmal festgestellte Gesetze ist eines der wichtigsten Kennzeichen der KMN: Neue, unter gleichen Bedingungen gemachte Erfahrungen können mathematische Gesetze nicht widerlegen (falsifizieren), sondern allenfalls bestätigen. Hieraus resultiert eine scharfe Trennung von Gesetz und Einzelfall: Alles Zufällige, Kontingente wird zu einer Sache des Einzelnen und seiner Geschichte — mathematisch gesprochen, wird es, von der ‚eigentlichen' Gesetzesaussage abgetrennt, zu einer Angelegenheit der Anfangs- und Randbedingungen.

Notwendigkeit, angewandt auf Gesetze, die auf dem Hintergrund der jeweiligen Metaphysik als ‚fundamental' verstanden werden — etwa Descartes' Stoßgesetze, Newtons Axiome, Maupertuis' Prinzip der kleinsten Wirkung —, beinhaltet auch *Eindeutigkeit*: Bis auf (triviale) Umformungen sind es *diese und nur diese* mathematischen Gesetze, die nach dem Verständnis ihrer Verfechter eine Naturphilosophie als deduktives wissenschaftliches System etablieren können. In diesem Sinne kann man hier Notwendigkeit auch als die Seite des klassischen, ‚materialen' Wahrheitsbegriffs verste-

[121] Für einen ersten systematischen und historischen Überblick s. Buchdahl 1969, S. 13-61.

[122] Vgl. hierzu nur etwa die neueren Untersuchungen Armstrong 1983; Bigelow/Pargetter 1990; Carroll 1994 und die verschiedenen Beiträge in Weinert 1995a.

[123] Diese Ansicht ist auch heute noch dominierend; so weist z.B. auch Popper darauf hin, daß es „logisch unzureichend und intuitiv unbefriedigend" sei, „wenn die Naturgesetze einfach als streng allgemeine Sätze charakterisiert werden" (Popper 1982, S. 382), betont aber — im Unterschied etwa zu Kneale — den Unterschied von Naturnotwendigkeit und logischer Notwendigkeit (ebd., S. 383-385).

[124] Vgl. hierzu auch Teil 1.3, Anm. 54; zum ‚dynamischen' Charakter der hier in Rede stehenden Notwendigkeit auch oben Anm. 119.

hen, die den wissenschaftstheoretischen Monismus klassischer Wissenschaft begründet.[125]

Soweit ich im folgenden den Begriff nicht näher spezifiziere, wird Notwendigkeit der Prinzipien in der angedeuteten Interpretation — und somit gewissermaßen auch als historiographisches Konstrukt — gebraucht; Begründbarkeit, Eindeutigkeit und Infallibilität der Prinzipien können als dessen ‚Minimalcharakteristik' gelten. Ich behaupte allerdings, und dies verschafft dem Konstrukt einen (noch einzulösenden) Anspruch darauf, *historisch angemessen* zu sein, daß in *allen* KMN-Entwürfen diese drei Prinzipieneigenschaften unterstellt werden.

Wie sich zeigen wird, variiert die Rolle der Mathematik bei den expliziten und impliziten Notwendigkeitszuschreibungen erheblich, aber sie ist immer präsent. Um dies an einem der geläufigsten Prinzipien zu illustrieren: Von Leibniz bis Laplace wurde das Trägheitsprinzips oft ‚rationalistisch' mit Hilfe des Satzes vom zureichenden Grund begründet. Danach gibt es für einen Körper, auf den keine äußeren Kräfte einwirken, *keinen Grund*, sich eher nach links als nach rechts, eher langsamer oder schneller zu bewegen. Diese Argumentation macht ersichtlich von der impliziten Voraussetzung Gebrauch, daß die (euklidische) Gerade eine einfache, der ‚Natur' der Bewegung entsprechende Form darstellt. Ohne diese mathematische Fixierung ist der Satz vom zureichenden Grund offenbar selber ‚nicht zureichend', um die ihm zugedachte Begründungsfunktion wahrzunehmen — in der expliziten Begründungsargumentation taucht sie jedoch nicht auf, denn sie gilt als evident. Wenn die klassische Mechanik sich in ihrer Entwicklung immer auf eine besondere *Anschaulichkeit* ihrer Grundlagen berief und berufen konnte, handelt es sich oftmals um einen Rekurs auf solche *mathematische* ‚Selbstverständlichkeiten'.

(c) Ableitungssicherheit: Allgemeinste und fundamentale Gesetzmäßigkeiten heißen in der KMN deshalb gewöhnlich ‚Prinzipien' (oder gelegentlich ‚Axiome'), weil sie — und dies unterscheidet sie grundlegend von Bacons Axiomen — an der Spitze eines *deduktiven* Systems stehen. Eine weitere Hauptfunktion der Mathematik besteht nun darin, mit Hilfe sicherer Ableitungsregeln die Evidenz und Sicherheit der Prinzipien auf die nachgeordneten Gesetze zu übertragen, ja sie dadurch in gewissem Sinne überhaupt erst zu Gesetzen zu *machen*. Formal kann man hier die Mathematik als eine Art Erweiterung der aristotelischen Syllogistik[126] auffassen, da sie die Aufgabe privilegierter, alle erfahrungsbezogenen Instanzen weit übertreffender Wahrheitsvermittlung übernimmt.[127]

[125] Vgl. Teil 1.1, Diemers Wahrheitsvoraussetzung *(2)*.

[126] Zu Aristoteles' Anwendung der Syllogistik in der Mathematik vgl. Detel 1993, insbes. S. 173-182.

[127] Wie Galilei in den *Discorsi* Sagredo in den Mund legt: „Erstaunlich und entzückend ist die Macht zwingender Beweise, und so sind die mathematischen allein geartet. [...] das Verständnis des inneren Zusammenhangs wiegt unendlich viel mehr, als die einfache Versicherung Anderer,

Bei Descartes findet man die Sicherungsfunktion mathematischer Ableitungen besonders prägnant formuliert: Neben der ‚Klarheit und Deutlichkeit' fordert er von seinen naturphilosophischen Prinzipien auch, „daß die Erkenntnis der andern Dinge von ihnen derart abhängt, daß die Prinzipien zwar ohne daß jene bekannt sind erkannt werden können, die anderen Dinge aber nicht anders als durch die Prinzipien, und daß man demnach versuchen muß, aus diesen Prinzipien die Erkenntnis der davon abhängenden Dinge derart abzuleiten, daß es in der ganzen Kette der Deduktionen nichts gibt, das nicht sehr klar wäre".[128] Wie er an anderer Stelle deutlich macht, sind solche Deduktionen wesentlich mathematischer Art: Um nämlich die gewünschten Ableitungen auch nur nachvollziehen zu können, verlangt er, „daß meine Leser die ersten Elemente der Geometrie entweder schon kennen oder die nötige Fassungskraft für das Verständnis mathematischer Beweise haben"; nur dasjenige will er überhaupt als „wirklich anerkennen, was nicht aus jenen [geometrischen] Gemeinbegriffen, an deren Wahrheit man nicht zweifeln kann, so klar abgeleitet wird, daß es als mathematisch bewiesen gelten kann"[129].

Einige der wichtigsten Entwicklungen der Analysis des 18. Jahrhunderts, darunter die der Variationsrechnung, können in ihrer Entstehung und Entwicklung überhaupt nur verstanden werden, wenn man in Rechnung stellt, daß für die KMN der ‚Bau von sicheren Ableitungskanälen'[130] ein zentrales Erfordernis darstellt, nämlich um die Evidenz und Sicherheit der *Prinzipien* deduktiv weiter zu vermitteln. Dies ist ein durch und durch ‚klassischer' Zug der KMN: Während nämlich heute selbst für die sog. reine Mathematik mit guten Gründen die These vertreten werden kann, daß in ihren axiomatischen Systemen manchen abgeleiteten Sätzen größere Evidenz und sogar Sicherheit beizulegen ist als den Axiomen selber[131], dominiert in der KMN die Vorstellung, daß die ersten Prinzipien diesbezüglich nicht übertroffen werden können. Umgekehrt: Evidenz und Sicherheit nehmen eher ab, je weiter die Deduktionskette nach unten, hin zu speziellen Gesetzen und Einzelbeobachtungen, reicht — sie werden sozusagen verdünnt bzw. verunreinigt, je näher sie dem ‚trüben Gewässer' der Erfahrung kommen. Für den ‚Rationalisten' Descartes ist es schon deshalb *evident*, daß die Evidenz von

und selbst mehr als der häufig wiederholte Versuch" (Galilei 1973, S. 244; 3. Tag). Daß bei Galilei der aristotelische Syllogismus durch die Geometrie abgelöst wird, betont bereits Jardine 1976; vgl. in diesem Zusammenhang auch unten die Anm. 139.

[128] Descartes 1955, S. XXXII (Schreiben an Picot).

[129] Weiter heißt es: „Da nun auf diese Weise alle Naturerscheinungen erklärt werden können, wie das Folgende ergeben wird, so halte ich andere Prinzipien der Naturwissenschaft weder für zulässig noch für wünschenswert" (ebd., S. 63).

[130] Lakatos gebraucht das Bild der „sicheren wahrheitserhaltenden Kanäle" bei seiner Kennzeichnung des Euklidianismus (s. etwa Lakatos 1982 II, S. 27). Ich komme hierauf in Teil 2.4 zurück.

[131] Vgl. hierzu etwa Lakatos 1982 II und Kitcher 1984.

abgeleiteten Sätzen die der Prinzipien nicht übertreffen kann[132], weil das ‚Licht der Vernunft' zunächst die Prinzipien beleuchtet. Aber auch der ‚Empirist' Newton wird in der rationalen Mechanik zum Certisten und ‚Evidenzialisten', nämlich wenn es um seine *axiomata sive leges motus* geht.[133] Selbst für das Projekt einer noch zu etablierenden physikalischen Optik, die die theoretische Erklärung einer bloß ‚sekundären' Qualität (im Sinne Lockes) wie der Farbe zum Gegenstand hat, vertritt er mit Blick auf die Reichweite der Mathematik eine — wenngleich abgeschwächte — Version dieses Grundsatzes: „[...] the absolute certainty of a Science cannot exceed the certainty of its Principles".[134] Die *Mathematik* muß Sorge tragen, daß das ganze System von der Evidenz und Sicherheit der Prinzipien profitiert.

[132] Vgl. etwa: „Nun können aber niemals Schlußfolgerungen aus einem nicht evidenten Prinzip selbst evident sein, wenn sie auch auf noch so evidente Weise daraus abgeleitet worden sind" (Descartes 1955, S. XXXVII; Schreiben an Picot). Längere Ableitungen bergen bei Descartes auch deshalb die Gefahr der Unsicherheit, weil sie nicht gleichzeitig in unserem Verstand repräsentiert werden können.

[133] Vgl. hierzu Kap. III, Teil 1.

[134] Brief an Oldenburg vom 11. Juni 1672 (Newton *Correspondence* I, S. 187). Die Stellungnahme des frühen Newton verdient eine ausführlichere Wiedergabe, weil hier für die Theorie der Farben — zur Mechanik vgl. Kap. III.1 — die Hoffnung auf eine ‚mathematische Sicherheit' zum Ausdruck kommt, wie sie bis dahin nur die „Optiques" (gemeint ist die quasigeometrische Strahlenoptik, eine der ‚klassischen' mathematischen Wissenschaften im Sinne Kuhns) kannte: „In the last place I should take notice of a casuall expression wch intimates a greater certainty in these things then I ever promised, viz: The certainty of *Mathematicall Demonstrations*. I said indeed that the *Science of Colours was Mathematicall & as certain as any other part of Optiques*; but who knows not that Optiques & many other Mathematicall Sciences depend as well on Physicall Principles as on Mathematicall Demonstrations: And the absolute certainty of a Science cannot exceed the certainty of its Principles. Now the evidence by wch I asserted the Propositions of colours is in the next words expressed to be from *Experiments* & so but *Physicall*: Whence the Propositions themselves can be esteemed no more then *Physicall Principles* of a Science. And if those Principles be such that on them a Mathematician may determin all the Phenomena of colours that can be caused by refractions, & that by computing or demonstrating after what manner & how much those refractions do separate or mingle the rays in wch severall colours are originally inherent; I suppose the *Science of Colours* will be granted *Mathematicall* & as certain as any part of *Optiques*. And that this may be done I have good reason to believe, because ever since I became first acquainted with these Principles, I have with constant success in the events made use of them for this purpose" (ebd., S. 187f.). In dieser Bemerkung, die Teil einer längeren Erwiderung auf eine Kritik Robert Hookes an Newtons früher Theorie der Farbe ist, kommt m.E. beispielhaft zum Ausdruck, daß auch eine Wissenschaft mit Prinzipien „from *Experiments* & so but Physicall" aufgrund ihres *mathematischen Ableitungscharakters* mathematische Sicherheit erhält, wenn diese Ableitungen sich empirisch bewahrheiten lassen — nichts anderes bringt die Formulierung „granted *Mathematicall* & as certain as any part of *Optiques*" zum Ausdruck, da die geometrische Optik zu Newtons Zeit als Mathematik galt. Ich teile nicht die von I. Bernard Cohen vertretene Ansicht, wonach es sich bei einer Stellungnahme wie dieser

Setzt man die hier angestellten Überlegungen zu den Funktionen der Mathematik in Beziehung zu den früheren Charakterisierungen klassischer und Baconscher Wissenschaft, liegt es nahe zu sagen, daß es die Mathematik ist, die der Baconschen Wissenschaft fehlt, um als *klassisch* im eingangs beschriebenen Sinne gelten zu können. In der KMN wird sozusagen das ‚K' durch das ‚M' trotz des ‚N' induziert: Wenn mathematische Evidenz, Notwendigkeit und Ableitungssicherheit zu der (überall unverzichtbaren) Erfahrung hinzutreten, ist es möglich, zu ‚wirklicher' Erkenntnis von der Natur, *episteme* im Sinne von Aristoteles, zu gelangen.

Galileis Kritik an William Gilberts *De magnete* kann als musterhafter Ausdruck dieser im 17. Jahrhundert sich anbahnenden Überzeugung verstanden werden. Er erkennt die ‚Baconsche Bemühungen' Gilberts uneingeschränkt an („[...] des höchsten Lobes wert wegen der zahlreichen neuen und zutreffenden Beobachtungen, die er anstellte zur Beschämung so manches lügenhaften, eitelen Autors [...]"); aber ebenso deutlich benennt Galilei im *Dialogo* einen entscheidenden Mangel, bei dem es, wie er an anderer Stelle bemerkt, um nichts geringeres geht als darum, daß „die Wahrheit, deren Erkenntnis durch die mathematischen Beweise vermittelt wird dieselbe ist, welche die göttliche Weisheit erkennt [...]"[135]. An dieser Wahrheit mangelt es nämlich einer Baconschen Wissenschaft, wie sie durch *De magnete* repräsentiert wird. Im *Dialogo* heißt es hierzu:[136]

> Eines vermisse ich allerdings bei *Gilbert*, er hätte etwas mehr Mathematiker und namentlich in der Geometrie gut beschlagen sein sollen. Die Vertrautheit mit ihr würde ihn nicht so entschieden als zwingende Beweise die Gründe ansehen lassen, welche er als wahre Ursachen der von ihm beobachteten richtigen Thatsachen bezeichnet. Diese Gründe haben, offen gesagt, nicht das Unwidersprechliche und Zwingende, wie das bei naturwissenschaftlichen, ewig notwendigen Gegenständen unbedingt möglich sein muß. Ich bezweifle nicht, daß mit der Zeit dieser neue Wissenszweig teils infolge neu hinzukommender Beobachtungen, ganz besonders aber rücksichtlich strenger und zwingender Beweismethoden Fortschritte machen wird.

um einen für Newton eigentlich untypischen, überzogenen Mathematisierungsanspruch handelt (vgl. Cohen 1982, S. 139f.), wie ich Cohens Interpretation der Rolle der Mathematik bei Newton insgesamt nicht teile; s. hierzu näher Kap. III, Teil 1.

[135] „[...] allerdings aber will ich Euch zugeben, daß die Art und Weise, wie Gott die zahllosen Wahrheiten erkennt, von denen wir nur einige wenige kennen, hoch erhaben über unsere Weise ist. Wir gehen mittels schrittweiser Erörterung weiter von Schluß zu Schluß, während er durch bloße Anschauung begreift" (Galilei 1891, S. 109; 1. Tag)

[136] Ebd., S. 424f. (3. Tag).

II.2.2 Eine AFE-Charakterisierung der KMN

Die gerade angedeutete These, die Mathematik ‚mache' neuzeitliche Naturphilosophie faktisch zu einer *klassischen* Wissenschaft im eingangs beschriebenen Sinne, ist aus *aristotelischer* Perspektive mehr als gewagt, nämlich unhaltbar: Zwar dient die Mathematik, wie oft bemerkt worden ist, aufgrund ihrer Evidenz, ihrer Sicherheit und ihres demonstrativen Charakters unbestreitbar als Leitdisziplin der aristotelischen Wissenschaftstheorie.[137] Gerade für Aristoteles steht es jedoch außer Frage, daß die mathematische Methode ungeeignet ist, die Natur zu erfassen: „Die genaue Schärfe der Mathematik aber darf man nicht für alle Gegenstände fordern, sondern nur für die stofflosen. Darum paßt diese Weise nicht für die Wissenschaft der Natur, denn alle Natur ist wohl mit Stoff verbunden".[138]

Aber die hier eingenommene Perspektive ist *keine* aristotelische: Es geht nicht darum, Aristoteles' Verständnis der Beziehung von Mathematik und Naturwissenschaft zum Maßstab des ‚Klassischen' zu machen, denn dann gäbe es keine moderne Naturwissenschaft, die begründet ‚klassisch' zu nennen wäre. Vielmehr geht es darum, zu zeigen, daß die heute als überwunden geltende aristotelische Auffassung von Wissenschaft als einem axiomatischen, fundamentalistischen und essentialistischen Unternehmen (AFE) in der KMN gerade aufgrund ihres *mathematischen* Charakters bis ins 19. Jahrhundert hinein tradiert werden konnte. Dies impliziert allerdings die Aufgabe einer Unterscheidung, die bei Aristoteles selbst wichtig ist, von den Aristoteles-Kommentatoren gleichwohl häufig verwischt wurde und die in der KMN keine Rolle mehr spielt: die Unterscheidung von *Beweis* als Frage nach dem „Daß" (*quia*) einerseits und erklärender Demonstration (kurz: *Erklärung*) als Frage nach dem „Warum" (*propter quid*) andererseits[139]. Die mathematischen Prinzipien der KMN dienen nicht nur als Beweis-, sondern auch als Erklärungsprämissen im aristotelischen Sinne.[140]

[137] S. z.B. Diemer 1964, S. 27.

[138] Met. II 3, 995a (Aristoteles *Schriften* V, S. 40).

[139] „Wir fragen aber, wenn wir nach dem Daß oder darnach, ob etwas schlechthin ist, fragen, *ob es* dafür einen Mittelbegriff gibt oder nicht gibt. Wenn wir aber entweder das Daß, oder ob etwas teilweise oder schlechthin ist, erkannt haben und dann wieder nach dem Warum oder nach dem Was ist es fragen, dann fragen wir, *welches* der Mittelbegriff ist. [...] Mithin folgt, daß man bei allen Fragen fragt, entweder ob ein Mittleres ist, oder welches das Mittlere ist. Denn das Mittlere ist die Ursache, nach ihr aber fragt man bei allem" (*Zweite Analytik* II.2, 89b-90a, vgl. auch I.13, II.3 und II.11; Aristoteles *Schriften* I, S. 70 bzw. S. 28-31, 71-74 und 85-88). Man kann die hier von Aristoteles vorgenommene Unterscheidung so ausdrücken, daß sowohl Beweis als auch Erklärung insofern *begründetes* Wissen liefern, als es sich bei ihnen um deduktive Verfahren handelt. Während die Erklärung sich jedoch in ihren Prämissen ursächlichen Wissens — im Sinne der aristotelischen Lehre von den vier Ursachen — bedient, ist dies beim Beweis nicht der Fall, insofern handelt es sich hier um eine defizitäre Begründungsform. (Eine ausführliche Diskussion hierzu führt Detel 1993 II, S. 278-309, 553-577 und 684-716).

Eine AFE-Kennzeichnung der KMN hat weiter darauf Rücksicht zu nehmen, daß ihr Wissen nicht nur eine *cognitio ex principiis* ist, sondern dem Anspruch nach auch eine *cognitio principiorum* beinhalten kann, wenn auch nicht muß. Bereits Descartes hat einen solchen Anspruch erhoben[141], und im älteren Induktivismus wird vollends klar, daß nicht nur die Kenntnis aus sicheren Prinzipien, sondern die Erkenntnis dieser Prinzipien selber geradezu als *Abschluß* der Wissenschaft betrachtet wird. Eine solche ‚Prinzipienvereinnahmung' durch die Wissenschaft (und gegen die Philosophie) wirft

Der Punkt ist von großer Bedeutung für Aristoteles' Beurteilung der Beziehung von Natur und Mathematik: Bekanntlich hat er ja in Gestalt der ‚klassischen Wissenschaften' (im Sinne Kuhns) Mechanik, Optik, Astronomie und Harmonik der Mathematik sehr wohl eine gewisse Bedeutung für die Erklärung solcher Entitäten zugestanden, die wir heute als ‚natürlich' bezeichnen. Die Beziehung von Wahrnehmung und Mathematik bestimmt er hier jeweils (d.h. im Rahmen ein und derselben Wissenschaft) so: „Hier nämlich ist es Sache der Wahrnehmenden das Daß und Sache der Mathematiker das Warum zu wissen. Denn diese besitzen die [Demonstrationen] aus den Gründen und wissen oft das Daß nicht, ebenso wie solche, die nur das Allgemeine betrachten, oft manches Einzelne wegen mangelnder Aufmerksamkeit nicht wissen. Das sind aber die Wissenschaften, die, obwohl sie der Substanz nach von der Mathematik verschieden sind, von ihr die Formalursachen übernehmen" (*Zweite Analytik* I.13, 79a; Aristoteles *Schriften* I, S. 30. Im zitierten Text wurde „Beweis" durch den — nach Detels Übersetzung zutreffenderen — Begriff „Demonstration" ersetzt). Hier gerät die Mathematik offenbar in die Lage einer *erklärenden*, aber *nicht beweisenden* Wissenschaft, weil sie Wissen der Formalursachen hat, aber das ‚Daß' nicht kennt, während z.B. Mechanik oder Optik als solche (immer genommen zu Aristoteles' Zeit) zwar im weiteren Sinne *demonstrativ* sind, weil in ihnen Theoreme aus Prinzipien abgeleitet werden, auch *beweisend*, weil sie ein ‚Daß' feststellen, aber *nicht erklärend*. Das scheinbar Paradoxe dieses Verhältnisses — die Mathematik erklärt, aber beweist nicht, die ‚Physik' beweist, aber erklärt nicht — beruht aber auf einer ‚modernisierenden' Interpretation: Tatsächlich müssen Mechanik, Optik etc. bei Aristoteles per se als mathematische Disziplinen aufgefaßt werden, die bereits von *mathematischen Abstraktionen* handeln. ‚Mathematik' (sofern sie innerhalb einer dieser Wissenschaften operiert) ist lediglich durch einen höheren Abstraktionsgrad, durch weitestgehendes Absehen von physikalischen Eigenschaften, gekennzeichnet. Detel faßt dies treffend so zusammen: „Für Aristoteles gibt es demnach keine mathematische Naturwissenschaft, wohl aber physikalische Mathematik. Mit diesem Unterschied ist die aristotelische Überzeugung bezeichnet, daß die Mathematik die wirklich komplexen Verhältnisse, die eigentliche oder ‚wesentliche' Natur physikalischer Dinge nicht erfassen kann — denn mathematische Eigenschaften kommen physikalischen Dingen nicht an sich oder ‚wesentlich', sondern nur potentiell zu [...]" (Detel 1993 II, S. 307). Demgegenüber ist die Überzeugung wichtiger Vertreter der KMN gerade, daß mathematische Eigenschaften ‚Wesensmerkmale' sind und daß daher mathematische Prinzipien nicht nur als Prämissen von Beweisen, sondern auch von Erklärungen zugelassen werden können oder sogar müssen (Für das Beispiel Galilei wird dies belegt in Fehér 1982). Für die KMN wird die Unterscheidung von Beweis und Erklärung daher gegenstandslos.

[140] Daß diese Doppelfunktion zu Problemen führt, werde ich im Zusammenhang mit Lagrange näher ausführen, s. Kap. II, Teil 4.

[141] Vgl. Diemer 1968b, S. 17-21, insbes. 19.

natürlich das Problem einer adäquaten, weder zirkulären noch willkürlich-dogmatischen noch überhaupt fehlenden Prinzipienbegründung auf. Man kann die begründungstheoretische Analyse dieses Problems, wie sie Hans Albert unter dem Begriff ‚Münchhausen-Trilemma' durchgeführt hat, geradezu als *Klassifikationsschema* verschiedener KMN-Typen benutzen.[142] Zunächst geht es jedoch darum, die KMN ohne Rücksicht auf dieses Begründungsproblem zu kennzeichnen. Mein AFE-Vorschlag hierzu lautet:[143]

> Eine KMN-Wissenschaft W* zielt ab auf die Entdeckung von mathematischen Prinzipien, die
> *(i*)* alle Theoreme von W* logisch implizieren und den logischen Gehalt von W* in Gestalt weniger Axiome komprimieren sowie zur Erklärung aller Beobachtungen in W* notwendig sind;
> *(ii*)* innerhalb oder außerhalb von W* argumentativ begründet werden können und müssen;
> *(iii*)* durch Induktion oder (und) Intuition erfaßt werden können und müssen;
> *(iv*)* immer wahr sind;
> *(v*)* sich auf ontologisch notwendige Strukturen oder Essenzen bzw. Allgemeinheiten im Gegenstandsbereich von W* beziehen;

[142] „Wenn man für *alles* eine Begründung verlangt, muß man auch für die Erkenntnisse, auf die man jeweils die zu begründende Auffassung — bzw. die betreffende Aussagen-Menge — zurückgeführt hat, wieder eine Begründung verlangen. Das führt zu einer Situation mit drei Alternativen, die alle drei unakzeptabel erscheinen, also: zu einem Trilemma, das ich [...] *das Münchhausen-Trilemma* nennen möchte. Man hat hier offenbar nämlich nur die Wahl zwischen:

1. einem *infiniten Regreß*, der durch die Notwendigkeit gegeben erscheint, in der Suche nach Gründen immer weiter zurückzugehen, der aber praktisch nicht durchzuführen ist und daher keine sichere Grundlage liefert;

2. einem *logischen Zirkel* in der Deduktion, der dadurch entsteht, daß man im Begründungsverfahren auf Aussagen zurückgreift, die vorher schon als begründungsbedürftig aufgetreten waren, und der ebenfalls zu keiner sicheren Grundlage führt; und schließlich:

3. einem *Abbruch des Verfahrens* an einem bestimmten Punkt, der zwar prinzipiell durchführbar erscheint, aber eine willkürliche Suspendierung des Prinzips der zureichenden Begründung involvieren würde" (Albert 1991, S. 15; zu Vorläufern dieser Unterscheidung vgl. ebd., S. 15-17, Anm. 7-9).

Wendet man dieses Trilemma auf die diversen Begründungsversuche mechanischer Prinzipien an, kann man die erste Möglichkeit (trivialerweise) historisch nicht belegen, die zweite Möglichkeit mit den ‚rationalistischen' Begründungsvarianten, etwa bei Descartes und Leibniz, in Verbindung bringen und die dritte Möglichkeit in zahlreichen ‚empiristischen' Begründungsversuchen des 18. und 19. Jahrhunderts nachweisen; s. hierzu auch Kap. III.

[143] Wenn ich hier von ‚einer' KMN-Wissenschaft spreche und somit die Möglichkeit verschiedener KMN-Wissenschaften andeute, ist dies nicht ‚immanent', d.h. aus KMN-Perspektive, zu verstehen, weil diese nicht die Möglichkeit alternativer Entwürfe kennt (Eindeutigkeit der Prinzipien, s.o.), sondern historisch deskriptiv: Es *hat* verschiedene Programme gegeben, eine KMN-Wissenschaft zu realisieren.

(vi)* auf kausale, naturgesetzliche Relationen in der Welt verweisen.

Offenkundig und keineswegs zufällig macht dieser Versuch mehr Anleihen bei der früheren AFE-Charakterisierung der aristotelischen als bei der Kennzeichnung der Baconschen Wissenschaft — es handelt sich gewissermaßen um eine ‚Anreicherung' der aristotelischen Wissenschaftsauffassung mit (zusätzlichen) induktivistischen Elementen: In *(i*)* trägt der Zusatz „sowie ..." der Forderung Rechnung, daß die Prinzipien (genauer: zumindest eines von ihnen) bei einer zureichenden Erklärung jedes einzelnen Phänomens, das in W* vorkommt, beteiligt sein müssen (bzw. muß). Der Zusatz läßt offen, ob bei einer solchen Erklärung auch andere Gesetze, die nicht Prinzipien sind, im konkreten Fall beteiligt sind.[144] *(ii*)* und *(iii*)* lassen sowohl empiristische als auch metaphysische Prinzipienbegründungen bzw. Wege der Prinzipienerkenntnis zu. *(iv*)* bringt unverändert den Certismus der KMN auf seiner wesentlichen, nämlich der ‚prinzipiellen' Ebene, zum Ausdruck. *(v*)* und *(vi*)* schließlich modifizieren den aristotelischen Essentialismus insofern, als sich die Prinzipien der KMN über ggf. unterstellte Essenzen hinaus auch auf ‚allgemeinste' Eigenschaften der Körper, die in W* untersucht werden, beziehen können. Dies mag zunächst als eine gravierende Veränderung der AFE-Charakterisierung erscheinen, ist jedoch, wie die historische Analyse zeigt, faktisch nicht folgenreich für das Wissenschaftsverständnis der KMN, d.h. es verändert nicht den wissenschaftstheoretischen Status der Grundgesetze. Ich halte daher für die KMN an dem Attribut ‚essentialistisch' fest.[145]

Man kann die bisherige, immer noch recht grobe Kennzeichnung verfeinern, indem man weitere Charakteristika expliziert, die der AFE-Kennzeichnung immanent sind:

[144] Solche Gesetze dürfen jedoch nicht bei *allen* Einzelerklärungen in W* beteiligt sein, ohne Prinzipien zu sein. Die Newtonsche Mechanik beispielsweise formuliert als Prinzipien die drei *axiomata sive leges motus*. Das Gravitationsgesetz muß zu diesen Prinzipien hinzutreten, um in der Himmelsmechanik Beobachtungen erklären zu können — es verschafft der Newtonschen Mechanik sozusagen ihren paradigmatischen Anwendungsbereich. Auch wenn Newton es faktisch als Axiom behandelt (vgl. Kap. III, Teil 1), ist es im Rahmen des Newtonschen Programms nur *ein* Kraftgesetz, das in bestimmten Anwendungsfällen (etwa der Optik, der Kapillarität etc.) durch ein *anderes* Kraftgesetz ersetzt werden könnte. Anders als Newtons Definitionen und Axiome handelt es sich also beim Gravitationsgesetz nicht um ein Prinzip im hier gemeinten Sinne.

[145] Im fraglichen, die KMN betreffenden Zeitraum wird die essentialistische Lehre, *„daß die Wissenschaft eine endgültige Erklärung anstrebt*; das heißt eine Erklärung, die (essentiell oder ihrer reinen Natur nach) nicht weiter erklärt werden kann und die auch keiner weiteren Erklärung bedarf" (Popper 1994/1997 I, S. 151), zwar gelegentlich in Frage gestellt, aber die Unterscheidung von ‚Essenzen' und ‚allgemeinsten Eigenschaften' begründet *keinen* unterschiedlichen wissenschaftstheoretischen Status der mit ihnen korrespondierenden Gesetze: Newton, den Popper selbst mit Recht dem Essentialismus zurechnet (ebd., S. 155), sah letztlich seine Versuche als mißlungen an, die Gravitation (vgl. auch Teil 2.1, Anm. 76) nicht nur als eine allgemeine, sondern auch als eine wesentliche Eigenschaft der Materie zu erweisen. Sein Gravitationsgesetz hatte jedoch für ihn die gleiche Sicherheit wie seine *axiomata*.

etwa die Annahme der logischen ‚Isolierbarkeit' der verschiedenen Prinzipien einer KMN-Wissenschaft[146] oder die implizite ‚metatheoretische Invarianzforderung', wonach der Status eines Prinzips — z.B. empirisch gehaltvolles und prüfbares Axiom oder materiale Definition[147] — ein für allemal festliegen muß. Auch könnte man hier solche Wissenschaftskriterien, die in die AFE-Kennzeichnung nicht direkt eingehen, diskutieren, wie etwa die *Exaktheit*. Es wäre ja ein Irrtum zu glauben, daß die Forderung nach *Exaktheit* — im Sinne einer möglichst genauen Übereinstimmung von theoretischen Aussagen mit Beobachtungen bzw. Messungen — in der KMN per se einen größeren Stellenwert gehabt hätte als in der früheren Naturphilosophie und als ob ihre ‚Mathematizität' gleichsam als Garant für die automatische Erfüllung dieser Forderung verstanden worden wäre: Galilei weist nicht ohne Grund auf das Problem hin, „dass die Unvollkommenheit der Materie [...] die schärfsten mathematischen Beweise zuschande machen kann"[148]. Es sind nicht einfach ‚höhere' Exaktheitsmaßstäbe typisch für die KMN, sondern eher ein ‚theoriekonstitutiver' Verzicht auf Exaktheit[149], genauer gesagt: die Entscheidung, fehlende Exaktheit eher zu einem Problem der Beobachtung als der Theorie zu machen.[150]

Diese und andere Verfeinerungen sind wichtig und dürfen im Laufe der Untersuchung nicht vernachlässigt werden, sie scheinen mir jedoch gegenüber der vorgeschla-

[146] Bedarf eine Wissenschaft W* *mehrerer* Prinzipien, ist es ja logisch kein Problem, diese durch Konjunktion zu ‚einem' Prinzip zusammenzufassen. Ein solcher Gedanke ist der klassischen Wissenschaftsauffassung jedoch fremd, weil er nicht dem materialen Wahrheitsbegriff entspricht: Danach strömen sozusagen verschiedene Wahrheiten aus verschiedenen ‚Kanälen' in das System hinein.

[147] Z.B. wurde das zweite Newtonsche Bewegungsgesetz $F = ma$ in der Geschichte der Mechanik meist im ersten Sinne verstanden, so auch von Newton selbst. D'Alembert, Kirchhoff und andere vertraten hingegen die Auffassung, es handle sich hier um eine bloße Definition, nämlich die der Kraft. Während heute gute Gründe dafür vorgebracht werden können, der gleichen symbolischen Darstellung in verschiedenen Kontexten auch verschiedenen wissenschaftstheoretischen Status zuzuschreiben — Gesetz, Definition, abgeleitetes Theorem (vgl. etwa Hanson 1958, Giere 1988) —, ist nach ‚klassischer' Auffassung eine Festlegung auf eine dieser Möglichkeiten zwingend.

[148] Galilei 1973, S. 4.

[149] Anneliese Maier grenzt scholastische und neuzeitliche Naturwissenschaft in Hinblick auf die Forderung nach Exaktheit so voneinander ab: „Ein Rechnen mit ungefähren Maßen, d.h. mit Näherungswerten, mit Fehlergrenzen und vernachlässigbaren Größen, wie es der späteren Physik selbstverständlich wurde, wäre den scholastischen Philosophen als ein schwerer Verstoß gegen die Würde der Wissenschaft erschienen. So sind sie an der Schwelle einer eigentlichen, messenden Physik stehengeblieben, ohne sie zu überschreiten, — letzten Endes, weil sie sich nicht zu dem Verzicht auf Exaktheit entschließen konnten, der allein eine exakte Naturwissenschaft möglich macht" (Maier 1955, S. 402). Für eine allgemeinere Untersuchung zum Begriff des Exakten s. König 1966.

[150] Vgl. hierzu auch den folgenden Teil 2.3.

genen AFE-Kennzeichnung zweitrangig zu sein, zum Teil ergeben sie sich aus ihr. Statt solche Fragen bereits hier zu verfolgen, erscheint es mir sinnvoller, die bisher vorwiegend formale Kennzeichnung der KMN durch ein Beispiel zu illustrieren.

II.2.3 Laplacesche Wissenschaft: Eine kleine Dämonologie

Die bisherige AFE-Kennzeichnung der KMN widerspricht offenbar eklatant der Auffassung, die hypothetisch-deduktive Methode sei der „Kern neuzeitlicher Wissenschaft“[151] — jedenfalls dann, wenn der Beginn neuzeitlicher Wissenschaft im 17. Jahrhundert gesehen wird und die Zeit der Aufklärung wie selbstverständlich umfaßt. Was aber wäre die Neuzeit *ohne* die Aufklärung? Bevor das Wissenschaftsideal der KMN weiter präzisiert wird, ist es sinnvoll, die ‚historische Realität' der KMN — eine Artikulation praktizierter Wissenschaft, die diesem Ideal folgt — vorzustellen. Das folgende, m.E. oft fehlgedeutete Beispiel liefert eine aufschlußreiche Selbstinterpretation der KMN, als diese ihren Zenit erreicht hatte:

Laplace führt am Ende des 18. Jahrhunderts die Figur einer übermenschlichen „intelligence“ ein, in der die Grundidee des klassischen Mechanismus wohl in ihrer plastischsten Form zum Ausdruck gebracht ist.[152] Erst in unserem Jahrhundert wird diese Intelligenz auch als ‚Laplacescher *Dämon*'[153] bezeichnet — eine Metapher, die die

[151] Böhme 1980, S. 84. Daß insbesondere Galilei, der in der empiristischen Geschichtsschreibung häufig als Paradebeispiel hypothetisch-deduktiver Vorgehensweise der Physik herhalten mußte, mit seiner Methode *ex suppositione* diesem Schema in der Tat *nicht* folgt, zeigt bereits Wallace 1992.

[152] Der *locus classicus* dieses Laplaceschen Geistes ist der *Essai philosophique sur les probabilités*, der als Einleitung zur zweiten Auflage der *Théorie analytique des probabilités* von 1814 veröffentlicht wurde (s. Laplace 1820 bzw. 1932). Die Figur findet sich allerdings schon ‚präformiert' bei d'Alembert und Leibniz (vgl. Du Bois-Reymond 1903, S. 9) und läßt sich auch bei Laplace selbst bis auf das Jahr 1773 zurückverfolgen (Laplace 1773, S. 144f.; vgl. auch Laplace 1783).

[153] Jürgen Mittelstraß führt diese Bezeichnung auf E. Du Bois-Reymonds berühmte Rede *Über die Grenzen des Naturerkennens* von 1872 zurück, auf die ich noch eingehen werde (s. Mittelstraß 1984, S. 540). Dort aber ist durchgängig ‚nur' vom „Laplace'schen Geist“ die Rede (Du Bois-Reymond 1903, insbes. S. 12). Ferdinand Fellmann bemerkt in einem neueren Aufsatz über *Wissenschaft als Beschreibung* zutreffend, die „Fiktion des Laplaceschen Geistes“ sei „in den letzten Jahrzehnten häufiger ‚Laplacescher Dämon' genannt“ worden (Fellmann 1974, S. 227). In der Tat ist diese Bezeichnung inzwischen ins Allgemeingut übergegangen, womit allerdings die Frage nach ihrem Ursprung noch nicht geklärt ist.

Bei der Suche nach diesem Ursprung liegt es nahe, ‚frühe' Kritiker des Mechanismus zu befragen. So findet man z.B. bei Ernst Mach eine deutliche Kritik an Laplaces „mechanischer Mythologie“, sie ist jedoch mit einem Verständnis für deren Herkunft gepaart, das noch von der (zeitlichen) Nähe zum klassischen Mechanismus zeugt: „ [...] so ist diese freudige Überschätzung der

Distanzierung eines neuen, nun in der Tat *modernen* Wissenschaftsverständnisses von dem des klassischen Mechanismus in aller Deutlichkeit vor Augen führt. Laplaces Beschreibung aber läßt von einer solchen Distanzierung noch nichts ahnen:[154]

Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen. Der

Tragweite der gewonnenen physikalisch-mechanischen Einsichten im 18. Jahrhundert verzeihlich, ja ein liebenswürdiges, edles, erhebendes Schauspiel, und wir können diese intellektuelle, einzig in der Geschichte dastehende Freude lebhaft mitempfinden" (Mach 1933, S. 443). Mach spricht (daher) noch nicht von einem Laplaceschen Dämon, ebensowenig wie etwa Clifford, Duhem, Kleinpeter, Rey oder Stallo. In der Tradition Machs stehend, haben allerdings die Vertreter des Wiener Kreises dessen freudige Anteilnahme an der Laplaceschen Fiktion dann nicht mehr teilen können: Philipp Frank könnte 1932 mit seinem Buch *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*, das über weite Strecken als eine kritische Auseinandersetzung mit der Möglichkeit eines Laplaceschen Geistes zu verstehen ist, der erste gewesen sein, der hier den Begriff ‚Dämon' ins Spiel bringt, und zwar gleich im Plural, da es nicht nur um Laplaces Figur, sondern auch um Maxwells „finite being" geht: „[...] Maxwell sagt sogar ausdrücklich von ihm, daß seine Eigenschaften ‚im wesentlichen' ebenso beschränkt sind wie die menschlichen. Es dürfte aber schwer sein, den Unterschied zwischen wesentlicher und unwesentlicher Beschränktheit scharf zu fassen und darauf eine Rangordnung der zur Erläuterung des Kausalgesetzes notwendigen Dämonen zu begründen. Es scheint mir jedenfalls von tieferer Bedeutung zu sein, daß an der Stelle, wo das Kausalgesetz für ein System von Massenpunkten in voller Allgemeinheit konkret ausgesprochen werden soll, Maxwell ebenso wie Laplace seine Zuflucht zum Geisterreich nehmen muß" (Frank 1988, S. 92). Ergänzend sei bemerkt, daß Poincaré, auf den sich Frank mehrfach bezieht, zwar von „Maxwells Dämon", aber noch nicht von einem Laplaceschen Dämon spricht; (Poincaré 1914a, S. 179), wie auch bereits 1890 Ferdinand Rosenberger (Rosenberger 1882-90, II, S. 415).

Auch Otto Neurath setzt sich wiederholt mit der Laplaceschen Figur auseinander, spricht aber fast immer vom „Laplaceschen Geist" — mit einer Ausnahme: „Nicht ein System, sondern eine Enzyklopädie ist das echte Modell der Wissenschaft als Ganzes. Eine enzyklopädische Integration wissenschaftlicher Sätze, mit all den damit einhergehenden Diskrepanzen und Schwierigkeiten, ist das Maximum an Integration, das wir erreichen können. Es ist gegen das Prinzip des Enzyklopädismus, sich vorzustellen, daß man alle solche Schwierigkeiten eliminieren ‚könnte'. Das zu glauben bedeutet, an eine Variante des berühmten Dämons von Laplace zu glauben, der ein vollständiges Wissen gegenwärtiger Fakten haben sollte, die ausreichend wären, vollständige Vorhersagen der Zukunft zu erstellen. So sieht die Idee *des Systems* im Gegensatz zur Idee *einer Enzyklopädie* aus; die erhoffte Vollständigkeit *des* Systems ist der nachdrücklich betonten Unvollständigkeit einer Enzyklopädie entgegengesetzt" (Neurath 1938, S. 889). Auf Neuraths Interpretation des nunmehr bereits *berühmten* „Dämons von Laplace„ als Inbegriff des Systems gehe ich im folgenden ein.

[154] Laplace 1932, S. 1f. (*Œuvres* VII, S. Vlf.).

menschliche Geist bietet in der Vollendung, die er der Astronomie zu geben verstand, ein schwaches Abbild dieser Intelligenz dar. Seine Entdeckungen auf dem Gebiete der Mechanik und Geometrie, verbunden mit der Entdeckung der allgemeinen Gravitation, haben ihn in Stand gesetzt, in demselben analytischen Ausdruck die vergangenen und zukünftigen Zustände des Weltsystems zu umfassen. Durch Anwendung derselben Methode auf einige andere Gegenstände seines Wissens ist er dahin gelangt, die beobachteten Erscheinungen auf allgemeine Gesetze zurückzuführen und Erscheinungen vorauszusehen, die gegebene Umstände herbeiführen müssen.

Daß und wie sich hier wissenschaftliche Erkenntnis in bezug auf ein übermenschliches, gleichsam ‚absolutes' Erkenntnisorgan definiert, ist für die KMN kennzeichnend: Menschlichem Wissenschaftler und Laplaceschem Geist ist aus dieser ‚Innenperspektive' offenbar mehr gemeinsam, als sie trennt. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal oder der Grund, warum der Mensch trotz aller wissenschaftlichen Erfolge ein ‚schwaches Abbild dieser Intelligenz' bleibt, liegt in seiner mangelhaften Kapazität, zu einem bestimmten Zeitpunkt die Naturelemente ihrer Lage und Bewegung nach (vollständig und genau) festzustellen und sie der Rechnung zu unterwerfen.

Wesentliche gemeinsame Erkenntnisgrundlage soll andererseits die durchgängige Determiniertheit aller Naturvorgänge sein — ein ‚evidentes Prinzip', das Laplace gleich zu Beginn mit Leibniz als „Prinzip vom zureichenden Grund" formuliert[155]. Daß auch unter dieser Prämisse dem Laplaceschen Geist unlösbare naturphilosophische Rätsel aufgegeben blieben, genau wie dem Wissenschaftler, hat schon Emil Du Bois-Reymond in seiner Rede *Über die Grenzen des Naturerkennens* (1872) betont.[156] Was bei Laplace als unausgesprochene Gemeinsamkeit von menschlicher und übermenschlicher Naturerkenntnis unterstellt wird, ist die Möglichkeit, in ‚derselben Formel' oder ‚demselben analytischen Ausdruck' das Verhalten aller Weltkörper zu allen Zeiten mathematisch zu begreifen. Daß dies tatsächlich erst für einen bestimmten Bereich — nämlich den der Himmelsmechanik — gelang, bedeutet hier keine wirkliche Einschränkung, geht es doch, wie die AFE-Kennzeichnung der KMN klarmacht, darum, *eine* mathematische Gesetzlichkeit für *alle* Körper der Natur aufzuweisen. Mit der

[155] Ebd. S. 1 (*Œuvres* VII, S. VI).

[156] Bei diesen Problemen handelt es sich — sofern sie die hier allein interessierende „Körperwelt" betreffen — um die Voraussetzung des Atomismus, der die „Corpuscular-Philosophie in unlösliche Widersprüche führt", sowie um die Frage nach dem „Urzustand der Dinge", den der Laplacesche Geist zwar bei einer vollständigen Kenntnis der Natur zu einem gewissen Zeitpunkt durch mathematische Naturgesetze rückwärts bestimmen, aber in seiner Eigenart *nicht* erklären könne, so daß sein „Causalitätsbedürfniss unbefriedigt" bleibe (Du Bois-Reymond 1903, S. 14, 18).

Ausarbeitung einer *Mécanique céleste* war dies nach Laplaces Verständnis aber bereits in paradigmatischer Form geschehen.[157]

Ich gehe nun auf einige Interpretationen der Laplaceschen Figur ein, um deutlicher zu machen, inwiefern es sich dabei um eine Selbstinterpretation der AFE handelt, deren Prämissen wohl ‚von außen' kritisiert werden können (schließlich werden sie heute allgemein und zu Recht als unhaltbar angesehen), die aber eine innere Logik hat, die nicht verfehlt werden darf, wenn man begreifen will, wie es zur Auflösung der KMN kam:

Du Bois-Reymond nimmt in seiner kritischen Analyse des Laplaceschen Geistes interessanterweise keinen Anstoß an der gerade ausgeführten, unausgesprochen unterstellten Gemeinsamkeit von Mensch und Laplaceschem Geist. Im Gegenteil, sein Satz: „Wir gleichen diesem Geist, denn wir begreifen ihn", meint gerade, daß uns keine grundsätzlichen Schranken auferlegt sind, erste allgemeine mathematische Naturgesetze zu erkennen und aus ihnen sämtliche Naturphänomene zu erklären.[158] Um noch einmal den Begriff des ‚Dämons' ins Spiel bringen: Das ‚Dämonische' des Laplaceschen Geistes besteht in seinen unbegrenzten Beobachtungs- und Gedächtnisleistungen, das ‚Menschliche' aber in seiner Fähigkeit zu umfassender und abschließender Naturerkenntnis aus einer einzigen ‚Weltformel' bzw. aus wenigen mathematischen Prinzipien, die sich zu einem einzigen theoretischen *Système du Monde* zusammenfügen. Mathematisch handelt es sich hier um eine Trennung der Anfangsbedingungen der

[157] S. hierzu insbes. seine *Exposition du système du monde* (Laplace 1835), die eine Einleitung zum *Traité de mécanique céleste* (Laplace 1799-1825) liefert. „Livre III: Des lois du mouvement" dieses Werkes beginnt mit den folgenden charakteristischen Worten: „Au milieu de l'infinie variété des phénomènes qui se succèdent continuellement dans les cieux et sur la Terre, on est parvenu à reconnaitre le petit nombre des lois générales que la matière suit dans ses mouvements. Tout leur obéit dans la nature; tout en dérive aussi nécessairement que le retour des saisons, et la courbe décrite par l'atome léger que les vents semblent emporter au hasard est réglée d'une manière aussi certaine que les orbes planétaires. L'importance de ces lois, dont nous dépendons sans cesse, aurait dû exciter la curiosité dans tous les temps; mais, par une indifférence trop ordinaire à l'esprit humain, elles ont été ignorées jusqu'au commencement de l'avant-dernier siècle, époque à laquelle Galilée jeta les premiers fondaments de la science du mouvement, par ses belles découvertes sur la chute des corps. Les géomètres, marchant sur ses traces, ont enfin réduit la Mécanique entière à des formules générales, qui ne laissent plus à désirer que la perfection de l'Analyse" (*Œuvres* VI, S. 151).

[158] „[...] die Unmöglichkeit, die Differentialgleichungen der Weltformel aufzustellen, zu integriren und das Ergebniss zu discutiren, ist keine in der Natur der Dinge begründete, sondern beruht auf der Unmöglichkeit, die nöthigen thatsächlichen Bestimmungen zu erlangen, und, auch wenn dies möglich wäre, auf deren unermesslicher, vielleicht unendlicher Ausdehnung, ihrer Mannigfaltigkeit und Verwickelung. Das Naturerkennen des Laplace'schen Geistes stellt somit die höchste denkbare Stufe unseres eigenen Naturerkennens vor, und bei der Untersuchung über die Grenzen dieses Erkennens können wir jenes zu Grunde legen" (Du Bois-Reymond 1903, S. 13).

Differentialgleichungen der Bewegungen von diesen Gleichungen selbst bzw. von Prinzipien, die diese Gleichungen generieren. Erkenntnistheoretisch geht es um die Unterscheidung einer bestimmten Faktenkenntnis über die Welt (vollständige Kenntnis der Positionen und Geschwindigkeiten aller Massen zu einem bestimmten Zeitpunkt) und der Erkenntnis allgemeiner und fundamentaler Gesetze.

Kann man einer solchen Trennung überhaupt irgendeinen guten Sinn abgewinnen? Sicher nicht, wenn man versucht, sie von der Seite des Dämons her zu denken, wie es etwa der Neukantianer Otto Liebmann tut:[159]

> Legt man also eine absolute Weltintelligenz hypothetisch zu Grunde, [...] dann wird dieser Intelligenz wirklich der ganze, für uns im unendlichen Raum verzettelte und in der unendlichen Zeit distrahirte, Weltproceß bis in seine kleinsten Einzelnheiten hinein als *zeitlose Weltlogik sub specie aeternitatis* gegeben sein. Dies wäre denn die *vollendete Logik der Thatsachen in der objectiven Weltvernunft* [...].

Hier verschmelzen die Erkenntnis allgemeiner Naturgesetze und singulärer Zustände in einer einzigen ‚Logik der Tatsachen' oder einer Laplaceschen ‚allgemeinen Weltlogik'[160]. Der Laplacesche Geist wird zur Metapher für das *eine* Weltsystem und als solche Zielscheibe der Kritik. So könnten Otto Neuraths Worte direkt auf Liebmanns Interpretation gemünzt sein:[161]

> *‚Das' System ist die große wissenschaftliche Lüge.* Nicht einmal als antizipiertes Ziel ist es ein brauchbarer Leitgedanke, da wir damit in die Nähe des Laplaceschen Geistes kommen, von dem man sich denkt, daß er in Kenntnis aller Gleichungen der Realwissenschaften ständig richtige Prognosen macht. Eine Annahme, durch die keine Prognose gefördert wird, eine Annahme, die in keiner Weise kontrolliert werden kann. Metaphysische Formulierungen, unbrauchbar, um unsere Wissenschaft zu fördern.

Kein wissenschaftliches System kann *jemals die Realität vollständig repräsentieren*, so läßt sich Neuraths Kritik auf den Punkt bringen. Sie richtet sich sowohl gegen den Laplaceschen Wissenschaftler als auch gegen Liebmanns Interpretation des Dämons.

Ernst Cassirer gibt eine Analyse der Laplaceschen Figur, die erkenntnistheoretisch tiefer geht als Liebmanns. Daraus, daß der Dämon nicht auf „mittelbarem", d.h. empi-

[159] Liebmann 1911, S. 205.

[160] Vgl. ebd., S. 204 bzw. 205, Anm.; vgl. Cassirer 1937, S. 137. Zur „Logik der Thatsachen" bemerkt Liebmann ergänzend: „Dieser bedeutungsvolle Begriff gewinnt aber einen noch viel beträchtlicheren Umfang, wenn man bedenkt, daß es unserer Theorie gelungen ist, in vielen Fällen eine Mehrheit specieller Naturgesetze auf allgemeinere Grundgesetze logisch zurückzuführen und aus diesen abzuleiten. So ergeben sich sämmtliche Specialgesetze der reinen Mechanik als mathematisch wohlgegliedertes und zusammenhängendes System aus ein paar allgemeinen Grundgesetzen [...]" (Liebmann 1911, S. 204).

[161] Neurath 1935, S. 626.

rischem Wege zu einer vollständigen Kenntnis eines Anfangszustandes gelangt sein könne, zieht er den Schluß:[162]

> Dieser Schwierigkeit ist nur zu entgehen, wenn wir der Laplaceschen Intelligenz eine nicht nur mittelbare, sondern eine unmittelbare, ‚intuitive' Kenntnis der Anfangsbedingungen zusprechen. Aber mit *dieser* Entscheidung würde uns das ganze Problem, das hier gestellt ist, gewissermaßen unter den Händen entschwinden und sich zuletzt in Nichts auflösen. Denn eine Intelligenz, die mit einer derartigen intuitiven Erkenntnis ausgerüstet wäre, wäre damit zugleich jeder Mühe der mittelbaren Schlußfolgerung, der Vorausberechnung enthoben. Sie brauchte nicht aus dem Gegenwärtigen auf das Vergangene oder Zukünftige zu ‚schließen'; sie besäße, in einem einzigen unteilbaren Akte, die vollständige Kenntnis [...]. In dem Bilde des ‚Laplaceschen Geistes' verbinden und durchdringen sich somit zwei heterogene, miteinander unvereinbare Bestimmungen. In diesem Bilde ist, um es in Kantischen Begriffen auszudrücken, gleichzeitig die Vorstellung eines ‚diskursiven' und eines ‚intuitiven' Verstandes enthalten; eines diskursiven Verstandes, der an die Form des mittelbaren Begreifens, des ‚Berechnens' gebunden ist, und eines intuitiven Verstandes, der sich alles Berechnens entschlagen kann, weil er vom ‚Synthetisch-Allgemeinen' (der Anschauung eines Ganzen als eines solchen) zum Besondern geht, d.i. vom Ganzen zu den Teilen.

Bei Liebmanns Verschmelzung von Fakten- und Gesetzeserkenntnis zu einer ‚Logik der Tatsachen' handelt es sich demnach um eine erkenntnistheoretisch unsinnige Verdoppelung: *Eine vollständig erfaßte Realität braucht kein wissenschaftliches System*, so kann man Cassirers Analyse zusammenfassen. Cassirer ist darin rechtzugeben, daß die Unterscheidung von spezieller Faktenkenntnis und allgemeiner Gesetzeserkenntnis sinnlos ist, wenn sie versuchsweise vom Standpunkt des Laplaceschen *Geistes* betrachtet wird. Hat man diesen Standpunkt einmal eingenommen, ist auch der Schluß unvermeidlich, daß diese Figur als „Ideal und Prinzip der naturwissenschaftlichen Erkenntnis"[163] nichts taugt.

Eine andere Frage ist es, ob man den Standpunkt des Laplaceschen Geistes einnehmen *sollte*, um sowohl jene Unterscheidung als auch die Funktion dieses Geistes im Kontext der Laplaceschen Wissenschaft zu verstehen. Diese Frage ist, wie ich meine, zu verneinen, und folglich geht nicht nur Liebmanns, sondern auch Cassirers und in gewissem Maße auch Neuraths Interpretation an der eigentlichen *historischen* Problemlage vorbei.

Versuchen wir also, stattdessen den Standpunkt eines *Laplaceschen Wissenschaftlers* einzunehmen. Ein solcher Standpunktwechsel ist zunächst durch inflationäre Problemvermehrung gekennzeichnet, denn der menschliche Wissenschaftler verfügt über kein ‚absolutes' Wahrnehmungsorgan: Er kann an den Gegenständen immer nur bestimmte Eigenschaften feststellen. Er kann nur einige davon als hinreichend ‚allgemein' oder ‚wesentlich' auswählen, um einen mechanischen Zustand zu kennzeichnen.

[162] Cassirer 1937, S. 142.
[163] Ebd., S. 143.

Er tut dies unter dem Aspekt der Berechenbarkeit und hat dazu insbesondere ein System von Körpern von demjenigen Ausschnitt einer ‚natürlichen' Gesamtheit zu isolieren, der ihm überhaupt zugänglich ist. Für dieses System kann er keine wirklich ‚momentanen' Positions- und Geschwindigkeitsmessungen vornehmen, er kann also strenggenommen gar keine deterministischen Vorhersagen machen, sondern nur gewisse Wahrscheinlichkeitskorrelationen angeben.[164] Man kann diese Liste erweitern um grundsätzlichere Einwände, wie sie die neuere Wissenschaftstheorie liefert: etwa den, daß die *Theoriebeladenheit* aller Beobachtungen es unmöglich mache, zwischen Fakten und Theorie scharf zu trennen[165], oder aber den, daß das hier in Rede stehende Ideal deduktiv-nomologischer Erklärung von der grundlosen metaphysischen Annahme ausgehe, die vorausgesetzten fundamentalen *und* wahren Naturgesetze *existierten* in irgendeinem näher präzisierbaren Sinne.[166]

In systematischer Hinsicht, beurteilt vom heutigen Stand der Wissenschaftstheorie aus, halte ich alle diese Argumente für berechtigt, in historischer Hinsicht, d.h. gedacht als Einwände gegenüber einem Laplaceschen Wissenschaftler, gehen sie alle an der Sache vorbei: Sie explizieren eher die wissenschaftstheoretischen ‚AFE-*Voraussetzungen*' des Programms, *unter* dem dieser Wissenschaftler arbeitet, als daß sie eine Kritik von dessen Durchführung lieferten: Der Laplacesche Wissenschaftler geht von der Prämisse aus, daß alle Naturvorgänge determiniert und in ihrer Determiniertheit erfaßbar sind. Die Existenz und Erkennbarkeit bestimmter allgemeiner, wahrer und notwendiger Naturgesetze ist für ihn eine nicht hinterfragbare Vorbedingung seiner Arbeit (würde er sie hinterfragen, stünde er nicht in diesem Programm). Es ist auch nicht seine Frage, ob theoretische Einstellungen den Blick auf wichtige neuartige Fakten verstellen können, weil seine Theorie bereits auf den ‚wesentlichen' Fakten beruht. Er weiß natürlich, daß seine Beobachtungen mit Ungenauigkeiten behaftet sind und sich in der Form, in der sie dann tatsächlich verwendet werden, auf Idealisierungen und Approximationen stützen, denn diese gehören zu seinem täglichen Geschäft. Gewiß erwartet er auch von den Vorhersagen seiner Theorie keine höhere Genauigkeit als die, die er ihr zuvor in den Beobachtungsdaten mitgegeben hat: Er behauptet nicht, das ‚große Uhrwerk' für alle Zeiten exakt vorausberechnet zu haben, und auch nicht, dies praktisch zu können.

Gerade daher kommt es aber, daß für den Laplaceschen Wissenschaftler, anders als für den Laplaceschen Dämon, die Unterscheidung von Fakten und Gesetzen sinnvoll und wichtig ist: Diese Unterscheidung geht nicht darauf aus, zwei gleichberechtigte Erkenntnisarten formal auseinanderzuhalten, sondern zwei unterschiedliche Erkenntnisqualitäten zu fixieren: Sie gibt ihm Auskunft darüber, wo er mit dem Irrtum rechnen muß und wo er Gewißheit erwarten darf. Man sollte eben nicht außer acht lassen, in

[164] Vgl. Nagel 1971, S. 281-284.
[165] S. hierzu etwa Duhem 1908a, Popper 1982 (zuerst veröffentlicht 1935) und Hanson 1958.
[166] S. Cartwright 1983, insbes. S. 44-53 und 100-104.

welchem Kontext Laplace seine Überlegungen anstellt, nämlich dem der Wahrscheinlichkeitstheorie: Eine Wahrscheinlichkeitsaussage ist dort und nur dort berechtigt, wo unsere Kenntnis der Sachlage noch nicht ausreicht. Wahrscheinlichkeit ist mathematisches Maß eines subjektiven Informationsdefizits und kann mit Behebung dieses Defizits in Gewißheit überführt werden.[167] Nun gilt aber für den Laplaceschen Wissenschaftler: „Alle Ereignisse, selbst jene, welche wegen ihrer Geringfügigkeit scheinbar nichts mit den großen Naturgesetzen zu tun haben, folgen aus diesen mit derselben Notwendigkeit wie die Umläufe der Sonne"[168], und ebensowenig zweifelt er daran, diese „großen Naturgesetze" mit der Vollendung der Mechanik, namentlich in Gestalt der Himmelsmechanik, im wesentlichen erfaßt zu haben.[169] Daraus folgt für ihn, daß der Mangel an Gewißheit in den Naturwissenschaften *immer* auf mangelnder Kenntnis von Fakten beruht — sei es, daß es sich hier um singuläre Beobachtungen handelt, sei es, daß es um eine Menge von Beobachtungen geht, der eine gewisse Regelhaftigkeit eigen ist und die sich daher in die Form eines ‚Gesetzes niederer Ordnung' bringen läßt.[170] Die ‚großen Naturgesetze' aber, d.h. die Grundgesetze der Mechanik als ‚Gesetze *erster* Ordnung', sind in jedem Falle Garanten von *Gewißheit*[171] — zweifellos eine metaphysische Annahme, wie die Idee ‚des' Systems selber eine metaphysische Annahme darstellt.[172]

II.2.4 Mechanischer Euklidianismus als Wissenschaftsideal und dessen Auflösung

Die allgemeinere Bedeutung des gerade vorgestellten Beispiels sehe ich darin, daß es verdeutlicht, was es heißt, den ‚großen Naturgesetzen' absolute Gewißheit zuzuschreiben. In einer solchen Zuschreibung besteht das Hauptcharakteristikum klassischer mathematischer Naturphilosophie: Gewißheit der Prinzipien ist es, die nach *klassischem* Verständnis der ganzen Theorie ihre Sicherheit verleiht. Die Auflösung eines solchen ‚axiomatischen Denkens' verstehe ich als wissenschaftstheoretischen Fortschritt: Es handelt sich um eine *Entdogmatisierung* von Wissenschaft, die überhaupt

[167] Vgl. Laplace 1932, S. 4f. (*Œuvres* VII, S. IX).

[168] Laplace 1932, S. 1 (*Œuvres* VII, S. VI).

[169] S. hierzu Laplace 1835, S. 94; vgl. Grattan-Guinness 1990 I, S. 94.

[170] Vgl. Laplace 1932, S. 3; (*Œuvres* VII, S. VIII).

[171] Es ist bemerkenswert, daß Laplace in früheren Reflexionen zum Zufallsbegriff eine skeptischere Haltung eingenommen zu haben scheint. Vgl. Laplace 1773, S. 144f., übers. in Schneider 1988, S. 69f.; s. auch Laplace 1783, S. 296 bzw. Schneider 1988, S. 71.

[172] Damit ist noch nicht gesagt, daß eine solche ‚absolute' Annahme — anders als Neurath meint — nicht auch wissenschaftsfördernd sein kann oder in relativierter Form (Voraussetzung *eines* Systems für *einen* Gegenstandsbereich bezogen auf *eine* Phase eines Forschungsprogramms) nicht sogar konstitutiv für Wissenschaft sein kann.

erst Spielräume für neue Entwicklungen schafft. Insofern geht es bei einer Auflösungsanalyse der KMN um die historische Umsetzung einer fallibilistischen Sichtweise wissenschaftlicher Erkenntnis, die letztlich erst von Popper[173] klar artikuliert wurde und sich dabei selbst einer Entwicklung verdankt, deren wissenschaftstheoretische Grundlagen hier zur Diskussion stehen:[174]

> Keine bestimmte Theorie kann als absolut sicher betrachtet werden; jede, auch die am besten bewährte, kann unter Umständen wieder problematisch werden. Keine wissenschaftliche Theorie ist sakrosankt. Man hat diese Tatsache oft vergessen, vor allem im vorigen Jahrhundert unter dem Eindruck der langdauernden und glänzenden Bewährung gewisser Theorien auf dem Gebiete der Mechanik, die man schließlich für absolut sicher hielt.

Der von Popper angesprochene Certismus der KMN kommt besonders deutlich in der immer wieder beschworenen engen Beziehung von Mechanik und Geometrie zum Ausdruck. Diese Beziehung ist, wie bereits früher bemerkt, ‚genetischer' Art.[175] Es ist daher auch nicht verwunderlich, daß die geläufige Feststellung der Geschichtsschreibung, die euklidische Geometrie habe über gut zweitausend Jahre als Wissenschafts- und oft auch als Philosophieideal gedient, auf die KMN in besonderem Maße zutrifft. Es gibt eine große Zahl von Beispielen dafür, daß Mechanik und euklidischer Geome-

[173] Daß Popper selbst die „rationalistische Tradition, die Tradition der kritischen Diskussion", in die er seine eigene Philosophie stellt, auf die Vorsokratiker (und namentlich auf Anaximander und Xenophanes) zurückführt, ist bekannt, ebenso die Kritiken an dieser Rekonstruktion (vgl. Popper 1994/97 I, S. 198-241, insbes. 222). Wie dem auch sei, scheint mir Poppers These, daß die (bzw. ‚seine') „wahre Theorie der Erkenntnis", die er bereits bei den Vorsokratikern artikuliert findet, sich kontinuierlich zu einem „Bestandteil der modernen Naturwissenschaft" entwikkelt habe (ebd., S. 22f., vgl. 205), kaum haltbar und, soll sie ‚gerettet' werden, zumindest stark differenzierungsbedürftig. Für den hier in Rede stehenden Bereich der KMN, der einen wichtigen Aspekt neuzeitlicher Naturwissenschaft ausmacht, erscheint sie mir schlicht als verfehlt; vgl. Poppers eigene diesbezügliche Stellungnahme (Zitat 174).

[174] Popper 1949, S. 101. Dieses Fallibilitätspostulat wird heute (mit wenigen Ausnahmen) allgemein akzeptiert, selbst über den Bereich der Naturwissenschaften hinaus für Teile der Mathematik. Es scheint aber, daß die meisten seiner heutigen Verfechter nicht mehr recht wahrhaben möchten, woher es kommt und wodurch es seine Kraft gewann, nämlich aus einer methodisch orientierten Wissenschaftstheorie, die die Wissenschaft in ihrer Besonderheit ernst nimmt.

Akzeptiere ich auch Poppers Postulat, bin ich doch anderer Auffassung in Hinblick auf dessen historische Relevanz, d.h. seine Wirksamkeit in der Wissenschaftsentwicklung: Tatsächlich waren ja bis zum späteren 19. Jahrhundert die wenigsten Wissenschaftler Fallibilisten im Popperschen Sinne — dies gilt insbesondere für die mathematischen und theoretischen Physiker. Man kann diese Untersuchung als Versuch lesen, zu erklären, *warum* der Gedanke der Fallibilität — wie ja auch Popper konzidiert (s.o.) — im Bereich der klassischen Mechanik über weite Strecken keine Rolle spielte und *warum* sich diese Situation — aus Gründen, die wiederum in Poppers Philosophie keine Rolle spielen — im Verlauf des 19. Jahrhunderts wandelt.

[175] Vgl. hierzu Teil 2.1.

trie der gleiche Status einer axiomatisch-deduktiven Wissenschaft zugebilligt wurden. Stellvertretend zitiere ich aus dem heute kaum noch bekannten Lehrwerk *System der reinen und angewandten Mechanik* (1802) von Johannes Josef Ide:[176]

> Die Mechanik verdient mit gleichem Rechte einen Platz in der reinen Größenlehre, als man die Geometrie dahin zu rechnen gewohnt ist. Sie hat, wie diese, ihre eigenthümlichen Grundsätze [...]. Ihre Begriffe von Kraft und Bewegung sind eben der Evidenz fähig als Raum und Ausdehnung, und das mechanische Bild vom festen Körper steht in Hinsicht auf Abstraktion und Bestimmtheit dem Körper des Geometers vollkommen zur Seite.

Von Descartes über Euler, d'Alembert, Lagrange[177], Whewell[178] und andere reicht die Ansicht, Mechanik und Geometrie, ja sogar Mechanik und andere Bereiche ‚reiner' Mathematik (wie die Arithmetik), seien von gleichem wissenschaftstheoretischem Status, bis weit ins 19. Jahrhundert hinein. G.R. Kirchhoff, der in seiner Mechanik von 1876 das Ideal einer ‚beschreibenden' Wissenschaft vertritt, äußert sich noch 1865 folgendermaßen:[179]

> Die Mechanik ist mit der Geometrie nahe verwandt; beide Wissenschaften sind Anwendungen der reinen Mathematik; die Sätze beider stehen in Bezug auf ihre Sicherheit genau auf der gleichen Stufe; mit demselben Rechte wie den geometrischen Sätzen ist auch den mechanischen absolute Gewissheit zuzusprechen.

[176] Ide 1802 I, S. 5f.

[177] Zu diesen Vertretern der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts vgl. Kap. III.

[178] Whewell verfaßte unter anderen Lehrbüchern der Mechanik eines mit dem vielsagenden Titel *The Mechanical Euclid; Containing the Elements of Mechanics and Hydrostatics, Demonstrated after the Manner of the Elements of Geometry* (Whewell 1843). Wenn Whewells Wissenschaftstheorie auch in dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt werden kann (vgl. Teil 3.3), sollte doch darauf hingewiesen werden, daß er zu den interessantesten Vertretern der KMN gehört. Sein ‚mechanischer Euklidianismus' (s.u.) ließe sich in seinen beiden Hauptwerken vielfach belegen. Eine prägnante Zusammenfassung gibt er in einem Brief an John Herschel unmittelbar nach dem Erscheinen seiner *Philosophy of the Inductive Sciences*: „My argument is all in a single sentence. You *must* adopt such a view of the nature of scientific truth as makes universal and necessary propositions possible; for it appears that there are such, not only in arithmetic and geometry, but in mechanics, physics and other things" (Brief an John Herschel vom 22. April 1844; zit. nach Todhunter 1876 I, S. 298; vgl. auch Teil 2.1, Anm. 119).

[179] Kirchhoff 1865, S. 5. Noch Emil Du Bois-Reymonds Rede *Über die Grenzen des Naturerkennens* von 1872, die mit dem berühmten ‚Ignorabimus' endet, enthält wie selbstverständlich die Bemerkung: „Die Sätze der Mechanik sind mathematisch darstellbar und tragen in sich dieselbe apodiktische Gewißheit wie die Sätze der Mathematik" (Du Bois-Reymond 1974, S. 55). Vgl. auch Kap. VII, Teil 3.1.

Wissenschaftstheoretisch zunehmend kritisch reflektiert wird dieses Denken ab dem Ende des 19. Jahrhunderts[180], als sich die Auflösung der KMN im wesentlichen schon vollzogen hatte und Mechanik nicht mehr als Mathematik im früher dargestellten Sinne (d.h. als mathesis mixta) verstanden werden konnte — ein Wandel, den es hier gerade zu erklären gilt. Doch es lohnt sich, zunächst eine gewisse ‚Spiralbewegung' zu vergegenwärtigen, die die auf diesem wissenschaftlichen Wandel ‚aufsitzende' wissenschaftstheoretische Kritik von empiristischer und konventionalistischer Seite nimmt:

Ernst Mach spricht in seiner *Mechanik*, rückblickend auf das 18. Jahrhundert, von einer „Sucht zu beweisen", die zu einer *„falschen und verkehrten Strenge"* führe: „Einige Sätze werden für sicher gehalten und als die notwendige und unanfechtbare Grundlage anderer angesehen, während ihnen nur der gleiche oder zuweilen sogar nur ein geringerer Grad der Sicherheit zukommt".[181] Mit der Absicht, ‚wirkliche' wissenschaftliche Erklärungen von „mathematischen Formeln [...], die nicht selten als physikalische Theorien prunken", zu unterscheiden, mahnt Johann B. Stallo in Die Begriffe und Theorien der modernen Physik eine Rückkehr zu einer ‚Baconschen Skepsis' bezüglich der Mathematik an,[182] Pierre Duhem beschreibt in Ziel und Struktur der physikalischen Theorien, gerade auch mit Blick auf Laplace, kritisch jene „Systeme der Natur [...], die behaupten, die Physik in die vollkommene Form der euklidischen Geometrie bringen zu können"[183]. Abel Rey sieht in Die Theorie der Physik bei den modernen Physikern in einer überzogenen Mathematisierung der Mechanik sogar eine Ursache ihrer Krise.[184] Bei Rudolf Carnap und anderen Vertretern des logischen Empiris-

[180] Es ist wichtig, die *Beschränkung* dieser wissenschaftstheoriegeschichtlichen Behauptung auf den Bereich der KMN zu vergegenwärtigen: Die Mechanik nimmt, gemessen an allgemeinen wissenschaftstheoretischen Reflexionen wie auch am Wandel des Wissenschaftsverständnisses verschiedener Einzeldisziplinen, eine ‚Nachzüglerrolle' ein, die sich gerade ihrem *mathematischen* Status verdankt. Für die breitere Entwicklung des naturwissenschaftlichen Wissenschafts- und Theorienverständnisses sei auch verwiesen auf die von Gert König so genannte „hypothetisch-konjekturale" und „assertorisch-empirische" Linie der Metatheorie des 19. Jahrhunderts (König 1968a, Kap. 3 und 4).

[181] Mach 1933, S. 72.

[182] Vgl. Stallo 1901, S. 101, bes. Anm. 10.

[183] Vgl. Duhem 1908a, S. 102. Daß die in seiner Beschreibung auch mitschwingende Bewunderung („großartige Systeme") eher der Abstraktheit und Kühnheit als der wissenschaftstheoretischen Angemessenheit dieser älteren Enwürfe gilt, versteht sich von selbst: Sein Konventionalismus ist mit einer ‚axiomatisch-fundamentalistisch-essentialistischen' Wissenschaftsauffassung nicht kompatibel.

[184] „Durch die mathematische Form also, welche die theoretische Physik angenommen hat, durch die Bedeutung dieser mathematischen Physik selbst, durch den Umstand, daß sie in das fast ausschließliche Bereich [sic!] des Mathematikers geraten ist, endlich durch die Umgestaltung, welche der letztere an der theoretischen Physik vornehmen mußte, läßt sich die Unzuträglichkeit, die Krise und die scheinbare Entfernung der Physik von den objektiven Tatsachen erklären" (Rey 1908, S. 214f. vgl. 213f.).

mus zerfällt die Mechanik dann, ebenso wie die Geometrie, in einen empirisch ‚leeren' mathematischen Kalkül und eine empirisch ‚gehaltvolle', eigentlich physikalisch zu nennende Theorie, die aus dem formalen Kalkül durch semantische Interpretation hervorgeht.[185] Historisch gewendet, wird die Vermengung beider Bereiche zur Quelle endloser Verwirrungen und Illusionen über die Möglichkeiten einer rationalen Mechanik erklärt. So beklagt Robert B. Braithwaite, ebenfalls auf dem Hintergrund einer logisch-empiristischen Dichotomie von Mathematik und Logik einerseits und Erfahrungswissenschaften anderseits, daß die euklidische Geometrie aufgrund ihrer falsch verstandenen Leitfunktion geradezu destruktiv auf die Mechanik, die empirischen Wissenschaften und deren Theorie, ja sogar die Metaphysik gewirkt habe: „[...] the good genius of mathematics and of unself-conscious science, Euclid has been the evil genius of philosophy of science — and indeed of metaphysics".[186] Später verwirft Imre Lakatos Braithwaites Dichotomie[187] — nicht aber, um ein euklidisches Wissenschaftsideal für die ‚Realwissenschaften' zu restituieren, sondern umgekehrt, um — sozusagen in Verlängerung von Poppers Fallibilismus — einem certistischen „Euklidianismus" auch in der Mathematik den Garaus zu machen: Mathematik selber versteht er — hier ergeben sich Berührungspunkte mit Quines und Putnams Kritik des logischen Empirismus — nicht (mehr) als euklidianistisch, sondern als „quasi-empirisch"[188].

Diese ‚Auflösungsskizze' läuft aus zwei Gründen auf Lakatos zu: Zum einen erscheint mir eine *Weiterentwicklung* seiner Position vielversprechende Lösungsansätze

[185] „Durch die Interpretation werden die Lehrsätze des Kalküls der Mechanik physikalische Gesetze, d.h. universelle Aussagen, die gewisse Eigenschaften der Ereignisse beschreiben. So wird die physikalische Mechanik als eine Theorie mit faktischem Gehalt konstituiert, die durch Beobachtung überprüft werden kann. Die Beziehung dieser Theorie zum Kalkül der Mechanik ist völlig analog der Beziehung der physikalischen zur mathematischen Geometrie" (Carnap 1973, S. 79).

[186] Sein Verweis auf den 'euklidischen' Aufbau der Newtonschen *Prinicipia* (vgl. Kap. II.1) schließt ab mit der Feststellung: „[...] it took a long time for scientists to realize that the hypothetico-deductive inductive method of science was epistemologically different from the prima facie similar deductive method of mathematics; and that, in properly imitating the deductive form of Euclid's system, they were not *ipso facto* taking over his deductive method of proof. The enormous influence of Euclid has been so good in inducing scientists to construct deductive systems as more than to counterbalance his bad influence in causing them to misunderstand what they were doing in constructing such systems; the good genius of mathematics and of unself-conscious science, Euclid has been the evil genius of philosophy of science — and indeed of metaphysics. The irreducible difference between the propositions of logic and mathematics and those of a natural science are that the former are logically necessary and the latter logically contingent" (Braithwaite 1960, S. 353).

[187] Vgl. Lakatos 1982 II, S. 5f., 10, 79 und 89.

[188] S. ebd., insbes. S. 29-34.

für Probleme auch der gegenwärtigen Philosophie der Mathematik zu beinhalten.[189] Wenn auch Lakatos' Unterscheidung von euklidischer und quasi-empirischer Wissenschaft für den eigentlich von ihm intendierten Bereich, nämlich die mathematische Grundlagenforschung (insbes. Arithmetik, Mengenlehre und mathematische Logik)[190], als problematisch erscheint, ist sie doch *historiographisch* fruchtbar, was die Geschichte der mathematischen Wissenschaften im weiteren Sinne (*mathesis mixta*) betrifft, insbesondere auch für den Bereich der rationalen Mechanik.[191] Den Terminus ‚Euklidianismus' benutze ich daher, um die logischen Implikationen aufzuzeigen, die eine AFE-Kennzeichnung der KMN beinhaltet, wie auch, um die KMN wissenschaftstheoriegeschichtlich in einen größeren Kontext einzuordnen:

Das Theorieideal des Euklidianismus läßt sich mit Lakatos beschreiben als „ein deduktives System mit einer unbezweifelbaren Wahrheitswertsetzung an der Spitze (einer endlichen Konjunktion von Axiomen) — so daß die Wahrheit von dort auf sicheren wahrheitserhaltenden Kanälen der gültigen Schlüsse das ganze System durchdringt"[192].

[189] Als solche verstehe ich Philip Kitchers Buch *The Nature of Mathematical Knowledge*: „Most philosophers of mathematics have regarded the history of mathematics as epistemologically irrelevant. (Lakatos's principal insight, it seems to me, was to recognize that this is a mistake.)" (Kitcher 1984, S. 5). Seine Distanzierung von Lakatos' Popperianismus (ebd., Anm. 2) erscheint mir gegenüber dieser Gemeinsamkeit sekundär; s. hierzu näher Koetsier 1991, S. 291.

[190] Lakatos führte seine Unterscheidung hauptsächlich ein, um zu zeigen, daß diese Grundlagendisziplinen nicht länger als infallibel verstanden werden können. S. hierzu Koetsier 1991, insbes. S. 62-64. Die Bezeichnung ‚Euklidianismus' wendet Lakatos auch bereits beiläufig auf die Mechanik des 18. Jahrhunderts an (vgl. Lakatos 1982 II, S. 7, Anm. 7).

[191] Diese ‚Rückwendung' der Parallelisierung von Mechanik und Geometrie rechtfertigt es, die vorangehende Auflösungsskizze als ‚spiralförmig' zu kennzeichnen: Während diese Parallelisierung ursprünglich dazu diente, die Sicherheit der Mechanik zu artikulieren, dient nunmehr ‚Euklidianismus' der Feststellung einer unhaltbar gewordenen wissenschaftstheoretischen Position, deren Auflösung historisch zu analysieren ist.

[192] Lakatos 1982 II, S. 5; vgl. hierzu auch Diemers Wahrheitsvoraussetzung *(2)* klassischer Wissenschaft in Teil 1.1. Während Lakatos in dem hier zitierten, 1962 erstmals veröffentlichten Aufsatz über *Infinite Regress and the Foundations of Mathematics* noch zwischen drei großen wissenschaftstheoretischen Programmen unterscheidet, dem „euklidischen„, dem „empiristischen" und dem „induktivistischen" (ebd., S. 4), ist in dem auf einen Vortrag von L. Kalmár aus dem Jahre 1965 zurückgehenden und erstmals 1967 veröffentlichten Beitrag *A Renaissance of Empiricism in the Recent Philosophy of Mathematics?* nur noch von „quasi-empirischen" und „euklidischen„ Theorien die Rede (ebd., S. 27). Offenbar geht Lakatos deshalb von einer ‚Trichotomie' zu einer ‚Dichotomie' über, weil seine Kennzeichnung der verschiedenen Programme durch den Wahrheitswertfluß nur *zwei* Möglichkeiten zuläßt: Der ältere Induktivismus erscheint dann als nur noch historisch beachtlicher Versuch, mit Hilfe des (falschen) „Prinzips der Rückübertragung der Wahrheit" (ebd., S. 7) die Wahrheit der Axiome zu sichern: *Begründungstheoretisch* fällt er mit dem Euklidianismus zusammen, sofern unterstellt wird, daß dieses Prinzip doch

Die entscheidende Wahrheitswertsetzung findet also bei den *Axiomen* statt, und es ist der Fluß des Wertes ‚wahr' nach unten, der eine euklidische Theorie von ihrem Gegenstück, der sog. quasi-empirischen Theorie, logisch unterscheidet; bei jener nämlich kann nur *Falschheit* von der untersten Ebene, den möglichen falsifizierenden Sätzen, rückübertragen werden: „Der maßgebende logische Fluß in solchen *quasi-empirischen Theorien* ist nicht die Übertragung der Wahrheit, sondern die Rückübertragung der *Falschheit* — von speziellen Theoremen auf der untersten Ebene (‚Basisaussagen') nach oben in Richtung auf die Axiome zu".[193] Euklidische Theorien treten mit dem Anspruch von *Sicherheit und Wahrheit* auf, während quasi-empirische Theorien lediglich auf ‚*Bewährtheit*' setzen dürfen und immer vermutungshaft bleiben. Der hypothetische, fallible Charakter auch ihrer Axiome oder Prinzipien ist ihr wichtigster Zug. Daher, aber auch, um Mißverständnisse zu vermeiden, spreche *ich* nicht von quasi-empirischen, sondern von *prinzipienfalliblen Theorien*.[194]

Prinzipienfalsifizierbarkeit muß für jede ‚gute' Theorie im Sinne Poppers und Lakatos' verlangt werden: Sie bringt die Bereitschaft zum Ausdruck, gerade auch die scheinbaren Selbstverständlichkeiten und Evidenzen einer deduktiven Wissenschaft auf den Prüfstand zu stellen. So ‚hängt' an den Prinzipien der KMN die klassische, im wesentlichen auf Newton zurückgehende Raum-Zeit-Lehre, die (etwa) ab der Mitte des 18. Jahrhunderts als kanonisch galt und deren Infragestellung durch die spezielle Relativitätstheorie einen der größten Fortschritte der neuzeitlichen Physik ermöglichte.[195]

Es ist wichtig, auch hier noch einmal darauf hinzuweisen, daß die wissenschaftstheoretische Zuordnung zu einem euklidianistischen oder prinzipienfallibilistischen Programm *nicht* durch ein erkenntnistheoretisches Urteil über den *Ursprung* der als wahr vorausgesetzten Sätze präjudiziert wird.[196] Eine ‚klassisch induktivistische' Posi-

wahr sei. Auch *historisch* macht Lakatos bereits in seinem älteren Aufsatz ein „Bündnis zwischen Euklidianismus und Induktivismus" (ebd., S. 9) aus.

[193] Ebd., S. 27.

[194] Lakatos spricht von einer *quasi*-empirischen Theorie, um über gewöhnlich als ‚empirisch' bezeichnete Theorien hinaus, bei denen die (im folgenden als ‚Basisaussagen' bezeichneten) ‚unteren' Sätze „raumzeitlich singuläre Basisaussagen" sind (ebd., S. 27; vgl. S. 34f.), auch die Mathematik mit einbeziehen zu können. Bei mathematischen Basisaussagen, die eine Theorie in Frage stellen, spricht Lakatos (nur) von „heuristischen" Falsifikatoren — einem „schlüpfrigen Begriff" (ebd., S. 38). Hier liegt in der Tat das Hauptproblem der Ausdehnung des Popperschen Falsifikationismus auf die Mathematik (s. hierzu näher Koetsier 1991, S. 62f.). Da es die Mechanik mit ‚raumzeitlich singulären Basisaussagen' zu tun hat, handelt es sich im Sinne Lakatos' einfach um eine empirische Theorie. Nicht alle Vertreter des Empirismus im landläufigen Sinne waren jedoch Fallibilisten, daher wähle ich die Bezeichnung ‚prinzipienfallible Theorie'.

[195] Hierauf gehe ich im Zusammenhang mit Carl Neumann näher ein; s. Kap. VII.3.

[196] „In der herkömmlichen Erkenntnistheorie sind die beiden entscheidenden Begriffe nicht ‚*Euklidisch*' und ‚*empiristisch*', sondern einmal ‚*apriori*' und ‚*aposteriori*' und zum anderen ‚*analytisch*' und ‚*synthetisch*'. Diese Begriffe beziehen sich auf Aussagen und nicht auf Theori-

tion ist also mit einem wissenschaftstheoretischen Euklidianismus durchaus verträglich, wenn dieser Empirismus auf die *Sicherheit* von Beobachtung bzw. Experiment und die Unfehlbarkeit der Induktion setzt. Dies deckt sich mit der oben vorgenommenen AFE-Kennzeichnung, da diese — anders als Diemers ursprüngliche Kennzeichnung klassischer Wissenschaft — aufgrund ihrer induktivistischen Erweiterung ebenfalls keine erkenntnistheoretischen Präferenzen aufweist.[197]

Ein zweiter Punkt, in dem mir Lakatos' Differenzierung geeignet zu sein scheint, Diemers klassischen Wissenschaftsbegriff, aber auch die AFE-Kennzeichnung der KMN, zu bereichern, betrifft die Methodologie: Diemer hatte ja Methoden- und Darstellungsformen aus der Kennzeichnung klassischer Wissenschaft ausgeschlossen, weil sie begründungsirrelevant seien.[198] Bereits die Diskussion der Baconschen Wissenschaft zeigte aber, daß es sich hier um eine problematische Beschränkung handelt.[199] Auch Lakatos macht gute Gründe dafür geltend, methodologische Kennzeichnungselemente nicht zu vernachlässigen:[200]

> Die Methodologie einer Wissenschaft hängt sehr stark davon ab, ob sie einem Euklidischen oder quasi-empirischen Ideal nachstrebt. Im ersten Fall ist die Grundregel die Suche nach evidenten Axiomen — die Euklidische Methodologie ist puritanisch, antispekulativ. Im zweiten Fall ist die Grundregel die Suche nach kühnen, phantasievollen Hypothesen [...] — die quasi-empirische Methodologie ist ungehemmt spekulativ.

Dieser Gesichtspunkt scheint mir schon aus historiographischen Erwägungen von Bedeutung zu sein. Es muß möglich sein, Euklidianismus und Prinzipienfallibilismus nicht allein aufgrund rhetorischer Bekundungen zum Status der Axiome zu unterscheiden (oft mangelt es ja überhaupt an solchen Bekundungen, weil sie als überflüssig angesehen werden), sondern auch aufgrund des tatsächlichen *Umgangs* mit solchen Prinzipien: Euklidianisten können prinzipiell nicht davon abgebracht werden, nach immer ‚sichereren Fundamenten' (neuen induktiven ‚Beweisen', verbesserter Intuition)

en; die Erkenntnistheoretiker erkannten nur langsam das Auftreten hochorganisierter Erkenntnis und die entscheidende Rolle von deren jeweiliger Organisationsform" (Lakatos 1982 II, S. 6).

[197] Zur Illustration: Descartes, der die ersten Prinzipien seiner Mechanik als Vernunftwahrheiten ansah, und Newton, der seine *leges motus* als Ergebnisse der Induktion verstand, waren in diesem Sinne beide ‚Euklidianisten', denn beide sahen ihre ersten Sätze jeweils als unbezweifelbar wahr an und stellten sie an die Spitze ihrer axiomatisch-deduktiv organisierten Mechanik. Das Trägheitsprinzip erfüllte seine Rolle als mechanisches Axiom unabhängig davon, ob es als Ausdruck der Unveränderlichkeit Gottes (Descartes) oder als verallgemeinerte, ‚vernünftigerweise' nicht zu bezweifelnde Beobachtung (Newton) angesehen wurde.

[198] Vgl. oben Teil 1.1 Pkt. *(5)*.

[199] Vgl. oben Teil 1.3.

[200] Lakatos 1982 II, S. 28.

für ihre Axiome zu suchen.[201] Klassische Wissenschaft ist generell *hypothesenfeindlich*. Auf der Ebene der ersten Sätze kann aber auch der bloße ‚Verdacht des Hypothetischen' nicht hingenommen werden: Axiom und Hypothese sind *prinzipiell* auseinanderzuhalten. Bei dem Versuch, Prinzipien als sicher zu erweisen, kann es auch zu einem pervertierten „Gummi-Euklidianismus" kommen, der sich (negativ) dadurch auszeichnet, daß er „die Grenzen des Evidenten" auf das gewünschte Maß ausdehnt.[202]

In Hinblick auf die KMN erscheint es mir sinnvoll, einen weiteren Typus einzuführen: Es tritt der Fall auf, daß der Euklidianismus als Ideal der Forschung akzeptiert und auch als *erreichbares* Ziel angesehen wird, aber nicht ‚mit Gewißheit' als faktisch schon erreicht: Wenn dieser ‚defizitäre' Zustand *nicht* Anlaß dazu gibt, nach wissenschaftlichen und methodologischen Mitteln zu suchen, um ihm abzuhelfen, sondern vielmehr die bereits erzielten Grundsätze als ‚quasi-axiomatische' festgehalten werden, spreche ich von einem ‚Quasi-Euklidianismus'.

Gegenüber *allen* Formen des Euklidianismus stellt der Prinzipienfallibilismus die Sicherheit und Evidenz der Axiome in Frage, entwirft und prüft Alternativen und mißversteht fortdauernde Bewährung nicht als endgültigen Beweis. Wenn Prinzipienfallibilisten bei auftretenden (und in der Wissenschaft allgegenwärtigen) empirischen Anomalien an ihren Prinzipien festhalten und ihre Theorie an anderen Stellen abändern, handelt es sich nicht um eine dogmatische, sondern um eine *methodisch reflektierte* Entscheidung: Man könnte sagen, daß die Duhem-Quine-These, deren historische Realität in der KMN geradezu mit Händen zu greifen ist, erst von einem Prinzipienfallibilisten als methodische Möglichkeit wahrgenommen wird, seiner Theorie Stabilität zu verleihen, wenn dies — angesichts vorhandener oder auch fehlender Alternativen — als *wünschenswert* erscheint.

Gegenüber einer solchen modernen Position mag heute der Euklidianismus in den Erfahrungswissenschaften als antiquiert und selbst noch als historisches Phänomen unverständlich erscheinen.[203] Hier wird, gerade für den Bereich der Mechanik, ein merkwürdiger Kontrast zwischen seiner historischen Bedeutung und seiner wissenschaftstheoriegeschichtlichen Aufarbeitung sichtbar. Noch heute muß nämlich mit

[201] „Ein Euklidiker ist nie *gezwungen*, eine Niederlage zuzugeben: Sein Programm ist unwiderlegbar. [...] Ja, die strengen Euklidiker lassen selbst ständig wissen, die ‚Euklidischen' Theorien ihrer Vorgänger seien nicht *wirklich* Euklidisch gewesen, die Intuition, die die Wahrheit der Axiome bezeugte, sei unzulässig gewesen, irreführend, ein Irrlicht, nicht das wahrhaft echte, wegweisende Licht der Vernunft" (ebd., S. 6).

[202] Ebd., S. 7; vgl. auch 14f. und 21.

[203] Lakatos hat zu Recht betont, daß der Euklidianismus ein historisch äußerst einflußreiches Programm war. Es ist jedoch ein Mangel seiner Wissenschaftstheorie, daß sie keine ernsthaften Erklärungsversuche dafür enthält, warum dieses Programm — selbst im Bereich der ‚Realwissenschaften' — so erfolgreich werden konnte.

Lakatos festgestellt werden: „Die fesselnde Geschichte des Euklidischen Programms und seines Zusammenbruchs ist noch nicht geschrieben [...]".[204]

Will man, wie es hier beabsichtigt ist, zur Behebung dieses Desiderats beitragen, ist es wichtig, zumindest *idealtypisch* zwischen zwei Auflösungsformen des Euklidianismus zu unterscheiden: Die Kritik an diesem Programm kann, kurz gesagt, einmal an der ‚Spitze' ansetzen und läßt sich bezeichnen als *Auflösung des traditionellen axiomatischen Denkens*. Ihre Quintessenz lautet: *In den empirischen Wissenschaften gibt es keine ersten, unfehlbaren und notwendigen Prinzipien.* Wenn die bisherige KMN-Kennzeichnung zutrifft, ist die Auflösung axiomatischen Denkens nur durch einen Wandel des Verhältnisses von Mathematik und Erfahrung verstehbar, auf ihn hätte sich die historische Analyse zu konzentrieren.

Die Auflösung des Euklidianismus kann aber auch ‚unten', bei den Phänomenen ansetzen.[205] Gegenüber einem (vermeintlichen) Wahrheitsfluß ‚top-down' wird hier ein (tatsächlicher) Falschheitsfluß ‚bottom-up' behauptet; von empirisch gehaltvollen und wahren Axiomen kann dabei gar keine Rede mehr sein. Es handelt sich dabei um einen wahren Empirismus im Sinne Lakatos', und sein Credo lautet: *In den empirischen Wissenschaften gibt es keine endgültigen Erklärungen oder Beweise.* Die historische Analyse nimmt hier die Falsifikatoren (‚raum-zeitlich singulären Basissätze') in den Blick und verfolgt, wieweit diese das deduktive System von unten zersetzen.

Konventionalismus, Instrumentalismus und Phänomenalismus haben diese Kritiken in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts auf die eine oder andere Weise artikuliert. Meine These ist, daß der zweiten Auflösungsform die erste zeitlich vorausgehen *muß*. Bildlich gesprochen: Erst wenn die Existenz von Axiomen, die Wahrheit abwärts leiten, fraglich geworden ist, kann der Aufwärtsfluß von Falschheit wirksam werden und eine Revision des ganzen Systems erzwingen. Dies ist der Grund, warum mein Interesse dem Wandel des Verhältnisses von mathematischer *Axiomatik und Empirie* gilt.

[204] Ebd., S. 6.

[205] Hierher gehören empirische Probleme, die die klassische Mechanik mit elektrodynamischen Phänomenen, der Thermodynamik und der Äthertheorie hatten. Sie werden jedoch erst zu eigentlichen *Anomalien* durch Auflösung des axiomatischen Denkens.

II.3 Zielsetzung, Methode und Plan der Untersuchung

II.3.1 Zielsetzung: Analyse der Auflösung des axiomatischen Denkens in der KMN

Aus den vorangegangenen Überlegungen ergibt sich als wichtigstes Ziel dieser Untersuchung, die Auflösung des axiomatischen Denkens der KMN im Verlauf des 19. Jahrhunderts zu analysieren. Die hierfür zu leistende historische Detailarbeit setzt zeitlich etwa mit der durch den Laplaceschen ‚Dämon' markierten 'Hochzeit' des Mechanismus ein und endet ein Jahrhundert später, *vor* dessen faktischer Ablösung durch ein neues wissenschaftliches Weltbild. Sie beansprucht aber keineswegs, eine Art Universalgeschichte des Mechanismus im 19. Jahrhundert zu geben, denn dies liefe auf eine allgemeine Geschichte nicht nur der mathematischen und experimentellen Physik und deren Wissenschaftstheorie, sondern geradezu auf eine allgemeine Geistesgeschichte dieser Zeit hinaus, die im verfügbaren Rahmen nicht geleistet werden kann, aber auch nicht geleistet werden muß: Ich werde zu zeigen versuchen, daß die Überwindung *axiomatischen Denkens* im Bereich des ‚Kerns' dieses Mechanismus, d.h. der rationalen Mechanik selber, den wichtigsten Beitrag zur Modernisierung des Wissenschaftsverständnisses darstellt und die Voraussetzung für deren Weiterentwicklung wie auch deren letztendliche Ablösung schafft. Der zeitlichen Eingrenzung ist also die These implizit, daß es weder das 17. noch das 18., sondern eben erst das 19. Jahrhundert war, in dem sich eine ‚modern' zu nennende Wissenschaftsauffassung auch in der Mathematischen Naturphilosophie durchsetzte.[206] Von einem konsequenten hypothetisch-deduktiven Wissenschaftsverständnis, das die Möglichkeit von Prinzipienfalsikationen einschließt, kann demnach vor dem 19. Jahrhundert nicht die Rede sein.

Diese These wird im Verlauf der Untersuchung zu begründen sein. Ich behaupte, daß das 19. Jahrhundert einen *Grundlagenwandel innerhalb der Mathematischen Naturphilosophie aufweist, der dem sich etwa gleichzeitig vollziehenden Wandel innerhalb der Geometrie an philosophischer Bedeutung kaum nachsteht, im Unterschied zu*

[206] Diese These unterstützt also die von A. Diemer und G. König vertretene Auffassung, nach der es „besonders das 19. Jahrhundert" war, das den Umbruch von klassischer zu moderner Wissenschaftsauffassung eingeleitet hat, wenngleich diese Periodisierung in Hinblick auf Wissenschaft bzw. Wissenschaftstheorie *in toto* „zu relativieren" sei (Diemer/König 1991, S. 6, vgl. 4). Betrachtet man den intendierten Anwendungsbereich der klassischen Mechanik, der sich im 18. und 19. Jahrhundert nach Auffassung mancher ihrer Vertreter nicht nur auf die biologische, sondern sogar auf die soziale und politische Sphäre erstreckte, wäre auch hier weiter zu differenzieren und zu relativieren. Ich schränke aber, wie im folgenden noch deutlich werden wird, meine Untersuchung von vornherein auf die ‚äußere' und ‚unbelebte' Natur als genuinen Anwendungsbereich der Mechanik ein.

jenem aber in der wissenschafts- und wissenschaftstheoriegeschichtlichen Literatur kaum Beachtung gefunden hat. In der Verkennung dieses Grundlagenwandels sehe ich den ersten und gravierendsten ‚blinden Fleck' bisheriger Forschung, den es zu beseitigen gilt.[207]

Dies ist auch der Ort, noch einmal auf den Terminus ‚Mathematische Naturphilosophie' zurückzukommen, denn es ist die ‚dynamische' Rolle der Mathematik in dem hier zu analysierenden historischen Prozeß, die es nahelegt, mit Fries von einer Untersuchung zur *Mathematischen* Naturphilosophie und nicht etwa zur Grundlagenentwicklung der Mechanik zu sprechen: Für Fries ist „Newtons mathematische Naturphilosophie" als Wissenschaft „die Rüstkammer aller derjenigen Hypothesen, aus welchen nachher in der Erfahrung die Erklärungen gelingen. Darin ist bey weitem das meiste von mathematischer Entwicklung, aber die Grundbegriffe sind philosophisch [...]"[208]. Gerade um die Bedeutung der *Mathematik* in dieser Untersuchung zum Ausdruck zu bringen, erscheint es gerechtfertigt, sich der Friesschen Begriffsbildung zu bedienen. ‚Mechanik' ist demgegenüber ein historisch schillernder Begriff, dessen Bedeutung sich im Laufe der Zeit von einer geradezu ‚naturwidrigen Überlistungskunst' zum Idealtypus einer ‚naturoffenbarenden Wissenschaft' wandelte.[209] Die heute vorherrschende Auffassung, sie sei als einer unter vielen Bereichen der ‚Experimentalwissenschaft' Physik zu subsumieren, verstellt völlig den Blick darauf, daß es sich bei ihr eben nicht um eine ‚Baconsche', sondern um eine ‚klassische' Wissenschaft im Sinne Kuhns handelt.[210] Rationale Mechanik wurde im 18. und 19. Jahrhundert ganz überwiegend als *mathematische* Wissenschaft verstanden und betrieben. Dieser wesentlich *mathematische* Charakter, in Gestalt der analytischen Mechanik offenkundig, wurde und wird jedoch in einem Großteil der historischen Literatur von Montucla über Mach bis zur Gegenwart als eine bloß *formale* Umgestaltung, oder — wie Kuhn sich ausdrückt — „Artikulation" eines sogenannten Newtonschen Paradigmas interpretiert.[211] Solchen Interpretationen lagen von Anfang an zwei Mißverständnisse zugrunde: auf der einen

[207] Ich verzichte daher an dieser Stelle auf eine Diskussion vorhandener Untersuchungen zur Geschichte der Mechanik und mathematischen Physik des 19. Jahrhunderts. Auf punktuelle Übereinstimmungen mit bzw. Abgrenzung gegenüber den im Literaturverzeichnis aufgeführten Untersuchungen werde ich im Verlauf dieser Studie verweisen. *Grosso modo* muß gesagt werden, daß die in Hans Alberts *Traktat über kritische Vernunft* vor nunmehr 30 Jahren — charakteristischerweise im Kontext der Diskussion der Entstehung nichteuklidischer Geometrien im 19. Jahrhundert — erhobenen Forderung *jenseits* des Bereichs der Geometrie immer noch Desiderat ist: „Wir haben also allen Anlaß, die Rolle des axiomatischen Denkens und die Bedeutung des axiomatischen Ideals für den Aufbau aller Wissensgebiete neu zu überdenken" (Albert 1991, S. 55). Wie bereits erwähnt, stellte Lakatos (noch früher) das gleiche Desiderat fest.

[208] Fries 1822, S. 9f. Vgl. auch die Motti zu dieser Untersuchung.

[209] S. Hooykaas 1963 und 1980, Krafft 1970 und 1982.

[210] S. hierzu näher Kuhn 1977.

[211] S. Kuhn 1981, S. 38.

Seite ein allgemeines, nämlich *simplizistisches* historiographisches Bild, wonach Wissenschaftsentwicklung durch eine mehr oder minder offenkundige Aufeinanderfolge von großen ‚Revolutionen' und ‚normalwissenschaftlichen' Entwicklungsperioden gekennzeichnet sei, das ich nicht teile und auch mit dieser Untersuchung zurückzuweisen beabsichtige; auf der anderen Seite ein spezielles, aber in Hinblick auf diese Untersuchung nicht weniger wichtiges *passivistisches Verständnis* von Mathematik als bloßem Repräsentationsmittel empirischen Wissens, zu dessen Erlangung und Interpretation sie selber keinen Beitrag leiste.[212] *Die Verkennung der Bedeutung der Entwicklung der Mathematik für die Entwicklung der Grundlagen der Mechanik ist ein zweiter ‚blinder Fleck' der gegenwärtig vorliegenden Wissenschafts- und Wissenschaftstheoriegeschichten, dessen Beseitigung mit dieser Untersuchung angestrebt wird.*[213]

II.3.2 Methode: Analytisch-genetische Rekonstruktion der Vergangenheit

Wie ich die Ansicht nicht teile, daß Wissenschaft ein weitgehend beliebiges, ungeregeltes Unternehmen ist, stimme ich auch nicht der Auffassung zu, daß Wissenschaftsentwicklung ein Prozeß ist, der nur konstruierbar, aber nicht in erklärender Absicht *re*konstruierbar ist. Vielmehr sind bestimmte Entwicklungen unter bestimmten historisch sinnvollen Fragestellungen verstehbar und als ‚vernünftig' ausweisbar. Allerdings enthält Geschichte „einen unausrottbaren Faktor der Konvention und Willkür, und dies macht es außergewöhnlich schwierig, wenn nicht gar unmöglich, den Bestrebungen der substantialistischen Geschichtsphilosophen darin zu folgen, von *der* Geschichte des Ganzen der Historie oder, was dasselbe wäre, *der* Geschichte irgendeiner beliebigen Ereignisfolge zu sprechen"[214]. ‚Unausrottbar' ist dieser Faktor, weil Geschichte prinzipiell nicht von einem Ende her oder auf ein Ende zu geschrieben werden kann. Analytische Philosophie der Geschichte unterscheidet sich von substantialistischer Geschichtsphilosophie nach Hegelschem Vorbild — und übrigens auch von Lakatos' ‚rationalen Rekonstruktionen' — in der Anerkennung und Reflexion dieser Beschränkung: Sie behauptet weder, einen realen Geschichtsverlauf aufdecken, noch, einen absoluten Standpunkt der Geschichtsbetrachtung einnehmen zu können, sondern

[212] Vgl. hierzu auch Teil 2.1.

[213] S. hierzu insbes. Kap. V.

[214] Danto 1980, S. 34. Weiter bemerkt Danto: „Philosophie der Geschichte ist ein intellektuelles Monstrum, ein ‚Kentaur', wie Jakob Burckhardt sie einst genannt hat, die weder Geschichte noch Wissenschaft ist, wenngleich sie der einen ähnelt und für sich selbst Ansprüche erhebt, die nur die andere machen kann."

begreift Geschichte als ein Erklärungsunternehmen, dessen Grenzen durch die Geschichtlichkeit des erklärenden Subjekts gezogen werden.[215]

Geschichte erklärt Veränderungen in der Zeit, die Naturwissenschaft nicht erklären kann. Es wäre daher verfehlt, ihr naturwissenschaftliche Erklärungen in Form allgemeiner Gesetze abverlangen zu wollen.[216] Geschichtliche Veränderungen folgen (in aller Regel) auch nicht den Absichten historischer Akteure; sie lassen sich daher nicht oder nur unzureichend durch Rekonstruktion handlungsleitender Intentionen verstehen.[217] Ich folge der Auffassung von Arthur C. Danto, Jörn Rüsen und anderen, wonach die Erklärungsleistung der Geschichte vielmehr und *vor allem* in ihrer spezifischen Erzählstruktur gegeben ist.[218] Das *Explanandum* besteht darin, daß zwischen zwei Zeitpunkten, die *beide* in der Vergangenheit liegen, an einem gewissen historischen Gegenstand (dessen ‚Identität' vorauszusetzen ist) eine *Veränderung* festgestellt wird. Das *Explanans* besteht in einer Erzählung, die Anfangs- und Endzeitpunkt überbrückt und dem es um die Veränderung am fraglichen Gegenstand zu tun ist. Historische Erklärung kann demnach nur in Form der Erzählung geschehen und auch letztlich nur eine Erzählung sein.[219] Nicht jede überbrückende Erzählung ist indes eine historische Erklärung; vielmehr müssen, um im Bild zu bleiben, ihre Bausteine und Konstruktionsprinzipien auf einer *historischen Theorie* beruhen, um Erklärungskraft zu haben. Diese leitet sich aber nicht aus einer universellen Geschichtsphilosophie her und ist auch nicht so zu verstehen, als ob sie der Struktur der ‚Erzählung' von außen beigegeben würde, um diese zu einer Erklärung zu machen: „Im Gegenteil: Existenz, Eigenart und

[215] „Ich werde daran festhalten, daß unsere Kenntnis des Vergangenen signifikant eingeschränkt wird durch unsere Unkenntnis der Zukunft. Das Auffinden und Aufzeigen von Grenzen ist das allgemeine Geschäft der Philosophie, und das Bestimmen *dieser* Grenze ist das besondere Geschäft der analytischen Philosophie der Geschichte, so wie ich sie verstehe" (ebd., S. 34f.).

[216] Der *locus classicus* dieses historiographischen Anspruchs ist Hempel 1942.

[217] Vgl. hierzu von Wright 1971 und Donagan 1976.

[218] S. hierzu Danto 1980, Kap. XI und Rüsen 1986, insbes. S. 37-47. Ich kann hier weder zwischen Dantos Ansatz und Rüsens Ausarbeitung differenzieren noch kritisch auf Kritiken des narrativen Erklärungsansatzes in der Theorie der Geschichte der letzten Zeit eingehen (Zur neueren Diskussion vgl. Küttler/Rüsen/Schulin 1993, Roberts 1996 und Müller/Rüsen 1997). Es ist merkwürdig, daß Dantos *Analytische Philosophie der Geschichte* in der Wissenschafts- und Wissenschaftstheoriegeschichte bisher kaum Beachtung gefunden zu haben scheint.

[219] „Ich biete [...] folgendes Modell, das die Struktur einer erzählenden Erklärung wiedergeben soll:

(1) x ist F in t-1.
(2) H ereignet sich mit x in t-2.
(3) x ist G in t-3.

(1) und (3) bilden zusammen das explanandum, (2) ist das explanans. Die Hinzuziehung von (2) ergibt die Erklärung für (1) - (3)". Die historische Erklärung ist eine Erzählung „einfach in dem Sinne [...], daß (1), (2) und (3) bereits die Struktur der Erzählung eigentümlich ist. Sie hat einen Anfang (1), einen Mittelteil (2) und ein Ende (3)" (Danto 1980, S. 376).

Funktion historischer Theorien müßten aus den Konstituenten einer historischen Erklärung hervorgehen, sich also mit dem Schema des narrativen Erklärens plausibel darlegen lassen".[220] Es handelt sich bei historischen Theorien um allgemeines Wissen über die fragliche Zeit und deren generelle Veränderungsdynamik, über den zu untersuchenden Gegenstand und dessen Einbettung in seine Zeit. Dieses Wissen ist nicht unabhängig von Gegenwartserfahrung und könnte ohne Gegenwartserfahrung keine sinnvolle Geschichte zuwege bringen.[221] Es liefert Kriterien für die Auswahl des historischen Materials, und es formiert und spezifiziert dieses Material so, daß die Erzählung sich vom Anfangs- bis zum Endpunkt als *Erklärung* dieses Materials entwickeln kann. Im Idealfall wird die Erzählung so, bildlich gesprochen, zu einer ‚Geodätischen des historischen Geländes', zu einer Form also, die global durch Anfangs- und Endpunkt festgelegt ist und sich lokal als der Umgebung (den jeweiligen Quellen) angepaßt und einfach erweist — umgekehrt verlieren die historischen Einzelheiten ihren kontingenten Charakter, weil sie durch diese ‚Geodätischen' in einen Zusammenhang gebracht werden. Dies gilt, wiederum idealerweise, nicht nur für das in den Theoriebildungsprozeß einbezogene Material, sondern (im Sinne einer Bewährung) auch bei Erschließung neuer Quellen oder — um im Bild zu bleiben — bei der Ausdehnung der (notwendig) diskreten historischen Mannigfaltigkeit auf ihren erreichbaren Abschluß. Andere historische Theorien mögen — im Rahmen der auch in der Geschichte existierenden unabweisbaren Fakten[222] — andere Formierungen und folglich andere Geodätische hervorbringen. Von guten Theorien kann man erwarten, daß sie gute Geodätische im Sinne dieses Prozesses liefern.[223]

[220] Rüsen 1986, S. 46.

[221] Rüsen spricht zu Recht davon, daß erst die Gegenwartserfahrung „von der möglichen zur wirklichen Geschichte" führe. „Die historischen Universalien spinnen gleichsam aus den Zeiterfahrungen der Gegenwart ein Netz von theorieförmigen Hinsichten, in das die Zeiterfahrungen der Vergangenheit eingebracht und zu Orientierungszwecken erzählend so auf die Gegenwart bezogen werden können, daß sich eine handlungsleitende Zukunftsperspektive ergibt" (ebd., S. 64).

[222] Zu diesen Fakten muß man insbesondere auch die korrekte Feststellung des historischen Anfangs- und Endzustandes selbst rechnen. Ohne eine solche Feststellung, die ja erst ein *Explanandum* definiert, ist keine historische Erklärung möglich.

[223] Die Idee eines solchen Variationsprozesses hält daran fest, daß es *(1)* historische Fakten gibt, daß *(2)* Geschichte als ein methodisch geregeltes Unternehmen möglich ist (wobei *(1)* und *(2) nicht* gleichbedeutend damit sind, daß es *die* Geschichte gibt) und daß *(3)* Geschichte eine wichtige Orientierungsfunktion für die Gegenwart hat — ‚selbst' die Wissenschaftsgeschichte für die heutige Wissenschaft. Alle drei Punkte weichen von sog. ‚postmodernen' Geschichtskonzeptionen ab. Wie Rüsen treffend feststellt: „Die Posthistoire-Vorstellung von der Gegenwart läßt die Orientierungsfunktion, die das Geschichtsbewußtsein mit dieser Zeitvorstellung [die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft übergreift] und ihrer empirischen Konkretion durch

Man wird allerdings nicht erwarten dürfen, daß eine so konstituierte ‚partikulare' Geschichte sich mit anderen Geschichten, die andere Punkte miteinander verknüpfen und ihre Kontinuitäten aus anderen Gegenständen beziehen, zu der ‚einen, großen' Geschichte zusammenfügt.[224] Sicherlich kann es fruchtbar sein, eine solche Universalgeschichte als *Regulativ* zu postulieren, und möglicherweise lassen sich so zwischen den Partikulargeschichten Analogien, Parallelen und Strukturverwandtschaften feststellen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich indes, daß solche Homogenitäten meist den stets beteiligten ‚Gegenwartsanteil' der historischen Theorie artikulieren und daher über *eigentliche* Geschichte, die immer einen Punkt der Vergangenheit mit einem anderen Punkt der Vergangenheit verknüpft, hinausgehen.

Ich will diese Überlegungen am Beispiel der Mathematischen Naturphilosophie verdeutlichen. Anfangs- und Endpunkt meiner Geschichte stellen sich rein deskriptiv so dar: Im ausgehenden 17. und im 18. Jahrhundert werden mechanische Grundsätze fast ausschließlich als ‚Axiome' (Newton, Lagrange u.a.), als ‚notwendige Wahrheiten' oder ‚unbestreitbare Prinzipien' (Euler, Maupertuis, d'Alembert u.a.) oder als ‚synthetische Prinzipien a priori' (Kant, Fries u.a.) bezeichnet. Ohne daß solche Ausdrücke ganz verschwunden wären, spricht man im späteren 19. Jahrhundert vorwiegend von bloßen ‚Hypothesen' (B. Riemann, C. Neumann, H. Klein, L. Boltzmann u.a.), von vorläufigen ‚Beschreibungen' (G.R. Kirchhoff, E. Mach u.a.), von ‚Konventionen' (C.G.J. Jacobi, H. Poincaré, u.a.) oder von ‚Bildern' (H. Hertz u.a.). Das *Explanandum* besteht zunächst in nichts anderem als in dieser Diskrepanz. Bereits die Voraussetzung, daß es dabei um einen im wesentlichen ‚identischen' Gegenstand geht, kann nur auf dem Hintergrund einer historischen Theorie erklärt werden, in die sowohl historische als auch systematische Überlegungen eingehen: Es wäre näher zu begründen, daß es sinnvoll ist, über einen Zeitraum von etwa zwei Jahrhunderten von *der* klassischen Mechanik zu sprechen.

Die nähere Betrachtung zeigt weiter, daß es sich bei der skizzierten Diskrepanz nicht um das Resultat sprachlicher Willkür, womöglich gepaart mit wissenschaftstheoretischer Naivität der jeweiligen Akteure, handelt, sondern um den begrifflichen Ausdruck eines tiefgreifenden wissenschaftstheoretischen Wandels, den es ‚eigentlich' zu erklären gilt: nämlich den Übergang von einem ‚axiomatisch-deduktiven' zu einem ‚hypothetisch-deduktiven' Theorieverständnis.

Ich habe in diesem Kapitel versucht, ausgehend von Diemers Unterscheidung von klassischer und moderner Wissenschaft im Ansatz eine historische Theorie zu entwikkeln, die meinen ‚Rahmen' für eine solche Erklärung darstellt. Da dieser Ansatz sowohl auf die wissenschaftstheoretische Vorgeschichte des hier in Rede stehenden Untersuchungszeitraums als auch auf die Geschichte wissenschaftstheoriegeschichtlicher

erinnerte Vergangenheit verknüpft, leer; das Kaleidoskop beliebiger Imaginationen des Vergangenen kann sie vielleicht zeitweilig verdrängen, nicht aber ersetzen" (Rüsen 1993, S. 25).

[224] Vgl. ebd., S. 50.

Untersuchungen zum klassischen Wissenschaftsbegriff rekurriert, spreche ich nicht nur mit Danto von einer *analytischen*, sondern auch von einer *genetischen* Rekonstruktion.[225] Diesem Ansatz zufolge hat sich in der rationalen Mechanik ein euklidianistisches Wissenschaftsideal bis ins 19. Jahrhundert hinein gerettet, dessen Auflösung in erster Linie als Auflösung axiomatischen Denkens analysiert werden kann. Es geht darum, den Wandel von mathematischer *Axiomatik und Empirie* zu verstehen, bevor die Geltungsrelativierung mechanischer Grundsätze durch ‚widerstrebende' Erfahrung eintritt.

Aus dieser Rahmenentscheidung resultieren, wie oben bereits angedeutet, wichtige methodische Konsequenzen für die Durchführung der Untersuchung: Sie hat zunächst die mathematische Physik selber ins Auge zu fassen sowie zeitgenössische Philosophie, die die Entwicklung der mathematischen Physik reflektiert. Ihre Quellen sind hauptsächlich die mathematisch avanciertesten Texte der rationalen Mechanik, weil dort die Dynamik der mathematischen Entwicklung am ehesten zum Tragen kommt und weil diese das Wissenschaftsverständnis der *scientific community* am nachhaltigsten geprägt haben.[226] Zweitens steht die o.g. Entscheidung damit in Zusammenhang, daß ich in dieser Untersuchung die deutschsprachige Entwicklung in den Vordergrund stelle, weil ich hier eine spezifische, in England und Frankreich nicht anzutreffende Entwicklung des Verhältnisses von Mathematik und Erfahrung sehe.[227] Drittens impliziert diese Entscheidung, daß empirisch relevante Entwicklungen innerhalb der Physik zwar nicht im einzelnen verfolgt werden, aber auf ihr ‚prinzipienveränderndes Potential' (im wissenschaftstheoretischen Sinne) hin im Blick gehalten werden müssen.[228]

[225] Dieser genetische Zug manifestiert sich in der Modifikation des Diemerschen Ansatzes über die AFE-Kennzeichnung aristotelischer Wissenschaft, die Kennzeichnung der Baconschen Wissenschaft bis hin zur AFE-Kennzeichnung der KMN und ihrer Illustration in der Laplaceschen Wissenschaft.

[226] Dies trifft ja, weit über die Grenzen der Mathematik hinaus, mit gewissen Einschränkungen auch noch heute zu. Wie Ronald Giere (1988, S. 64) treffend bemerkt: „[...] the education of many scientists still includes physics, and the serious study of physics begins with classical mechanics. For a great many contemporary scientists, then, classical mechanics provided their first serious exposure to a scientific theory". Noch die heutigen Standardwerke der Wissenschaftstheorie benutzen die Lehrbücher der klassischen Mechanik als bevorzugtes Beispielreservoir. Es muß von vornherein darauf hingewiesen werden, daß diese Quellen nicht als formale Übungen in Mathematik — so wird gerne Leonardo da Vincis Rede von der ‚Mechanik als Paradies der Mathematik' gedeutet — historisch mißverstanden werden dürfen. Von Euler und Lagrange über Hamilton und Jacobi bis zu Helmholtz und Hertz stand vielmehr immer außer Frage, daß es rationaler Mechanik primär um Wirklichkeitsbeschreibung und -erklärung geht.

[227] Vgl. hierzu insbes. Kap. VI, Teil 1.

[228] Auf weitere ‚Rahmenentscheidungen', die aus den bisherigen Vorüberlegungen resultieren, gehe ich einfachheitshalber bei der Vorstellung des Plans der Untersuchung am Ende dieses Kapitels (Teil 3.3) ein.

Der *Gegenwartsbezug* historischer Erzählung, ohne den ‚wirkliche' Geschichte nicht eintritt[229], liegt bei dieser Untersuchung auf der Hand: Wenn die Einschränkung und Relativierung von Geltungsansprüchen ein Hauptzug moderner Wissenschaft ist, wie bereits Diemer betont, kann eine Analyse des Auflösungsprozesses der KMN einen Beitrag zum Verständnis ihres spezifisch *modernen* Charakters leisten und insofern auch ‚sinnbildend' sein — wie sich umgekehrt die Aufgabe einer solchen Analyse erst vor dem Hintergrund einer modernen Wissenschaftsauffassung stellt und ihren Sinn erhält. Von diesem Standpunkt aus ist es auch naheliegend, die Auflösung der KMN in einen weiteren Kontext zu stellen.[230] Gerade die Entwicklung der Geometrie des 19. Jahrhunderts lädt, wenn die Kennzeichnung der KMN als ‚mechanischem Euklidianismus' angemessen ist, hierzu ein. Die Möglichkeit nichteuklidischer Geometrien betrifft ja die KMN zweifach: zum einen auf inhaltlicher Ebene, indem in der KMN die euklidische Struktur des physikalischen Raumes als selbstverständlich vorausgesetzt wurde, zum anderen auf metatheoretischer Ebene, insofern der Evidenzverlust der euklidischen Geometrie geeignet war, das wissenschafts*theoretische* Ideal des Euklidianismus zu diskreditieren. Es läge also nahe, zu versuchen, die Auflösung axiomatischen Denkens in der KMN als einen ‚Reflex' auf die Grundlagenentwicklung der Geometrie zu begreifen. Tatsächlich aber würde ein solcher Versuch nur eine Illustration für die (bereits oben bemerkte) Gefahr, Partikulargeschichten zu einer Universalgeschichte zu hypostasieren, liefern: Wie sich nämlich zeigen wird, verhalten sich die Geschicht*en* von Mechanik und Geometrie anders zueinander.[231] Unbeschadet davon bleiben die ‚Rigorisierung' von Beweisansprüchen und die Relativierung von Geltungsansprüchen in den verschiedenen formalisierten Disziplinen (von der Mechanik und Geometrie über Analysis und Arithmetik bis hin zur Logik) lohnende Untersuchungsgegenstände der Geschichte der Wissenschaftstheorie des 19. Jahrhunderts.

II.3.3 Plan: Aufbau und Grenzen der Untersuchung

Es wird zunächst wichtig sein, über das Laplacesche Beispiel hinaus den mechanischen Euklidianismus historisch zu belegen und zu konturieren. Dieser Aufgabe sind die beiden folgenden Kapitel gewidmet. Ich beginne mit der ersten geschlossenen theo-

[229] Vgl. Rüsen 1986, S. 63f.

[230] Es verwundert also nicht, wenn entsprechende Parallelen bereits konstatiert wurden. Vgl. etwa die Feststellung von Gerald Whitrow (1950, S. 92): „On the three basic mathematical disciplines, Euclidian geometry, elementary arithmetic and classical dynamics, *modern criticism* of the first began in the eighteenth century, of the second in the late nineteenth, and criticism, of the third entered [...] from the beginning of the present century". Whitrows Einschätzung hält indes, wie diese Untersuchung zeigen wird, in chronologischer Hinsicht einer Überprüfung nicht stand.

[231] Vgl. hierzu insbes. Kap. VII, Teil 3.

retischen Darstellung der KMN, Newtons *Principia*. Anschließend werde ich die Entwicklung des 18. Jahrhunderts, soweit sie mir für den wissenschaftstheoretischen Wandel der Mechanik relevant zu sein scheint, in ihren Hauptzügen kennzeichnen. Die eigentliche wissenschaftstheoriegeschichtliche Detailanalyse setzt erst *danach* ein und zeigt im wesentlichen eine chronologische Ordnung. Auf die genauere Einteilung komme ich später zurück.

Der Rahmen der Untersuchung, soweit sie das 19. Jahrhundert betrifft, wird — neben der zeitlichen Eingrenzung — maßgeblich bestimmt durch die Beschränkung auf den deutschsprachigen Raum sowie eine bestimmte Disziplinenorientierung. Zunächst zum zweiten Punkt: Mathematische Naturphilosophie ist angesiedelt in einem disziplinären Dreieck von Philosophie, Mathematik und Physik, das sich überhaupt erst im frühen 19. Jahrhundert in einer Form ausbildet, die der heute noch vorfindbaren nahekommt.[232] (Im folgenden bezeichne ich die wissenschaftliche ‚Basis' dieses disziplinären Dreiecks kurz und zusammenfassend als mathematische Physik, seine ‚Spitze' als Schulphilosophie.) Ich stelle nun *nicht* schulphilosophische Begründungsversuche Mathematischer Naturphilosophie in den Mittelpunkt, sondern Reflexionen auf diesen Gegenstandsbereich von seiten der arbeitenden Wissenschaftler, d.h. der mathematischen Physiker selber. Zwei miteinander zusammenhängende Gründe inhaltlicher und historischer Art sind hierfür maßgebend: Mein inhaltliches Interesse gilt der Funktion und dem Funktionswandel der *Prinzipien* mathematischer Systeme, die auf Naturbeschreibung und -erklärung abzielen. Es richtet sich auf *praktizierte Wissenschaft* und deren *Selbstinterpretation* — in der Annahme, daß dieser ‚direktere' Zugang eher zum Verständnis der Auflösung axiomatischen Denkens beiträgt als die Rekonstruktion philosophischer Rekonstruktionsbemühungen.[233] Allerdings ist eine scharfe Grenzziehung zwischen Wissenschaft und Philosophie im 17. und 18. Jahrhundert oft nicht möglich.[234] Dies sollte jedoch nicht den Blick auf eine historische Entwicklung verstellen, die sich für die Mathematische Naturphilosophie des 19. Jahrhunderts als äußerst folgenschwer erweist: In der ersten Hälfte des ‚Jahrhunderts der *Wissenschaft*' mußte „Wissenschaftlichkeit als Signatur des Zeitalters [...] nach Überzeugung der Zeitgenossen in einem Ablösungsprozeß von der Philosophie des deutschen Idealismus und ge-

[232] S. hierzu näher Stichweh 1984.

[233] Der Laplacesche Geist etwa ist eine sinnvolle Konstruktion auf dem Hintergrund der zeitgenössischen mathematischen Physik und liefert eine Selbstinterpretation derselben (s. Teil 2.3). Wie gezeigt, geht ihr Sinn in einer kantianischen oder auch logisch-empiristischen Rekonstruktion verloren, weil ihre Prämissen nicht zur Kenntnis genommen bzw. in ihrem historischen Eigenrecht nicht anerkannt werden.

[234] Im 17. und 18. Jahrhundert stehen Namen wie Descartes, Newton und Leibniz oder auch Euler, Maupertuis und d'Alembert für eine *Einheit* von Wissenschaft und Philosophie, die nur künstlich aufgelöst werden kann. Noch im ausgehenden 19. Jahrhundert begegnet uns etwa mit Mach ein Forscher, den seine Zeitgenossen vor allem als Physiker kannten, den wir aber heute (fast ausschließlich) als Philosophen rezipieren.

gen deren Monopolanspruch auf Wissenschaftlichkeit erst erkämpft" werden[235]. Dieser Ablösungsprozeß führt dazu, daß wissenschaftliche Entwicklungen von seiten der Schulphilosophie nicht mehr oder nur noch partiell wahrgenommen und reflektiert werden. Gerade weil Mathematische Naturphilosophie im 18. und 19. Jahrhundert eine reflektierte Entwicklung in ihren Grundlagen verzeichnet und nicht nur — in Abwandlung von A.N. Whiteheads berühmtem Platon-Wort — aus einer Reihe von Fußnoten zu Newtons *Principia* bestand, wie die historische Literatur zur Mechanik oft glauben machen möchte, sollte ihre wissenschaftstheoriegeschichtliche Rekonstruktion bei der mathematischen Physik selber ansetzen.

Mit Kant (Kap. IV, Teil 7; Kap. V, Teil 3) und Fries (Kap. V, Teil 4) mache ich zwei wichtige Ausnahmen von dieser Entscheidung, die es zu begründen gilt. Kants *Metaphysische Anfangsgründe* liegen *vor* dem skizzierten Ablösungsprozeß und verkörpern geradezu idealtypisch das alte Ideal einer Einheit der Wissenschaft unter Leitung der Philosophie, aber mit Blick auf die mathematische Physik. Fries' *Mathematische Naturphilosophie* dokumentiert *im* Prozeß der Ablösung das Bemühen, dieses Ideal aufrechtzuerhalten und gleichzeitig der Eigendynamik der wissenschaftlichen Entwicklung gerecht zu werden. Beide Beiträge lassen sich — aus guten Gründen, wie zu zeigen sein wird — als Versuche interpretieren, die *in der Wissenschaft ihrer Zeit* vorfindbaren Auffassungen zu artikulieren und wissenschaftstheoretisch zu fundieren. Es ist m.a.W. ihre relative *Nähe* zur praktizierten Mathematischen Naturphilosophie, die sie zu einem wichtigen ‚philosophischen Komplement' einer ansonsten an der mathematischen Physik orientierten Untersuchung macht.

Eine relative Nähe von Philosophie und praktizierter Mathematischer Naturphilosophie, wie sie Kant und vor allem Fries eigen ist, kann — in Variation einer Bemerkung des Fries-Schülers und Botanikers M.J. Schleiden — von „zweien Richtungen" nicht behauptet werden, nämlich von der „speculativen Naturwissenschaft" Schellings (wie auch der Hegelschen Naturphilosophie) einerseits sowie von einem in den experimentellen und beobachtenden Bereichen der Naturwissenschaften dominierenden „trivialen Empirismus" andererseits.[236] Beide Richtungen kommen daher hier nur am Rande zur Sprache (Kap. V und VI)[237].

[235] Schnädelbach 1991, S. 88.

[236] Schleiden schreibt in der Vorrede zur 4. Auflage seines Werkes *Die Botanik als inductive Wissenschaft* von 1861: „Ich war mit meinem Werke ganz bewusst zweien Richtungen entgegengetreten, den letzten Ausklängen der *Schelling*'schen Phantastereien, die sich speculative Naturwissenschaft nannten, und dem in der Botanik noch in voller Macht bestehenden trivialen Empirismus. Ich hatte versucht, die kindlichen und kindischen Tändeleien der *amabilis scientia* in den männlichen Ernst einer inductiven Wissenschaft hinüberzuführen. Darin, und darin allein, lag der Werth meiner Arbeit, dass der Stoff nach richtiger Methode in einem Guss bearbeitet war [...]" (Schleiden 1861, S. VI).

Die zweite Jahrhunderthälfte ist auf seiten der Schulphilosophie in Deutschland wesentlich von *Entstehung und Aufstieg des Neukantianismus* geprägt.[238] Diese Richtung beanspruchte ja gerade, ‚wissenschaftliche Philosophie' zu sein, d.h. eine Brückenfunktion zwischen alter, kantisch geprägter Schulphilosophie und neuer mathematischer und naturwissenschaftlicher Entwicklung wahrzunehmen. Der Neukantianismus mit seinem inhärenten Apriorismus übt jedoch auf die in Frage stehende Entwicklung keinen avancierenden, sondern im Gegenteil einen retardierenden Einfluß aus; im Rahmen der hier beabsichtigten Rekonstruktion kann er daher unberücksichtigt bleiben.

Hiermit wird eine weitere Entscheidung angesprochen, die für den Gang dieser Untersuchung leitend ist: Es geht nicht darum, die Mathematische Naturphilosophie des 19. Jahrhunderts in ihrer ganzen Breite darzustellen, sondern lediglich darum, eine bestimmte *Modernisierungslinie* — nämlich den *ersten* der beiden o.g. Auflösungstypen der KMN - aufzuzeigen. Diese Linie setzt nach meiner historischen Rekonstruktion bei C.G.J. Jacobi (Kap. VI) ein, der in der bisherigen Wissenschaftstheoriegeschichte vollkommen unbeachtet geblieben ist, und sie braucht nur bis Riemann und Carl Neumann (Kap. VII) gezogen werden: Das dort aufweisbare Verhältnis von Axiomatik und Empirie wird in den letzten drei Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts dominierend, und es wird durch die dann erst einsetzende positivistische Kritik des älteren Mechanismus wie auch durch die dann erst wirksam werdende Grundlagendiskussion der Geometrie verstärkt. Beide Entwicklungen unterstützen den hier in Rede stehenden Modernisierungsprozeß; beide sind jedoch zeitlich dem *entscheidenden* Umbruch nachgeordnet und zudem historisch wie wissenschaftstheoretisch recht gut analysiert, können daher in dieser Studie im wesentlichen unberücksichtigt bleiben: Carl Neumann ist ein *Vorläufer* Ernst Machs und markiert den Endpunkt meiner Untersuchung; nach gängigem historischem Verständnis aber *beginnt* mit Mach erst die hier gemeinte Modernisierung der KMN. Es geht mit dieser Studie also auch darum, den fraglichen Wandel *genauer* und *früher* zu positionieren. Daher können hier neben den meisten Vertretern der Schulphilosophie auch eine Reihe hervorragender und philosophisch interessanter mathematischer Physiker wie etwa David Hilbert[239] oder der Hilbert-Schüler Georg

[237] Herbart nimmt in der ersten Jahrhunderthälfte eine gewisse Sonderstellung ein. Auf ihn gehe ich im Zusammenhang mit Riemanns *Neuer mathematischer Naturphilosophie* kurz ein (Kap. VII, Teil 2).

[238] S. Köhnke 1986.

[239] Hilbert erwähne ich hier deshalb besonders, weil er als der vielleicht wichtigste Vertreter einer *klassischen* Wissenschaftstheorie der mathematischen Physik am Ausgang des 19. Jahrhunderts angesehen werden kann — dies, obwohl er in die Philosophie der Mathematik einen durchaus neuen, ‚modern' zu nennenden Axiomenbegriff einführt (Man kann hier mit Gert König von einem wissenschaftstheoretischen ‚Hilbert-Paradox' sprechen.).

Hamel unberücksichtigt bleiben, die zur Modernisierung der Mathematischen Naturphilosophie im fraglichen Sinne *nicht* beitragen.

Die eigentliche Frage ist also nicht, warum die Schulphilosophie in dieser Untersuchung im großen und ganzen wenig Berücksichtigung findet, sondern vielmehr, warum die behauptete Modernisierung im Bereich der mathematischen Physik selber zu verorten ist und *deshalb* eine umfassendere Analyse der Schulphilosophie unterbleiben kann. Dabei wird, wie bereits bemerkt, die Möglichkeit einer sinnvollen Trennung von Wissenschaft und Philosophie unterstellt, die noch für das 18. Jahrhundert alles andere als plausibel gewesen wäre. In Kapitel IV gehe ich dieser Frage nach, um zu zeigen, daß eine solche Trennung nicht nur möglich, sondern sogar notwendig ist, um die Originalität und Dynamik der wissenschaftstheoretischen Entwicklung innerhalb der mathematischen Physik während des zweiten Drittels des 19. Jahrhunderts verstehen zu können. Dies hat ganz wesentlich mit einer Änderung der Stellung der *Mathematik* zur Philosophie einerseits und zu den empirischen Wissenschaften andererseits zu tun, die man schlagwortartig als *Autonomisierung* bezeichnen kann. Sie kommt im Aufstieg sogenannter *reiner Mathematik* in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts am deutlichsten zum Ausdruck und führt einen Wandel des *Anwendungsproblems* herbei, unter dem Mathematische Naturphilosophie notwendigerweise betrachtet werden muß. Diese Entwicklung ist spezifisch für den deutschsprachigen Raum und grenzt ihn von der in England und Frankreich ab, wo nach wie vor eher empiristisch geprägte Konzeptionen von Mathematik dominierten. Daß sich die Untersuchung in ihrem Hauptteil auf diesen Raum beschränkt, findet hierin seine eigentliche Begründung.

Schließlich sei hier auf einen Gesichtspunkt verwiesen, der bereits über diese Untersuchung hinausweist: Daß die rationale Mechanik als ‚Fundamentalwissenschaft' der mathematischen Physik fungierte, erklärt nicht nur ihren besonderen wissenschaftstheoretischen Stellenwert, sondern wirft auch besondere methodische bzw. historiographische Probleme auf. Die Konzentration auf die Auflösung axiomatischen Denkens stellt eine Rahmenentscheidung dar, die sich in *allen* Teilen dieser Untersuchung niederschlägt. Sie impliziert — in der Sprache des frühen 19. Jahrhunderts — im wesentlichen eine *Beschränkung* auf die Mechanik ‚ponderabler Körper' als der einzigen damals in wesentlicher mathematisierter Form vorliegenden physikalischen Theorie und dem *Kern* der KMN. Die Frage, inwiefern physikalische Probleme ‚nichtponderabler Körper' und andere wissenschaftliche Fragen, aber auch philosophische Entwicklungen im späteren 19. Jahrhundert auf die Auflösung axiomatischen Denkens Einfluß genommen haben, wird nicht diskutiert. Eine geradezu mustergültige Analyse einer Modernisierung des Wissenschaftsbegriffes in dieser Zeit, die eine solche weitere Perspektive einnimmt, hat Gregor Schiemann am Beispiel Hermann von Helmholtz vorgelegt.[240]

[240] Vgl. Schiemann 1997.

Im Schlußteil dieser Arbeit wird die im Verlauf dieser Studie gezeichnete Entwicklung zusammenfassend bewertet und die These vertreten, daß sie eine notwendige wissenschaftstheoriegeschichtliche Bedingung der Möglichkeit für die Ablösung der klassischen Mechanik durch die Einsteinsche Relativitätstheorie war: *keine wissenschaftliche Revolution ohne vorangehende wissenschaftstheoretische Evolution.*

III Axiomatik und Empirie bei I. Newton

III.1 Einführung

Im ersten Kapitel wurde eine vorwiegend systematische Bestimmung von Klassischer Mathematischer Naturphilosophie innerhalb des weiteren Rahmens klassischer (gegenüber moderner) Wissenschaftsauffassung gegeben, die dem gängigen, ‚hypothetisch-deduktivem' Bild neuzeitlicher Wissenschaft widerspricht. In diesem und dem folgenden Kapitel soll an wenigen, historisch allerdings sehr einflußreichen Beispielen gezeigt werden, daß die KMN bis zum Ende des 18. Jahrhunderts tatsächlich unter diese Bestimmung fällt. Dabei kann es nicht darum gehen, die Praxis der KMN des 18. Jahrhunderts sowie deren wissenschaftstheoretische Reflexion in ihrer ganzen Breite zu rekonstruieren. Vielmehr beschränken sich diese Teile ganz auf den Gesichtspunkt, der im ersten Kapitel als leitend für diese Untersuchung herausgestellt wurde — auf den Nachweis also, daß in maßgeblichen Werken der Mathematischen Naturphilosophie dieses Zeitraums eine Wissenschaftsauffassung dominiert, die sich als ‚Mechanischer Euklidianismus' kennzeichnen läßt.

Warum wird hier Newtons Hauptwerk an den *Anfang* eines solchen Überblicks gestellt? Auf den ersten Blick fällt die Antwort leicht: Die *Principia* gelten als ein ‚revolutionäres', epochemachendes Werk – und dies nicht erst seit Thomas S. Kuhn: Von B. de Fontenelle (1727) und A. Clairaut (1747) über J.-S. Bailly (1781) und J.L. Lagrange (1787) bis zum heutigen Tage gibt es eine bemerkenswerte Kontinuität der Diskontinuitätszuschreibung, d.h. der Übereinstimmung darin, daß dieses Buch die Wissenschaft schlagartig auf eine qualitativ neue Stufe gehoben habe.[241] Eine eingehendere Analyse des Begriffs der wissenschaftlichen Revolution und der Gründe dafür, warum dieser Begriff auf Newtons Hauptwerk angewandt wird, als sie hier vorgestellt werden kann, würde jedoch ergeben, daß sich nahezu alle diese Zuschreibungen auf Newtons physische Astronomie (insbesondere seine Gravitationstheorie) und seine Mathematik (insbesondere seine Fluxionsrechnung) stützen, während die rationale Mechanik im engeren Sinne, d.h. die *Prinzipien* der mathematischen Naturphilosophie, in einem merkwürdigen historiographischen Zwielicht bleibt. Newton selber sah sie, das Gravi-

[241] Für zahlreiche Belege s. Cohen 1980 und Cohen 1994, S. 242-264.

tationsgesetz ausgenommen, bekanntlich als keineswegs originell oder neu an, sondern reihte sich mit ihrer Formulierung umstandslos in die ältere Tradition mathematischer Naturphilosophie ein.[242] Viele spätere Interpretationen haben diese begründete Selbsteinschätzung ignoriert oder marginalisiert und Newtons *axiomata* per se zu originellen Leistungen hochstilisiert. Historisch kenntnisreichere Stellungnahmen, wie sie etwa Ernst Mach und Thomas S. Kuhn abgegeben haben, beziehen sich bei ihrer Würdigung der *Principia* weniger auf die einzelnen vorgebrachten Prinzipien als auf deren zusammenfassende Darstellung: Als das eigentlich Neue gilt hier eine gewisse logische ‚Vollständigkeit' der Newtonschen Axiomatisierung in dem Sinne, daß deren Prinzipien hinreichend zur Lösung aller später vorgebrachten mechanischen Probleme seien.[243] Neuere Forschungen, vor allem Clifford Truesdells extensive Untersuchungen zur rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts, erzwingen jedoch eine Revision der Vollständigkeitsthese: Die *Principia* enthalten Mängel und Lücken, zu deren Behebung es eines weiteren Jahrhunderts mathematisch-physikalischer Forschung und philosophischer Reflexion bedurfte, bis von einer Mechanik die Rede sein konnte, die *heute* den Namen Newtons trägt.[244] Auch wenn man — *cum grano salis* — eine weitgehende Vollständigkeit der *Principia* im Sinne Machs oder Kuhns unterstellen würde, bliebe die Frage zu beantworten, inwiefern hier wirklich Neues und ‚Revolutionäres' behauptet werden könnte, handelte es sich doch dann bei der Axiomatisierung der *Principia* vor allem um eine *synthetische* Leistung, die bereits *vorhandene* Prinzipien der Mecha-

[242] Nach Formulierung seiner *axiomata sive leges motus* und verschiedener *corollaria* bemerkt er: „Bis jetzt habe ich die Principien dargestellt, welche von den Mathematikern angenommen [„recepta"], und durch vielfältige Versuche bestätigt worden sind" (Newton 1872, S. 39 bzw. 1972, S. 64; vgl. unten, Anm. 115). Ich beziehe mich im folgenden auf die von I.B. Cohen und A. Koyré besorgte Neuausgabe der 3. Aufl. der *Principia* von 1726, wenn es um Formulierungen Newtons im lateinischen Original geht (Newton 1972), auf die deutsche Übersetzung von J. Ph. Wolfers, sofern sie mir zuverlässig erscheint (Newton 1872), wie auch auf die insgesamt getreuere englische Übersetzung der dritten Auflage, die von A. Motte angefertigt und von F. Cajori überarbeitet wurde (Newton 1934). Newtons *Opticks* zitiere ich nach W. Abendroths Übersetzung der 2. Aufl. von 1717 (Newton 1898) und nach I.B. Cohens Neuausgabe der 4. Aufl. von 1730 (Newton 1952).

[243] „Die Newtonschen Prinzipien sind genügend, um ohne Hinzuziehung eines neuen Prinzips jeden praktisch vorkommenden mechanischen Fall [...] zu durchschauen. Wenn sich hierbei Schwierigkeiten ergeben, so sind dieselben immer nur mathematischer (formeller) und keineswegs mehr prinzipieller Natur" (Mach 1933, S. 179). Für Kuhn (1981, S. 20f.) handelt es sich bei der nachnewtonschen Mechanik ebenfalls um eine wesentlich formelle, mathematisch und ästhetisch motivierte Ausarbeitung des durch die *Principia* definierten Paradigmas.

[244] „Die klassische Mechanik [...] trägt zweifellos Newtons Prägung, ist aber sicherlich auch nicht in den *Principia* auffindbar; sie folgt *nicht* allein aus Newtons Ideen, sie ruht weitgehend, ja größtenteils auf den Konzepten und Prinzipien, die durch andere entwickelt worden sind; einige wenige von ihnen waren Newtons Vorgänger, die meisten aber seine Nachfolger" (Truesdell 1989, S. 47; vgl. auch die verschiedenen Beiträge in Truesdell 1968).

nik zusammenbringt und selbst in ihrer synthetisierenden Absicht noch auf frühere, in die gleiche Richtung zielende Bemühungen wie Galileis *Discorsi* und Huygens *Horologium* anknüpfen konnte.[245] Kurz gesagt: Die *Principia* sind, sofern sie als Beitrag zur rationalen Mechanik verstanden werden, sicherlich *nicht* ‚revolutionär'[246], und soweit sie ‚revolutionär' sind, hier nicht von direktem Interesse.

Trotz solcher Überlegungen nimmt dieses Werk eine besondere Stellung in der KMN ein, die es sinnvoll erscheinen läßt, es hier an den Anfang zu stellen. Man kann seine historische Besonderheit am ehesten vergleichen mit derjenigen von Euklids *Elementen* in der Geschichte der Geometrie: Von den *Elementen* wissen wir, daß die meisten ihrer Lehrsätze nicht neu waren, daß es ihnen an logischen Fehlern und Beweislücken nicht mangelt und daß ihre axiomatisch-deduktive Methode auf Anregungen der älteren Geometrie und eleatischen Philosophie zurückgeht.[247] Ihre Zusammenfassung und logische Ordnung älteren Wissens sowie die Allgemeinheit der Darstellung machten sie *dennoch* zu einem Kristallisationspunkt der bis dahin von den Grie-

[245] Gegen den Begriff einer ‚Newtonian synthesis' spricht sich I. Bernard Cohen (1980, S. 158) aus und pocht dabei auf den revolutionären Charakter des Newtonschen Werkes. Wie dort im allgemeineren Zusammenhang, wäre hier konkret für die Newtonsche Axiomatisierung zu fragen, inwiefern eine bloße Zusammenfassung älterer Prinzipien wirklich *Neues* begründen kann. Einen instruktiven Vergleich der Newtonschen Axiomatisierung der Mechanik mit Huygens *Horologium* (1673), der illustriert, daß sich Newton bereits auf weitreichende Ansätze zur Synthetisierung beziehen konnte, gibt z.B. Speiser 1989. Freilich spricht Huygens von ‚Hypothesen' der Mechanik und vertritt die Auffassung, daß diese die Evidenz und Sicherheit geometrischer Sätze nicht erreichen können. Er ist anders als Newton und die meisten mathematischen Physiker des 18. Jahrhunderts kein ‚typischer' Vertreter der KMN im eingangs beschriebenen Sinne; zu Huygens Mechanik s. näher Yoder 1988.

[246] Cohen führt in seiner historischen Untersuchung zum Begriff der (natur-)wissenschaftlichen Revolution vier eigene „Kriterien" bzw. „Tests" an, bei deren völliger oder weitgehender Erfüllung von einer ‚Revolution' gesprochen werden sollte: *(1)* das „Urteil von Wissenschaftlern und Nichtwissenschaftlern der besagten Zeit"; *(2)* die „dokumentarische Auswertung der späteren Entwicklung des Gebietes, innerhalb dessen sich eine Revolution abgespielt haben soll"; *(3)* das „Urteil kompetenter Historiker, vornehmlich solcher der Wissenschafts- und Philosophiegeschichte"; sowie *(4)* die „allgemeine Meinung der heute forschenden Wissenschaftler" (Cohen 1994, S. 83-87). Wendet man diese Tests, die mit dem Anspruch vorgetragen werden, „rein historisch und tatsachenorientiert" (ebd., S. 83) zu sein, *differenziert* (im obigen Sinne) auf Newton an, wird man nur *(4)* erfüllt finden, weil es bis heute zur wissenschaftshistorischen Folklore gehört, daß die sogenannten Newtonschen Prinzipien der Mechanik auch die von Newton selbst ‚gefundenen' Prinzipien sind. Besonders im Sinne von *(3)* sei *gegen* die von Cohen vertretene Auffassung, Newtons Beitrag zur rationalen Mechanik sei ‚revolutionär' zu nennen, verwiesen auf Dijksterhuis 1956, Jammer 1957 und Truesdell 1968 im allgemeinen sowie auf Gabbey 1971 und 1980 sowie Westfall 1970 für das *erste*, Ellis 1962 und Hankins 1967 für das *zweite* und Russell 1975 für das *dritte* Bewegungsgesetz Newtons.

[247] Vgl. Szabó 1960 und 1969.

chen ausgearbeiteten Geometrie und zu *dem* Ausgangspunkt der meisten späteren geometrischen Untersuchungen. Analog verhält es sich mit Newtons *Principia* in Hinblick auf die ältere KMN.

Newtons Hauptwerk ist in drei ‚Bücher' gegliedert; sie handeln von reibungsfreier Bewegung („De motu corporum liber primus"), Bewegung in widerstrebenden Medien („De motu corporum liber secundus") und von der Himmelsmechanik („De mundi systemate liber tertius"), die in popularisierender Absicht geschrieben wurde und später auch tatsächlich allein Popularität erlangte. Einem Brief Newtons an Edmund Halley kann man entnehmen, daß er ursprünglich die beiden ersten Teile unter dem Titel *De motu corporum libri duo* herauszubringen beabsichtigte, dann aber — durchaus nicht nur ‚philosophischen' Überlegungen folgend[248] — den Titel *Philosophiae naturalis principia mathematica* vorzog. Dieser Titel nimmt nun auf keines der drei Bücher unmittelbaren Bezug, sondern am ehesten auf den Einleitungsteil, der keinen eigenen Titel trägt, sondern unter den Überschriften „Definitiones" und „Axiomata sive leges motus" die Hauptbegriffe und Prinzipien des Werkes darlegt.

Unter den Vorarbeiten zu diesem Einleitungsteil ist neben *De motu* (1684) vor allem die frühe, sehr wahrscheinlich zwischen 1668 und 1673 entstandene Schrift *De gravitatione* zu nennen, bei der es sich um eine direkte Auseinandersetzung Newtons mit Descartes' *Principia philosophiae* handelt. Neben wichtigen inhaltlichen Verbindungen zu den *Principia* ist diese Schrift vor allem in zweierlei Hinsicht interessant für Newtons späteres Hauptwerk: Newton übt in ihr zum einen eine scharfe Kritik an Descartes' Naturphilosophie, namentlich an dessen Gleichsetzung von Körper und Ausdehnung, an der Unterscheidung von *res cogitans* und *res extensa* sowie an dessen Bewegungsvorstellung, wobei er Descartes im einzelnen „Hirngespinste", eine „konfuse und vernunftwidrige Lehre" und deren „absurde Konsequenzen", ja sogar eine „täuschende und unzuverlässige Argumentation" vorwirft.[249] Ausgehend von eigenen Bestimmungen der Begriffe Ort („locus"), Körper („corpus"), Ruhe („quies") und Bewegung („motus")[250], will Newton erreichen, daß „bezüglich der Natur der Bewegung keinerlei Zweifel bleibt"; die „Destruktion" der Cartesianischen Lehre verfolgt er mit dem Ziel, „wahrere Grundlagen für die mechanischen Wissenschaften" zu schaffen.[251]

[248] Wichtig war ihm offenbar *auch* (vgl. unten) die Verkaufsstrategie: „Twill help ye sale of ye book wch I ought not to diminish now tis yours" (Newton an E. Halley vom 20. Juni 1686; *Correspondence* II, S. 437; s. hierzu näher Cunningham 1991).

[249] Newton 1988, S. 17, 19, 75; ähnlich harsche Urteile über Descartes finden sich ebd., S. 21, 23, 27, 29, 35, 45 und S. 65.

[250] Ebd., S. 14f.

[251] Ebd., S. 35.

Newton unterscheidet zum anderen von vornherein zwischen einem Teil, der „zu den mathematischen Wissenschaften gehört", und einem zweiten, experimentellen Teil, der dazu dient, den ersten zu veranschaulichen [„illustrare"], da[252]

diese [meine] Lehre in gewisser Weise der Naturphilosophie als verwandt anzusehen ist, insofern sie sich sehr vielen ihrer Phänomene erklärend anpaßt, so daß ihre Anwendbarkeit dann besonders deutlich wird und auch die Gewißheit der Prinzipien vielleicht bestätigt wird. Und zwar soll das so geschehen, daß diese weniger strenge und in Scholien formulierte Art der Erörterung nicht mit dem Vorhergehenden, das in Lemmata, Propositionen und Corollarien abgehandelt wurde, vermischt wird.

Die in *De gravitatione* an Descartes geübte Kritik gehört nun fast ausschließlich dem ersten Teil an, in dem es darum geht, „die einzelnen Behauptungen dieser Untersuchung aus abstrakten und dem Leser hinreichend bekannten Prinzipien nach Art der Geometer strikt zu beweisen"[253]. Hier, auf der Ebene *mathematischer* und *begrifflicher* Analyse und *nicht* im Bereich experimenteller Belege, sucht Newton von Anfang an die Auseinandersetzung mit und die Revision von Descartes' Lehre. Daß dabei ohnehin schon durch Gewißheit („certitudo") ausgezeichnete Prinzipien noch experimentell bestätigt werden („confirmatur") sollen, weist der Beobachtung eher eine illustrative denn begründende Funktion zu — entscheidend für die Zurückweisung und Ersetzung der Cartesianischen Lehre ist die vorgängige geometrische und begriffliche Grundlegung „unter Absehung von sinnlichen Qualitäten"[254].

De gravitatione kann, bezogen auf die Philosophie Descartes', als ein Zeugnis naturphilosophischer Differenz, aber wissenschaftstheoretischer *Kontinuität* in der Begründung einer physikalischen Theorie *more geometrico* gelesen werden. Dieser Punkt, der später, in den *Principia*, durch Newtons empiristische Methodologie verdeckt wird, ist von großer Bedeutung für ein Verständnis des Einleitungsteils seines Hauptwerkes, das den ersten Teil von *De gravitatione* weiterführt, wie auch für die Einordnung der *Principia* in die KMN insgesamt. Er macht zugleich die philosophische Intention deutlich, die Newton bei der Namensgebung seines Hauptwerkes geleitet haben dürfte: Descartes' *Principia philosophiae* zu ersetzen durch eine *Philosophiae naturalis principia mathematica*[255].

[252] Ebd., S. 15.
[253] Ebd., S. 15.
[254] Ebd., S. 17; s. auch den dortigen Hinweis auf Euklids *Elemente*.
[255] Bereits Koyré bemerkt zur Opposition von Newton und Descartes: „[...] we cannot expect to find praise, or even historical justice, for Descartes in a book whose title, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, contains an obvious reference to, and rejection of, his *Principles of Philosophy*" (Koyré 1965, S. 65).

III.2 Der axiomatische Aufbau der *Principia*

Mit der Zielsetzung, den *begründenden* Charakter seines Werkes zu unterstreichen, führt Newton die *Principia* als einen Beitrag zur *rationalen* Mechanik[256] ein. Es geht ihm dabei nicht um Mechanik im traditionellen Sinne, d.h. als naturwidrige Kunst der Überlistung, sondern um eine mechanische Grundlegung der Naturphilosophie bzw., im modernen Verständnis, der Physik.

Inwiefern kann bei einem solchen Werk, das eine *Physik* begründen möchte, von einem ‚axiomatischen Aufbau' überhaupt gesprochen werden? Man kann die Beantwortung dieser Frage in zwei Schritten angehen: zum einen durch eine Analyse der Stellung und Funktion der von Newton als „*Axiomata* sive leges motus"[257] bezeichneten Prinzipien im Gesamtaufbau der *Principia*, zum anderen durch eine Beantwortung der Frage, wieweit ihnen solche Eigenschaften, die ‚klassischen' Axiomen eigen zu sein pflegen, in Newtons Werk zugesprochen werden. Hier soll zunächst nur dem ersten Punkt nachgegangen werden.

III.2.1 Zur Stellung der Axiome in den *Principia*

Newton beginnt mit acht formellen Erklärungen („definitiones") der Grundbegriffe seiner rationalen Mechanik, nämlich der Begriffe Materiemenge („quantitats materiae"), Bewegungsgröße („quantitas motus"), innewohnende bzw. Trägheitskraft („materiae vis insita"), einwirkende Kraft („vis impressa"), Zentripetalkraft („vis centripeta"),

[256] „Die Alten stellten die Mechanik auf zweifache Weise dar, als *rationale*, welche durch Beweisführung mit Genauigkeit vorwärtsschreitet und als *practische*. [...] In diesem Sinne ist die *rationale Mechanik* die genau dargestellte und erwiesene Wissenschaft, welche von den aus gewissen Kräften hervorgehenden Bewegungen und umgekehrt den, zu gewissen Bewegungen erforderlichen Kräften handelt. Diesen Theil hatten die Alten in den *fünf Kräften*, welche sich auf Handfertigkeiten beziehen, ausgebildet. Sie betrachteten dabei die *Schwere* (da sie keine Kraft der Hand ist) kaum weiter, als bei den Gewichten, welche durch jene Kräfte bewegt werden sollen. Wir aber, die wir nicht die Kunst, sondern die wir die Wissenschaft zu Rathe ziehen, und die wir nicht über die Kräfte der Hand, sondern die der Natur schreiben, betrachten hauptsächlich diejenigen Umstände, welche sich auf Schwere und Leichtigkeit, auf die Kraft der Elasticität und den Widerstand der Flüssigkeiten und auf andere derartige anziehende oder bewegende Kräfte beziehen, und stellen daher unsere Betrachtungen als *Mathematische Principien der Naturlehre* auf" (Newton 1972, S. 15f.; Übersetzung nach Newton 1872, S. 1, 1f.). Verschiedene Autoren haben gerätselt, ob der Begriff ‚mechanica rationalis' nicht tatsächlich erst von Newton selbst eingeführt wurde. Allan Gabbey hat neuerdings gezeigt, daß er sich in Goclenius's *Lexicon philosophicum Graecum* findet und hat daraus geschlossen, daß er (spätestens) ab dem frühen 17. Jahrhundert im Gebrauch war (Gabbey 1992, S. 309, Anm. 13).

[257] Vgl. Newton 1972, S. 39 und 54 (Hervorhebung dort).

absolute Größe der Zentripetalkraft („vis centripetae quantitas absoluta"), beschleunigende Größe der Zentripetalkraft („vis centripetae quantitas acceleratrix") und bewegende Größe der Zentripetalkraft („vis centripetae quantitas motrix")[258]. In einer ersten Anmerkung („Scholium") folgen seine berühmten Ausführungen zum absoluten Raum und zur absoluten Zeit. Sie soll nicht als formelle Definition speziellerer Grundbegriffe, über die auch unter Vertretern der Mathematischen Naturphilosophie erst ein Konsens hergestellt werden muß (wie etwa über die *vis impressa*) verstanden werden, sondern als Explikation eines allgemein anerkannten Wissens über solche Grundbegriffe, die Newton als „absolute, wahre und mathematische" noch abgrenzt gegenüber einem vulgären, „in Bezug auf die Sinne" gebildeten Vorverständnis, aber als solche von vornherein als unstrittig unterstellt: „Zeit, Raum, Ort und Bewegung, als allen bekannt, erkläre ich nicht"[259].

Die Newton-Forschung der letzten Jahrzehnte hat hinlänglich klar gemacht, daß den hier von Newton eingeführten irreduziblen und quantitativen Grundbegriffen, nämlich Raum, Zeit, Materie und Kraft, eine Ontologie korrespondiert, die es berechtigt erscheinen läßt, eine Mechanik auf ihrer Grundlage als ‚essentialistisch'[260] zu bezeichnen. Nicht nur räumliche und zeitliche Ausdehnung von Körpern, bezogen auf einen ‚absoluten' Raum und eine ‚absolute' Zeit, sind wesentliche Körpereigenschaften, sondern auch die Trägheit, deren Maß die *Masse* ist.[261] Nicht anders verhält es sich mit dem vieldiskutierten vierten Grundbegriff der Newtonschen Mechanik, dem der (äußeren oder direktiven) Kraft: Ungeachtet Newtons gelegentlicher Beteuerung, er führe Kräfte nur ‚mathematisch' ein, hat dieses Basiskonzept, wie vor allem Richard S.

[258] Newton 1872, S. 21-24 bzw. 1972, S. 39-44.

[259] Newton 1872, S. 25.

[260] Vgl. Kap. II, Teil 2.2. Popper bezeichnet Newton aufgrund dessen Haltung zur Erklärung der Schwerkraft als Essentialisten: „Und doch war Newton selbst ein Essentialist. Er hatte sich ernsthaft bemüht, eine annehmbare endgültige Erklärung der Schwerkraft zu finden, indem er den Versuch machte, das quadratische Gesetz aus der Annahme eines mechanischen Stoßes oder Druckes abzuleiten — der einzigen Art von kausaler Aktion, die Descartes zugelassen hatte [...]. Doch er scheiterte damit" (Popper 1994/97 I, S. 155). Bereits früher (Kap. II, Teil 2.1, insbes. Anm. 110) habe ich mit der Rede von „wesentlichen und (oder) allgemeinen" Eigenschaften darauf hingewiesen, daß Newtons Unterscheidung von ‚wesentlichen' und ‚allgemeinen' Eigenschaften für das Problem der Gravitation irrelevant ist (vgl. auch Anm. 263).

[261] Auf die Frage, inwiefern Newtons Einführung des Massenbegriffes über den Begriff der Dichte zirkelhaft ist, kann ich hier nicht näher eingehen. Für einen Überblick zu dieser Problematik s. Jammer 1981, insbes. S. 67-78; eine plausible Rekonstruktion der Newtonschen Argumentation bietet Steinle 1992. Entscheidend in diesem Kontext — und in der Literatur wohl auch unbestritten — ist, daß Newtons quantitativer Massenbegriff die ‚universelle' Eigenschaft der *Trägheit* repräsentiert.

Westfall gezeigt hat, für ihn ein *fundamentum in re*.[262] Grundbegriffe der mathematischen Theorie — verstanden als Begriffe, die in die ‚Axiome' der Theorie eingehen — sind in der KMN, so auch bei Newton, *nie* instrumenteller Natur. Dies gilt insbesondere auch für den Begriff der *Kraft*, der bei Newtons Mechanik besonders in Gestalt der Gravitationskraft hervortritt.[263]

Den vier irreduziblen und quantitativen Allgemeinbegriffen korrespondieren ‚Wesensallgemeinheiten', die auch in die drei Bewegungsgesetze eingehen, mit denen Newton den Einleitungsteil fortsetzt. Sie lauten folgendermaßen:[264]

Lex I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare. [...]

Lex II. Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur. [...]

Lex III. Actioni contrarium semper & aequalum esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales & in partes contrarias dirigi.

[262] „Had Newton been pressed to reduce his dynamics to three ultimate terms, as we now know dynamics can be reduced, he would certainly have chosen, in addition to length and time, force rather than mass. Force was more than a convenient term to express the product of mass times the rate of change of translation. Force was an entity ontologically existent in the universe" (Westfall 1971, S. 507). Ein guter Teil von Westfalls Analyse der Newtonschen Naturphilosophie kann als gelungener Beleg für diese These gelesen werden, die (deshalb) hier nicht weiter ausgeführt zu werden braucht.

[263] „Alle Körper, welche wir beobachtet haben, sind ausgedehnt, beweglich und undurchdringlich; und hieraus schliessen wir, dass alle Körper, auch die nicht beobachteten, ausgedehnt, beweglich und undurchdringlich sind. Ebenso sind alle beobachteten Körper schwer, und hieraus schliessen wir auf die Schwere aller Körper, auch derjenigen, welche wir nicht beobachtet haben. [...] Unter den ursprünglichen Eigenschaften aller Körper [inter primarias qualitates corporum universorum] findet entweder die Schwere statt, oder es finden ebensowenig die Ausdehnung, Beweglichkeit und Undurchdringlichkeit statt. Die Natur der Dinge wird entweder richtig durch die erstere, oder nicht richtig durch die drei letztern erklärt" (Newton 1872, S. 11, mit Änderung; vgl. Newton 1972, S. 26f.). Diese Worte Roger Cotes aus dem Vorwort zur 2. Auflage könnten ohne Newtons Zustimmung kaum in den erläuternden und popularisierenden Einleitungstext von Cotes Eingang gefunden haben.

[264] Newton 1972, S. 54f. Wolfers übersetzt so:

„1. Gesetz. *Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.*

2. Gesetz. *Die Aenderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.*

3. Gesetz. *Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung*" (Newton 1872, S. 32).

An *Lex I* werde ich im nächsten Teil die ‚axiomatisierende' Funktion der Mathematik in Newtons *Principia* exemplarisch darstellen. *Lex III* ist das (auch) zeitlich letzte auf Newtons Weg zur Axiomatisierung seiner Mechanik. Eine gewisse Sonderstellung nimmt es ein, weil es sich des Begriffs ‚actio' bedient, der in den vorangehenden Definitionen nicht vorkommt. Der Begriff wird von Newton in der Anwendung von *Lex III* oft umgangssprachlich gebraucht und erfährt keine eindeutige mathematische Präzisierung. Dort wo ‚actio' eine quantitative Bedeutung erlangt, erweist sie sich als eine aus den primitiven quantitativen Konzepten seiner Mechanik *abgeleitete*, impulsartige Größe.[265] Zum *Inhalt* der *leges motus* sei hier ansonsten nur noch angemerkt, daß *Lex II* weder in seiner ursprünglichen Formulierung noch aufgrund des Gebrauchs, den Newton von diesem Gesetz macht, die heute geläufige Interpretation rechtfertigen kann, wonach die *vis impressa* dem Produkt aus Masse und Beschleunigung proportional ist. Vielmehr soll das Gesetz genau das zum Ausdruck bringen, was der Wortlaut hergibt: Die *vis impressa* ist der Änderung des *motus* proportional, also — da Newton in der zweiten Definition die *quantitas motus* durch Geschwindigkeit und Materiemenge (Masse) eines Körpers bestimmt — proportional der Änderung des Produktes aus Masse und Geschwindigkeit, und *nicht* des Produktes aus Masse und Beschleunigung:

$$F \sim (mv) \quad \text{und nicht} \quad F \sim ma.$$

Stillschweigende ‚Modernisierungen' und Kritik an der (vermeintlichen) Laxheit der ursprünglichen Newtonschen Formulierung von *Lex II* hat es zuhauf gegeben. Sie übersehen ausnahmslos den wesentlichen Umstand, daß dieses Gesetz nach Newton für *alle* physikalischen Vorgänge einen Zusammenhang zwischen Bewegungsänderung und einwirkender Kraft herstellen soll, auch für den Stoß. Die Existenz vollkommen *harter* Körper ist nun aber eine grundlegende Voraussetzung seiner Naturphilosophie. Die Anwendung der modernen Fassung ($F = ma$) auf den instantanen Stoß zweier solcher Körper würde das Vorhandensein unendlich großer *vires impressae* implizieren: Im Rahmen der Newtonschen Naturphilosophie könnte eine solche Regel gar keinen Anspruch auf Allgemeinheit machen, also kein Gesetz, geschweige denn ein Axiom abgeben.

Newton erklärt in den *Principia* nirgendwo, warum er die aufgeführten Sätze als ‚axiomata' bezeichnet. Analysieren wir ihre Stellung innerhalb des Werkes etwas genauer, zunächst ihr Verhältnis zu den Definitionen: Es wäre verfehlt, zwischen beiden Aussagentypen eine scharfe, logisch oder methodologisch durchhaltbare Trennlinie ziehen zu wollen. Weder kann man die vorgebrachten Definitionen als rein analytische

[265] Z.B. als eine Größe, die dem Zeitintegral über eine auf einen Körper ausgeübte Kraft proportional ist (vgl. Westfall 1971, S. 455f. und 548-550). Jedenfalls handelt es sich bei ‚actio', sofern der Begriff bei Newton quantitative Bedeutung hat, um eine *abgeleitete* Konzeption und findet deshalb keine Berücksichtigung unter den Definitionen des Einleitungsteils.

Sätze von synthetischen, empirisch gehaltvollen Axiomen abgrenzen, noch kann man erstere als rein qualitative Begriffsbestimmungen verstehen, die durch letztere in eine mathematische Beziehung gebracht würden. Newton wirft vielmehr bereits mit den Definitionen und dem ersten Scholium ein Begriffsnetz aus, das nicht nur in Hinblick auf die nachfolgenden, empirisch verstandenen Gesetze konzipiert ist, sondern diese teilweise bereits vorwegnimmt[266] und auch wichtige quantitative Bestimmungen seiner Mechanik enthält[267]. Ungeachtet dieser Tatsachen scheint seine eigene Auffassung dahin zu gehen, daß es sich bei der Unterscheidung von Definitionen und Axiomen um eine Trennung von empirisch gehaltlosen Nominaldefinitionen und empirisch gehaltvollen Naturgesetzen handelt.[268] Den Anspruch der *axiomata* darauf, empirisch gehaltvolle, allgemeine Naturgesetze zu sein, bringt er dabei gerade durch den Zusatz *leges motus* zum Ausdruck. Die *Verbindung* beider Prädikate wiederum kann — auch nach Newtons Verständnis — unmöglich so verstanden werden, als sei in den drei Prinzipien der gesamte empirische Gehalt der *Principia* enthalten, so daß dieser nur noch durch geeignete Ableitungen auf einzelne Probleme oder Problemklassen hin eingeengt werden müßte, deren ‚Erklärung' dann genau darin bestünde, eine solche (logische) Einengung aufgewiesen zu haben. Vielmehr liegt auf der Hand, daß die *leges motus* allein gar keine mechanische Fundierung der Physik liefern können: Ohne ein Kraftgesetz, das die im zweiten Gesetz mit der Bewegungsveränderung assoziierte *vis impressa* von der räumlichen Konfiguration des jeweiligen mechanischen Systems und ggf. von anderen Faktoren abhängig macht, ist keine Bewegungsbestimmung und folglich keine empirisch erfolgreiche Mechanik möglich.

III.2.2 Ein Beispiel: Liber I, Sectio II, Theorema I

Damit ist die Frage angesprochen, wie die Axiome mit den weiteren, in den drei Büchern der *Principia* enthaltenen Lehrsätzen — Newton verwendet die Begriffe „corol-

[266] So heißt es in der dritten Definition: „Die Materie besitzt das Vermögen zu widerstehen; deshalb verharrt jeder Körper, soweit es an ihm ist, in einem Zustande der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung" (Newton 1872, S. 21). Das ‚deshalb' verbindet die ‚Wesenseigenschaft' Trägheit mit dem Trägheitsprinzip, das als ‚Lex I' (s.o.) unter die Axiome aufgenommen wird.

[267] Wie die zwischen Masse, Dichte und Volumen, Masse und Gewicht, Bewegungsgröße, Masse und Geschwindigkeit etc. Die gegen Newton vorgebrachten Zirkularitätsargumente nehmen bereits in diesem definitorischen Teil ihren Ausgang.

[268] Newton bezeichnet die Definitionen, für sich genommen, nie explizit als ‚Prinzipien' seiner Naturphilosophie, worunter er Grundsätze versteht, die aus den Erscheinungen ‚deduziert' und durch Induktion verallgemeinert wurden (vgl. Teil 4). Die Axiome hingegen sind für ihn — worauf zurückzukommen sein wird — die weitestgehenden Verallgemeinerungen von Erfahrung, die über die Bewegung materieller Körper gewonnen werden können.

larium", „lemma" und „theorema" — sowie mit den Aufgaben („problema") zusammenhängen. Betrachten wir hierzu ein repräsentatives und durchsichtiges Beispiel, nämlich „Theorema I" aus Buch I, Abschnitt II „Von der Bestimmung der Centripetalkräfte". Es lautet folgendermaßen:[269]

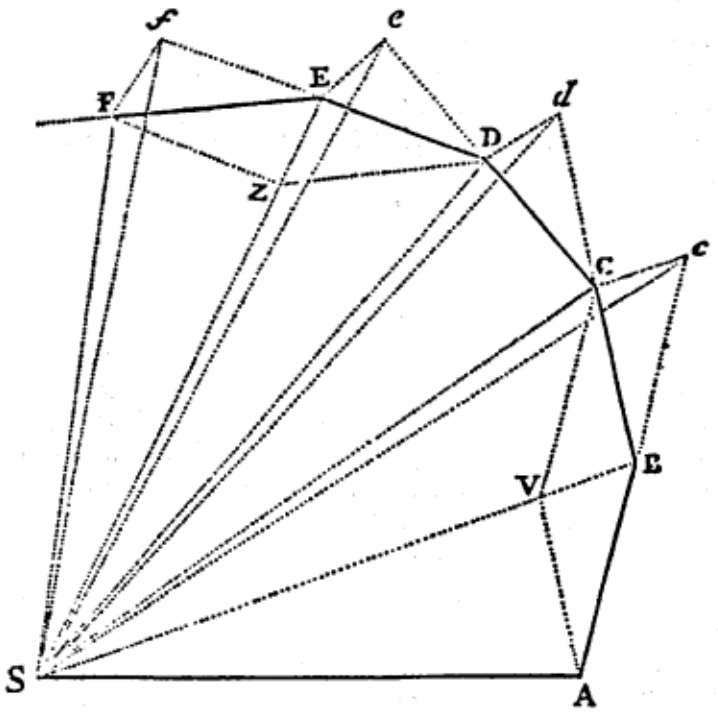

Abb. 1: Zum Flächensatz

Wenn Körper sich in Bahnen bewegen, deren Radien stets nach dem unbeweglichen Mittelpunkte der Kräfte gerichtet sind; so liegen die von ihnen beschriebenen Flächen in festen Ebenen und sind den Zeiten proportional.

Newton formuliert hier eine Verallgemeinerung des Keplerschen Flächensatzes für eine beliebige Zentralkraft. Er stellt die Bewegung eines Körpers, der einer solchen Kraft unterliegt, durch ein Polygon *A*, *B*, *C*, ... dar, dessen Eckpunkte durch äquidistante *Zeit*punkte festgelegt werden: Im ersten Zeitabschnitt bewegt sich der Körper unter Einfluß der (auf das Zentrum S hin gerichteten) Kraft von *A* nach *B*, im zweiten von *B*

[269] Newton 1872, S. 55 bzw. 1972, S. 89 (Abb. 1 aus der letztgenannten Ausgabe).

nach *C*. Jedoch *würde* sich der Körper, „wenn nichts ihn verhinderte", im zweiten Zeitabschnitt geradlinig über *C* hinaus bis *c* (mit *Bc* = *AB*) bewegen — „per leg. I", wie Newton hinzusetzt.[270] Das Trägheitsgesetz legt die ungestörte (geradlinige und gleichförmige) Bewegung *Abc* fest, und eine elementargeometrische Betrachtung zeigt, daß die Dreiecke *ASB* und *BSc* gleichen Flächeninhalt haben. Newton stellt nun — und dies liefert eine Illustration dafür, wie er mit *seinem* zweiten Bewegungsgesetz $F \sim mv$ kontinuierliche Krafteinwirkungen behandelt — die gesamte Einwirkung auf den Körper im zweiten Zeitabschnitt durch einen „einzigen aber starken Impuls auf ihn" dar, der in der Ablenkung entlang *BC* resultiert. Mit Hilfe seiner Parallelogrammregel („Corollarium I" zu den *leges motus*), bei deren Ableitung er sowohl das erste als auch das zweite Bewegungsgesetz heranzieht, zeigt Newton sodann, daß der Körper nach dem zweiten Zeitabschnitt im Punkte *C* der durch *ABS* definierten Fläche angelangt ist und die Fläche der beiden Dreiecke *SBC* und *SBc*, also auch die der Dreiecke *SBC* und *ASB* gleich sind. Dies gilt auch für die weiteren Dreiecke *SCD* und *SBC* ... des Polygons. Mit seiner geometrisch eingekleideten analytischen Methode der ‚ersten und letzten Verhältnisse' konstruiert er nun die krummlinig begrenzte Fläche der ‚tatsächlichen' Zentralkraftbewegung, indem er „ins Unendliche die Zahl der Dreiecke [vermehrt]", wodurch die Zentralkraft selber von einer diskreten zu einer „beständig" wirkenden wird, „und die den Zeiten der Beschreibung proportionalen Flächenräume *SABCS* und *SABCDES* werden auch in diesem Falle ihnen proportional bleiben. Q.E.D.".[271]

Das erste Theorem ist für Newton gleichermaßen ein mathematisch bewiesener Satz wie eine empirisch gehaltvolle Aussage. Es ist jedoch — und dies macht die Analyse des Theorems interessant, aber auch verwickelt — trotz seines *mathematischen* Charakters nicht kategorischer Art und trotz seines *empirischen* Charakters keiner direkten Prüfung an der Erfahrung zugänglich:

Formal handelt es sich um einen Konditionalsatz:[272] ‚*Wenn* Körper sich in Bahnen bewegen, deren Radien stets nach dem unbeweglichen Mittelpunkt der Kräfte gerichtet sind ...'. Die Antezedensbedingung (ich nenne sie *B*) wird expliziert, ihre Erfüllbarkeit aber zunächst nicht weiter diskutiert. Die Gültigkeit des Schlußsatzes *S*, genauer gesagt der Sätze S_1 (Bewegung in einer festen Ebene) und S_2 (Proportionalität der beschriebenen Flächen und der Zeit), wird jedenfalls abhängig gemacht von der Erfüllung von *B*. In den Schluß gehen jedoch — neben geometrischen Sätzen[273] G_i, die ich hier nicht

[270] Newton 1972, 89.

[271] Newton 1872, S. 56 bzw. 1972, S. 90.

[272] Auf den konditionalen Charakter der meisten Theoreme der *Principia* weist bereits Moulines 1988 (insbes. S. 67) hin.

[273] Auf das Problem, in der KMN zwischen Geometrie und Mechanik überhaupt unterscheiden zu wollen, habe ich bereits in Kapitel II hingewiesen. Wenn ich hier doch von ‚geometrischen Sätzen' im Unterschied zu den Axiomen der rationalen Mechanik Newtons spreche, meine ich solche Hilfssätze, in die der Bewegungsbegriff *nicht* explizit eingeht.

weiter diskutiere — auch das erste und – aufgrund der benötigten Parallelogrammregel[274] – das zweite Bewegungsgesetz bzw. ‚Axiom' ein (A_1, A_2). Er nimmt damit folgende Form an:

$$(G_i \wedge A_1 \wedge A_2 \wedge B) \rightarrow (S_1 \wedge S_2)$$

Doch weder die geometrischen Hilfssätze G_i noch die Bewegungsgesetze A_1 und A_2 werden *explizit* als Voraussetzungen dieses Schlusses aufgeführt, sondern lediglich die Bedingung B. Viele Sätze und Beispiele der *Principia* weisen einen konditionalen Charakter von dieser Art auf, wobei die Antezedensbedingungen B_i die in Rede stehenden Klassen von mechanischen Systemen formal einengen, sei es (wie im obigen Beispiel) durch Vorgabe bestimmter geometrischer Einschränkungen, sei es durch die Vorgabe bestimmter konkreter Kraftgesetze oder Typen von Kraftgesetzen. Je länger dabei die Schlußkette wird bzw. je weiter die Hierarchie der Schlußsätze hinabreicht und sich einer Klasse von Phänomenen oder einem Einzelphänomen annähert, umso spezifischer werden die explizit aufgeführten Bedingungen. Erst hier können diese Bedingungen als *hypothetisch* im Sinne von ‚revidierbar aufgrund empirischer Belege' angesprochen werden, erst hier bekommt die Rede vom ‚hypothetisch-deduktivem Charakter' der Newtonschen Wissenschaft überhaupt einen Sinn — und zwar auch nur in bezug auf die ausgewiesenen Antezedensbedingungen, denn die *axiomata* selber stehen nirgendwo zur Disposition. Sie dienen, um an das bereits früher verwendete Bild von Lakatos anzuknüpfen, der *sicheren* Ableitung von Wahrheit ‚nach unten', zur Ebene der Phänomene hin, wobei die vermittelte Wahrheit teils aus den Axiomen selber fließt, teils aus den in den Antezedensbedingungen niedergelegten physikalischen Gesetzesvermutungen. Nur letztere sind *vorläufig*, nicht aber die ‚axiomatisch' wahren Sätze A_i.

Daß die bei der Ableitung ‚höherer' Gesetze eingeführten Antezedensbedingungen *nicht hypothetisch* im Lichte empirischer Prüfung sind, erkennt man bereits am oben vorgestellten Beispiel: Die mit B vorgebrachte Annahme eines *ruhenden* Kraftzentrums steht in offenkundigem Widerspruch zum dritten Bewegungsgesetz. Wenn dieses Gesetz, wie Newton beansprucht, ein universelles Naturgesetz ist, dann ist B offenkundig falsch — ein sowohl kontrafaktischer als auch kontratheoretischer Satz (K&K): kontrafaktisch, weil eine Bewegung wie die beschriebene nie beobachtet wurde, kontratheoretisch, weil sie (aufgrund von A_3) auch nie beobachtet werden kann.

Aber Newton bringt eben auf *dieser* Ebene nicht A_3 gegen B in Stellung, sondern versteht die Ableitung von S_1 und S_2 aus A_1, A_2 und B als ein wichtiges allgemeines Ergebnis seiner Naturphilosophie. Dies liefert ein Beispiel für die bereits früher bemerkte ‚Isolierbarkeit' von Prinzipien in der KMN, einer Folge von deren materialem

[274] Hierzu näher Westfall 1971, S. 476-481, insbes. 478.

Wahrheitsverständnis.[275] Sehen wir zu, wie das daraus resultierende K&K-Problem gelöst wird:

Newton bedient sich des Theorems I in verschiedenen späteren Ableitungen, so etwa in Theorem XIII des Buches III, das Keplers erstes und zweites Gesetz zusammenfaßt. In seine Ableitung dieser Gesetze gehen verschiedene andere Sätze ein, so z.B. Propositio XI (Problema VI) des Buches I, wonach ein Körper, der sich auf einer Ellipsenbahn bewegt und einer Zentripetalkraft unterliegt, die auf einen der Brennpunkte der Ellipse gerichtet ist, umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat angezogen wird.[276] Diese Sätze werden als sicher vorausgesetzt, und Newton leitet aus ihnen Theorem XIII nicht in Form eines konditionalen, sondern eines kategorischen Satzes ab:[277]

Die Planeten bewegen sich in Ellipsen, deren einer Brennpunkt sich im Mittelpunkte der Sonne befindet, und die um denselben beschriebenen Flächenräume sind den Zeiten proportional.

Zweifellos handelt es sich hier für Newton um eines der wichtigsten *Naturgesetze*, die in Buch III formuliert werden, und zwar um ein unbestreitbar *wahres* Naturgesetz. Der konditionale Charakter ‚höherstufiger' Gesetze (wie Theorem I aus Buch I) hindert ihn also nicht, Ableitungen aus denselben (wie Theorem XIII aus Buch III) als kategorisch wahr auszuweisen. Der Grund liegt darin, daß er die in die Ableitung eingehenden *mathematischen* Voraussetzungen (z.B. *B* in Theorem I, die Ellipsenbahn in Problema VI) gar nicht als hypothetisch in einem empirisch relevanten Sinne (d.h. als offen für Revision im Lichte möglicher Anomalien) ansieht: Die *höherstufigen* Sätze sind im axiomatischen Aufbau der *Principia* von vornherein immun gegen solche Widerlegungen.

III.2.3 Die Kritik Duhems und Poppers

Bekanntlich hat Newton in Buch III seines Hauptwerkes von den oben genannten Keplerschen Gesetzen als ‚induktiv gewonnenen' Naturgesetzen Gebrauch gemacht, um aus ihnen — wiederum ‚induktiv'[278] — sein Gravitationsgesetz abzuleiten. Pierre Duhem hat diese Ableitung einer grundlegenden und wissenschaftstheoretisch völlig berechtigten Kritik unterzogen, indem er darauf hinwies, daß sie nicht nur eine induktive Lücke enthält, sondern daß zwischen den Keplerschen Gesetzen und dem Gravitati-

[275] Vgl. Kap. I, Teil 2.2, insbes. Anm. 146.
[276] Newton 1872, S. 69-71 bzw. 1972, S. 118-120.
[277] Ebd., S. 397 bzw. S. 587.
[278] Zu Newtons Verständnis von Induktion, insbes. zur ‚Deduzierung' von Gesetzen aus Phänomenen, vgl. den Teil 4.

onsgesetz ein logischer Widerspruch besteht.[279] Popper hat diese Kritik dahingehend ausgeweitet, daß Newtons Theorie nicht nur der Keplerschen Himmelsmechanik, sondern auch der Galileischen terrestrischen Mechanik widerspreche.[280] Ohne auf diese Kritiken hier im einzelnen eingehen zu können, ist festzustellen, daß beide Philosophen gute Gründe gegen die — noch zu diskutierende — induktive Methode Newtons und ihre Ansprüche vorbringen. Über dieser berechtigten wissenschaftstheoretischen Kritik entgeht jedoch sowohl Duhem als auch Popper das wissenschaftstheorie*geschichtliche* Faktum, daß Newton — wenngleich im Widerspruch zu seiner Methodologie — lediglich die gängigen Prinzipien der KMN zur Anwendung bringt. Insbesondere entgeht dem wissenschaftstheoretischen Holisten Duhem, daß in der KMN eines Newton höherstufige Gesetze als ‚isoliert wahr' gelten (die Keplerschen Gesetze unabhängig von A_3), während der wissenschaftstheoretische Fallibilist Popper zu sehr mit der Bekämpfung sicherer Newtonscher Induktion beschäftigt ist, um zu sehen, daß bei Newton tatsächlich unfehlbare Wahrheit ‚von oben' in das System eingeführt wird. Anders als Duhem und Popper und *trotz deren Kritik* sehe ich die großartige Leistung Newtons gerade darin, in *deduktiver* Art ein ‚Netz' von Begriffen und mathematischen Sätzen aufzubauen, das unter der Fülle des empirischen Belegmaterials nicht ‚reißt', sondern es sogar gestattet, die ‚Maschen' so zu verfeinern, daß der Einzelfall — sei es eine terrestrische, ‚galileische' Bewegung oder eine caelestische, ‚keplersche' Bewegung —

[279] Duhems Kritik beruht auf dem Argument, daß Newton mit feststehenden Zentralkörpern operiert, während das dritte Newtonsche Gesetz dieser Annahme zuwiderläuft: *„Das Prinzip der allgemeinen Gravitation kann daher keineswegs durch Generalisation und Induktion aus den Beobachtungstatsachen, die Kepler formuliert hatte, abgeleitet werden, es widerspricht vielmehr in aller Form diesen Gesetzen. Wenn die Theorie von Newton richtig ist, sind die Keplerschen Gesetze notwendigerweise falsch.*

Es sind daher nicht die Gesetze, die Kepler aus der Beobachtung der Himmelserscheinungen abgeleitet hat, die ihre experimentelle Sicherheit auf das Prinzip der allgemeinen Schwere übertragen, da man im Gegenteil, wenn man die absolute Richtigkeit der Keplerschen Gesetze annimmt, gezwungen wäre, den Lehrsatz, auf den Newton die Mechanik des Himmels aufbaut, zu verwerfen" (Duhem 1908a, S. 257).

[280] Popper greift Duhems Kritik auf (Popper 1993, S. 208, Anm. 10) und teilt sie trotz der ‚Bornschen Verbesserung' der Newtonschen Herleitung (ebd., S. 206, Anm. 8). Er selbst weist zusätzlich u.a. darauf hin, daß das Galileische Fallgesetz eine *konstante* Fallbeschleunigung behauptet, während das Newtonsche Gravitationsgesetz gerade eine vom Abstand des anziehenden Körpers abhängige, d.h. *veränderliche* Fallbeschleunigung aussagt. Sein zusammenfassendes Urteil lautet: „[...] von einem logischen Gesichtspunkt aus widerspricht Newtons Theorie, strenggenommen, der Theorie Galileis wie auch der Keplers (obwohl diese beiden Theorien natürlich als Annäherungen erhalten werden können, sobald wir mit Newtons Theorie arbeiten). Es ist daher unmöglich, daß Newtons Theorie von den beiden anderen durch deduktive oder auch durch induktive Schlüsse abgeleitet werden kann. Denn weder deduktive noch induktive Schlüsse können von widerspruchsfreien Prämissen zu Schlußfolgerungen führen, die diesen Prämissen widersprechen. Das halte ich für ein sehr starkes Argument gegen die Induktion" (ebd., S. 206).

noch *approximiert* wird: Hierin liegt der unifizierende Beitrag der *Principia*, der es durchaus gestattet, sie mit Euklids *Elementen* auf eine Stufe zu stellen.

Tatsächlich geht es ja Newton um nichts anderes als eine solche *Approximation*: Wie in der allgemeinen Charakterisierung der KMN ausgeführt, behauptet diese nicht, jeden (oder auch nur einen) Einzelfall durch ein solches Netz allgemeiner Sätze vollständig und exakt bestimmen zu können.[281] Auch Newton übt sich in dieser Selbstbeschränkung: Wird ein wahres, aber zunächst nur deduktiv erschlossenes Naturgesetz (wie Theorem XIII) auf ein konkretes, physikalisches System (wie unser Sonnensystem) angewandt, zeigt sich eine Diskrepanz zwischen Gesetzesaussage und empirischen Daten, die aber nicht zu Lasten der Gesetzesaussage gehen kann, sondern im Bereich der Anfangs- und Randbedingungen des Einzelfalls zu lösen ist: Die Sonne ruht nicht wirklich (denn A_3 ist ein überall gültiges Naturgesetz), und die Ellipsenbahn ist keine vollkommene (denn wir haben es mit mehreren, einander störenden Planeten zu tun), aber die Gesetzesaussage erweist sich in der *Approximation* an diese Verhältnisse doch als wahr. Newton bringt dies in der Erläuterung des oben angeführten Lehrsatzes durch eine Reihe von Konditionalisierungen zum Ausdruck:[282]

> Wir haben oben diese Bewegungen nach den Erscheinungen discutirt. Sind die Principien der ersteren erst einmal bekannt, so schliessen wir aus ihnen a priori auf die Bewegungen der Himmelskörper. Hat man also gefunden, dass die Gewichte der Planeten gegen die Sonne den Quadraten ihrer Abstände von derselben umgekehrt proportional sind; so leuchtet nach §§. 13., 29. und 32., Zusatz 1. des ersten Buches ein, dass wenn die Sonne sich in Ruhe befände und die Planeten nicht wechselseitig auf einander wirkten, alle ihre Bahnen Ellipsen sein würden, deren gemeinschaftlicher Brennpunkt in der Sonne läge, und dass sie um denselben Flächenräume beschreiben würden, welche den Zeiten proportional wären. Nun sind aber die wechselseitigen Wirkungen der Planeten aufeinander so schwach, dass sie vernachlässigt werden können, und nach §. 107. des ersten Buches wirken sie weniger störend auf die Beschreibung ihrer Ellipsen um die Sonne ein, wenn man diese als beweglich annimmt, als wenn man sie als unbeweglich voraussetzte.

Der ‚rote Faden' von Theorem I in Buch I bis zu dieser starken Konditionalisierung von Theorem XIII in Buch III heißt *Axiomatisierung*[283]: Die Definitionen und Axiome liefern, wie an anderen Beispielen ebenso illustriert werden könnte, die Grundlage für einen deduktiven Aufbau der *Principia*, der bis zur Prüfung der abgeleiteten Gesetze am konkreten Einzelfall reicht. Weitere Voraussetzungen werden — explizit als Antezedensbedingungen ausgewiesen — in die zu beweisenden Sätze eingeführt und verlei-

[281] Vgl. Kap. II, Teil 2.3.

[282] Newton 1872, S. 397. Mit § 13 ist Theorem I, mit § 29 ist Proposition XI (Problem VI) und mit § 32, Zusatz 1 ist Korollar 1 zu Lemma XIV von Buch 1 gemeint; vgl. Newton 1972, S. 88, S. 118f. und 123.

[283] Und nicht ‚Methodologisierung', wie ich im nächsten Teil — entgegen Feyerabends und Lakatos' Newton-Kritik — näher ausführen werde.

hen dem deduktiven System sukzessive empirischen Gehalt. Die Antezedensbedingungen werden aber von Newton bei ‚höherstufigen' Gesetzen faktisch *nicht* als der empirischen Prüfung bedürftig angesehen — in der Tat sind sie einer direkten empirischen Prüfung auch nicht fähig —, so daß sie (mittelbar) als Voraussetzung in die Ableitung von (kategorisch gültigen) Naturgesetzen eingehen. Ihre konditionale *Form* mag dem Mythos vom durchgängig hypothetisch-deduktiven Aufbau der *Principia* Vorschub geleistet haben. Tatsächlich aber findet erst auf ‚unterer' Ebene eine empirisch relevante Konditionalisierung statt, wo durch Aufdeckung von ‚störenden' Nebenbedingungen erklärt wird, warum die Einzelfälle nicht ‚genau' unter die speziellen Gesetze fallen.

Newton selbst bringt diese mathematisch-deduktive Vorgehensweise im abschließenden Scholium zum Abschnitt XI des 1. Buches am klarsten zum Ausdruck:[284]

> In der Mathematik hat man die Grösse der Kräfte und diejenigen Verhältnisse derselben zu erforschen, welche aus gewissen vorausgesetzten Bedingungen hervorgehen. Steigt man hierauf zur Physik herab, so hat man diese Verhältnisse mit den Erscheinungen zu vergleichen, um zu erfahren, welche Bedingungen der Kräfte den einzelnen Arten anziehender Körper [corporum attractivorum] zukommen. Hierauf kann man endlich über die Gattungen der Kräfte, und über ihre physischen Ursachen und Verhältnisse streiten.

Als *System* im Sinne der KMN stehen und fallen die *Principia* mit den drei Axiomen und den mit ihnen zusammenhängenden Definitionen: Sie sind selber wahr und dienen der Sicherung ‚wahrheitserhaltender Ableitungskanäle', die sich — um im Bild zu bleiben — nach unten hin ausweiten (Offenheit für empirisch prüfbare Hypothesen), aber auch ‚Ventilfunktion' haben (Unmöglichkeit empirischer Falsifikation der Axiome, s.u.). Newton erklärt jedoch nicht, warum er diese (nur und genau diese) drei Bewegungsgesetze an die Spitze seines Systems stellt, worin also ihr besonderer *Status* besteht. Aus seinen diesbezüglichen Ausführungen direkt erschließbar ist nur, daß er ihnen größte *Allgemeinheit* zubilligt: Als *mechanische* Prinzipien gelten sie ausnahmslos für alle Körper und Vorgänge, die Gegenstand seiner mathematischen Naturphilosophie werden können. Das Ideal seiner mathematischen Naturphilosophie ist die Erklärung aller natürlichen Vorgänge durch die Wechselwirkung materieller Korpuskel mittels (zentraler) Kräfte. Wenn er in der berühmten Frage 31 der *Opticks* über die „von Gott im Anfang der Dinge" geschaffenen „massiven festen, harten, undurchdringlichen und beweglichen Partikel", die alle Materie konstituieren sollen, bemerkt, daß diese „nicht nur Trägheit besitzen und damit den aus dieser Kraft ganz natürlich entspringenden passiven Bewegungsgesetzen [passive Laws of Motion] unterliegen, sondern dass sie auch von activen Principien, wie die Schwerkraft oder die Ursache der Gährung [Fermentation] und der Cohäsion der Körper sind, bewegt werden"[285], so sind

[284] Newton 1872, S. 191 (mit Korrektur) bzw. 1972, S. 298.
[285] Newton 1898, S. 266 bzw. 1952, 400f.

die ‚passiven Bewegungsgesetze' die Naturgesetze, denen ausnahmslos *alle* Korpuskeln unterliegen, während die verschiedenen ‚aktiven Prinzipien' sich in verschiedenen, nach Newtons Auffassung allerdings auch nur wenigen, Arten von Kräften (mit unterschiedlichen mathematischen Kraftgesetzen) manifestieren. Die Gravitationstheorie, behandelt in Buch III der *Principia*, nimmt dabei eine Sonderstellung in der Newtonschen Naturphilosophie insofern ein, als hier eine empirische Bestimmung mechanischer Größen (Massen, Abstände, Geschwindigkeiten etc.) einfacher ist als in anderen Bereichen (z.B. in der Optik oder bei chemischen Reaktionen). Auch hat, wie ich später begründen werde, das Gravitationsgesetz (G) für Newton faktisch den Status eines Axioms, so daß die durch A_1, A_2, A_3 und G festgelegte Gravitationstheorie nicht nur als pragmatisch, sondern auch erkenntnistheoretisch bevorzugte (nämlich zugleich empirische und infallible) Theorie fungiert.

Grundsätzlich zielt seine mathematische Naturphilosophie darauf ab, *alle* Vorgänge unter die Axiome A_i und wenige weitere (Zentral-)Kraftgesetze zu bringen. Dies ist vielfach belegbar, z.B. anhand der ‚Queries' der *Opticks*, wird von Newton aber als Programm bereits im Vorwort der *Principia* annonciert:[286]

> Alle Schwierigkeit der Physik [philosophiae] besteht nämlich dem Anschein nach darin, aus den Erscheinungen der Bewegung die Kräfte der Natur zu erforschen und hierauf durch diese Kräfte die übrigen Erscheinungen zu erklären. Hierzu dienen die allgemeinen Sätze, welche im ersten und zweiten Buch behandelt werden. Im dritten Buch haben wir, zur Anwendung desselben, das Weltsystem erklärt. Dort wird nämlich aus den Erscheinungen am Himmel, vermittelst mathematischer Sätze, die Kraft der Schwere abgeleitet [...]. Möchte es gestattet sein, die übrigen Erscheinungen auf dieselbe Weise aus mechanischen Principien [ex principiis mechanicis] abzuleiten.

[286] Newton 1872, S. 2 bzw. 1972, S. 16.

III.3 Trägheitsprinzip, absoluter Raum und die ‚axiomatisierende' Funktion der Mathematik

Die Ausführungen des letzten Teils mögen deutlich gemacht haben, inwiefern den *Principia* ein axiomatischer Aufbau zugesprochen werden kann. In diesem und dem folgenden Teil soll der Frage nachgegangen werden, in welchem Sinne Newton den *leges motus* selber auch ‚axiomatische Qualitäten' beilegt. Grundsätzlich wäre an jedem der drei Bewegungsgesetze zu zeigen, daß ihnen — im Rahmen der Newtonschen Naturphilosophie — neben ihrer Allgemeinheit auch eine besondere Evidenz und Sicherheit und sogar eine gewisse Notwendigkeit eigen ist. Für A_2 und A_3 würde ein solcher Nachweis eine weitergehende Auseinandersetzung mit den Grundlagen seiner *Dynamik*, insbesondere mit seiner Ontologie der Kräfte[287] erfordern. Ich beschränke mich hier auf entsprechende Ausführungen zum voraussetzungsärmeren Trägheitsprinzip A1:[288]

1. Gesetz. Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

Der Form nach handelt es sich um einen empirischen Allsatz, im Sinne Newtons also um ein Naturgesetz; dem *Inhalt* nach aber sagt er ohne weitere Bestimmungen alles andere als die Bedingungen einer *natürlichen* Bewegung aus: Aristoteles hätte eine solche Bewegung geradezu als ‚naturwidrig' — eben als *mechanisch* — bezeichnet.[289] Keine rollende Kugel auf glatter Ebene und erst recht nicht die von Newton selber angeführten Geschosse, Kreisel, Planeten und Kometen[290] vermögen, dieses Gesetz als *wahr*, sondern allenfalls, es als eine plausible Approximation zu auszuweisen.

III.3.1 ‚Axiomatisierende' Funktion der Mathematik

Wenn wir versuchen, die Bedeutung des Prinzips A_1 näher zu bestimmen, ist zunächst zu klären, was mit ‚gleichförmig', ‚geradlinig' und — ich kürze ab — mit ‚Kräftefreiheit' gemeint ist. Im Sinne des von Newton vertretenen Empirismus wären

[287] Vgl. insbes. Westfall 1971 und Kutschmann 1983.

[288] Newton 1872, S. 32 bzw. 1972, S. 54.

[289] „Was natürlich abläuft, erregt Verwunderung, solange man den Grund nicht kennt, auch was der Natur entgegen ist, sobald es durch unsere Kunst der Menschheit zum Nutzen sich abspielt" (Aristoteles 1957, S. 21; vgl. hierzu näher Krafft 1967 und 1970 sowie 1982, S. 41f.). Nach dieser formalkausalen Auszeichnung wäre die Newtonsche Trägheitsbewegung zwar noch nicht naturwidrig, wohl aber aufgrund der weitergehenden Aristotelischen Bestimmung, daß *jede* Bewegung einen Grund haben muß.

[290] Vgl. Newton 1872, S. 32.

für diese Ausdrücke *Meßverfahren* anzugeben. Um die Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit einer Bewegung feststellen zu können, müßte dazu vor allem anderen ein beobachtbarer Bezugskörper gegeben sein. Berücksichtigt man hier Newtons Gravitationsgesetz in seiner vollen Allgemeinheit, kann aber ein solcher Bezugskörper unmöglich der Ausmessung einer *kräftefreien* Bewegung dienen, da er selber gravitiert. Demnach wäre also das Trägheitsgesetz nicht nur ein kontrafaktischer, aller Beobachtung widersprechender, sondern auch ein kontratheoretischer, d.h. einem anderen Grundgesetz logisch widersprechender Satz (K&K).[291] Eine solche Interpretation unterstreicht die Notwendigkeit, eine Antwort auf die Frage zu geben, inwiefern das Trägheitsprinzip überhaupt als ein ‚Axiom' im traditionellen Sinne gedacht werden kann — als ein Satz also, der weder beweisbedürftig, noch beweisfähig, sondern selbstevident ist.[292]

Newtons Empirismus, wonach es „die Hauptaufgabe der Naturphilosophie ist, aus den Erscheinungen ohne Hypothese Schlüsse zu ziehen"[293], trägt zur Beantwortung offenbar nicht bei: Nicht ‚hypotheses non fingo', sondern „in philosophicis autem abstrahendum est a sensibus"[294], lautet hier die Losung. Obwohl Newton „Zeit, Raum, Ort und Bewegung als allen bekannt"[295] nicht definiert, setzt er sein Verständnis dieser Begriffe im ‚Scholium' des Einleitungsteils der *Principia* auseinander und eröffnet damit einen Einblick in seine eigentliche Interpretation des Trägheitsprinzips. Vor allem wichtig ist hier Newtons Unterscheidung von absoluten und relativen Größen [quantitates], die er einführt, weil „man gewöhnlich diese Grössen nicht anders, als in Bezug auf die Sinne auffasst und so gewisse Vorurtheile entstehen, zu deren Aufhe-

[291] S. Hanson 1965a, 14; vgl. auch den ‚K&K-Charakter' der Bedingung *B* in Teil 2.

[292] Ich betone diese beiden Punkte — den kontrafaktischen und kontratheoretischen Charakter des ersten Bewegungsgesetzes — hier deshalb so stark, weil in der nachnewtonschen Mechanik eine Vielzahl von Versuchen anzutreffen ist, diesem Satz auf die eine oder andere Art Evidenz zu verleihen. Die eine, *rationalistische* Art greift dabei auf den Satz des zureichenden Grundes zurück. (Es gibt danach keinen Grund, warum ein ‚freier' Körper sich eher nach links oder rechts, eher langsamer oder schneller bewegen sollte.) Bis weit ins 19. Jahrhundert hinein hat dieses Argument immer wieder Anhänger gefunden. Die andere, eher *empiristische* Art findet sich bereits bei Galilei. Sie läuft darauf hinaus zu zeigen, daß eine ungezwungene Bewegung im Sinne unseres Satzes durch sukzessive Elimination von äußeren Störungen empirisch approximiert werden *kann* und folglich als Ideal eine völlig freie Bewegung im Sinne des ersten Bewegungsgesetzes angenommen werden *muß*. Die Erfahrung soll so *erzwingen*, was sie niemals zeigen kann — ein Argument, das v.a. bei den ‚Praktikern' der rationalen Mechanik, d.h. den Mathematikern des 18. und mehr noch des 19. Jahrhunderts, sehr starke Verbreitung fand. So oder so kann es mit der ‚Selbstevidenz' des Satzes nicht weit her sein; es geht hier ja gerade darum, Evidenz zu *vermitteln* und so zumindest einen ‚quasi-axiomatischen' Status zu rechtfertigen.

[293] Newton 1898, S. 243f. (‚Query 28').

[294] Newton 1972, S. 49; „ [...] in der Naturlehre hingegen muss man von den Sinnen abstrahiren", übersetzt J. P. Wolfers (Newton 1872, S. 27).

[295] „... erkläre ich nicht" (Newton 1872, S. 25).

bung man sie passend in absolute und relative, wahre und scheinbare, mathematische und gewöhnliche unterscheidet"[296].

Newtons begriffliche Unterscheidung ‚absolut - relativ' ist durchgängig auch eine Unterscheidung von ‚wahr' und ‚mathematisch' einerseits, sowie ‚scheinbar' und ‚gewöhnlich' andererseits — wobei er die beiden letztgenannten Attribute gelegentlich auch durch ‚natürlich' ersetzt.[297] Der mathematische, „absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äussern Gegenstand, stets gleich und unbeweglich", so heißt es bei Newton, hingegen sei der natürliche, „relative Raum ein Maass oder ein beweglicher Theil des erstern, welcher von unsern Sinnen, durch seine Lage gegen andere Körper bezeichnet und gewöhnlich für den unbeweglichen Raum genommen wird"[298]. Welche Rolle spielt nun diese Unterscheidung in *wissenschaftstheoretischer* Hinsicht?

Zunächst ist zu konstatieren, daß sie weniger als eine erkenntnistheoretische denn als eine *logische* zu verstehen ist, denn wenngleich die relativen Entitäten der Erfahrung direkter zugänglich sind als die absoluten, unterliegen doch beide zunächst ganz verschiedenen Bestimmungsformen: Die Eigenschaften der absoluten Entitäten werden ‚vermöge ihrer inneren Natur', die der relativen Entitäten in ‚Beziehung auf äussere Gegenstände' bestimmt.[299] Aufgrund des logischen Charakters der Unterscheidung sind bestimmte Fragen nur sinnvoll an die erste, andere nur sinnvoll an die zweite Klasse von Eigenschaften zu richten. So wäre es z.B. nicht sinnvoll, in Hinblick auf die absolute Zeit nach der Veränderlichkeit einer Maßeinheit zu fragen, während dies in Hinblick auf die relative Zeit — z.B. als Frage nach der Veränderlichkeit des astronomischen Tages — sehr wohl der Fall ist. Was die Bewegung betrifft, gehören die Eigenschaften Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit in die erste Klasse, und die Frage ist, inwiefern sie in Hinblick auf relative Bewegung sinnvoll ausgesagt werden können.

Newtons Unterscheidung impliziert, daß das Trägheitsgesetz in der oben gegebenen Formulierung auf den mathematischen, absoluten Raum zu beziehen ist. ‚Kräftefreiheit' ist hier kein Thema, da kein materielles Bezugssystem vorkommt. ‚Geradlinigkeit' verweist auf die als selbstverständlich vorausgesetzte Euklidische Struktur des Raumes, ‚Gleichförmigkeit' bezieht die durchlaufenen Strecken auf „die absolute, wahre und mathematische Zeit", die „an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig,

[296] Ebd., S. 25. Nebenbei bemerkt, verpaßt hier der ‚Empirist' Newton dem ‚Rationalisten' Descartes den versteckten Seitenhieb, in sinnlichen „Vorurtheilen" befangen zu sein — ein Seitenhieb auch auf diese gängigen erkenntnistheoretischen ‚Schubladen'.

[297] So spricht Newton etwa von den „natürliche[n]" Tagen, die er als Maß der *relativen* Zeit dem Maß der *absoluten* Zeit gegenüberstellt (ebd., S. 27).

[298] Ebd., 25f.

[299] Ich folge in diesem Punkt Toulmin 1959, S. 15. Allerdings wird die weitere Diskussion zeigen, daß Newton diese Dichotomie nicht stringent einhält.

und ohne Beziehung auf irgend einen äussern Gegenstand" verfließt.[300] Modern gesprochen, handelt sich hier zunächst um *nicht* interpretierte, rein *geometrische* bzw. *kinematische* Begriffe. Es *scheint* daher durchaus nahezuliegen, Newtons Vorgehensweise selbst ‚modern' zu interpretieren — etwa im Sinne des logischen Empirismus, dessen Theoriebegriff durch die Unterscheidung theoretischer Aussagen (hier: über die absoluten Entitäten), einer Beobachtungssprache (hier: über die relativen Entitäten) und vermittelnder Regeln zwischen beiden Bereichen bestimmt ist.[301] In der Tat wurden und werden ja die *Principia* bis heute oft in dieser Weise verstanden.[302]

[300] Newton 1872, S. 25.

[301] Vgl. hierzu König/Pulte 1998

[302] Stellvertretend sei auf die Newton-Darstellung in John Losees *Geschichte der Wissenschaftstheorie* verwiesen. Hier wird nicht nur Newtons „axiomatische Methode" in Form eines ‚Drei-Stufen-Modells' vorgestellt, das im wesentlichen dem Theorieverständnis des frühen logischen Empirismus folgt (Losee 1977, S. 86-90), sondern es wird auch kategorisch behauptet, für Newton seien „alle Interpretationen von Naturvorgängen kontingent [...] und einer Überprüfung im Lichte weiterer Erfahrung zugänglich" (S. 94). Zwischen Newtons Ablehnung Cartesianischer Gesetzesnotwendigkeit, die Losee in diesem Kontext zu Recht betont, und bloßer Kontingenz, von Losee offenbar verstanden als ‚jederzeitige Revidierbarkeit' aufgrund neuer Erfahrung, liegt gerade Newtons Glaube an die Infallibilität zumindest der *Axiome* seiner Wissenschaft, um die es mir hier geht.

Selbst die Interpretation des Wissenschaftshistorikers und Newton-Experten I. Bernard Cohen, generell frei von ‚modernisierenden' Kurzschlüssen, ist in diesem Punkt nicht eindeutig: Cohen unterscheidet in seiner Analyse des ‚Newtonschen Stils', den er als den „Kern der durch Newton revolutionierten Wissenschaft" ansieht (Cohen 1994, S. 248), drei Phasen der Theorieentwicklung: „Newton beginnt mit einem rein mathematischen Konstrukt oder Gedankengespinst — [...] einem vollkommen künstlich erfundenen System, wie es in der realen Welt überhaupt nicht existiert" (ebd., S. 249). In einer zweiten Phase „vergleicht Newton sein ideelles Konstrukt mit der realen Welt" und modifiziert dieses Konstrukt entsprechend der Erfahrung (ebd., S. 249f.). In einer weiteren Phase werden die mathematischen Implikationen des revidierten „ideellen Konstrukts" herausgearbeitet und wiederum mit der „realen Außenwelt" (ebd., S. 250) konfrontiert. In dieser „Manier eines kontrapunktischen Wechsels zwischen mathematischen Konstrukten und Abgleichungen mit der realen Außenwelt" (ebd., S. 251) sieht Cohen das Revolutionäre der Newtonschen mathematischen Methode (vgl. auch Cohen 1980). Während diese Beschreibung auf die Entwicklung der Newtonschen Himmelsmechanik, die bei Cohen im Mittelpunkt steht, zutreffen mag und eine ‚modernisierende' Interpretation des Newtonschen Vorgehens im o.g. Sinne nahelegt, verhalten sich auf axiomatischer Ebene mathematische Konstruktion und Erfahrung *anders* zueinander: Weder sind die mathematisch eingeführten Axiome für Newton ‚künstlich' (sondern *Natur*gesetze), noch sind sie revidierbar oder auf verschiedene Weise konstruierbar. Hier stößt Cohens starke Kontrastierung der Newtonschen und Cartesianischen Naturphilosophie, die auf seiten Newtons durch eine „signifikant neue Art und Weise [...], Mathematik überhaupt in der Naturphilosophie einzusetzen", gekennzeichnet sein soll (Cohen 1994, S. 245), offenkundig an ihre Grenzen.

Ich stimme einer solchen Interpretation nicht zu. Der springende Punkt bei Newton scheint mir nämlich zu sein, daß es in seiner Wissenschaftstheorie keine ‚Theoriesprache' in diesem modernen Sinne gibt und geben kann: Die mit den absoluten Entitäten korrespondierenden Begriffe sind bei ihm nicht formal zu verstehen, sondern sind gehaltvolle, *realitätsvermittelnde* Begriffe. Nicht nur erklärt Newton im Vorwort der *Principia* die praktische Mechanik zur „Basis" der Geometrie und ordnet diese in eine „allgemeine Mechanik"[303] ein, sondern er bestimmt mathematische Größen ganz allgemein als solche, die durch stetige Bewegungen *erzeugt* werden: „Diese Erzeugungen finden in der Natur tatsächlich statt, und man kann sie täglich bei der Bewegung der Körper beobachten".[304] Wenn Newton daher ‚mathematisch', bezogen auf seine absoluten Entitäten, über Bewegung handelt, geht es ihm eben nicht um die Bereitstellung einer formalen Struktur, der nachträglich (durch Korrespondenzregeln) empirische Bedeutung verliehen wird. Vielmehr ist nach seinem Verständnis die Mathematik selber empirisch bedeutungsvoll, sie ist ‚semantisch geladen'[305].

Die Schwierigkeit, das Trägheitsprinzip angemessen zu interpretieren, liegt nun darin, die logische Unterscheidung von ‚mathematischen', absoluten Entitäten einerseits und ‚natürlichen', relativen Entitäten andererseits mit seiner Auffassung von Mathematik, die diese Unterscheidung zu unterlaufen scheint, in Einklang zu bringen. Mein Rekonstruktionsvorschlag hierzu ist, in gebotener Kürze, folgender:

Das Mathematische geht bei Newton *genetisch* aus dem Natürlichen hervor, ist aber mit diesem offenkundig *nicht* identisch (sonst würde sich die Unterscheidung von absoluten und relativen Entitäten von vornherein erübrigen), und es ist begründungstheoretisch primär. Die ‚Kunst' der mathematischen Konstruktion, sozusagen das eigentlich ‚Mechanische' (im Aristotelischen Sinne) an der Mechanik (im Newtonschen Sinne), besteht darin, von dem zu abstrahieren, was der natürlichen Realisierung vollkommener *mathematischer* Bewegungen im Wege steht. Das Trägheitsprinzip ist für Newton deshalb ein *Axiom*, weil es das Ergebnis einer solchen *Abstraktion* darstellt, nicht aber etwa ein Resultat empirischer *Approximation*. Es handelt sich um eine Abstraktion, weil die mathematische Bewegung *in* der Natur liegt und von ihr ‚abgezogen' werden

[303] „Gerade Linien und Kreise beschreiben, sind Aufgaben, nicht der Geometrie sondern der Mechanik; erstere lehrt die Anwendung derselben und es gereicht ihr zum Ruhme, dass sie mit so wenigen, von anderswo hergenommenen Principien so viel leistet. Die Geometrie hat demnach ihre Basis in der praktischen Mechanik [Fundatur igitur *geometria* in praxi mechanica], und sie ist derjenige Theil der allgemeinen Mechanik [mechanicae universalis], welcher die Kunst, genau zu messen, aufstellt und beweist" (Newton 1872, S.1 bzw. 1972, S. 15).

[304] S. die Einleitung Newtons zu *De quadratura curvarum*; zit. nach Becker 1964, S. 153.

[305] Vgl. hierzu bereits Kap. I, Teil 2.1. Toulmin (1959, S. 18) weist auf einen gewissen Platonismus Newtons hin. Für die neuplatonistischen Hintergründe seiner Raumkonzeption vgl. Jammer 1980, S. 118-122.

muß[306], wobei die Abstraktionsprinzipien nur der Mathematik selber entstammen können: Die geometrische Eigenschaft ‚Geradlinigkeit' wird durch die zugrundeliegende Euklidische Geometrie festgelegt, die algebraische Eigenschaft ‚Gleichförmigkeit' durch diese Geometrie im Verbund mit der mathematischen, ‚gleichförmigen' Zeit. Mit einem Wort: Evidenz und Eindeutigkeit des Trägheitsprinzips werden *mathematisch* induziert, nicht durch rollende Kugeln. Die rollenden Kugeln oder andere empirische Beispiele dienen dazu, klar zu machen, daß es sich dabei nicht nur um ein mathematisches Axiom, sondern gleichzeitig um ein *Bewegungsgesetz* handelt, das durch physikalische Prozesse zumindest *approximierbar* ist: ‚axiomata sive *leges motus*'.

III.3.2 Empirischer Charakter des Trägheitsprinzips

Damit komme ich zur empirischen Seite des Trägheitsprinzips. Da es Newton um die mathematischen Grundlagen der *Physik* geht, erfordert seine Unterscheidung von absoluten und relativen Entitäten die Formulierung von *Regeln*, die die empirische Bedeutung der geometrischen Begriffe festlegen, konkret also: die sagen, wie Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit in bezug auf reale Körper gemessen werden können. Dies können, wie bemerkt, keine Korrespondenzregeln im modernen Sinne sein, die der Theorie erst Bedeutung verleihen, sondern es sind Meßregeln, die interne, notwendigerweise *relationale* Bestimmungen dieser Begriffe leisten sollen, deren meßtechnische Realisierung auf ihre idealen und absoluten Gegenüber bezogen bleibt. Newton erörtert solche Regeln nicht in allgemeiner und systematischer Form, sondern anhand konkreter Beispiele, die zeigen, daß es gute und weniger gute geometrische und chronometrische Bezugssysteme gibt. Hier erst wird der Gedanke der *Approximation* empirisch relevant, wenn es nämlich darum geht, solche Bezugssysteme aufzufinden, die annähernde empirische Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit von (annähernd) frei bewegten Körpern liefern: Pendeluhren und die Perioden der Jupitertrabanten liefern bessere Realisierungen chronometrischer Gleichförmigkeit als das Sonnenjahr, weil erstere — ohne erkennbare physikalische Wechselwirkung — *synchron* laufen; Geradlinigkeit ist nicht realisiert für eine rollende Kugel auf einem ebenen Tisch auf einer *rotierenden* Erde,

[306] So versteht Newton bereits in *De gravitatione* den Raum nicht als ein bloßes amorphes Bezugssystem für Bewegungsbestimmungen, sondern als einen ‚Behälter' geometrischer Strukturen, die in ihm realisiert sind und durch die Geometrie — und also nach seinem Geometrieverständnis durch die Mechanik — nur noch versinnlicht werden: „[...] folglich gibt es überall alle Arten von Figuren, überall Geraden, überall Kreise, Ellipsen, Parabeln und alle übrigen Figuren, d.h. jeder Gestalt und Größe, auch solche, die bisher noch nicht durch Zeichnung sichtbar gemacht wurden. Denn die materielle Zeichnung einer Figur ist nicht so etwas wie eine Neuschaffung des Raumes jener Figur, sondern nur ihre körperliche Darstellung, so daß den Sinnen offenbar wird, was vorher [schon] im Raum war" (Newton 1988, S. 39).

sie ist besser realisiert für die Bewegung der Sonne gegenüber dem Fixsternhimmel, und sie ist am besten — möglicherweise sogar vollkommen — realisiert für die Bewegung des Schwerpunktes des Sonnensystems gegenüber dem Fixsternhimmel.[307] Aber solche Approximationen bleiben natürlich empirisch relational, beziehen physikalische Prozesse meßtechnisch *aufeinander*. Sie ‚verifizieren' nicht das Trägheitsprinzip in der A_I-Formulierung, sondern illustrieren eher — im Verbund mit den anderen Axiomen und Kraftgesetzen — seine empirische Anwendbarkeit durch Deduktion bestätigbarer Aussagen, *wenn* es zu einem regulativen Ideal *umgedeutet* wird. Eine solche Umdeutung aber ist logisch zwingend, weil sich A_I auf absolute, der Beobachtung nicht zugängliche Entitäten und Prozesse bezieht. Die Notwendigkeit einer solchen Umdeutung hat Newton selbst nicht gesehen: Sein Induktivismus und sein „mathematischer Realismus"[308], wie er sich in der oben aufgezeigten Beziehung von Geometrie und Mechanik artikuliert, brachten ihn dazu, empirische Anwendbarkeit des regulativen Ideals und Verifikation (im strengen Sinne des Wortes) von A_I *in eins* zu setzen.

Bis zu diesem Punkt ließe sich eine ‚modernisierende' Newton-Interpretation retten, indem man Newtons mathematischen Realismus ignoriert oder als bedauerliche, aber eher belanglose Verirrung kritisiert und zur empiristischen Tagesordnung übergeht: Newtons absoluter Raum wäre demnach zwar notwendig, um ein ideales Trägheitsprinzip zu formulieren, aber er wäre — wie dieses Prinzip selbst — lediglich ein Ideal, das die empirische Gesetzes- und Theoriebildung leiten würde, ohne selbst eine unmittelbare empirische Bedeutung zu beanspruchen. Unter dieser Prämisse könnte man Newton insbesondere gegen die von Leibniz über Berkeley und Mach bis hin zu Einstein geübte Kritik bezüglich der *Existenz* des absoluten Raums ‚immunisieren'. Stützen ließe sich eine solche Interpretation durch das Argument, daß ja Newton selbst unzweideutig festgestellt habe, daß alle tatsächlich beobachtbaren Bewegungen ‚nur' relationaler Art seien[309] und daß insbesondere kein empirisches Unterscheidungskriterium für solche Bewegungen angeben werden könne, die zu seinem absoluten Raum geradlinig-gleichförmig verlaufen, daß also, in moderner Terminologie, alle Inertialsysteme empirisch *äquivalent* seien.[310] Newtons absoluter Raum diene demzufolge keineswegs dazu, beobachtbare Phänomene — wie etwa die Wölbung der Wasseroberfläche im berühmten Eimerexperiment — durch eine unbeobachtbare Entität kausal zu erklären, sondern dazu, Inertial- und Nichtinertialbewegungen auseinanderzuhalten und

[307] Vgl. unten, Zitate 321 und 322.

[308] Jammer 1980, S. 110; vgl. auch Burtt 1932 und Strong 1951 für ähnliche Einschätzungen.

[309] Vgl. Newton 1872, S. 27 bzw. 1972, S. 48f.

[310] So bemerkt Newton etwa im Korollar 5 zu den Bewegungsgesetzen: „Körper, welche in einen gegebenen Raum eingeschlossen sind, haben dieselbe Bewegung unter sich; dieser Raum mag ruhen oder sich gleichförmig und geradlinig, nicht aber im Kreise fortbewegen" (Newton 1872, S. 38 bzw. 1972, S. 59).

eine ‚gute' Definition nichtinertialer Bewegung zu ermöglichen. Die Tatsache, daß sich auf dem oben skizzierten approximativen Wege Inertialsysteme überhaupt auffinden lassen, wäre als Ausdruck der Tatsache zu nehmen, daß wir (in ihnen) jede Beschleunigung eines Körpers auf die Einwirkung anderer Körper zurückführen könnten, während (in bezug auf sie) rotierende Körper Trägheitskräfte erlitten, und eben diese Tatsache würde zur *Definition* des Begriffs ‚Inertialsystem' benutzt. Der absolute Raum wäre aus der Klasse der so definierten Inertialsysteme durch willkürliche Festlegung (als ruhend) auswählbar und diese Wahl selbst eine reine Frage der Bequemlichkeit; er wäre dann nicht als Ursache der Kräfte auf einen wirklich rotierenden Körper anzusehen, sondern man könnte vielmehr sagen, daß eine solche *Definition* von Rotation gegenüber einem festen Bezugssystem — dem absoluten Raum — gut (im Sinne empirischer Bewährung) ist, die das Auftreten solcher Kräfte beinhaltet. Newtons Raum-Zeit-Theorie wäre demnach eine relationale, von jeglichem ‚Metaphysikverdacht' freizusprechende Konzeption.

Einige neuere Untersuchungen haben Newton tatsächlich so interpretieren wollen.[311] Handelt es sich bei ihnen, *systematisch* betrachtet, um einen diskutablen Ansatz für eine empiristische Rechtfertigung der Beibehaltung des absoluten Raumes, bleibt doch in *historischer* Perspektive zu sagen, daß eine solche Rechtfertigung an Newtons Verständnis des absoluten Raumes völlig vorbei geht. Obwohl Raum-Zeit-Theorien nicht zum eigentlichen Themenkreis dieser Studie gehört, muß auf eine Newton-Interpretation der beschriebenen Art eingegangen werden, weil diese einen ‚konventionalistischen' Status des Newtonschen Trägheitsprinzips zu implizieren scheint, der dem hier behaupteten mechanischen Euklidianismus Newtons direkt zuwiderliefe:

Die Newton in dieser Interpretation unterstellte Raum-Zeit-Konzeption bedeutet ja bei näherer Betrachtung nichts anderes als eine *versteckte ‚versteckte Definition'* im Sinne Poincarés: Während Poincaré das Trägheitsprinzip als versteckte Definition

[311] Stellvertretend verweise ich auf DiSalle 1992, der insbes. an die früheren Arbeiten Stein 1967, Friedman 1983 und Earman 1989 anknüpft: „Yet Newton's scholium on space, time and motion, properly understood, never attempts to explain the origin of centrifugal forces, or to use them as evidence for the existence of absolute rotation and absolute space. Instead, the scholium introduces the *definitions* of absolute space, time and motion, and tries to show how they apply to experience. When Newton says that absolute space ‚remains similar and immovable', he is not making the questionable metaphysical claim that is usually attributed to him; he is only saying what he means by absolute space. And he does not use his spinning bucket to prove that absolute rotation, rather than relative rotation, is the cause of centrifugal forces; he is only explaining what he means by absolute rotation and how we can recognize and measure it when we see it. All of this is made clear in the text of the scholium. Newton nowhere says that space is absolute or that absolute space exists" (DiSalle 1992, S. 184).

Interpretatorisch ist hier erstens anzumerken, daß DiSalle Newton Definitionsabsichten unterstellt, die dieser explizit nicht hat („Zeit, Raum, Ort und Bewegung als allen bekannt, erkläre ich nicht"; Newton 1872, S. 25). Zweitens wird darauf verwiesen, daß Newton bezüglich des absoluten Raumes keine explizite Existenzaussage macht, während Newtons Rede von der ‚Natur' des Raumes (ebd., S. 25), seine späteren Ausführungen zu den Eigenschaften dieses Raumes, aber auch seine Ausführungen in der *Opticks* (Newton 1898) sowie die mit seiner Zustimmung im Leibniz-Clarke-Briefwechsel geführte Raumdiskusson von Clarke (vgl. Schüller 1991) und andere Quellen in diesem Punkt gar keinen Zweifel lassen: Wie immer man den Status des absoluten Raumes bei Newton interpretieren mag, kommt man kaum um die Feststellung herum, daß Newton von der *Existenz* dieses Raumes ausgeht. Wenngleich DiSalle zu erkennen gibt, daß es ihm eher um systematische Stringenz als historische Korrektheit geht (vgl. DiSalle 1992, S. 187), machen seine wiederholten Bezugnahmen auf Newtons ‚eigentliche' Vorgehensweise und seine Kritik an anderen Newton-Interpretationen (vgl. ebd., S. 183f., 186, 189 Anm. 2) eben *auch* seinen historischen Anspruch klar. ‚Historisch-systematisch' problematisch wird die fragliche Newton-Interpretation insbesondere dadurch, daß DiSalle (in Anschluß an Stein) Newtons Raum-Zeit-Theorie auf eine vierdimensionale affine Mannigfaltigkeit ‚projiziert' und so in einer Weise modernisiert, die Newton in keiner Weise gerecht wird. So kommt es zu einer Verquikkung guter systematischer Absichten mit schiefen historischen Ansichten, die dem Verständnis der Newtonschen Raumkonzeption und seines Trägheitsprinzips wenig dienlich ist.

(‚définition déguisée') der Kräftefreiheit interpretiert, die durchaus auch anders getroffen werden könnte, liefe diese Raum-Zeit-Konzeption darauf hinaus, Inertialsysteme dadurch zu definieren, daß in ihnen alle beschleunigten Bewegungen mit Kräften, die auf die physikalischen Körper des Systems zurückführbar sind, in Verbindung gebracht werden können:[312] Inertialsysteme definieren ‚Erklärbarkeit von Bewegung durch Kräfte', Nichtinertialsysteme liefern keine solche Definitionsmöglichkeit, und insofern sind beide Klassen von Systemen auch mittelbar empirisch zu unterscheiden. ‚Kräfteunterworfenheit' und *eo ipso* auch Kräftefreiheit werden so durch die Raumkonzeption festgelegt, und es ist auch hier von vornherein nicht einzusehen, warum keine andere Festlegung getroffen werden könnte. Das ist es, was ich — gegenüber Poincarés versteckter Definition — mit *versteckter* versteckter Definition meine.

Aber bei Newton verhält sich die Sache anders: Während Eimerexperiment und ‚Zwei-Kugeln-Experiment'[313] durchaus als Versuche zu verstehen sind, zu einer empirisch begründeten Unterscheidung zwischen Inertialsystemen und Nichtinertialsystemen zu kommen, läßt Newton keinerlei Zweifel daran, daß er *darüber hinaus* auch eine empirisch oder anderweitig *begründete*, nicht nur per Konvention festgelegte, Unterscheidung zwischen allen relativ zueinander bewegten und dem *einen* absolut ruhenden Bezugssystem treffen will: „Absolute und relative Ruhe und Bewegung unterscheiden sich von einander durch ihre Eigenschaften, Ursachen und Wirkungen".[314]

Keiner der ‚modernisierenden' Newton-Interpreten scheint diese Aussage überhaupt ernstgenommen zu haben. Aber man muß sie Ernst nehmen, denn Newton ging es mit seiner Grundlegung der Mechanik, wie unter seinen früheren Schriften das Fragment *De gravitatione* am besten belegt, von Anfang an auch darum, den relationalen Bewegungsbegriff Descartes' zu vermeiden — faules Fundament einer „konfusen und vernunftwidrigen" Lehre, die zu „absurden Konsequenzen" führe.[315] Betrachten wir daher diese Aussage genauer:

Zunächst würde sie eine Überschreitung der von Newton selber gegebenen *logischen* Unterscheidung von absoluten und relativen Entitäten anzeigen, wenn die aufgeführten Unterscheidungskriterien (Eigenschaften, Ursachen, Wirkungen) nur empirische Bedeutung hätten. Absolute Rotation (Rotation gegenüber dem absoluten Raum) wird in der Tat empirisch festgestellt: Sie ist der Erfahrung zugänglich aufgrund ihrer Eigenschaften (z.B. der Wölbung der rotierenden Wasseroberfläche) und Wirkungen generell (d.h. dem Auftreten von Trägheitskräften). Absolute Translation (Translation gegenüber dem absoluten Raum) dagegen kann, wie bereits bemerkt, auch nach Newtons eigener Auffassung empirisch nicht festgestellt werden. Das bedeutet aber nicht, daß alle Inertialsysteme für ihn auch *ontologisch* gleichwertig sind, denn hier kommt

[312] Vgl. DiSalle 1992, S. 182f.
[313] Vgl. Newton 1872, S. 31 bzw. 1972, S. 53.
[314] Ebd., S. 27f. bzw. S. 49.
[315] S. Newton 1988, insbes. S. 19.

mit dem dritten Unterscheidungskriterium (Ursachen) Newtons Kraftkonzeption ins Spiel:[316]

Def. 5: Kraft [vis] ist verursachendes Prinzip der Bewegung und der Ruhe. Sie ist entweder eine äußere, nämlich dann, wenn sie, auf einen Körper angewandt, dessen Bewegung erzeugt oder zerstört, oder wenigstens auf sonst eine Art verändert, oder sie ist ein inneres Prinzip [internum principium], durch das die Bewegung oder Ruhe, die ein Körper hat, erhalten wird und durch das jedes Seiende in seinem Zustand sich zu erhalten sucht und durch das es Widerstand leistet. [...]
Def. 7: Impetus [impetus] ist eine Kraft, insofern sie etwas eingeprägt ist.
Def. 8: Trägheit [inertia] ist die innere Kraft [vis interna] des Körpers [durch die verhindert wird], daß sein Zustand durch eine äußere, angebrachte Kraft leicht verändert wird.

Diese Definitionen sind dem Fragment *De gravitatione* entnommen. Sie bringen aber eine ontologische Bindung Newtons zum Ausdruck, die noch in den *Principia* nachweisbar ist: Als ‚Prinzip der Bewegung und Ruhe' (Def. 5) sind Kräfte unverzichtbar zur Unterscheidung von Ruhe und Bewegung *jeder* Art, auch von absoluter Ruhe und absoluter Translation. Es ist, genauer gesagt, jede absolute Translation dadurch ausgezeichnet, daß sie durch eine Kraft erzeugt wird, und auch dadurch, daß sie durch eine Kraft aufrechterhalten werden muß. Wie er bereits an früherer Stelle bemerkt: „Und deshalb muß die physische und absolute Bewegung von etwas anderm als jener Translation abgeleitet werden, während jene Translation nur als äußerliche Zuschreibung anzusehen ist".[317]

Der Gedanke, daß absolute Translationen durch eine innere Kraft kontinuierlich aufrecht erhalten werden müssen, ist ein Residuum der Impetustheorie in Newtons ‚absoluter Dynamik', und es ist der Begriff ‚impetus' (vgl. Def. 7), der diese inhärente, bewegungserhaltende Kraft des bewegten Körpers zum Ausdruck bringt. Nach verschiedenen Transformationen ist diese Vorstellung, wie verschiedene detaillierte Studien gezeigt haben[318], in den *Principia* noch präsent im Begriff der Trägheitskraft (*vis iner-*

[316] Vgl. ebd., S. 77 bzw. S. 76 (Handschrift). Böhmes Übersetzung wurde hier mit Rücksicht auf das Original leicht modifiziert.

[317] Ebd., S. 27; vgl. hierzu ausführlicher Westfall 1971, S. 362f.: „The basic message of *De gravitatione* is the displacement of relativistic kinematics by absolutistic dynamics in which force rather than translation expresses ultimate reality", faßt Westfall seine Untersuchung zusammen (ebd., S. 363).

[318] Neben der bereits ‚klassischen' Untersuchung von Westfall 1971 sei insbes. verwiesen auf Kutschmann 1983, insbes. S. 46-57 und 103-112. Beiläufig sei erwähnt, daß Newton absolute Bewegungen und absoluten Raum nicht „erstmalig" in *De gravitatione* einführt, wie Kutschmann mit Gernot Böhme vermutet (ebd., S. 57), sondern bereits früher. S. Westfall 1971, S. 342; vgl. hierzu auch Pulte 1993c, insbes. Anm. 29.

tiae; vgl. Def. 8) bzw. dem *dortigen* Begriff der inneren Kraft (*vis insita*); selbst der Begriff *impetus* ist in den *Principia* noch gelegentlich anzutreffen.[319]

Diese Hinweise mögen ausreichen, um zu zeigen, daß Newtons Ontologie der Kräfte eine Bestimmtheit *auch* der absoluten Translation erzwingt, die auf empirischem Wege nicht erzwungen werden kann, und daß dadurch im Rahmen der wissenschaftlichen Metaphysik Newtons für das mathematisch formulierte Axiom A_I eine *Eindeutigkeit* garantiert ist, die nicht durch Konvention herbeigeführt werden mußte, aber auch nicht herbeigeführt werden durfte. Danach kann es in den *Principia* offenbleiben, ob es einen absolut ruhenden physikalischen Körper tatsächlich gibt oder nicht.[320] Newton formuliert zwar die „*Hypothese*. Der Mittelpunkt des Weltsystems befindet sich in Ruhe"[321], aber damit ist der Schwerpunkt des Sonnensystems gemeint — also ein mathematischer Punkt, kein Körper. Offenbar setzt er darauf, „dass irgend ein Körper in der Nähe der Fixsterne oder weit jenseits derselben absolut ruhe"[322], aber von dieser Hypothese hängen Wahrheit und Eindeutigkeit von A_I nicht länger ab: Der absolute geometrische Raum, bezogen auf den A_I formuliert wurde, wird ontologisch ausgezeichnet, ohne empirisch relevant zu sein, das Trägheitsprinzip als regulatives Ideal dagegen erweist sich als empirisch relevant, ohne auf diese ontologische Verpflichtung angewiesen zu sein und wird — eine wissenschaftstheoretisch *nicht* begründete Identifizierung durch Newton — eben diesem Prinzip A_I gleichgesetzt: *eine* Mathematik, *eindeutige* Axiomatik.

III.3.3 Das ‚Paradox der modernen Mechanik' im Rahmen der KMN

Richard Westfall, einer der besten Kenner der Newtonschen Mathematischen Naturphilosophie, bezeichnet es im Kontext der Analyse des Newtonschen Trägheitsprinzips als „the ultimate paradox of modern mechanics — that to assert the principle of inertia is to renounce in the same breath any criterion by which its truth may be demonstrated"[323]. Westfall ist *logisch* insofern recht zu geben, als es Newton ja darum geht, gegen Descartes' Auffassung die Relativität von Bewegungsbestimmungen grundsätzlich zu

[319] Vgl. Newton 1872, S. 21f., 28 und 32 bzw. 1972, S. 40f., 49 und 54. Kutschmann (1983, S. 121) faßt zusammen: „Nach der von mir vertretenen Ansicht hat Newton immer, auch in den *Principia*, an einem generativen Zusammenhang von Kraft und Bewegung festgehalten, einem Zusammenhang, wie er aus der Impetustheorie schon tradiert war und in der ‚absoluten Dynamik' wieder bekräftigt wurde: dergestalt nämlich, daß jede (wahre) Bewegung von einer Kraft erzeugt werde".

[320] „Es kann nämlich der Fall sein, dass kein wirklich ruhender Körper existirt, auf welchen man die Orte und Bewegung beziehen könne" (Newton 1872, S. 27 bzw. 1972, S. 49).

[321] Ebd., S. 396 bzw. S. 386.

[322] Ebd., S. 28 bzw. S. 49.

[323] Westfall 1971, S. 446.

vermeiden, während die Formulierung von A_1 grundsätzlich kein Inertialsystem als (einzig) ‚wahres' auszeichnet. *Historisch* läßt sich dieses Paradox jedoch auflösen, wenn man Newtons Ansatz als eine spezifische ‚KMN-Lösung' des Bewegungsproblems interpretiert, die konventionalistische Elemente in der Axiomatik der Bewegung ausschließen *muß*, um *deren* Wahrheit (die Eindeutigkeit impliziert) zu sichern. Das Beispiel Trägheitsprinzip sollte zeigen, daß es in der Tat eher die Mathematik (hier: die Euklidische Geometrie) als bloße Erfahrung ist, die dies leistet, aber auch, daß eine ‚Implantierung' solcher mathematischer Prinzipien in die Naturphilosophie ohne ontologische Bindungen nicht auskommt. Dies rechtfertigt es, selbst bei einem ‚empiristischen' Begründungsprogramm, wie es das Newtonsche zu sein beansprucht, nicht nur von einem axiomatischen, sondern eben auch von einem fundamentalistischen und essentialistischen Unternehmen (AFE) zu sprechen.

III.4 Prinzipiencertismus und empiristische Methodologie

Allgemeinheit und ‚Essentialität' der Bewegungsgesetze A_1, A_2, A_3 können, wie hier aus Gründen der Umfangsbeschränkung nur für A_1 dargelegt wurde, als Merkmale der Newtonschen Axiomatik ebenso unterstellt werden wie eine gewisse, auf Newtons wissenschaftliche Metaphysik zu beziehende Notwendigkeit. Dies sind jedoch an sich noch keine hinreichenden Eigenschaften für ‚Axiomatizität' im Sinne der klassischen Wissenschaftsauffassung. Newton läßt nun, wie bereits bemerkt, in den *Principia* nirgends klar erkennen, inwiefern er ihnen ‚axiomatische' Qualitäten wie Evidenz und Sicherheit zuzusprechen bereit ist. Gehen wir dieser Frage nach, reicht es nicht aus, den faktischen Aufbau der *Principia* und ihre ontologischen Voraussetzungen zu rekonstruieren; vielmehr muß eine solche Rekonstruktion eingebettet werden in einen weiteren Begründungskontext: Wenn die These zutrifft, daß im klassischen Wissenschaftsverständnis die Fragen nach Ursprung und Geltung der Erkenntnis untrennbar miteinander verbunden sind[324], ist hier Newtons *Empirismus* näher ins Auge zu fassen: Auch wenn dieser, wie die bisherige Untersuchung bereits deutlich gemacht haben mag, nicht konsequent durchgeführt wird, ist *er* es doch, der weiteren Aufschluß über den Status der Axiome in Newtons Mathematischer Naturphilosophie verspricht. Insbesondere ist hier Newtons *Methodologie* zu analysieren, denn sie ist es ja vor allem, die seinem Werk den Nimbus einer ‚modern' empirisch verfahrenden, auf Erkenntnisgewißheit verzichtenden Wissenschaft[325] verschafft hat, also einer Einordnung der *Principia* in die KMN diametral entgegenzustehen scheint.

[324] Vgl. Albert 1991, S. 28; hierzu auch Kap. II, Teil 1.3.
[325] Vgl. für diese verbreitete Sichtweise ‚idealtypisch' die Arbeit Blake 1966.

III.4.1 Methode der Analyse und Synthese

Wichtig für das Verständnis der methodologischen Ausführungen Newtons ist vor allem seine Unterscheidung von Analyse und Synthese:[326]

> Wie in der Mathematik, so sollte auch in der Naturphilosophie [Natural Philosophy] bei Erforschung schwieriger Dinge die analytische Methode der synthetischen vorausgehen. Diese Analysis besteht darin, dass man aus Experimenten und Beobachtungen durch Induction allgemeine Schlüsse zieht und gegen diese keine Einwendungen zulässt, die nicht aus Experimenten oder aus anderen gewissen Wahrheiten entnommen sind. Denn Hypothesen werden in der experimentellen Philosophie [experimental Philosophy] nicht betrachtet. Wenn auch die durch Induction aus den Experimenten und Beobachtungen gewonnenen Resultate nicht als Beweise allgemeiner Schlüsse gelten können, so ist es doch der beste Weg, Schlüsse zu ziehen, den die Natur der Dinge zulässt, und [der Schluss] muss für umso strenger gelten, je allgemeiner die Induction ist. Wenn bei den Erscheinungen keine Ausnahme mit unterläuft, so kann der Schluss allgemein ausgesprochen werden. Wenn aber einmal später durch die Experimente sich eine Ausnahme ergiebt, so muss der Schluss unter Angabe der Ausnahmen ausgesprochen werden. Auf diese Weise können wir in der Analysis vom Zusammengesetzten zum Einfachen, von den Bewegungen zu den sie erzeugenden Kräften fortschreiten, überhaupt von den Wirkungen zu ihren Ursachen, von den besonderen Ursachen zu den allgemeineren, bis der Beweis [the Argument] mit der allgemeinsten Ursache endet. Dies ist die Methode der Analysis; die Synthesis dagegen besteht darin, dass die entdeckten Ursachen als Principien angenommen werden, von denen ausgehend die Erscheinungen erklärt und die Erklärungen bewiesen werden.

Diese Passage aus ‚Query 31' der *Opticks* enthält *in nuce* alle wichtigen Elemente der Newtonschen Methodologie. Sie ist empiristisch zu nennen, insofern sie *(a)* ‚Experiment und Beobachtung' als materiale Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnis und *(b)* die Induktion als wichtigste Methode der Theoriebildung umfaßt sowie *(c) Revidierbarkeit* theoretischer Erkenntnis, insbesondere im Lichte von Erfahrung (‚Experimenten') zu umfassen *scheint*. Im folgenden soll demgegenüber dargelegt werden, daß *(c)* für Newton *kein* allgemeines Merkmal theoretischen Wissens darstellt, sondern vielmehr von einem — durch die Newtonsche Methodologie nicht begründbaren, aber mit ihr kompatiblen — *Prinzipiencertismus* eingeschränkt wird, der es nahelegt, die Newtonsche Mathematische Naturphilosophie als ‚Baconsche Variante'[327] der KMN aufzufassen. Newtons umstrittener *Hypothesenbegriff* wird bei diesem Nachweis eine Schlüsselrolle spielen.

[326] Newton 1898, S. 269 (mit Änderungen) bzw. 1952, S. 404f. Beiläufig sei darauf hingewiesen, daß auch hier die Mathematik (genauer gesagt: die griechische Geometrie, hier nach Pappus) eine offenkundige Leitbildfunktion wahrnimmt.

[327] Nicht zu verwechseln mit der ‚Baconschen Wissenschaft' selbst; vgl. Kap. II, Teil 1.3 und 2.2.

Die Naturphilosophie beginnt mit der Feststellung von Phänomenen, aus denen sie allgemeine Sätze durch Induktion *schließt* (oder ‚deduziert').[328] Die Rede von einer induktiven ‚Deduktion aus Phänomenen' bekommt bei Newton ihren Sinn dadurch, daß *Phänomene* nicht nur durch Einzelbeobachtungen und -experimente gegeben werden, sondern *auch* empirisch gewonnene allgemeine (und sogar mathematisch formulierte) Sätze sein können. Das bekannteste Beispiel für solche Phänomene, die als Phänomene bereits Gesetzeserkenntnis beinhalten — und von Newton auch als ‚Gesetze' angesprochen werden —, sind die Keplerschen Planetengesetze.[329] Was die Phänomene eint, ist also keine formale Eigenschaft, etwa die Darstellbarkeit durch ‚raum-zeitliche singuläre Basissätze' gegenüber theoretischen Allsätzen. Es ginge auch an Newtons Verwendung des Begriffs vorbei, eine (mehr oder weniger unbewußte) ‚Theoriebeladenheit' von Phänomenen ausmachen zu wollen, die deren Abgrenzung gegenüber dem theoretischen Teil seiner Wissenschaft ausschlösse, während sich Newton selber über die Unmöglichkeit einer solchen Abgrenzung nicht im Klaren gewesen sei; vielmehr enthält bei Newton der Begriff ‚Phänomen' von vornherein die Möglichkeit theoretisch-konstruktiver Elemente.[330] Newtons Methodologie enthält jedoch keine Klausel, wonach solche Elemente die empirische Evidenz eines Phänomens in Zweifel ziehen könnten — ‚allgemeine' Phänomene (wie die Keplerschen Gesetze) stehen den Einzelphänomenen insbesondere an Sicherheit nicht nach. Mit einem Wort: Was Phänomene im Sinne Newtons eint, ist ihr Ursprung in der Erfahrung, ihre Unwiderlegbarkeit durch die Erfahrung und ihre Funktion als Ausgang (weiterer) Verallgemeinerung von Erfahrung.[331]

Newton glaubt ganz offenkundig nicht nur an die Möglichkeit einer sicheren Ausgangsbasis im Bereich der Phänomene, sondern auch an die Möglichkeit *unfehlbarer* Verallgemeinerung. Induktion in seinem Sinne verfährt nicht negativ bzw. eliminativ (durch Ausschluß von alternativen Möglichkeiten), sondern ist ein „positiver und direkter" Weg vom Einzelnen zum Allgemeinen bzw. vom Allgemeinen zum Allgemeine-

[328] Im *Scholium generale* heißt es wörtlich: „In hac philosophia propositiones deducuntur ex phaenomenis, & redduntur generales per inductionem" (Newton 1972, S. 764).

[329] Vgl. etwa das Scholium zur ‚Propositio IV' des dritten Buches, wo Newton von dem „von *Kepler* entdeckten Gesetz der Planeten" („legem planetarum a *Keplero* detectam") spricht (Newton 1872, S. 387 bzw. 1972, S. 569); zu Newtons Gesetzesbegriff vgl. Steinle 1995, S. 341-354.

[330] Feyerabend bemerkt treffend, daß es sich bei Newtons Phänomenen um „*ausgewählte* und *idealisierte* Experimente, deren Eigenschaften Punkt für Punkt denen der zu beweisenden Theorie entsprechen", handle (Feyerabend 1981, S. 174). Er generalisiert jedoch zu stark, wenn er kategorisch hinzufügt, sie hätten „den logischen Status von *Gesetzen*" (ebd., Anm. 1), denn Newton wendet den Phänomenbegriff auch auf Einzelbeobachtungen an.

[331] In der ersten Auflage der *Principia* wird dies noch durch Newtons schwankende Begrifflichkeit verdeckt: Er nennt dort (noch) ‚Hypothese', was später ‚Phänomen' heißt; vgl. Koyré 1965, Ch. II und Cohen 1966.

ren.[332] Wir finden aber bei ihm, anders als bei Bacon, keine ausgearbeitete Theorie der Induktion — wohl auch deshalb nicht, weil ‚wichtige' Induktionen (wie die des Gravitationsgesetzes) tatsächlich in *deduktiver* Manier erfolgen.[333] Der Mangel an differenzierten Reflexionen zur propagierten induktiven Methode steht dabei in krassem Gegensatz zu der Tatsache, daß es sich bei ihr um den *einzigen* Weg handeln soll, um zu allgemeinen Gesetzen zu gelangen: „[...] Experimental philosophy proceeds only upon Phenomena & deduces general Propositions from them only by Induction".[334] Weil es der Newtonschen Methodologie an einer wirklichen Theorie der Induktion mangelt, ist auch keine klare Unterscheidung von Induktion und Analyse aufweisbar: Wie das obige Zitat deutlich macht, aber auch andere Belege zeigen, ist die Induktion das ‚verallgemeinernde' Element der Analyse, während umgekehrt nicht gesagt wird, worin das ‚analytische' Element der Induktion bestehen soll. Daher wird auch nicht klar, wie am Ende der Induktion (und also am Ende der Analyse) die Kenntnis allgemeiner *Ursachen* stehen kann: Daß die Analyse mit allgemeinsten Naturgesetzen endet, in denen idealerweise *zugleich* (und sogar im Singular) *die* ‚allgemeinste Ursache' zum Ausdruck kommt, bleibt so, methodologisch betrachtet, ein reiner Glaubenssatz Newtons. Dieser Glaubenssatz entspricht allerdings vollkommen dem fundamentalistisch-essentialistischen und — bezieht man auch Newtons (nicht weniger fragmentarische) Ausführungen zur Synthese ein — auch dem axiomatischen Charakter der KMN:[335] Die durch Analyse gefundenen obersten Prinzipien sind es, die sich in der nachfolgenden Synthese als Axiome erweisen, ohne sich noch als solche *be*weisen zu müssen.

[332] „[...] the Theory, which I propounded, was evinced to me, not by inferring 'tis thus because not otherwise, that is, not by deducing it only from a confutation of contrary suppositions, but by deriving it from Experiments *concluding positively and directly*. The way therefore to examin it is, by considering, whether the Experiments which I propound do prove those parts of the Theory, to which they are applyed; or by prosecuting other Experiments which the Theory may suggest for its examination" (Newton 1958, S. 93).

[333] Lakatos spricht in diesem Zusammenhang sogar von einer „Gleichsetzung von Induktion und Deduktion" und auch davon, daß bei Descartes wie bei Newton die „Induktion der unfehlbare Zwillingsbruder der Deduktion" sei (Lakatos 1982 II, S. 77).

[334] Newton an Cotes vom 31. März 1713 (*Corrrespondence* V, S. 400).

[335] Vgl. Kap. II, Teil 1.3. Newton konterkariert diesen Glaubenssatz an anderer Stelle (vgl. Newton 1952, S. 401f. bzw. das dieser Arbeit vorangestellte Motto) dadurch, daß er dort doch die Möglichkeit in Frage stellt, in allgemeinen Bewegungsgesetzen tatsächliche Ursachenkenntnis vorzufinden. Es handelt sich hier um eine charakteristische Ambivalenz der KMN an der Schwelle zur Moderne, die nicht nur Newtons Naturphilosophie, sondern auch spätere Entwürfe durchzieht.

III.4.2 Hypothesenbegriff

Um den Status der Prinzipien, deren Aufdeckung am Ende der Analyse steht, einzusehen, muß darauf eingegangen werden, wie Newton die Resultate der Analyse, d.h. ‚ursachenenthüllende' Gesetze und Theorien, zur vorgängigen Erfahrung in Beziehung setzt. Hier kommt die vierte seiner berühmten *regulae philosophandi* und damit auch sein umstrittener Hypothesenbegriff ins Spiel:[336]

In der Experimentalphilosophie [philosophia experimentali] muss man die, aus den Erscheinungen [phaenomenis] *durch Induction geschlossenen, Sätze, ungeachtet entgegengesetzter Hypothesen [non obstantibus contrariis hypothesibus], entweder genau oder sehr nahe für wahr halten, solange bis [donec] andere Erscheinungen eintreten, durch welche sie entweder grössere Genauigkeit erlangen, oder Ausnahmen unterworfen werden.*
Dies muss geschehen, damit nicht das Argument der Induction durch Hypothesen [per hypotheses] aufgehoben werde.

Newton führt diese vierte Regel erstmals in der 3. Auflage der *Principia* von 1727 auf — wie ja die meisten seiner allgemeinen methodologischen Bemerkungen erst in den späteren Auflagen seiner beiden Hauptwerke anzutreffen sind. Es ist eine plausible und oft vorgebrachte Vermutung, daß er sie *post festum* eingeführt habe, um seine Gravitationstheorie gegen Angriffe von seiten ‚rationalistischer' Kritiker, namentlich der Cartesianischen und Leibnizschen Schule, zu verteidigen. Die vierte Regel ist dann zu lesen als eine Absage an *deren* Maßstäbe wissenschaftlicher Begründung: Newton verwirft „jeden Einwand der Art, daß seine Theorie unbewiesen sei, weil nicht auf evidenten Kartesischen Voraussetzungen ruhend, und er somit ‚ohne Fundament gebaut' habe; zum zweiten jeden Einwand der Art, daß seine Theorie nicht nur nicht aufgrund der apriorischen ersten Grundsätze bewiesen sei, sondern ihnen geradezu widerspreche".[337] Die vierte Regel wäre demnach bloßer Ausdruck eines ‚undogmatischen Dogmatismus' — nämlich einer Immunisierung des eigenen Programms gegen verfehlte rationalistische Letztbegründungsansprüche.

Es ist aber auch zu fragen, inwiefern man diese Regel ‚(selbst-)kritisch' interpretieren kann und muß, denn unbeschadet des Glaubens an die Möglichkeit einer sicheren Erkenntnisgrundlage in den Phänomenen und sicherer induktiver Verallgemeinerung scheint sie doch eine methodologische Offenheit für die Revision der eigenen Prinzipien zum Ausdruck zu bringen. Dies ist jedoch *nicht* der Fall, wie eine genauere Analyse zeigt:

Die Regel beinhaltet erstens die Warnung, durch Beobachtung und Verallgemeinerung erreichte allgemeine Sätze nicht leichtfertig, nämlich bereits aufgrund widerstreitender *Hypothesen*, aufs Spiel zu setzen. Sie gibt zweitens eine Bedingung an, wann

[336] Newton 1872, S. 381 (mit Änderungen) bzw. Newton 1972, S. 555 (Hervorhebung dort).
[337] Lakatos 1982 I, S. 221.

eine echte Revision (und nicht nur eine marginale Verbesserung) induktiv gewonnener Sätze ins Auge zu fassen sei: das Auftreten von Phänomenen, die als *Ausnahmen* von solchen Sätzen bewertet werden müssen.

Zunächst zu Newtons Warnung, die ja in Gestalt des schillernden ‚Hypotheses non fingo', zu finden im Scholium *generale* der 3. Auflage der *Principia*, besonders populär geworden ist. Newton hat im Laufe der Zeit als ‚Hypothese' bezeichnet, was bei ihm zu anderen Zeiten Phänomen, Gesetz, Regel (des Philosophierens) und sogar Axiom hieß. Erst in seinen späteren Jahren, etwa ab 1685, zeichnet sich sein Gebrauch des Begriffes durch eine gewisse Einheitlichkeit aus — Ausdruck einer zunehmend hypothesenfeindlichen Haltung Newtons, wie zuerst Alexandre Koyré herausgearbeitet hat.[338]

Hypothesen sind danach von Phänomenen einerseits und aus Phänomenen ‚abgeleiteten' Gesetzen bzw. Theorien andererseits, klar zu unterscheiden: „[...] only such a Proposition as is not a Phaenomenon nor deduced from any Phaenomena but assumed or supposed without any experimental proof"[339]. Die wesentliche Eigenschaft der Hypothese ist ihre *Unbewiesenheit*. Dabei spielt zunächst keine Rolle, ob über ihre Wahrheit bzw. Falschheit womöglich zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden kann oder ob es sich um eine schlechterdings unbeweisbare Annahme handelt.

‚Hypotheses non fingo' meint nun nicht, daß solche Annahmen oder Vermutungen in der Naturphilosophie keinerlei Wert hätten und daher auszuschließen seien, sondern vielmehr, keine *fingierten* (erdichteten) Hypothesen einzuführen, also solche, denen von vornherein kein ernsthafter Wahrheitsanspruch zuerkannt werden kann.[340] Newton wendet sich damit gegen einen rein instrumentalistischen Hypothesengebrauch, wie er in der Astronomie — insbesondere von Osiander in seinem Vorwort zu Kopernikus' *De Revolutionibus* — häufiger praktiziert wurde. Er fordert m.a.W., nur ‚gute', wahrheitsverheißende Hypothesen zuzulassen. Dies sind für ihn, wie bereits seine frühen methodologischen Ausführungen zur Optik belegen, Vermutungen, die so eingerichtet sind („accomodari"), daß sie die durch Beobachtung festgestellten Eigenschaften der Körper erklären, aber nicht solche, die diese vorderhand bestimmen („determinare") — es sei denn, sie dienten der Durchführung neuer Experimente. Newton appelliert hier an eine ‚reine', vorurteilsfreie Erfahrungserkenntnis im Sinne Bacons, die erlangt zu haben allerdings nicht anders feststellbar ist als durch den weiteren *Prozeß* der Erfahrungsgewinnung: Hypothesen, die beliebig, d.h. von Fall zu Fall, eingeführt werden, können zu keiner sicheren Erkenntnis führen. (Aus falschen Voraussetzungen könnten ja wahre Schlüsse gezogen werden.). Sie generieren neue Probleme und taugen nicht

[338] S. Koyré 1965, insbes. Ch. II und Ch. VI, sowie Cohen 1966, insbes. ‚App. One'; vgl. auch Tonelli 1974, insbes. Sp. 1263.

[339] Newton an Cotes vom 28. März 1713 (*Correspondence* V, S. 397).

[340] Vgl. hierzu und zu den diversen Übersetzungsprobleme des ‚hypotheses non fingo' Koyré 1965, insbes. S. 35-38.

zur Verallgemeinerung.[341] Die Verallgemeinerungsfähigkeit ist das einzige positive Kriterium ‚guter' Hypothesen. Dies wirft die Frage auf, wie Newton zwischen (guten, aber vermutungshaften) Hypothesen und (induktiv gewonnenen, daher sicheren) Gesetzen unterscheiden kann. Tatsächlich liefert er kein Unterscheidungskriterium, das durch seine empiristische Methodologie abgedeckt wäre, baut aber — wie später deutlich werden wird — zwischen Hypothesen und Gesetzen geradezu einen ‚rhetorischen Demarkationswall' auf.

Interpretiert man die vierte der *regulae philosophandi* vor dem Hintergrund des Newtonschen Hypothesenbegriffs, kommt man kaum um den Schluß umhin, daß es sich hierbei um eine äußerst restriktive methodologische Forderung handelt: Nach dieser Regel dürfen keine, auch keine ‚guten' Hypothesen gegen induktiv gewonnene Sätze oder Theorien gerichtet werden. Erfolgreich abgeschlossene Induktion über einen bestimmten Phänomenbereich erübrigt also weitere Hypothesenbildung. Dies ist nichts anderes als eine Aufforderung zum Spekulationsverzicht und zur Abwehr jedweder Theorienpluralisierung, geradezu ein ‚Markenzeichen' des mechanischen Euklidianismus, wie bereits früher deutlich wurde.[342]

Diese Aufforderung sei aber, so mag man entgegnen, an eine Bedingung gebunden: Sie gelte ja nur ‚solange bis andere Erscheinungen [phaenomena] eintreten'. Was aber sagt die Newtonsche Methodologie für den negativen Fall, daß solche Erscheinungen ‚tatsächlich' nicht unter die induktiv gewonnenen Lehrsätze fallen, sich also als ‚Ausnahmen' erweisen? Für diesen Fall gibt die vierte Regel keine Anweisung; das ‚solange ...' bleibt negativ, es sagt nicht, was zu tun ist. Die einzige mögliche Antwort Newtons findet sich in der eingangs zitierten Passage aus ‚Query 31' der *Opticks*: , ... so muss der [induktive] Schluss unter Angabe der Ausnahmen ausgesprochen werden'. Der Gültigkeitsbereich der Sätze wird eingeschränkt (Angabe von Ausnahmen), aber die Sätze als solche werden durch widerstreitende Phänomene nicht widerlegt oder auch nur in Frage gestellt (Ausschluß von Falsifikation). Widerstrebende Erscheinungen können demnach nur als ‚Restriktoren', nicht als ‚Falsifikatoren' fungieren. Dies ist eine logische Konsequenz des Newtonschen Induktivismus: Widerlegung oder Hypothesierung sind ausgeschlossen, weil es sich sowohl bei Ausnahmen (als Phänomenen)

[341] „Nam *Hypotheses* ad explicandas rerum proprietates tantùm accomodari debent, et non ad determinandas usurpari, nisi quatenus experimenta subministrare possint. Et si quis ex solâ *Hypothesim* possibilitate de veritate rerum conjecturam faciat, non video quo pacto quicquam certi in ulla scientia determinare possit; siquidem alias atque alias Hypotheses semper liceat excogitare, quae novas difficultates suppeditare videbuntur. Quamobrem ab *Hypothesium* contemplatione, tanquam improprio argumentandi Loco, hîc abstinendum esse censui, et vim Objectionis abstrahendam esse, ut pleniorem et magis generalem responsionem accipiat" (Newton an Oldenburg für Pardies vom 10. Juni 1672; *Correspondence* I, S. 164). Vgl. hierzu auch Sabra 1981, S. 285f.

[342] Vgl. Kap. II, Teil 2.4.

als auch bei den Sätzen (als induktiven Schlüssen) um unbestreitbare *Wahrheiten* handelt.

Die Methode der Geltungsbeschränkung kann nun aber nicht angewandt werden auf Sätze, die Newton als Prinzipien an die Spitze des deduktiven Aufbaus seiner Theorie stellt, nämlich die drei Bewegungsgesetze und — in Hinblick auf Buch III der *Principia* — das Gravitationsgesetz: Diese Sätze verdanken nämlich ihre Stellung, folgt man Newtons Methodologie, der für sie behaupteten uneingeschränkten *Allgemeinheit*. In seiner ‚induktiven Hierarchie' fallen daher größte Allgemeinheit und Sicherheit zusammen. Man kann dabei nicht sagen, daß Sicherheit (im Sinne von Immunität gegen empirische Falsifikation) die *Folge* einer *methodologischen* Entscheidung Newtons wäre, also eine Konsequenz des Entschlusses, die Prinzipien seiner Mathematischen Naturphilosophie in konventionalistischer Art als allgemein festzusetzen und *dadurch* mögliche Falsifikatoren — wie diese auch im einzelnen beschaffen sein mögen — von ihnen abzuwenden. Eher handelt es sich hier um einen Ausdruck seiner methodologisch nicht abgesicherten und auch nicht absicherbaren metaphysischen Überzeugung, daß Gesetze größter Allgemeinheit die ‚Wesenseigenschaften' der Körperwelt erfassen — eine Überzeugung, die sich allerdings in Newtons Verbindung von Induktion und Analyse methodologisch manifestiert und auch manifestieren muß: Der ‚klassische Empirismus', wie Feyerabend ihn nennt, muß seinen Certismus *methodologisch* einkleiden, weil er den diesem Certismus zugrunde liegenden Essentialismus empirisch nicht begründen *kann* und metaphysisch nicht begründen *darf*.

III.4.3 Prinzipiencertismus

Roger Cotes, der philosophisch eigenständigste Kopf aus der engeren Schülerschaft Newtons, hat sich einerseits für einen ‚offeneren' Essentialismus ausgesprochen, als Newton ihn vertreten mochte.[343] Andererseits hat er deutlich das Problem gesehen, Newtons empiristischen Prinzipiencertismus vom rationalistischen Typus eines Descartes, der glaubt, „sich allein auf die Kraft seines Geistes und das innere Licht seiner Vernunft" [344] stützen zu können, abzugrenzen. Im Rahmen seiner Vorbereitung zur zweiten Auflage der *Principia* wendet er sich an Newton, um in dieser Frage größere Klarheit zu gewinnen: „I think it will be proper [...] to add something more particularly concerning the manner of Philosophizing made use of & wherin it differs from that of

[343] „Unter den ursprünglichen Eigenschaften aller Körper [inter primarias qualitates corporum universorum] findet entweder die Schwere statt, oder es finden ebensowenig die Ausdehnung, Beweglichkeit und Undurchdringlichkeit statt. Die Natur der Dinge wird entweder richtig durch die erstere, oder nicht richtig durch die drei letztern erklärt" (‚Vorrede' von Cotes zur zweiten Ausgabe; Newton 1872, S. 11, mit Änderung, bzw. 1972, S. 27).

[344] Ebd., S. 18.

De Cartes & others. I mean in first demonstrating the Principles it imploys".[345] Cotes geht es hierbei zunächst um eine populäre Darlegung der Newtonschen ‚Deduktion' des Gravitationsgesetzes, die er dem Leser in seiner Vorrede zur 2. Auflage vermitteln möchte. Interessant wird seine Anfrage an Newton aber vor allem dadurch, daß er Schwierigkeiten hat, die Wechselseitigkeit der Anziehung zu verstehen und seine diesbezüglichen Bedenken in ein Gedankenexperiment[346] faßt, das eine Verletzung der Bewegungsgesetze und eine Hypothesenfingierung durch Newton nachzuweisen scheint, die dessen expliziter Methodologie zuwiderlaufen: „[...] 'till this Objection be cleared I would not undertake to answer any one who should assert You do *Hypothesim fingere* I think You seem tacitly to make this Suppositon that the Attractive Force resides in the Central Body".[347]

Newton reagiert auf Cotes' Bedenken mit einer kurzen Antwort und einem wesentlich ausführlicheren Entwurf zu derselben. Beide Schreiben belegen seinen Prinzipiencertismus eindrucksvoll, wenn auch in unterschiedlichem Maße. Der Antwortbrief enthält zum einen eine Abgrenzung von Hypothesen und Prinzipien, die letztere gegen alle empirischen Einwände immunisiert, zum anderen eine auf dieser Abgrenzung aufbauende Zurückweisung des Cotesschen Gedankenexperimentes:[348]

[...] the Difficulty you mention wch lies in these words [...] is removed by considering that as in Geometry the word Hypothesis is not taken in so large a sense as to include the Axiomes & Postulates, so in experimental Philosophy it is not to be taken in so large a sense as to include the

[345] Cotes an Newton vom 18. März 1712/13 (*Correspondence* V, S. 391).

[346] Ebd., S. 392. Das Beispiel selbst sei nur beiläufig angeführt, weil es hier nicht um die inhaltliche Auseinandersetzung geht (in der Newton recht zu geben ist), sondern um Newtons *Form* der Argumentation (vgl. Zitat 347): Newton stellt im ersten Korollar zur Propositon V des 3. Buches fest, daß die Anziehung eine wechelseitige sei („Et cum Attractio omnis mutua sit ..."). Die Wahrheit dieser Worte zieht Cotes in Zweifel. Zur Begründung nimmt er zwei ruhende Kugeln A und B auf einem ebenen Tisch an. B werde durch eine „invisible hand" zu A hin bewegt, ohne daß ein Beobachter der Ursache dieser Bewegung gewahr werde. Der Beobachter sei dann berechtigt, die Kraft, die B bewege, als auf A hin gerichtete Zentripetalkraft und sogar als Attraktion von A zu bezeichnen, „since ye effect appears the same as if it did truly proceed from a proper & real Attraction of A". Der Beobachter könne aber im Falle einer *solchen* Attraktion nicht aufgrund des ‚Axioms' *Attractio omnis mutua est* den der Erfahrung widerstreitenden Schluß ziehen, daß sich A auch auf B zu bewege und beide sich im gemeinsamen Schwerpunkt träfen. Cotes schließt hieraus auf eine ‚tacit supposition' Newtons, wonach die Attraktion tatsächlich im Zentralkörper (hier also in Körper A) ihren Sitz habe. Cotes' Schwierigkeit rührt daher, daß Newton sein drittes Bewegungsgesetz in Buch 3 zunächst gar nicht ins Spiel bringt und daher für ihn nicht erkennbar ist (vgl. Teil 2). Die Herausgeber der *Correspondence* bemerken mehr Cotes- und weniger Newton-kritisch: „Cotes seems naively to have misunderstood the implications of the third law here" (ebd., S. 393, Anm. 5).

[347] Ebd., S. 392.

[348] Newton an Cotes vom 28. März 1713 (*Correspondence* V, S. 396f.).

first Principles or Axioms wch I call the laws of motion. These Principles are deduced from Phaenomena & made general by Induction: wch is the highest evidence that a Proposition can have in this philosophy [...].
If a body attracts another body contiguous to it & is not mutually attracted by the other: the attracted body will drive the other before it & both will go away together wth an accelerated motion in infinitum, as it were by a self moving principle, contrary to ye first law of motion, whereas there is no such phaenomenon in all nature.

Newtons Widerlegung des Gedankenexperimentes von Cotes hat die Struktur eines indirekten Beweises: Wäre Cotes im Recht, würde eines der Axiome der *Principia* (nämlich das Trägheitsprinzip) falsch sein, *also* hat Cotes unrecht. Der Schluß wird vorderhand dadurch abgesichert, daß die Axiome, dem Vorbild der Mathematik folgend (‚... as in Geometry, ... so in experimental Philosophy'), von einer möglichen Revision ausgeschlossen werden: Sie sind eben keine Hypothesen, sondern *Axiome*, denen kein Naturphänomen widerspricht (‚... there is no such phaenomenon in all nature').

Der *Entwurf* zu der Antwort an Cotes kann geradezu als ein ‚prinzipiencertistisches Manifest' bezeichnet werden[349], das die Widerlegung des Cotesschen Gedankenexperiments um einige wichtige Argumente ergänzt, die von Newton gewöhnlich gar nicht artikuliert werden und — aufgrund des *generell* prinzipiencertistischen Charakters der KMN — auch gar nicht artikuliert werden müssen. Ich weise hier besonders auf die folgenden drei Gesichtspunkte hin:

(1) Die drei Bewegungsgesetze sind — aufgrund der induktiven Methode ihrer Gewinnung und der mathematisch-deduktiven Methode ihrer Anwendung in den *Principia* — als Axiome und nicht als Hypothesen aufzufassen.[350]

(2) Die ‚experimentelle Philosophie' (Newtons) unterscheidet sich von der ‚hypothetischen Philosophie' (Descartes', Leibniz' und anderer) durch die methodisch erreichte Sicherung ihrer Grundlagen, namentlich der drei Bewegungsgesetze.[351]

[349] Es scheint nicht aufgeklärt zu sein, warum Newton diesen Entwurf unterdrückt hat. Die Vermutung liegt nahe, daß er zu sehr von seiner generellen Linie, an Reflexionen über den Status seiner Bewegungsgesetze so wenig wie möglich zu verlautbaren, abwich: Durch ‚vielfältige Versuche' auf *echte* Axiome gekommen zu sein, war ein Anspruch, den Newton weder selbst öffentlich vertreten hat noch durch Cotes vertreten sehen mochte.

[350] Der Entwuf der Antwort an Cotes beginnt so: „I like your design of adding something more particulary concerning the manner of Philosophizing made use of in the Principia & wherein it differs from the method of others, viz by deducing things mathematically from principles derived from Phaenomena by Induction. These Principles are the 3 laws of motion. And these Laws in being deduced from Phaenomena by Induction & backt with reason & the three general Rules of philosophizing are distinguished from Hypotheses & considered as Axioms. Upon these are frounded [*sic*] all the Propositions in the first & second Book. And these Propositions are in the third Book applied to the motions of ye heavenly bodies" (ebd., S. 398).

(3) Die drei Bewegungsgesetze zeichnen sich durch größtmögliche Evidenz aus — eine Evidenz, die vergleichbar ist mit der unserer Kenntnis primärer Eigenschaften der Körper (wie der Undurchdringlichkeit) und der der Axiome der Geometrie.[352]

Newtons Prinzipiencertismus, wie er hier zum Ausdruck kommt, wird durch seine empiristische Methodologie im wesentlichen noch *bis heute* verdeckt. Aber Newton

[351] „Experimental Philosophy reduces Phaenomena to general Rules & looks upon the Rules to be general when they hold generally in Phaenomena. It is not enough to object that a contrary phaenomenon may happen but to make a legitimate objection, a contrary phenomenon must actually be produced. Hypothetical Philosophy consists in imaginary explications of things & imaginary arguments for or against such explications, or against the arguments of Experimental Philosophers founded upon Induction. The first sort of Philosophy is followed by me, the latter too much by Cartes, Leibniz & some others. And according to the first sort of Philosophy the three Laws of motion are proposed as general Principles of Philosophy tho founded upon Phaenomena by no better Argument then that of Induction without exception of any one Phaenomenon" (ebd., S. 398f.); zur ‚höchsten Evidenz' vgl. auch Zitat 347.

[352] Das obige Zitat (Anm. 351) wird fortgesetzt mit den Worten: „For the impenetrability of matter is grownded upon no better an Argument". Newtons essentialistisches Prinzipienverständnis kommt auch in verschiedenen anderen Parallelisierungen von Bewegungsgesetzen und Undurchdringlichkeit zum Ausdruck, z.B. in folgender Kritik des ‚absurden' Gedankenexperimentes (vgl. Anm. 346) von Cotes: „And such an absurd Hypothesis wch would disturb all nature, is not to be admitted in opposition to the first & third Laws of motion wch are grownded upon Phaenomena. For that all attraction is mutual & mutually equal follows from both those laws. One may suppose that God can create a penetrable body & so reject the first law of motion. One may suppose that God can create a penetrable body & so reject the impenetrability of matter. But to admitt of such Hypotheses in opposition to rational Propositions founded upon Phaenomena by Induction is to destroy all arguments taken From Phaenomena by Induction & all Principles founded upon such arguments. And therefore as I regard not Hypotheses in explaining the Phenomena of nature so I regard them not in opposition to arguments founded upon Phaenomena by Indcution or to Principles seted upon such arguments" (ebd., S. 398).

Newton macht hier von seinem eigenen, oben dargelegten Hypothesenbegriff Gebrauch. Daß er den *weiteren*, in der Mathematik (und insbesondere in der Astronomie) anzutreffenden Gebrauch dieses Begriffes kennt, aber gerade deshalb nicht adaptiert, um *sichere* Wahrheiten (Bewegungsgesetze, geometrische Axiome, Sätze von der Art: ‚Alle Körper sind undurchdringlich.') von revidierbaren abzugrenzen, machen die letzten Sätze aus dem Schlußpassus seines Entwurfs deutlich: „In Mathematicks all Propositions not demonstrated mathematically are Hypotheses, but some are admitted as Principles under the name of Axioms or Postulates without being called Hypotheses. So in experimental Philosophy its proper to distinguish Propositions into Principles, Propositons & Hypotheses, calling those Propositions wch are deduced from Phaenomena by proper Arguments & made general by Induction (the best way of arguing in Philosophy for a general Propositon) & those Hypotheses wch are not deduced from Phaenomena by proper arguments. But if any man will take the word Hypothesis in a larger sense, he may extend it, if he pleases to the impenetrability of matter the laws of motion & the Axioms of Geometers. For it is not worth the while to dispute about the signification of a word" (ebd., S. 399).

selber war, natürlich zu Recht, nie wirklich überzeugt, daß eine rein methodologische Rechtfertigung dieser Position ausreichen würde.[353] Wir finden in seinem Werk, mehr oder weniger andeutungsweise, verschiedene andere Argumentationsstränge, die sich als Versuche interpretieren lassen, die verbleibende ‚Sicherheitslücke' zu schließen. So führt er bereits im ersten *Scholium* seines Hauptwerkes die Bewegungsgesetze und die aus ihnen abgeleiteten Korollare *nicht* ein als Prinzipien, „welche von den Mathematikern *angenommen*, und durch vielfältige Versuche bestätigt worden sind", wie es die Wolfersche Übersetzung will[354], sondern vielmehr als Prinzipien, welche von den Mathematikern *erhalten* (oder aufgenommen) und durch vielfältige Erfahrung bestätigt wurden: „Hactenus principia tradidi a mathematicis recepta & experientia multiplici confirmata".[355] Diese Formulierung kann sowohl als Appell an eine ‚höhere', gesetzgebende Instanz als auch an *eine* Art der unbewiesenen und beweisunbedürftigen Prinzipien einer axiomatisierten Wissenschaft im Sinne der Euklidischen *Elemente*, nämlich die *koinai ennoiai* bzw. *communes animi conceptiones*[356], verstanden werden. Beide Interpretationen ließen sich durch andere Belege stützen. Newton beruft sich zur Absicherung seiner Prinzipien auf ein fragloses Einverständnis über diese Prinzipien innerhalb der Praxis der mathematischen Physik. Das dritte Axiom wird durch die Theorie bewahrheitet, die „mit der Erfahrung völlig in Einklang steht", und ist ein „abgesichertes" Gesetz[357]; das Trägheitsprinzip sieht er sogar bestätigt durch die „general opinion of mankind"[358]. Newton macht aber auch verschiedentlich klar, daß die mathematischen Prinzipien seiner Naturphilosophie von *Gott* der Natur auferlegte und durch

[353] So findet sich im Entwurf des Schreibens an Cotes auch diese Wendung: „Experimental philosophy argues only from phaenomena, draws general conclusions from the consent of phaenomena, & looks upon the conclusion as general when ye consent is general without exception, tho the generality cannot be demonstrated a priori" (ebd., S. 399).

[354] Newton 1872, S. 39 (meine Hervorhebung). ‚Angenommen' könnte nach heutigem Sprachgebrauch eine konventionalistische Interpretation begünstigen, die Newton zweifellos fremd ist.

[355] Newton 1972, S. 64. Motte ist hier mit seiner Übersetzung genauer als Wolfers: „Hitherto I have laid down such principles as have been received by mathematicians, and are confirmed by abundance of experiments" (Newton 1934 I, S. 21).

[356] Vgl. hierzu näher Szabó 1969, insbes. S. 378-389. Szabó legt dar, daß der Begriff *nach* und wahrscheinlich auch *vor*, aber vermutlich nicht von Euklid selbst gebraucht wurde.

[357] „Atque hoc pacto lex tertia quoad ictus & reflexiones per theoriam comprobata est, quae cum experientia plane congruit" bzw. „Hisce volui tantum ostendere, quam late pateat quamque certa sit lex tertia motus" (Newton 1972, S. 69 bzw. 72).

[358] Newton an Cotes vom 28. März 1713 (Entwurf); *Correspondence* V, S. 399. Newton erklärt Cotes, durch dessen Gedankenexperiment (vgl. Anm. 346) würde dieser ein dem Trägheitsprinzip zuwiderlaufendes (ebd., S. 398) Prinzip der Selbstbewegung einführen, „wch would disturbe the whole frame of nature, & in the general opinion of mankind is as remote from the nature of matter as [penetrability]". Man beachte, daß noch für Galilei das Trägheitsgesetz in seiner Newtonschen Form weniger als evident, nämlich unbekannt war.

Erfahrung erlernbare erste Gesetze seien. Wichtig, weil rezeptionsgeschichtlich bedeutsam, ist seine *Physikotheologie* vor allem insofern, als sie besonders der Absicherung des Gravitationsgesetzes dient[359] Ich brauche diese Argumentationsstränge hier nicht weiter zu verfolgen, da sie ohnehin dem klassisch-certistischen Naturgesetzverständnis der frühen Neuzeit eigen sind, während Newtons Methodologie einer Diskussion bedurfte, weil sie diesem Verständnis gerade zuwiderzulaufen *schien*. Dabei darf jedoch nicht übersehen werden, daß die physikotheologische Argumentation den sogenannten ‚Newtonianern' des 18. Jahrhunderts wichtige *psychologische* Unterstützung für ihren Glauben lieferte, auf einem ‚sicheren Weg' zu sein.

[359] „When I wrote my treatise about our System I had an eye upon such Principles as might work wth considering men for the beliefe of a Deity & nothing can rejoyce me more then to find it usefull for that purpose. But if I have done ye publick any service this way 'tis due to nothing but industry & patient thought" (Newton an Bentley vom 10. Dezember 1692; *Correspondence* III, S. 233).

III.5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Theorie des modernen Empirismus konnten Newtons Werk und seine Methodologie nur deshalb paradigmenbildend werden, weil die hier vorgestellte (und absichtlich akzentuierte) Seite seines Denkens entweder ignoriert oder in teleologievergessener Weise ‚modernisiert' wurde. Aber Newton war kein Vertreter der hypothetisch-deduktivem Methode in einem *modernen*, Prinzipiencertismus ausschließender Sinne. Er hat auch, wie die vorangegangenen Ausführungen deutlich machen sollten, die *Principia* nicht in erster Linie deshalb in mathematisch-deduktiver Form präsentiert, um seine (im Cartesianischen Geiste aufgewachsenen) Leser zu ‚überreden'[360] – um Descartes also gleichsam mit seinen eigenen Darstellungsmitteln zu schlagen. Es ging ihm vielmehr darum, die Cartesischen Prinzipien *inhaltlich* durch ein System mathematischer Prinzipien der Naturphilosophie abzulösen, das in einer empiristischen Methodologie abgesichert ist und *daher* Descartes' *Principiae philosophiae* an Sicherheit übertrifft. Wenn er gelegentlich bemerkt, daß „die durch Induction aus den Experimenten und Beobachtungen gewonnenen Resultate nicht als Beweise allgemeiner Schlüsse gelten können"[361], oder hier nur von dem „beste[n] Weg, Schlüsse zu ziehen"[362], oder deren ‚größter Sicherheit' (nicht aber von einem unfehlbaren Weg und ‚absoluter Sicherheit') spricht, bringt er *keinen* Prinzipien*fallibilismus* zum Ausdruck, sondern die Einsicht, daß sein Prinzipien*certismus* methodologisch nicht einholbar ist. Die *Principia* sollten also nicht als Werk ‚empiristischer Auflösung' der KMN gelesen werden, sondern eher als Beispiel eines ‚Baconschen Typus' von Wissenschaft[363], der *innerhalb* der KMN anzusiedeln ist.

Dort, wo der Antagonismus zwischen Newtons empiristischer Methodologie und dem tatsächlichen Aufbau und Verfahren der *Principia* überhaupt wahrgenommen wurde, hat man oft versucht, ihn zu einem reinen ‚Darstellungsproblem' herabzustimmen: Der der Methodologie entsprechende experimentalphilosophische Charakter des Newtonschen Werkes, der die Newtonsche Entdeckungslogik so erfolgreich gemacht habe und der vor allem in den *Opticks* anzutreffen sei, und der mathematisch-deduktive Charakter der *Principia*, in der es um die kohärente Präsentation von Ergebnissen gehe, würden sich danach zueinander verhalten wie zwei Seiten der gleichen Medaille. Eher aber als eine Medaille könnte man zur Illustration dieses Verhältnisses einen *Pfirsich*

[360] Vgl. etwa Bloch 1908, insbes. S. 129-131, und im Anschluß daran Blake 1966, S. 122: „[...] the geometrical mode of exposition is not for Newton a definitive form insuring a grasp of absolute fact. It is rather a means of persuading those whom dogmatic prejudice renders incredulous, by the use of a language which they find clearer than that of the facts themselves".

[361] Newton 1898, S. 269 bzw. 1952, S. 404.

[362] Ebd., S. 269 bzw. S. 404.

[363] Wiederum (vgl. Anm. 327) meine ich damit *nicht* eine ‚Baconsche Wissenschaft' im Sinne von Kap. II, Teil 1.3, die ich *nicht* als KMN-Wissenschaft verstehe.

heranziehen: Die mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie bilden den ‚harten Kern' unwiderlegbarer Sätze, um ihn herum die ‚Frucht' empirisch gehaltvoller Sätze, die nicht ohne Beobachtung und Experiment, aber eben *auch nicht* ohne Kern (um den es hier allein geht) möglich wäre.

Bei den Newtonianern des 18. Jahrhunderts ist gelegentlich, und sehr zu Recht, ein gewisser Certismus und Dogmatismus bemerkt worden: Auf der Grundlage der *Principia* ging es, in den Worten Colin MacLaurins, darum, „to proceed with perfect security, and to put an end for ever to disputes"[364]. Dieser Certismus und Dogmatismus wurde

[364] Vgl. MacLaurin 1748, S. 8: „In order to proceed with perfect security, and to put an end for ever to disputes, he [Newton] proposed that, in our enquiries into nature, the methodes of *analysis* and *synthesis* should be both employed in a proper order [...]". An anderer Stelle (S. 95f.) bemerkt er: „The variety of opinions and perpetual disputes amongst philosophers has induced not a few, of late as well as in former times, to think that it was vain labour to endeavour to acquire certainty in natural knowledge, and to ascribe this to some unavoidable defect in the principles of the science. But it has appeared sufficiently, from the discoveries of those who have consulted nature and not their own imaginations, and particularly from what we learn from Sir *Isaac Newton*, that the fault has lain in the philosophers themselves, and not in philosophy. A compleat system indeed was not to be expected from one man, or one age, or perhaps from the greatest number of ages; could we have expected it from the abilities of any one man, we surely should have had it from Sir *Isaac Newton*: but he saw too far into nature to attempt it". Die von Newton artikulierte (‚one man', ‚one generation'; vgl. Anm. 365), von Mac Laurin perpetuierte (‚one man', ‚one age', perhaps the ‚greatest number of ages') *Offenheit* des Forschungsprozesses ist, wie bereits früher bemerkt, charakteristisch für das Baconsche Programm, aber sie hat nichts zu tun mit der *Revidierbarkeit* bereits erreichter Ergebnisse: Es handelt sich vielmehr um einen streng kumulativen Prozeß.

Es sollte erwähnt werden, daß nicht alle Newton-Anhänger der ersten Generation an die vollkommene, sich wesentlich der zugleich ‚induktiven' und ‚mathematischen Methode' verdankende Sicherheit der Newtonschen Naturphilosophie glaubten. Henry Pemberton etwa differenziert folgendermaßen zwischen ‚natural philosophy' und ‚mathematics': „The proofs in natural philosophy cannot be so absolutely conclusive, as in the mathematics. For the subjects of that science are purely the ideas of our minds. They may be represented to ours senses by material objects, but they are themselves the arbitrary productions of our own thoughts; so that as the mind can have a full and adequate knowledge of its own ideas, the reasoning in geometry can be rendered perfect. But in natural knowledge the subject of our contemplation is without us, and not so compleatly to be known: therefore our method of arguing must fall a little short of absolute perfection" (Pemberton 1728, S. 23; §20). Es bleibt bei dieser Feindifferenzierung (‚little short of absolute perfection') allerdings offen, inwieweit sie nach Pemberton auf der ‚prinzipiellen' Ebene der Naturphilosophie, um die es hier geht, anzuwenden sei. Pembertons Betonung der ‚Bescheidenheit' der Newtonschen Methode (§16) und seine Berufung auf mögliche Restriktionen des Induktionsprozesses (§25) schließt, ähnlich wie bei Newton selbst, einen Prinzipiencertismus nicht aus (Zur breiten Diskussion um die sog. ‚mathematische Methode' in der Philosophie während der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts generell, die ganz unterschiedliche Momente und Ebenen des Mathematisierungsprozesses umfaßt, vgl. Tonelli 1959a.).

dann, sehr zu Unrecht, als bloßer euphorischer Auswuchs der nie für möglich gehaltenen empirischen Triumphe einer mathematischen Theorie der Naturwissenschaften interpretiert, für die es in Newtons Werk keine Grundlage gebe — gleichsam eine psychologische Vernebelung der kritischen wissenschaftstheoretischen Sinne Newtons durch die ‚süße Frucht' des wachsenden empirischen Erfolges.

Aber dem ist nicht so, wie ich zu zeigen versucht habe. Man kann lediglich davon sprechen, daß Newton den Bereich sicherer mathematischer Naturerkenntnis vorsichtiger gefaßt hat als seine Nachfolger. Die Himmelsmechanik, ‚prinzipiell' festgelegt in den drei Bewegungsgesetzen und dem Gravitationsgesetz, verstand er als sicheren ‚Kern', den die künftige mathematische Naturphilosophie, zunächst im Bereich der Optik, stetig auszubauen habe. In einem unveröffentlichten Entwurf zu den ‚Queries' schreibt Newton:[365]

[...] what certainty can there be in a Philosophy wch consists in as many Hypotheses as there are Phaenomena to be explained. To explain all nature is too difficult a task for any one man or even for any one age. Tis much better to do a little with certainty & leave the rest for others that come after, than to explain all things by conjecture without making sure of anything: And there is no other way of doing any thing with certainty than by drawing conclusions from experiments & phaenomena untill you come at general Principles & then from those Principles giving an account of Nature. Whatever is certain in Philosophy is owing to this method & nothing can be done without it.

[365] Add Ms. 3970 f.479 in den ‚Newton Papers' der Cambridge University Library; zit. n der Transkription von Rogers 1978, S. 231f., Anm. 40.

IV Stationen und Entwicklungen Klassischer Mathematischer Naturphilosophie im Zeitalter der Aufklärung

IV.1 Einführung

Newtons Principia wirkten im 18. Jahrhundert stärker über ihre ‚revolutionäre' Gravitationstheorie denn über ihre Axiomatisierung der Mechanik im engeren Sinne. Nicht nur Newton selbst, sondern auch spätere Mathematiker wie die Bernoullis, Euler, Maupertuis und d'Alembert sahen seine *leges motus* zurecht nicht als neu oder originell an.[366] Erst gegen Mitte des Jahrhunderts, bei Leonhard Euler, bildet sich überhaupt die Axiomatisierung der Mechanik aus, die wir *heute* als ‚Newtonsche' bezeichnen.[367] Vor allem Clifford Truesdells historische Analysen zur rationalen Mechanik haben gezeigt, daß es eher das 18. als das 17. Jahrhundert war, in dem die sog. ‚Klassische Mechanik' ihre heutige Gestalt erhielt — nicht nur in ihrer ‚Newtonschen' Form, sondern auch in ihrer analytischen.[368] Es ist ein wichtiges und unhintergehbares Ergebnis der neueren Forschung, daß die These von der ‚Vollständigkeit' der bei Newton selber anzutreffenden Axiomatisierung nicht nur systematisch unhaltbar ist, sondern auch historisch irreführend: Klagen über die ‚mangelnde Kenntnis' mechanischer Prinzipien zur Behandlung konkreter Probleme der Punkt- und Kontinuumsmechanik sind im frühen 18. Jahrhundert Legion, und eine der wichtigsten Aufgaben bestand nach Meinung führender ‚Geometer' darin, diesem Mißstand abzuhelfen. Die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts ist daher durch eine Prinzipiendiskussion und auch eine gewisse ‚Prinzipieninflation' gekennzeichnet, die in der Geschichte der rationalen Mechanik ihresgleichen sucht.

[366] Vgl. insbes. Truesdell 1960b und Hankins 1967, 1970.

[367] Wichtigste Station hierbei ist Eulers „Découverte d'un nouveau principe de mécanique" (Euler 1750a). Das ‚nouveau principe' besteht in der modernen Darstellung des sog. zweiten Newtonschen Bewegungsgesetzes in Cartesischen Koordinaten; s. auch Teil 3.1, Gl. *(1)*.

[368] Von den im Literaturverzeichnis aufgeführten Schriften seien hier nur die bahnbrechenden Untersuchungen Truesdell 1954 und 1960a, die ‚Programmschrift' Truesdell 1960b und die Sammlung Truesdell 1968 genannt; zu Truesdells Historiographie vgl. Pulte 1993c, S. 174f.

Truesdells immanente, vor allem auf angewandte Mathematik fixierte Historiographie hinderte ihn gleichwohl, den mit diesen inhaltlichen Entwicklungen einhergehenden metatheoretischen Wandel wahrzunehmen. Es ist ein grundlegender Mangel seiner Geschichtsschreibung, rationale Mechanik *nicht* als Weiterführung des Projekts einer *philosophia naturalis* wahrzunehmen, wie dies bei Newton noch klar hervortritt und auch von seinen Nachfolgern nicht anders gesehen wurde. Ihm entgeht daher vollkommen, daß die zahlreichen Kontroversen des 18. Jahrhunderts um die ‚wahre' Begründung der Mechanik einen eminent wissenschaftstheoretischen Charakter haben, während sein wichtiger Beitrag zur historischen Forschung wiederum im allgemeinen denen entgeht, die *diesen* Charakter sehen und verstehen möchten, aber ohne Blick auf die *Praxis* der rationalen Mechanik nicht verstehen können. So fehlt es im wesentlichen bis heute an Versuchen, ‚materiale' wissenschaftshistorische Untersuchungen und ‚formale' Analysen zum Theoriewandel zu integrieren:[369] Lakatos' Einsicht: ‚Wissenschaftsphilosophie ohne Wissenschaftsgeschichte ist leer; Wissenschaftsgeschichte ohne Wissenschaftsphilosophie ist blind' stellt hier offenbar erst die Diagnose dar, der eine Therapie noch zu folgen hätte.

Im folgenden soll daher versucht werden, solche Entwicklungsmomente der Mechanik zwischen Newtons *Principia* und Lagranges *Mechanique Analytique* herauszuarbeiten, die den Wandel des mechanischen Euklidianismus unmittelbar betreffen. Dabei läßt die hier eingenommene ‚analytisch-genetische' Perspektive[370] zwei Momente besonders hervortreten: Erstens ist festzustellen und zu erklären, daß die *Méchanique Analitique* im Unterschied zu den *Principia* eher eine Systematik für eine Vielzahl sog. mechanischer ‚Prinzipien'[371] denn eine Anwendung solcher Prinzipien auf konkrete physikalische Objekte und Probleme darstellt, und daß — während Lagranges Axiomatisierung selber sich in den konzeptuellen Rahmen der *Principia* durchaus noch einfügen läßt — darunter auch solche Prinzipien wie das der *Erhaltung* mechanischer Größen anzutreffen sind, die in Newtons *philosophia naturalis* nicht nur nicht ‚angelegt'

[369] Ich werde hierauf am Ende dieses Kapitels (Teil 6) am Beispiel von Jürgen Mittelstraß' Darstellung des Theoriewandels der Mechanik im 18. Jahrhundert zurückkommen.

[370] Vgl. Kap. II, Teil 3.2.

[371] Ich übernehme hier, wie bereits früher, die bei Lagrange und im 18. Jahrhundert insgesamt gängige Rede von ‚Prinzipien', ohne diesen Begriff auf seine wörtliche Bedeutung (als ‚Anfänge') einzuschränken. Gemeint sind einfach mehr oder minder allgemeine mechanische Gesetze. Wie Heinrich Hertz treffend bemerkte: „In strengem Sinne verstand man ursprünglich in der Mechanik unter einem Prinzip jede Aussage, welche man nicht wieder auf andere Sätze der Mechanik selbst zurückführte, sondern welche man als unmittelbares Ergebnis anderer Quellen der Erkenntnis angesehen wissen wollte. Es konnte in der geschichtlichen Entwicklung nicht ausbleiben, daß Sätze, welche unter besonderen Voraussetzungen einmal mit Recht als Prinzipien bezeichnet wurden, später diesen Namen, wiewohl mit Unrecht, beibehielten" (Hertz 1894, S. 4).

sind, sondern von ihr geradezu ausgeschlossen werden.[372] Die *Méchanique Analitique* ist also nicht einfach ‚reicher' an Konzepten und Prinzipien als die *Principia*, was nach einem Jahrhundert Mechanikentwicklung kaum verwundern mag, sondern mit jenen in Teilen *unverträglich*.

Zweitens ist ein auffälliger Darstellungsunterschied zwischen frühen Werken wie Newtons *Principia*, Hermanns *Phoronomia* und Huygens *Horologium* und späteren Werken wie Eulers *Mechanica*, d'Alemberts *Traité de Dynamique* und Lagranges *Méchanique Analitique* zu konstatieren und wiederum zu *erklären*: eine Verschiebung von der traditionellen, ‚synthetischen' zur ‚analytischen' Präsentation, die einhergeht (wenn auch nicht identisch ist) mit der Ersetzung der *heute* sog. ‚Newtonschen' Prinzipien durch ‚analytische' Prinzipien wie das der kleinsten Wirkung oder der virtuellen Geschwindigkeit. Auch die meisten Versuche des 19. Jahrhunderts, der Mechanik eine axiomatische Form zu geben, gingen von solchen oder anderen analytischen Prinzipien (wie Gauß' Prinzip des kleinsten Zwanges, Hamiltons Prinzip, Hertz' Prinzip der geradesten Bahn) aus — ein Wandel, der sich bereits im 18. Jahrhundert vollzieht und wichtig für die spätere Auflösung der KMN wird.

Da diese Auflösung, als eigentlicher Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung, hier (noch) nicht zur Debatte steht, sind die folgenden Ausführungen als eine bloße *Strukturskizze* zu betrachten, die Beispiele nur gelegentlich und zur Illustration heranzieht, die jedoch beansprucht, durch umfangreicheres Belegmaterial ‚gefüllt' werden zu können. Der nächste Teil 2 gibt einen Überblick über Hauptmomente der Entwicklung, die am Beispiel Eulers — dem überragenden Gestalter der rationalen Mechanik zwischen Newton und Lagrange[373] — vertieft werden (Teil 3). Die wichtigsten Charakteristika der analytischen Prinzipien werden im Anschluß noch einmal gesondert betrachtet (Teil 4), bevor Lagranges analytische Mechanik und deren Rezeption beleuchtet wird (Teil 5). Die nachfolgenden Teile sind Kants ‚Projektionen' der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts (Teil 6) und historiographischen Fragen (Teil 7) gewidmet.

[372] Damit meine ich konkret die Erhaltung von Bewegungsgrößen wie den ‚Impuls' oder die Leibnizsche *vis viva*. Newton hat es bekanntlich nicht nur als unvermeidlich, sondern geradezu als Vorzug seiner Naturphilosophie angesehen, daß ihr zufolge Gott von Zeit zu Zeit das Weltsystem mit Bewegung ‚versorgen' muß, wodurch die Angewiesenheit der physischen Welt auf ein göttliches Wesen demonstriert wird. Es handelt sich hier um einen bevorzugten Diskussionspunkt des Newton-Clarke-Briefwechsels (vgl. Teil 2.2).

[373] Hierin wiederum stimme ich Truesdell vollkommen zu; vgl. etwa Truesdell 1957.

IV.2 Zur allgemeinen Entwicklungsstruktur der rationalen Mechanik

William Emerson bringt in seinen *Principles of Mechanics*, die von 1754 bis zur Jahrhundertwende in nicht weniger als fünf Auflagen die *Newtonian philosophy* propagierten, den Certismus der ‚Newtonianer' so zum Ausdruck:[374]

Upon mechanics is [...] founded *the Newtonian or only true philosophy in the world.* [...] It has been ignorantly objected by some that the Newtonian philosophy, like all others before it, will grow old and out of date and be succeeded by some new system. [...] But this objection is very falsely made. *For never a philosopher before Newton ever took the method that he did.* For whilst their systems are nothing but hypotheses, conceits, fictions, conjectures and romances invented at pleasure and without any foundation in the nature of things, he on the contrary and by himself alone set out upon a very different footing. For he admits nothing but what he gains from experiments and accurate observations and from this foundation whatever is further advanced, is deduced by strict mathematical reasoning. The foundation is now firmly laid: the Newtonian philosophy may indeed be improved and farther advanced: but it can never be overthrown: notwithstanding the efforts of all the *Bernoulli's*, the *Leibniz's*, the *Green's*, the *Berkeley's*, the Hutchinson's etc.

Emersons Verteidigung enthält, genau betrachtet, zwei verschiedene Ansprüche: Zum einen soll die neue Methode (‚from experiments and accurate observations') vor dem Schicksal der alten Systeme schützen (‚grow old and out of date'), d.h. unüberholbare Grundlagen garantieren. Dies kam ja, wie im letzten Teil gezeigt, bereits in Newtons Prinzipiencertismus zum Ausdruck. Rückblickend auf ein dreiviertel Jahrhundert der *Newtonian philosophy*, wird zum anderen aber auch anerkannt, daß Newtons Mechanik keineswegs einhellig akzeptiert war oder ist, sondern es mit ernsthaften gegnerischen Systemen (‚the efforts of all the *Bernoulli's*, the *Leibniz's* ...') zu tun hatte bzw. hat; zugleich wird behauptet, daß diese Mechanik durch rivalisierende Entwürfe nie umgestürzt werden könne (‚it can never be overthrown'). Hierum geht es in diesem Teil vor allem: um Newtons rationale Mechanik und die ‚kontinentalen', Newtonkritischen Traditionen, die v.a. durch Descartes und Leibniz definiert wurden.

[374] Emerson 1773, S. V-VII. Cassirer (*Erkenntnisproblem* II, S. 401) interpretiert Emersons Stellungnahme zurecht als Zeugnis für das uneingeschränkte Vertrauen in die ‚Newtonsche Methode': „Die Frage nach der Methode, mit der die moderne Philosophie begonnen hatte, scheint in der Newtonischen Wissenschaft in der Tat zum sicheren Abschluß gelangt. Was die abstrakte Spekulation vergeblich gesucht und ersehnt hatte, das schien hier die empirische Forschung in ihrem stetigen Gange errungen zu haben. Newtons nächste Schüler und Anhänger fassen seine Leistung durchaus in diesem Sinne auf. Ihnen ist Newton nicht in erster Linie der Entdecker des Gravitationsgesetzes, sondern der Begründer einer neuen Forschungsart. Sein Werk bedeutet ihnen zugleich eine philosophische Tat [...]".

IV.2.1 Rationale Mechanik als Mathematik

Zuvor soll an einen übergreifenden Zug der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts erinnert[375] werden, dessen Bedeutung schwerlich überschätzt werden kann. Die frühe Rezeption der *Principia*[376], beschränkt auf eine handvoll Gelehrter wie Leibniz, Huygens, Hermann, Varignon und die älteren Bernoullis, zeigt dies deutlich: Rationale Mechanik war zunächst und vor allem eine *mathematische* Spezialdisziplin, die sich mit den neuen mathematischen Methoden, insbesondere mit der Infinitesimalrechnung, entwickelte und ihrerseits die Entwicklung neuer mathematischer Methoden voranbrachte. ‚Gewöhnliche' Analysis, Variationsrechnung, die Theorie gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen und Potentialtheorie können in ihrer Entwicklung nicht isoliert von der Erforschung mechanischer Spezialprobleme und Gesetze verstanden werden.

Die Mechanik ihrerseits ist *als* Mathematik *zugleich* Naturwissenschaft in einem wesentlichen Sinne. D'Alemberts Wissenschaftsauffassung, wie sie im *Discours Préliminaire* zur *Encyclopédie* entwickelt wird, illustriert diese Auffassung besonders klar: Von den Sinneseindrücken ausgehend, die allein menschliches Wissen begründen können, bilden wir durch Vergleich und Verallgemeinerung sukzessive immer abstraktere Begriffe wie die der Undurchdringlichkeit, Ausdehnung und (zuletzt) der Zahl. Diese ‚abstraktive Hierarchisierung' führt, rückwärts durchlaufen, zu einer Hierarchie von Wissenschaften: Der Zahl korrespondiert die Arithmetik bzw., als allgemeine Formenlehre, die Algebra; der Zahl, ergänzt um die Eigenschaft ‚Ausdehnung', korrespondiert die Geometrie, der Zahl, ergänzt um die Eigenschaften ‚Ausdehnung' und ‚Undurchdringlichkeit', die Mechanik etc.: „Nur die Algebra, die Geometrie und die Mechanik, also die sich mit der Berechnung der Größen und der allgemeinen räumlichen Eigenschaften befassenden Zweige kann man, genau genommen, als beglaubigt und bewiesen anerkennen [regarder comme marquées au sceau de l'évidence]".[377] Auch diese abstraktesten mathematischen Wissenschaften sind also in gewissem Sinne Naturwissenschaften — eben weil ihre Gegenstände von der Natur ‚abstrahiert' sind und daher Grundstrukturen der Realität aufbewahren und gleichsam in ‚reiner Form' darstellen.[378] Ihre Sätze sind zudem, aufgrund der besonderen Einfachheit ihrer Gegenstände, sicher und evident. Wie bereits früher betont[379], existiert hier für die Mechanik als *mathesis mixta* kein eigentliches ‚Anwendungsproblem' im modernen Sinne, d.h. im Sinne der Notwendigkeit, zwischen einer syntaktischen Struktur einerseits und den empirischen Gegebenheiten andererseits mit Hilfe von ‚Korrespondenzregeln' eine

[375] Vgl. bereits allgemeiner Kap. II, Teil 2.1.
[376] Vgl. den instruktiven Überblick in Fellmann 1989.
[377] D'Alembert 1975, S. 49 bzw. 48.
[378] Vgl. hierzu auch Daston 1988 und DeGandt 2000.
[379] Vgl. Kapitel III, Teil 2.1.

Beziehung herstellen zu müssen und so den mathematischen Aussagen Bedeutung zu verleihen: Auch die abstraktesten Gleichungen und Symbole, wie sie in der analytischen Ausprägung der rationalen Mechanik begegnen, haben semantischen Gehalt, sind ‚semantisch geladen'.[380] Ich behaupte, daß es sich dabei — wechselnde oder auch überhaupt fehlende Begründungen in Rechnung gestellt — um einen *generellen* Zug der rationalen Mechanik im fraglichen Zeitraum handelt, dessen Bedeutung kaum überschätzt werden kann.

Als *mathematische* Teildisziplin ist die rationale Mechanik des 18. Jahrhunderts weiterhin durch eine relativ starke Isolierung von Experimental- und Anwendungsbezügen gekennzeichnet: Sie ist, im Sinne Thomas S. Kuhns, eine ‚klassische' und keine experimentelle oder ‚Baconsche' Wissenschaft:[381] Nur wenige ihrer Vertreter haben systematisch experimentiert, und von den zahlreichen, später noch näher darzustellen-

[380] Es ist kennzeichnend hierfür, daß d'Alembert die Gefahren eines ‚sorglosen' Gebrauchs der Mathematik in der Physik eher ahnt als analysiert und dann der fehlerhaften Beobachtung, also der *Ausgangsbasis* des abstraktiven Prozesses, der zu den mathematischen Wissenschaften führt, nicht aber diesem Prozeß selbst zuschreibt: „Immerhin muß der Mißbrauch zugegeben werden, den die Mathematiker gelegentlich mit der Anwendung der Algebra auf die Physik treiben. Liegen als Berechnungsangabe geeignete Experimente nicht vor, so erlauben sie sich die Aufstellung von Hypothesen, die zwar für sie äußerst bequem sind, sich jedoch von den wirklichen Naturverhältnissen weit entfernen" (D'Alembert 1975, S. 43).

[381] Als ‚klassische', seit der Antike betriebene und bis zur Neuzeit tradierte Wissenschaften bezeichnet Kuhn die Astronomie, Harmonielehre, Mathematik, (geometrische) Optik und Statik (Kuhn 1977, S. 89), als ‚Baconsche' die erst seit der Renaissance sich ausbildenden experimentellen Naturwissenschaften (ebd., S. 92f.). Zwar erlebten auch die klassischen Wissenschaften während der sog. ‚Wissenschaftlichen Revolution' einen grundlegenden Wandel, dieser sei jedoch „besser neuen Sichtweisen gegenüber alten Erscheinungen zuzurechnen als einer Folge unerwarteter experimenteller Entdeckungen" (ebd., S. 97). Kuhns Thesen, daß „die Vertreter dieser klassischen Wissenschaften im 17. und 18. Jahrhundert mit ein paar bemerkenswerten Ausnahmen sehr wenig mit Experimenten und verfeinerten Beobachtungen zu tun" hatten (ebd., S. 91) und insbesondere „während des 18. Jahrhunderts die Hauptvertreter der etablierten mathematischen Wissenschaften wenig Experimente aus[führten]" (ebd., S. 101), wird durch die rationale Mechanik des 18. Jahrhunderts bestätigt. Die heute übliche Behandlung der Mechanik im Rahmen der Physik, die vor allem als experimentelle Disziplin verstanden wird, kann leicht den Blick hierauf verstellen.

Zur Illustration sei auf eine etwas skurrile Episode aus Eulers Jugendjahren verwiesen: Euler beteiligte sich mit seiner ersten veröffentlichten Abhandlung an einer Preisfrage der Pariser Akademie nach der günstigsten Position der Schiffsmasten bei einem Segelschiff. Der Schweizer habe, so wird berichtet (Spiess 1929, S. 48f.), ein solches Objekt nie zu Gesicht bekommen. In der fraglichen Arbeit Eulers heißt es jedoch: „Ich habe es nicht für nötig gehalten, diese meine Theorie durch das Experiment zu bestätigen, denn sie ist ganz aus den sichersten Prinzipien der Mechanik abgeleitet, weshalb der Zweifel, ob sie wahr sei und in der Praxis statthabe in keiner Weise aufgeworfen werden kann" (zit. ebd., S. 48).

den Diskussionen über die Prinzipien der Mechanik scheint überhaupt nur die *vis viva*-Kontroverse stärker von experimentellen Untersuchungen beeinflußt worden zu sein.[382] Nicht durch aktive, experimentelle Gestaltung formbar, sondern durch passive Beobachtung zu erschließen, war das Newtonsche ‚Weltsystem', d.h. unser Planetensystem, der bevorzugte reale Anwendungsfall, während die meisten anderen Systeme, die der Untersuchung unterworfen wurden, ‚idealer' Art blieben: Modifikationen der sog. ‚einfachen Maschinen' der Antike, das Pendel, Systeme von Massenpunkten mit ‚gegebenen' Wechselwirkungskräften und unter bestimmten einschränkenden (geometrisch, später algebraisch definierten) Bedingungen, in der Kontinuumsmechanik vollkommen ‚starre', durch unverrückbare Lage der einzelnen Elemente gekennzeichnete Körper, ‚ideale' Flüssigkeiten etc. Die bevorzugte *Praxis* der rationalen Mechanik war denn auch die begriffliche Analyse und ihre mathematische Darstellung, eine wesentlich *deduktive* Praxis, deren induktive Seite sich oftmals darauf reduzierte, für die an wenigen ausgezeichneten Problemen gewonnenen Regeln Gesetzlichkeit zu postulieren. Die Entwicklung der Mechanik zwischen Newton und Lagrange läßt sich nicht verstehen ohne diese *Praxis*.

IV.2.2 Drei Programme der rationalen Mechanik

Ist Kuhns Auffassung von der relativen Bedeutungslosigkeit des Experiments für die klassischen Wissenschaften, hier die rationale Mechanik, auch zuzustimmen, muß seine These vom ‚normalwissenschaftlichen' Charakter der nachnewtonschen Mechanik mit Nachdruck zurückgewiesen werden: Was die axiomatische Entwicklung der Mechanik betrifft, war das 18. Jahrhundert nicht ‚normal', weil das 17. Jahrhundert nicht ‚revolutionär' war. Bereits an anderer Stelle wurde die Auffassung vertreten, daß das 18. Jahrhunderts nicht eine bloß formale Artikulation Newtonscher Konzeptionen und Grundgesetze lieferte, sondern vielmehr als eine Auseinandersetzung von im wesentlichen *drei* verschiedenen, d.h. durch verschiedene wissenschaftliche Metaphysiken definierten Programmen verstanden werden sollte: dem Cartesianischen, dem Leibnizschen und dem Newtonschen Programm.[383] Wenngleich letzteres bereits näher charakterisiert worden ist, empfiehlt es sich für die weitere Diskussion, alle Programme noch einmal kurz gegenüberzustellen[384], um die inhaltlichen Differenzpunkte — wahre ‚Weltbildkontroversen' zwischen den verschiedenen Parteien — sichtbar zu machen und so aufzuzeigen, welche Hindernisse auf dem Weg zu einer Integration mechani-

[382] „Although the controversy seemed to be primarily an intellectual exercise, the most decisive progress came from experiment" (Hankins 1985, S. 31).
[383] Vgl. Pulte 1989, insbes. S. 23-26.
[384] Vgl. zum folgenden die Skizze Pulte 1993a, S. 39-41.

schen Wissens bestanden und wie eine solche Integration *nicht* zustandekommen konnte:

(1) Das *Cartesianische Programm* ist dem Dogma von ‚Materie in Bewegung' verpflichtet. Materie ist ausgedehnt, undurchdringlich, träge und beliebig teilbar. Es gibt keine ‚letzten' Atome und kein Vakuum; alles Ausgedehnte ist von Materie erfüllt. Die Materie verfügt *nicht* über inhärente Kräfte. Die Trägheitsbewegung eines Körpers kann allein durch Stoß oder Druck eines anderen Körpers abgeändert werden; Fernwirkungen sind also ausgeschlossen. Das Trägheitsprinzip, von Descartes selber in ‚distinkter' Form als Prinzip der Ruhe und der geradlinig gleichförmigen Bewegung formuliert, sowie die universelle Erhaltung der Bewegungsgröße (verkürzt: skalarer ‚Impuls', *mv*) sind die mathematischen Grundgesetze der Cartesianischen Mechanik. Da Kräfte als physische Ursachen der Bewegung oder Bewegungsänderungen grundsätzlich ausgeschlossen sind, kann man Descartes' Ansatz als *kinematisch* bezeichnen.

Im Cartesianismus des 18. Jahrhunderts lassen sich zwei Richtungen unterscheiden, die versuchen, in dieser kinematischen Tradition eine Erklärung von Bewegungsänderungen *ohne* Rückgriff auf primäre Kräfte zu leisten: eine *okkasionalistische*, die jede Änderung auf ein direktes göttliches Eingreifen zurückführt, und eine *materietheoretische*, die die Cartesianischen Wesenseigenschaften der Körper (Ausdehnung, Undurchdringlichkeit, Trägheit) allein für solche Änderungen verantwortlich macht. Malebranche und Euler können als idealtypische Vertreter der einen bzw. anderen Richtung namhaft gemacht werden.

(2) Das *Leibnizsche* Programm dagegen ist ein essentiell *dynamisches*. Körper sind ausgedehnt und mit Kräften ausgestattet; sie werden durch die Existenz von ‚passiven' Kräften (Trägheit, Undurchdringlichkeit) überhaupt erst konstituiert. Daneben kennt Leibniz' Substanztheorie innere ‚aktive' Kräfte, die Bewegung generieren. Die Existenz aktiver Kräfte unterscheidet Ruhe- und Bewegungszustand. Ein Körper kann (wie bei Descartes) seine Bewegung nur im Kontakt mit einem anderen Körper ändern. Die Änderung wird nicht durch Übertragung einer substantiellen Kraft von einem Körper auf den anderen hervorgerufen (dies verbietet die ‚Fensterlosigkeit' der Leibnizschen Monaden), sondern durch die (jeweils innere) aktive Kraft.

Der Erhaltungsgedanke ist auch für die Leibnizsche Mechanik zentral. Das ‚wahre Kraftmaß' ist jedoch nicht wie bei Descartes die Bewegungsgröße *mv*, sondern die *vis viva* mv^2 (in heutiger, allerdings mißverständlicher Terminologie: die kinetische Energie). Leibniz sieht dieses Erhaltungsgesetz nicht nur durch den elastischen Stoß und den freien Fall empirisch bestätigt: Über diesen Nachweis „a posteriori" hinaus beansprucht er, einen metaphysichen Beweis „a priori" gegeben zu haben.[385] Die universelle Erhaltung dieser *vis viva* ist (neben dem Trägheitsprinzip) das wichtigste Grundgesetz

[385] Vgl. den berühmten Aufsatz *Brevis demonstratio* zum empirischen Nachweis und den *Essai de dynamique* zum metaphysischen ‚Beweis' (Leibniz 1686 und *Mathematische Schriften* VI, S. 215-234).

seiner Mechanik; Leibniz ordnet es metaphysisch einigen Stoßgesetzen (Erhaltung der Relativgeschwindigkeit, Erhaltung der Schwerpunktsbewegung) über, die er ebenfalls als allgemeine und sichere mechanische Gesetze anerkennt.[386]

(3) Das *Newtonsche Programm* schließlich ist ebenfalls als ein wesentlich *dynamisches* zu kennzeichnen. Die größte konzeptuelle Leistung Newtons liegt in der Einführung der *vis impressa* als einer äußeren, direktiven Kraft. Sie tritt als *vierter* unabhängiger und irreduzibler Grundbegriff neben Raum, Zeit und Masse in den Grundgesetzen seiner Mechanik auf. Kräfte sind für den Aufbau der Newtonschen Mechanik unverzichtbar.[387]

Der *Erhaltungsgedanke* ist dem Newtonschen Programm fremd. Beim Stoß harter Körper, dem wichtigsten Fall Newtonscher Nahwirkung, geht Bewegung verloren.[388] Das Universum bedarf daher — anders als bei Descartes und Leibniz — von Zeit zu Zeit einer Einwirkung ‚von außen', um fortbestehen zu können. Newtons Anhänger sahen gerade in diesem Gedanken ein physikotheologisches Argument für die Überlegenheit ihrer Lehre und warfen ihren Gegnern vor, durch ihre Erhaltungsgesetze die Welt dem göttlichen Wirken entziehen zu wollen und so dem Atheismus Vorschub zu leisten.[389]

Für die *Rezeption* der Newtonschen Lehre auf dem Kontinent ist ein letzter Punkt von Bedeutung: Zweifellos stellten die *Principia* nicht nur das empirisch erfolgreichste Programm der Physik des 18. Jahrhunderts dar, sondern von vornherein auch das *ma-*

[386] Für Details vgl. Pulte 1989, S. 58-62 und die dort aufgeführte weitere Literatur.

[387] Newtons ontologische Interpretation des Kraftbegriffs ist wiederum zu betonen (vgl. Kap. II, Teil 2.1, insbes. Anm. 262).

[388] „Wenn zwei gleiche Körper im luftleeren Raume direct zusammenstossen, so werden sie zufolge der Bewegungsgesetze alle ihre Bewegung verlieren und zur Ruhe kommen, ausser wenn sie elastisch sind und von ihrem Anprall neue Bewegung erhalten" (Newton 1898, S. 264). Die Einschränkung (elastische Körper) ist für Newton nicht wesentlich, weil er die Atome als vollkommen hart konzipiert. Daher kommt er zu dem Schluß: „Da wir also sehen, dass die verschiedenen Bewegungen, die wir in der Welt vorfinden, in stetiger Abnahme begriffen sind, so liegt die Nothwendigkeit vor, sie durch thätige Principe zu erhalten und zu ergänzen [...]" (ebd., S. 265). Daß spätere britische Physiker wie W. Thomson und P. G. Tait bei Newton eine ‚Antizipation' des mechanischen Energieerhaltungssatzes ausgemacht haben, ist vor diesem Hintergrund eher als eine Parodie auf eine ‚teleologische' Wissenschaftsgeschichtsschreibung denn als Wissenschaftsgeschiche selbst aufzufassen.

[389] Vgl. etwa die diesbezüglichen Auseinandersetzungen zwischen Leibniz und dem Newton-Anhänger Samuel Clarke (Schüller 1991). Clarke artikuliert in diesem berühmten Briefwechsel nicht nur im wesentlichen die Newtonschen Auffassungen, sondern führt, wie heute hinlänglich bekannt ist, die Auseinandersetzung mit direkter Beteiligung Newtons und gleichsam als dessen ‚Bauchredner'. Leibniz sah dies genauso. Er schreibt am 17. Juni 1716 an Johann Bernoulli: „Vielleicht habe Sie schon erfahren, daß ich zur Zeit mit Newton, oder was auf das gleiche hinausläuft, mit seinem Verteidiger Clarke [...] einen philosophischen Disput führe" (ebd., S. 254). S. hierzu auch Koyré/Cohen 1962.

thematisch avancierteste. Deshalb war die Aufnahme des Werkes auf dem Kontinent, wie bereits erwähnt, zunächst auf wenige führende *Mathematiker* beschränkt, und Newtons *mathematische* Leistungen in diesem Werk standen in der Rezeption auch nie in Frage. Eine wichtige Konsequenz dieser Tatsache war, daß sich neben den Anhängern einer *Fernwirkungslehre* viele deshalb zum Newtonianismus bekannten, weil sie der Anwendung der *mathematischen Methode* in der Naturbeschreibung und -erklärung besondere Bedeutung beimaßen. Eine solche Einschätzung ist jedoch nachweisbar verkürzt: *Jedes* der drei Programme hatte eine möglichst vollständige (wenngleich je verschieden ausgeprägte) Mathematisierung der empirischen Wissenschaften zum Ziel.

Rückblickend auf die klassische Mechanik bis zum Ende des 19. Jahrhunderts läßt sich sagen, daß jedes der drei skizzierten Programme einer axiomatischen Darstellung im Sinne der drei ‚Hertzschen Bilder'[390] fähig ist: Die Basiskonzepte Raum, Zeit und Masse (Descartes) bzw. Raum, Zeit, Masse und Energie (Leibniz) bzw. Raum, Zeit, Masse und Kraft (Newton) erlauben in Verbindung mit geeigneten mechanischen Prinzipien den deduktiven Aufbau je verschiedener Mechaniken. Aus Gründen, die hier nicht im einzelnen diskutiert werden können und müssen, erfuhr im 18. Jahrhundert jedoch nur das dritte Programm eine solche Ausarbeitung, daß am Ende des Jahrhunderts von einer Axiomatisierung wichtiger Teile der Mechanik auf *dessen* konzeptueller Grundlage gesprochen werden kann. Die Laplace-Poissonsche Physik[391], die zu dieser Zeit die Wissenschaft dominierte, ist die eigentliche ‚Hochzeit' der Newtonschen Mechanik.

[390] S. Hertz 1894, vgl. auch Pulte 1989, S. 6-10.
[391] Vgl. insbes. Fox 1974 und Grattan-Guinness 1990.

IV.2.3 Rivalisierende Euklidianismen: Drei Kontroversen

Inhaltlich spiegeln sich die Differenzen der drei Programme in drei[392] großen Kontroversen der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts wider: der Auseinandersetzung über die Zulässigkeit von *Kräften* in der Mechanik überhaupt (Cartesianer vs. Newtonianer und Leibnizianer), der Auseinandersetzung über die Erhaltung eines *wahren Kraftmaßes* (Leibnizianer vs. Cartesianer und ‚spätere' Newtonianer) und der Auseinandersetzung über die Rolle der *Gravitation* (Newtonianer vs. Cartesianer und Leibnizianer). Der Leibniz-Clarke-Briefwechsel etwa — gelegentlich und sehr zu Recht als ein ‚Dialog zweier Tauber' beschrieben — zeigt überdeutlich, daß es auf der Ebene des philosophischen Diskurses zu einer inhaltlichen Verständigung über zentrale Konzepte der Naturphilosophie nicht kam und die verschiedenen Programme *inkommensurabel* waren.[393]

Es sind die beiden erstgenannten Kontroversen[394], die vor allem Einfluß auf die weitere axiomatische Entwicklung der rationalen Mechanik genommen haben, während die besonders lautstark geführte Auseinandersetzung über den ontologischen, erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Status der Gravitation[395] hierzu nur insofern beitrug, als Newtons Gravitationsgesetz zunehmend auch auf dem Kontinent als ein ‚quasi-axiomatisches' Grundgesetz verstanden wurde, d.h. neben den *leges motus* oder

[392] Hier wäre als vierte Auseinandersetzung noch die über Newtons Konzeptionen des absoluten Raums und der absoluten Zeit anzuführen, die bekanntlich von Leibniz, Wolff und deren Anhängern besonders heftig geführt wurde. Bei der Formierung allgemeinerer mechanischer Prinzipien *jenseits* des Trägheitsprinzips, d.h. solcher Prinzipien, die die Ableitung der Bewegungsgleichungen erlauben, spielte diese Diskussion jedoch nur eine geringe Rolle, ebenso bei den Diskussionen um den Status dieser Prinzipien. (Auf Eulers Position gehe ich im Teil 3.3 kurz ein.) Max Jammer stellt treffend fest: „Es ist bemerkenswert, wie wenig allgemeine Betrachtungen über die Natur des absoluten Raumes für den sachlichen Fortschritt der Mechanik eine Rolle spielten. Von den großen französischen Schriftstellern im Gebiet der Mechanik, Lagrange, Laplace und Poisson, war keiner besonders am Problem des absoluten Raumes interessiert. Sie übenahmen den Gedanken als Arbeitshypothese, ohne sich um eine theoretische Rechtfertigung zu bemühen. Liest man die Einleitungen zu ihren Schriften, so findet man als ihre Auffassung, die exakte Wissenschaft könne sehr wohl ohne allgemeine Überlegungen über den absoluten Raum auskommen" (Jammer 1980, S. 155).

[393] In dem Sinne, daß ihre Vertreter völlig unterschiedlicher Auffassung über den ‚paradigmatischen' Charakter von mechanischen Problemen, ihr Verständnis von Mechanik überhaupt, die Bedeutung zentraler Begriffe (wie Raum, Zeit, Kraft, Materie und Masse) waren, und dies sogar in dem starken Kuhnschen Sinne, daß sie „ihre Tätigkeit in verschiedenen Welten" ausübten (Kuhn 1981, insbes. S. 161. Für eine differenzierende und kritische Bewertung des Kuhnschen Inkummensuraribilitätskonzepts s. Hoyningen-Huene 1989, S. 197-216, und 1990).

[394] Vgl. Pulte 1989 und die dort aufgeführte Literatur; für die aktuelle Diskussion und Literatur auch die verschiedenen Beiträge in Lefèvre 2001.

[395] S. insbes. Dundon 1972, daneben Guerlac 1981 und Hesse 1962, Ch. VII.

alternativen Formulierungen zu einem infalliblen Prinzip avancierte, das einem zentralen Anwendungsbereich — der Himmelsmechanik — die Sicherheit verschaffte, die der mechanische Euklidianismus beansprucht: Konnten Euler und Clairaut zur Jahrhundertmitte noch Abänderungen der $1/r^2$-Beziehung in Betracht ziehen, um widerstrebende himmelsmechanische Daten ‚versuchsweise' in ihre Theorien zu integrieren[396], wird das Gravitationsgesetz später auch auf dem Kontinent zu einem sakrosankten Grundsatz.

Die beiden erstgenannten Kontroversen waren insofern *radikalerer* Natur, als es hier darum ging, in die Bewegungsgesetze *selbst* neben Raum, Zeit und Materie neue Basiskonzeptionen (wie Newtonsche ‚direktive' Kraft und Leibnizsche *vis viva* als ‚konservierte' Kraft) aufzunehmen und so den Cartesianischen Essentialismus einer Mechanik ‚more geometrico' auf axiomatischer Ebene gleichsam ‚dynamisch' aufzulösen.

Die *vis viva*-Kontroverse[397] konzentrierte sich vor allem auf die Erhaltung der lebendigen Kraft bei Stoßprozessen. Obwohl sie sich durch das ganze Jahrhundert hindurchzieht[398], galt sie *Mathematikern* wie Maupertuis, d'Alembert und Euler bereits vor der Jahrhundertmitte als ‚gelöst'.[399] Sie ist wesentlich dafür verantwortlich, daß Erhaltungsgesetze — entgegen dem Newtonschen Programm — zum integralen Bestandteil der rationalen Mechanik wurden, auch wenn damit *keine* Anerkennung der Leibnizschen Ontologie der Kräfte einherging: Beispiele wie der elastische Stoß und der freie Fall, später auch Zentralkraftbewegungen unter Einwirkung mehrerer Massenpunkte, zeigten, daß es sich bei der *vis viva* mv^2 um ein fruchtbares mechanisches Konzept handelt, auch wenn die ihr von Leibniz beigelegte universelle Gültigkeit zurückgewiesen wurde, wie dies etwa d'Alembert, Lagrange und Lazare Carnot mit Hinweis auf den vollkommen ‚harten' Stoß taten. In der analytischen Mechanik erhält diese Konzeption ihren festen Platz, obwohl es sich bei ihr — entgegen einem verbreiteten Vorurteil, das insbesondere durch die ältere *deutsche* Mechanikgeschichtsschreibung (von Helmholtz, A. Mayer, Kneser u.a.) genährt wurde — um keine ‚Weiterführung' des Leibnizschen Programms in irgendeinem *historisch* wirklich belegbaren Sinne handelt.[400] (Der *Systematiker* sieht den engen Zusammenhang von Erhaltungssätzen und

[396] Vgl. hierzu Chandler 1975.

[397] Vgl. insbes. Hiebert 1962, Iltis 1970, 1971, 1972 und Scott 1970.

[398] Dies zeigt insbes. Scott 1970, der den „Conflict between Atomism and Conservation Theory" (Titel) bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts verfolgt.

[399] Auf Eulers Lösung komme ich im Teil 3.2 zurück.

[400] Vgl. hierzu näher Pulte 1989. Die dort gegen die gängige Geschichtsschreibung vertretene These, daß Leibniz' Programm für die Entwicklung der analytischen Mechanik nicht maßgeblich war und insbes. Leibniz selbst ein Prinzip der kleinsten Wirkung bei der gegenwärtigen Quellenlage nicht zugesprochen werden kann, wird (jedenfalls in ihrem *zweiten* Teil) durch neuere Argumente eher noch erhärtet; s. hierzu Breger 1999.

Variationsprinzipien der analytischen Mechanik, aber die Geschichte tut ihm nicht den Gefallen, diesen Zusammenhang historisch zu realisieren.)

‚Die' zweite Kontroverse ist von vornherein im *Plural* zu denken: Ob von Kräften in der rationalen Mechanik *überhaupt* die Rede sein dürfe und welche Bedeutung dem Kraftbegriff gegebenenfalls beizulegen sei, hat von Berkeley und Malebranche über Maupertuis, d'Alembert, Euler, Hume, Lazare Carnot und anderen zu einer Vielzahl ontologischer, erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Erörterungen und Auseinandersetzungen Anlaß gegeben, deren Ausgang nicht leicht zu fassen ist. *Cum grano salis* läßt sich hierzu vielleicht folgendes feststellen: Generell gelten ‚Newtonsche' direktive Kräfte gegen Ende des 18. Jahrhunderts als probate kausale Erklärungen von Naturphänomenen — so etwa bei Lagrange und in der Laplace-Poissonschen Physik. An der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert wird Newtons Konzept der direktiven Kraft generell als unproblematisch angesehen; wie die Physik der Zeit *insgesamt* durch eine starke Dominanz des Newtonschen Programms gekennzeichnet ist. Die Kausalitäts- und Kraftkritik vor der Jahrhundertmitte[401] blieb jedoch nicht gänzlich folgenlos: Mathematiker wie Maupertuis und d'Alembert forderten, Kräfte nicht als Erklärungsentitäten aufzufassen (da die Einführung unbeobachtbarer Kräfte zur ‚Erklärung' beobachtbarer Wirkungen gar nichts erkläre) und den Begriff ‚Kraft' lediglich als Abkürzung für die jeweils festgestellte Bewegungsänderung zu gebrauchen. Newtons zweites Bewegungs*gesetz* wird bei ihnen zu einer bloßen Nominal*definition*.[402] Diese erkenntnistheoretisch motivierte Kraftkritik wird im 19. Jahrhundert — meist ohne Kenntnis der historischen ‚Vorläufer' — von Physikern und Philosophen wie Kirchhoff, Mach, Hertz und Poincaré wieder aufgegriffen.

IV.2.4 Mechanischer Euklidianismus und Humescher Skeptizismus

Der entscheidende Punkt ist hier jedoch, daß zwischen der durchaus ‚modern' anmutenden Kausalitäts- und Kraftkritik der *Praktiker* der rationalen Mechanik und einem Erkenntnisskeptizismus, wie ihn insbesondere David Hume hinsichtlich der Allgemeinheit und Sicherheit von Naturgesetzen aus seiner Kausalitätskritik abgeleitet hat, deutlich unterschieden werden muß. Wie schon Malebranche durch seine Kausalitäts- und Kraftkritik nicht gehindert wird, die Gesetze der Mechanik als notwendig (weil auf einem direkten und unwandelbaren göttlichen Eingreifen in das Naturgeschehen beruhend) anzusehen, werden auch die späteren Kritiker hierdurch *nicht* von einem strikten mechanischen Euklidianismus abgebracht. Man ist fast versucht zu sagen: im Gegenteil. So vertrat Maupertuis zunächst die Auffassung, mechanische Gesetze seien keineswegs notwendig, sondern lediglich als bequeme, ‚denkökonomisch' nützliche Zu-

[401] Für einen Überblick s. Pulte 1989, S. 83-88, sowie die dortige Literatur.
[402] Vgl. ebd., S. 89-92 und S. 100f. bzw. S. 154 und S. 157; s. auch Hankins 1970, S. 151-194.

sammenfassungen gleichartiger Ereignisse aufzufassen — sie seien weder bewiesen noch beweisbar[403]. Sein später formuliertes Prinzip der kleinsten Wirkung, auf das noch zurückzukommen sein wird, ist jedoch keineswegs von dieser modernen, geradezu ‚Machschen' Art: Es soll vielmehr von unbeschränkter Allgemeinheit, Sicherheit und Evidenz sein, und es wird von Maupertuis *teleologisch* begründet. Die Kausalitäts- und Kraftkritik dient bei ihm lediglich dazu, ‚rivalisierende' Prinzipien, die sich auf die eine oder andere Kraftkonzeption stützen, zu diskreditieren[404], um das Prinzip der kleinsten Wirkung als *einziges* erkenntnistheoretisch unproblematisches (und zugleich hinreichend allgemeines) Prinzip auszuweisen und so die in der KMN geforderte *Eindeutigkeit* des mechanischen Systems und seiner Axiome zu garantieren.[405] Ähnlich macht d'Alembert für sein Prinzip[406] nicht nur geltend, daß es von größter Allgemeinheit und — anders als andere ‚Prinzipien', wie etwa das der *vis viva*-Erhaltung — tatsächlich *bewiesen* sei, sondern auch, daß es nicht auf „irgendeiner schlechten oder dunklen Metaphysik" gründe und keinen Gebrauch von „Aktionen oder Kräften oder anderen sekundären Prinzipien" mache, die niemals zu „primären Prinzipien werden können, weil die Metaphysik sie nie wird klären können"[407].

Maupertuis und d'Alembert beleuchten einen Zug der KMN des 18. Jahrhunderts, der *allgemeinerer* Art ist: Die erkenntniskritische Kausalitäts- und Kraftdiskussion bleibt sozusagen an der Oberfläche; sie führt nicht zu einer grundsätzlichen Infragestellung der Allgemeinheit, Sicherheit und der (zumindest von Mathematikern wie Euler und d'Alembert geforderten) Notwendigkeit mechanischer Grundgesetze.

Humes Kritik der Induktion, wonach induktive Verallgemeinerungen niemals Sicherheit und Notwendigkeit von synthetischen Sätzen begründen können und daher prinzipiell immer als offen für Revisionen im Lichte künftiger Erfahrungen angesehen werden müssen, geht mit einer Unterscheidung fehlbarer empirischer Gesetze und sicherer mathematischer Aussagen einher[408], die — ohne eine nichtinduktive ‚Absiche-

[403] Vgl. Maupertuis 1740, S. 170.

[404] S. Pulte 1989, S. 92-98.

[405] Vgl. Kap. II, Teil 2.1 und 2.2. Daß Maupertuis sein Prinzip teleologisch und nicht kausal interpretiert, steht *nicht* in Widerspruch zur dortigen KMN-Forderung *(vi*)*, wie eine genauere Betrachtung von Maupertuis' Aktionsbegriff zeigt; vgl. auch Teil 4.2.

[406] Dessen Formulierung ist vom *heute* sog. ‚D'Alembertschen Prinzip' – einer Bezeichnung die meistens synonym mit ‚Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten' gebraucht wird – durchaus verschieden; s. hierzu näher Fraser 1985.

[407] D'Alembert 1755, S. 175; vgl. hierzu auch Hankins 1970, S. 190-194.

[408] Zumindest Arithmetik und Algebra, nicht jedoch Geometrie und Mechanik behalten ihren klassischen erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Status: „There remain, therefore, algebra and arithmetic as the only sciences, in which we can carry on a chain of reasoning to any degree of intricacy, and yet preserve a perfect exactness and certainty" (Hume 1739, S. 119). Bereits auf die Sätze der Geometrie (nicht zu reden von der Mechanik) treffen diese Eigenschaften nicht mehr zu: „[...] tho' geometry falls short of that perfect precision and certainty, which are peculiar

rung' synthetischer Sätze als a priori gültige, wie sie später Kant zu geben suchte — den mechanischen Euklidianismus unterminieren würde.

Aber diese Wirkung blieb aus: Der ‚Humesche Skeptizismus' prallt ab an den Vertretern einer Disziplin, die sich in der Begründung mechanische Prinzipien eher auf die Sicherheit der Mathematik denn die Regularität der Erfahrung berufen zu können glaubten, und in der Tat wurde Hume hier — selbst von ‚philosophischen Köpfen' mit empiristischer Neigung wie Maupertuis und d'Alembert — erst spät und mit sehr geringem Einfluß rezipiert[409]. Auf die Praktiker der mathematischen Physik könnte man daher eine Bemerkung Humes münzen, mit der er eine geläufige Kritik an seinem Skeptizismus antizipierte: „My practice, you say, refutes my doubts. But you mistake the purport of my question. As an agent, I am quite satisfied in the point; but as a philosopher, who has some share of curiosity, I will not say scepticism, I want to learn the foundation of this inference".[410]

Die *Praxis* der rationalen Mechanik war eben eine empirisch erfolgreiche, mathematische und deduktive Praxis und Euklidianismus weiterhin ihr Ideal[411]. Newtonianer wie die bereits erwähnten Colin MacLaurin oder William Emerson vertraten zwar nicht den Anspruch, Newtons *axiomata* seien *notwendig*, aber sie galten ihnen doch als induktiv gesicherte, evidente und allgemeinste Wahrheiten. Kontinentale Vertreter gingen gewöhnlich hierüber noch hinaus: Für Euler bestand, wie wir sehen werden, kein Zweifel, daß die gesamte rationale Mechanik aus wenigen ‚notwendigen Wahrheiten' deduktiv erschlossen werden könne; zeitweilig glaubte er, die verschiedenen Prinzipien, die *scheinbar* Anspruch auf eine „Stellung als Axiome der Mechanik" machen, könnten „auf ein *einziges* reduziert werden" — nämlich seine Erweiterung des zweiten Newtonschen Gesetzes — und dieses könne als „*einziges* Fundament der ganzen Mechanik und der anderen Wissenschaften, die die Bewegung irgendwelcher Körper behandeln",

to arithmetic and algebra, yet it exceeds the imperfect judgements of our senses and imagination. The reason why I imute any defect to geometry, is, because its original and fundamental principles are deriv'd merely from appearances; and it may perhaps be imagin'd that this defect must always attend it, and keep it from ever reaching a greater exactness in the comparison of objects or ideas, than what our eye or imagination alone is able to attain. I own that this defect so far attends it, as to keep it from ever aspiring to a full certainty [...]" (ebd., S. 119).

[409] Zu Maupertuis vgl. Pulte 1989, S. 83-86 (insbes. Anm. 285) und die dortige Literatur; zu d'Alembert s. Hankins 1970, S. 160-162. Ich stimme allerdings nicht Hankins' These zu, Hume habe deshalb so wenig Einfluß auf d'Alembert genommen, weil beider Auffassungen ohnehin zu ähnlich gewesen seien (ebd., S. 161). Eher dürfte zutreffen, daß d'Alembert die Radikalität der Humeschen Kausalanalyse und ihrer Implikationen für sein Verständnis mechanischer Grundgesetze gar nicht wahrgenommen hat.

[410] Hume 1777, S. 38.

[411] Die einzige namhafte, wirkungsgeschichtlich aber bezeichnenderweise bedeutungslos gebliebene Ausnahme scheint mir — erst um die Jahrhundertwende — Lazare Carnot zu sein. S. Carnot 1805 sowie Gillispie 1971; vgl. auch Pulte1994, S. 508f.

betrachtet werden[412]. D'Alembert warnte davor, ein Prinzip der Mechanik als „reinen Erfahrungssatz" zu betrachten, weil „hierdurch die Sicherheit der Mechanik zerstört und diese zu einer rein experimentellen Wissenschaft gemacht würde"[413]. Die Preisfrage der Berliner Akademie aus dem Jahre 1758, „ob die Wahrheit der Prinzipien der Statik und der Mechanik notwendig oder kontingent ist"[414], beantwortet er eindeutig im ersten Sinne[415]. Das von ihm selbst formulierte, ‚D'Alembertsche Prinzip' nehme unter den notwendigen Prinzipien eine Sonderstellung aufgrund seiner größten Allgemeinheit ein; es löse „alle Probleme des Bereichs [Dynamik]" und beantworte „alle Fragen der Dynamik durch eine einzige, sehr einfache und direkte Methode"[416]. Der volle Titel seines *Traité de dynamique*[417] kann geradezu als *Programm* des mechanischen Euklidianismus gelesen werden.

Maupertuis beansprucht die gleiche unbeschränkte Allgemeinheit für sein Prinzip der kleinsten Wirkung: Es ist ein „universelles Prinzip", auf dem „alle Gesetze gegründet sind" und von dem „die Bewegung und die Ruhe aller körperlicher Substanzen abhängen"[418]. Er legt sogar dessen Gültigkeit im Bereich des Organischen nahe[419] und versteht es als „eine notwendige Folge der weisesten Ausübung jener Macht [des Schöpfers]"[420].

Was sich in diesen drei Beispielen aus der ‚mittleren' Zeit zwischen Newton und Lagrange geltend macht und durch weitere Beispiele untermauert werden könnte, ist das Festhalten sowohl an der *cognitio ex principiis* als auch an der *cognitio principiorum* der klassischen Wissenschaftsauffassung[421]: Das Gesamt des anerkannten mechanischen Wissens, d.h. dessen verschiedenen, in der Regel nur auf einen beschränkten Bereich anwendbaren Einzelgesetze, soll aus wenigen, möglichst sogar nur *einem* Prinzip abgeleitet werden können und so in die Gestalt eines *Systems*[422] gebracht werden; zugleich sollen die Prinzipien durch geeignete Begründungen gesichert und einsichtig

[412] Euler 1750a, S. 88f. (Hervorhebungen von mir).
[413] D'Alembert 1743, S. XXII bzw. 1899, S. 11.
[414] S. Harnack 1900 II, S. 306 (Anm. 1).
[415] Vgl. D'Alembert 1758, S. XXXV.
[416] D'Alembert 1755, S. 175.
[417] „Traité de dynamique, dans lequel les loix de l'équilibre et du mouvement des corps sont réduites au plus petit nombre possible, et démontrées d'une manière nouvelle, où l'on donne un Principe général pour trouver le Mouvement de plusieurs Corps qui agissent les uns sur les autres, d'une manière quelconque" (D'Alembert 1743 bzw. 1758).
[418] Maupertuis 1746, S. 218.
[419] Ebd., S. 286.
[420] Vgl. Maupertuis 1750, S. 44f.
[421] Vgl. Kap. II, Teil 2.2.
[422] Ein Begriff, der von den mathematischen Physikern in der Regel (eine Ausnahme ist J.H. Lambert) gar nicht weiter diskutiert, sondern als die selbstverständliche Form, in der wissenschaftliche Erkenntnis darzustellen sei, vorausgesetzt wird.

gemacht werden. Da diese Prinzipien, wiederum dem klassischen Wissenschaftsverständnis folgend, ‚material' wahr sein müssen, kann man beide Forderungen nicht in der Weise auseinanderhalten, als ginge es bei der ersten *nur* um eine formale Organisation und bei der zweiten *nur* um die Sicherung und Einsichtbarmachung ihrer Wahrheit. Wenn ich beide im folgenden dennoch getrennt betrachte, geschieht dies nicht, weil ich eine solche Trennung in der fraglichen Entwicklung von vornherein als faktisch vorhanden behaupten würde, sondern vielmehr, weil ich in dieser Entwicklung eine *Schwerpunktverlagerung* vom Inhaltlichen zum Formalen sehe, die so besser zum Ausdruck gebracht werden kann.

IV.2.5 Prinzipieninflation und systematisch-deduktive Organisation

Die rationale Mechanik im zweiten Drittel des 18. Jahrhunderts ist durch eine Prinzipieninflation gekennzeichnet, die die Rede vom normalwissenschaftlichen Charakter dieses Zeitraums gleichsam empirisch widerlegt: Es begegnen nicht nur zahlreiche ältere, z.T. seit der Antike bekannte Prinzipien der Statik, die in ein umfassendes System zu integrieren waren, und nicht nur die bereits bekannten Bewegungsgesetze Newtons sowie Leibniz' Prinzip der *vis viva*-Erhaltung und die von Descartes, Huygens, Leibniz und anderen entwickelten Gesetze des elastischen und inelastischen Stoßes, sondern auch Maupertuis' „Loi du Repos" (1740) und das „Principe de la moindre action" (1744, 1746), Eulers eigenständige Formulierung des letzteren (1744), seine allgemeine Formulierung der sog. Newtonschen Bewegungsgleichungen (1750) und des Drehimpulserhaltungssatzes (1755), d'Alemberts Prinzip in seiner ursprünglichen Form (1743) und dessen Transformation zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten bzw. Verrückungen von Lagrange (1764), d'Arcys Prinzip (1747), Königs Prinzip (1751) usw. — nicht zu sprechen von den zahlreichen Prinzipien der Kontinuumsmechanik und Hydrodynamik, die in eine rationale Mechanik der Massenpunkte zu integrieren waren.[423] Es wäre falsch, diese Prinzipienvermehrung als Ausdruck kühner spekulativer Entwürfe, gleichsam einer Popperschen Praxis von ‚Vermutungen und Widerlegungen' zu interpretieren — dem genauen Gegenteil eines Euklidianismus, wie er hier behauptet wird. Vielmehr ist sie ein Ausdruck der Tatsache, daß *verschiedene*, miteinander rivalisierende Euklidianismen ihrem Geschäft nachgingen, allgemeine und sichere Prinzipien der Mechanik zu etablieren, um so die Leistungsfähigkeit ihres jeweiligen Programmes zu demonstrieren.

All die genannten Prinzipien entstanden aus der Analyse spezieller Beispiele und idealisierter physikalischer Anordnungen, deren Bedeutung und Tragweite durch die

[423] Für einen Überblick über die — hier nur angedeutete — Prinzipieninflation s. einführend die Gesamtdarstellungen Benvenuto 1991, Dugas 1955, Fraser 1997, Grattan-Guinness 1990, Mach 1933, Szabó 1979 und Truesdell 1968; zur folgenden Analyse vgl. auch Pulte 2000b.

wissenschaftliche Metaphysik des jeweiligen Programms bestimmt wurde. Sie galten als bestätigt durch die Anwendung auf verschiedene Probleme, und erhielten ihren Status als ‚Prinzipien' oftmals durch nichts anderes als solche eingeschränkten Anwendungsnachweise. Von einer Verifikation in irgendeinem strengeren Sinne konnte vorderhand nicht die Rede sein: Sie waren zunächst weder deduziert aus einem ‚höheren' Prinzip, noch — in Newtonscher, induktiver Manier — ‚deduziert' aus den Phänomenen, sondern sie bewährten sich an konkreten Problemen. Mit anderen Worten: Ihren Status als ‚Prinzip' verdankten sie zunächst weder metaphysischen noch empirischen Begründungen, sondern der *deduktiven Praxis der mathematischen Physik*. Begründung blieb, zumindest für hinreichend allgemein und fruchtbar erscheinende Prinzipien, notwendig, wie später noch deutlicher werden wird, aber sie folgte der Bewährung im Konkreten *nach*.

Es läßt sich zeigen, daß hinsichtlich einer solche Bewährung im Konkreten über die Grenzen der verschiedenen Programme hin Einigung erzielt werden konnte, wenn auch über die *Bedeutung* zentraler theoretischer Terme (wie ‚Kraft') keine Verständigung möglich war. Das Gravitationsgesetz, ein ‚Quasi-Axiom' des Newtonschen Programms, wurde von Leibnizianern wie Wolff und Cartesianern wie Euler früh als *empirisch* fruchtbar anerkannt, ungeachtet der Kontroversen über das ‚Wesen' der Gravitation; die Newtonianer wiederum erkannten früh die Bedeutung der Cartesischen Bewegungsgröße mv für die Analyse von Stoßprozessen, und Newtonianer wie Cartesianer akzeptierten im Laufe der Zeit auch, daß die von Huygens eingeführte und von Leibniz' zur universellen Erhaltungsgröße erklärte *vis viva* mv^2 nützlich für ein Verständnis des elastischen Stoßes und des freien Falls ist, *obwohl* ihre Meinung über Status und Reichweite deren Erhaltung von Leibniz' Auffassung völlig verschieden war und *obwohl* sie über völlig verschiedene Kraftbegriffe verfügten. Mit einem Wort: Verständigung kam nicht zustande auf der Ebene des philosophischen Diskurses, weil die dort verhandelten Bedeutungen zentraler, für die rationale Mechanik unentbehrlicher theoretischer Begriffe (Raum, Zeit, Materie und Masse, Kraft) inkommensurabel waren, sondern auf der Ebene konkreter Probleme, wo die Bedeutungen der auftretenden Konzepte (mv, mv^2 etc.) aus dem praktischen Kontext erschlossen werden konnten und wesentlich deskriptiver Art blieben: Massen-, Positions- und Zeitbestimmungen erlauben hier für bestimmte Fälle einen Vergleich unterschiedlicher Gesetzesauffassungen und eine Einigung über dieselben, die im Allgemeinen und Abstrakten nicht möglich war.

Solche Verständigungen zwischen inkommensurablen Programmen auf ‚unterer Ebene' sind nicht selbstverständlich, wie andere wissenschaftliche Grundlagenkontroversen zeigen. Sie erfordern vielmehr eine gewisse Verwandtschaft und strukturelle Gemeinsamkeiten[424], die dem Cartesianischen, Newtonschen und Leibnizschen Programmen aufgrund ihres gemeinsamen mechanistischen Hintergrundes eigen sind: Daß

[424] Für die *vis viva*-Kontroverse zeigt dies gut die Analyse Papineau 1977.

die Phänomene gesetzlich durch ‚Materie in Bewegung' bestimmt sind und daher die Feststellung von Materiemengen, deren Positionen und zeitlichen Veränderungen unabdingbar für die Erklärung konkreter Prozesse sind, ist ein gemeinsamer Bestand von Überzeugungen, der nicht aufgegeben werden konnte, ohne sich vom Mechanismus selbst zu verabschieden.

Trifft die These von einer ‚Verständigung auf unterer Ebene' zu, ergibt sich aus ihr ein grundsätzliches Problem des Euklidianismus: Die oben skizzierte Prinzipieninflation wird dann für die Vertreter der unterschiedlichen Programme *real* in dem Sinne, daß sie mit einer Vielzahl sog. ‚Prinzipien' konfrontiert sind, deren (zumindest partielle) Gültigkeit nicht in Abrede gestellt werden kann, die also in ein *System* der Mechanik integriert werden müssen. Der Euklidianismus kann aber keine Vielheit unabhängiger Prinzipien tolerieren, erst recht nicht, wenn diese rivalisierenden Programmen entstammen. Er strebt vielmehr danach, eine möglichst *kleine* Zahl von Axiomen zu etablieren, aus denen Sätze niederer Stufe abgeleitet werden müssen: Prinzipienvielheit ist das Resultat verschiedener wissenschaftlicher Metaphysiken, systematische Einheit das Ziel des Euklidianismus.

Hieraus wird klar, warum Maupertuis, d'Alembert, Euler und andere Ausschau nach ‚dem' einen Prinzip hielten, das die gesamte Mechanik, einschließlich der akzeptierten Leistungen rivalisierender Programme, umfassen sollte. Hieraus resultiert aber auch eine zunehmende und unvermeidbare Spannung, was die Rolle der ‚systemstiftenden' Prinzipien betrifft: Für Descartes, Newton und Leibniz waren dies die jeweiligen Bewegungsgesetze — Newtons Rede von *axiomata sive leges motus* belegt gerade die Auffassung, daß die allgemeinsten Bewegungsgesetze *auch* als systemorganisierende Axiome des euklidischen Aufbaus fungieren sollen. Aber das ‚sive' birgt ein Problem: Es ist keineswegs klar, daß solche Bewegungsgesetze (allgemeinste Naturgesetze im Sinne des Mechanismus) auch als deduktive Anfänge (Axiome im Sinne des Euklidianismus) taugen. Gesetze erklären die Natur, Axiome organisieren Theorien. Warum sollten beide Forderungen durch die *gleichen* Prinzipien erfüllbar sein? Es könnte vielmehr eine Möglichkeit Realität sein, wie sie später Kant in Erwägung zieht: Obwohl grundlegende Naturgesetze (nämlich die der Mechanik) existieren, könnte deren ‚deduktive Kraft' nicht ausreichen, um die Natur in *ein* kohärentes wissenschaftliches System zu fassen. Trotz universeller Gesetzlichkeit könnte die Natur sozusagen logische Ordnung zurückweisen.[425] In diesem Fall gäbe es eine Vielzahl verschiedenartiger Naturgesetze — Kant würde von einem ‚bloßen Aggregat' sprechen —, aber keine Ordnung und Einheit.

Diese Konsequenz ist für den Euklidianismus inakzeptabel, erscheint aber unabweisbar vor dem Hintergrund der disparaten Programme: *eine* Naturordnung, aber

[425] Ich gehe auf dieses Problem, das bei Kant interessanterweise eine ‚Wurzel' in seiner Mechanik-Rezeption (namentlich seinem Verständnis von Maupertuis' Prinzip der kleinsten Wirkung) hat, in Kapitel V näher ein.

verschiedene Wissenschaftsordnungen ohne übergreifende Axiomatisierung — dies wäre das Ende des mechanischen Euklidianismus als einer ‚AFE-Unternehmung', wie sie früher charakterisiert wurde.

Historisches Faktum bleibt jedoch, daß Lagrange gegen Ende des Jahrhunderts mit der *Méchanique Analitique* eine Integration leistet, die wichtige Beiträge der verschiedenen Programme berücksichtigt.[426] Die Frage wird zu beantworten sein, wie es — angesichts des dem Euklidianismus inhärenten Dogmatismus — überhaupt zu einer *theoretischen*, über die ‚Verständigung auf unterer Ebene' hinausgehenden Integration kommen konnte und wie diese Integration aussieht.

Meine These hierzu ist, daß die stattfindende Integration als eine euklidianistische Konsequenz dieser ‚Verständigung auf unterer Ebene' verstanden werden kann, daß es sich um eine im wesentlichen *formale*[427] Integration handelt (und insofern handeln *muß*, als eine inhaltliche Verständigung nicht möglich ist, der allgegenwärtige Euklidianismus jedoch *eo ipso* auf eine Integration aus sein muß) und daß diese folglich mit einer ‚semantischen Entladung' der Mathematik in der Mechanik einhergeht. Durch diesen Formalisierungsprozeß wird eine Auflösung des mechanischen Euklidianismus in seiner ursprünglichen AFE-Form eingeleitet, die jedoch vor dem Ende des 18. Jahrhunderts nicht wissenschaftstheoretisch reflektiert und daher faktisch erst in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vollzogen wird. Diese These wird später, an Eulers und Lagranges Mechanik, exemplifiziert. Zunächst soll sie jedoch in allgemeinerer Form ausgeführt werden.

In Zeiten einer ‚Revolution in Permanenz', worunter die Mechanikentwicklung mindestens der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts gerechnet werden kann, gewinnen *formale* Elemente der Wissenschaften eine besondere Qualität: Während ein ‚konzeptueller' Diskurs über die Grenzen des eigenen Programms hinweg kaum möglich ist und fast immer unfruchtbar bleibt, wird die ‚Sprache Mathematik' für die Geometer noch wichtiger, um Fragen der rationalen Mechanik zu klären. Damit ist nicht die von Lagrange vertretene[428] und kaum anders als naiv zu nennende Auffassung gemeint, die Mathematik könne gleichsam als ‚Metasprache' das babylonische Sprachgewirr der verschiedenen Metaphysiken überwinden und deren Begründungskontroversen lösen. Gemeint ist vielmehr, daß die Darstellung durch Geometrie, Analysis und Algebra ein eigenes (zusätzliches) Gewicht aufgrund der Tatsache erhält, daß, durch sie die *Resultate* eines Programms den anderen verfügbar gemacht werden, die Mathematik eine Schlüsselrolle in der Integration der als wichtig anerkannten Resultate rivalisierender Programme bekommt. Sie ist das einzige Mittel zur Formulierung übergreifender Prin-

[426] Vgl. hierzu Teil 5.2.

[427] Ich gebrauche diesen Begriff einstweilen vage und als Gegenbegriff zu ‚inhaltlich'. Die weitere Diskussion wird diese Redeweise präzisieren, s. insbes. Teil 4.2 und Teil 5.

[428] Vgl. Lagrange an d'Alembert vom 27. Januar 1778 (Lagrange *Œuvres* XIII, S. 336).

zipien, von denen aus die akzeptierten Gesetze der Mechanik, ob sie dem eigenen Programm entspringen oder nicht, abgeleitet werden können.

Mit der skizzierten Prinzipieninflation werden besonders die letztgenannten Gesichtspunkte wichtig. Gesetzt nun den Fall, an konkreten mechanischen Problemen habe sich ein mathematisches Prinzip bewährt, das große deduktive Leistungsfähigkeit verspricht (etwa das der kleinsten Wirkung, der virtuellen Geschwindigkeiten oder d'Alemberts Prinzip). Als mögliches ‚Axiom' wird dieses Prinzip (weiterhin) durch besondere Evidenz und Sicherheit auszuweisen, d.h. näher zu begründen sein. Vor allem anderen aber ist zu zeigen, daß es die verheißene deduktive Organisation tatsächlich leistet, d.h. die Ableitung möglichst vieler, idealerweise *aller* akzeptierter mechanischer Sätze tatsächlich erlaubt. In Lakatos' ‚Fließmetapher':[429] Es reicht nicht aus, durch unbezweifelbare Axiome Wahrheit von oben in das System einzuführen, sondern es wird mit wachsendem Korpus mechanischen Wissens immer wichtiger, Wahrheit auch nach unten weiterleiten zu können und so den gesamten Bestand des Wissens zu verifizieren (Die Entwicklung der Variationsrechnung — in Verbindung mit den analytischen Prinzipien der Mechanik — liefert das beste Beispiel für die Bemühungen der Mathematiker, solche ‚wahrheitserhaltenden Ableitungskanäle' zu bauen.).

Der Prozeß systematischer Ordnung und Integration ist daher mit einer — für die *entwickelte* klassische Wissenschaft charakteristischen — Schwerpunktverlagerung verbunden, die im Falle der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts durch die ‚analytische' Richtung[430] besonders gut illustriert wird: Mit zunehmendem mechanischen Wissen wird die *Ableitung aus* Axiomen wichtiger als die *Begründung von* Axiomen selber[431], ihre formalen (logisch-deduktiven) Möglichkeiten werden wichtiger als ihr naturgesetzlicher Gehalt — mit Bezug auf Newtons Wendung von den *axiomata sive leges motus* könnte man auch sagen, daß die erste Bedeutung zu Lasten der zweiten an Gewicht gewinnt. Alwin Diemer hat hierfür im allgemeineren Zusammenhang das plastische Bild von der ‚Abwärtsbewegung des Schwerpunktes' gebraucht.[432]

Mit dieser ‚Abwärtsbewegung' geht — wie ich im folgenden zeigen will — eine wachsende Unabhängigkeit der rationalen Mechanik von philosophischen Grundlegungen im weitesten Sinne einher: Metaphysische Prinzipienbegründungen, aber auch solche empiristischen Begründungen, die explizit auf erkenntnistheoretische und methodologische (induktionslogische) Reflexionen Bezug nehmen, werden sekundär. Um noch einmal auf Lakatos' Fließmetapher zurückzugreifen: Wenn die ‚Ableitungskanä-

[429] Vgl. Kap. II, Teil 2.4.

[430] Vgl. insbes. die folgenden Teile 4 und 5.

[431] Dem entspricht die bereits erwähnte Beobachtung, daß die großen Grundlagenkontroversen der rationalen Mechanik eher in der ersten als der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts stattfinden, während die zweite Hälfte stärker von formalen Entwicklungen (Potentialtheorie, Variationsrechnung, Störungstheorie etc.) gekennzeichnet ist.

[432] Diemer 1968b, S. 29-31; vgl. Kap. II, Teil 1.1, Pkt. (4).

le' mit Wahrheit gefüllt sind und der ‚Wahrheitsfluß' hin zu den Phänomenen gesichert erscheint, verliert die *Quelle* der Wahrheit an Bedeutung. Euklidianismus prägt weiterhin das Wissenschaftsverständnis, wird aber eher zu einem syntaktischen denn semantischen Konzept.

IV.2.6 Prinzipienbegründungen und Begründungsprinzipien

Nach der bisherigen Charakterisierung der drei großen Programme der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts versteht es sich fast von selbst, daß über Fragen der Prinzipienbegründung keine Einigung erzielt werden konnte. Dies resultiert nicht nur und nicht einmal in erster Linie aus den unterschiedlichen Auffassungen darüber, welche *Prinzipien* der Mechanik als Axiome vorangestellt werden sollten und daher einer besonderen Begründung bedürfen, sondern vor allem aus den unterschiedlichen Standards für Begründungen bzw. *Begründungsprinzipien*: Während die Newtonianer eine hinreichende Begründung mechanischer Prinzipien in der (induktiven) ‚Deduktion aus den Phänomenen' sahen, konnten Cartesianer und Leibnizianer hierin überhaupt keine Begründung erkennen und verlangten weitergehende, metaphysische Rechtfertigungen. Sie beharrten auf dem ‚aristotelischen' AFE-Ideal der KMN und waren nicht bereit, Newtons ‚Baconsche Erweiterung' dieses Ideals hinzunehmen.[433] Newtons *Principia* galten ihnen daher in der Regel als ein zwar mathematisch achtbares, aber keineswegs als ein philosophisches Werk.[434] Wegen ihrer fehlenden metaphysischen Begründung waren sie kein Beitrag zur *philosophia naturalis*. Christian Wolff etwa spricht von der „Newtonianischen Philosophie" als einem „non ens" oder von der „einfältig sogenannten Neutonianischen Philosophie"; ihre Anhänger sind ihm keine „rechten philosophi"[435].

Auf der anderen Seite ließen Newtonianer keinen Zweifel an ihrer Überzeugung, daß die metaphysischen Begründungen der Gegenseiten dunkel und daher *unsicher* seien: Für Leibniz war der Satz vom zureichenden Grund ein Vernunftprinzip, aufgrund dessen mechanische Gesetzmäßigkeiten überhaupt erst verstanden und als not-

[433] Vgl. Kap. II, die Teile 1.2, 1.3 und 2.2.

[434] „In der Mathematik genießt der hochberühmte Newton ganz zu Recht den allerhöchsten Ruhm, aber bei der Erklärung der Natur genügt die Mathematik allein deshalb nicht, weil sie ohne die Mithilfe einer wohlbegründeten Metaphysik den Ungeheuern der Einbildung, die für die Naturerkenntnis ein Hindernis darstellen, erliegt [...]" (Wolff 1717, S. 278). Zu Wolffs Newton-Rezeption und -Kritik s. Lorenz 1985. Die eher wissenschaftspolitische und institutionengeschichtliche Seite der ‚Newtonian-Wolffian Controversy' beleuchtet Calinger 1969.

[435] Notiz Wolffs im Briefwechsel mit Manteuffel (Wolff *Werke* III 14, S. 61).

wendig eingesehen werden konnten.[436] Der Newtonianer Samuel Clarke jedoch nimmt dieses Prinzip nicht als solches hin und fragt nach einer *Begründung* des Satzes vom zureichenden Grund.[437] Leibniz weist dieses Ansinnen zurück, weil er das Prinzip für evident und keiner weiteren Begründung bedürftig hält.[438] In der Terminologie von

[436] „Die entscheidende Grundlage für die Mathematik ist der Satz vom Widerspruch bzw. von der Identität [...]. Allein dieser Satz reicht aus, die gesamte Arithmetik und Geometrie, das heißt, sämtliche mathematische Sätze zu beweisen. Um aber von der Mathematik zur Physik übergehen zu können, ist noch ein anderer Satz erforderlich, wie ich in meiner Theodizee festgestellt habe, das ist der Satz vom hinreichenden Grunde, nämlich es ereignet sich nichts, ohne daß es einen Grund gibt, warum es so und nicht anders ist." (Leibniz' zweites Schreiben an S. Clarke; Schüller 1991, S. 25f.) Eine Analyse des Satzes und seiner Bedeutung für das „Begründungsproblem der Mechanik" gibt Kambartel 1966.

[437] Nachdem sich Clarke in seiner Antwort auf Leibniz' zweites Schreiben zunächst eher zustimmend („Es ist vollkommen richtig, daß nichts ohne einen hinreichenden Grund ist [...]"), aber auch einschränkend äußert („Jedoch ist dieser hinreichende Grund oftmals nichts anderes als der bloße Wille Gottes"; ebd., S. 31), macht er in der fünften Entgegnung, im Kontext der Diskussion menschlicher Willensfreiheit, seinem Unmut über Leibniz' Auslegung dieses Satzes Luft: „Was den grundlegenden Satz vom hinreichenden Grund angeht, so dient alles, was der hochgelehrte Verfasser hier dazu vorbringt, nur dazu, seine Schlußfolgerung zu behaupten, aber nicht zu beweisen und bedarf daher auch keiner Antwort. Ich will nur anmerken, daß seine Redeweise nicht eindeutig ist. [...] Seine Aufstellung eines grundlegenden Satzes vom hinreichenden Grund in einem solchen Sinne [...] und seine Hoffnung, daß er ihm in diesem Sinne ohne Beweis zugestanden wird, ist das, was ich seine *petitio principii* nenne bzw. das Vorwegnehmen der Behauptung. Nichts kann unphilosophischer sein als dies" (ebd., S. 163). Dies sind die letzten Worte des Briefwechsels; der Schlußsatz markiert das Maß an erzielter ‚Übereinstimmung' in aller Deutlichkeit.

[438] In Leibniz' drittem Schreiben heißt es: „Man erkennt den wichtigen Satz an, daß nichts geschieht, ohne daß es einen hinreichenden Grund gibt, warum es so und nicht anders ist. Jedoch gesteht man ihn mir nur dem Worte nach zu und in Wirklichkeit bestreitet man ihn mir. Dies zeigt, daß man die gesamte Tragweite des Satzes nicht völlig verstanden hat" (ebd., S. 37). Im vierten Schreiben führt er sein Verständnis des Satzes näher aus (ebd., S. 52-55) und schreibt begleitend an die Prinzessin von Wales: „Ich werde sehen, wie Monsieur Clarke mir antwortet. Wenn er mir das grundlegende Axiom, daß sich nichts ereignet, ohne daß es einen hinreichenden Grund gibt [...], nicht als vollkommen wahr zugesteht, so werde ich nicht anders können, als an seiner Aufrichtigkeit zu zweifeln [...]" (ebd., S. 262; vgl. auch sein Schreiben an Louis Bourget vom 20. April 1716, ebd., S. 243). Auch wenn die Diskussion des Satzes sich nicht auf mechanische Prinzipienbegründung im engeren Sinne erstreckt, zeigt sie doch, daß hier über *Begründung* im Leibnizschen Sinne kein Konsens möglich war. Die Verlagerung der Debatte von der erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen bzw. naturphilosophischen auf die ethische und moralische Ebene, wie sie in Leibniz' Zweifel an Clarkes Aufrichtigkeit zum Ausdruck kommt, ist symptomatisch für die ganze Auseinandersetzung: Wo ‚rationale' Argumente wirkungslos bleiben, kann dem ‚rationalen' Dialogpartner keine wirklich philosophische Gesinnung (vgl. Anm. 72) zugesprochen werden. Leibniz eröffnet sein fünftes und letztes Schreiben mit den Worten:

Hans Alberts ‚Münchhausen-Trilemma'[439] könnte man sagen: Während die eine (Leibnizsche) Seite in der Hinterfragung des Satzes vom zureichenden Grunde die Gefahr eines unerlaubten und auch vermeidbaren unendlichen Regresses sieht, wittert die andere (Newtonsche) Seite den dogmatischen Abbruch eines ohnehin problematischen Begründungsverfahrens oder — dritter Teil des Trilemmas — einen logischen Zirkel im Begründungsverfahren der Gegenseite[440], weil keine Einigkeit darüber herrscht, was begründungsbedürftig sei und was nicht. Während innerhalb der jeweiligen Programme weitgehende Einigkeit darüber bestand, *wie* zu begründen sei und *was* dabei vorausgesetzt werden dürfe, war ein übergreifender ‚Archimedischer Punkt der Erkenntnis' nicht vorhanden und wurde auch nicht erreicht. Leibniz' berühmte Frage, in der Auseinandersetzung mit Newton an den ‚Vermittler' Abbé Conti gerichtet, klingt denn auch heute weniger rhetorisch und verrät mehr über die Ratlosigkeit, in Fragen der Wissenschaftlichkeit und wissenschaftlichen Begründung Einigkeit zu erzielen, als die Protagonisten einräumen konnten: „Ich bin erstaunt, daß Sie mir schreiben, daß man sich über die Methode des Philosophierens verständigen müsse, bevor man über Monsieur Newtons Philosophie spricht. Gibt es denn in London eine andere Logik als in Hannover?"[441]

Nicht alle Begründungsversuche blieben darum unfruchtbar und ‚steril' in dem Sinne, daß sie auf die Axiome des eigenen Programms beschränkt blieben und die der Gegenseite erst gar nicht in Erwägung gezogen wurden. So wuchs mit fortschreitendem empirischem Erfolg des Newtonianismus das Interesse der Cartesianer und Leibnizianer daran, Newtons *axiomata* im Sinne ihrer jeweiligen Programme umzudeuten und so sicher zu begründen.[442] In Deutschland läßt sich von Wolff und anderen Philosophen

„Dieses Mal will ich ganz ausführlich antworten, um in die Schwierigkeiten Licht zu bringen und zu prüfen, ob man bereit ist, auf Gründe zu hören und zu zeigen, daß man ein Verehrer der Wahrheit ist, oder ob man nur herumkritteln will, ohne etwas aufzuklären" (ebd., S. 75; zur Reaktion vgl. Anm. 72).

[439] Vgl. Kap. II, Teil 2.2., Anm. 142.

[440] Dies ist offenbar Clarkes Kritik an Leibniz; vgl. Anm. 437 oben.

[441] Weiter heißt es: „Immer wenn man ordnungsgemäß über erwiesene Tatsachen bzw. über unbezweifelbare Axiome spricht, hat man ganz bestimmt recht" (Leibniz an A. Conti vom 9. April 1716; Schüller 1991, S. 242; vgl. hierzu auch Hecht 1993). Aber welche Kriterien gelten für eine ‚ordnungsgemäße Rede' über Tatsachen, welche für Axiome? Gerade hierum ging der Streit. Wie Leibniz etwas früher gegen Newton bemerkt: „Ich gebe Hypothesen nicht den Vorzug gegenüber Schlußfolgerungen, die aus den Experimenten durch Induktion gewonnen wurden. Aber manchmal gibt man das für allgemeine Induktion aus, was sich nur aus speziellen Beobachtungen zusammensetzt, und manchmal möchte man das für eine Hypothese ausgeben, was sich beweisen läßt" (ebd., S. 242).

[442] Wie bereits bemerkt, waren ihnen diese *axiomata* oft ohnehin geläufig und wurden der älteren Tradition der Mechanik zugerechnet (wie Newtons erstes Gesetz Descartes, das zweite Gesetz Galilei).

wie Thümmig, Bilfinger, Reusch und Crusius eine Traditionslinie rationalistischer Begründung der Newtonschen *Principia* bis hin zu Kants Versuch einer transzendentalen Begründung in den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* (1786) ziehen, denen die Überzeugung gemeinsam ist, daß die mathematischen Grundgesetze der Bewegung weder durch Mathematik allein noch durch Erfahrung, sondern vor allem durch metaphysische Argumente angemessen zu rechtfertigen seien. In Hinblick auf Kant sei bereits hier auf ein auffälliges Merkmal dieser Begründungsversuche hingewiesen: Während das Trägheitsprinzip im Satz des zureichenden Grundes eine (scheinbar) unproblematische Begründung erhält und das dritte Gesetz mit Hilfe des Satzes ‚causae equat effectus' — gelegentlich aber auch durch wesentlich voraussetzungsreichere ontologische Argumentationen[443] — begründet wird, *fehlen* nicht nur vergleichbare Begründungen, sondern Begründungen *überhaupt* für Newtons zweites Gesetz — wobei nicht klar wird, ob dieses Gesetz als ‚nur' empirisches verstanden wird und daher aus dem Begründungskontext herausfällt, weil es nicht zu den ‚ersten' Prinzipien gehört, oder ob es, was dem Leibnizschen Programm eher entspräche, als gänzlich überflüssig angesehen wird.[444] Wie sich zeigen wird, ist auch Kants *Metaphysischen Anfangsgründen* diese ‚Begründungslücke' eigen — wobei zu vergegenwärtigen ist, daß hier von einer ‚Lücke' zu sprechen nur dann sinnvoll ist, wenn die metaphysische Fundierung aller *drei* Newtonschen Axiome als unverzichtbar angesehen wird. Ich komme hierauf zurück.[445]

Die Begründungsbemühungen der Praktiker der rationalen Mechanik, auf die ich die weitere Darstellung konzentriere, sind von einer Buntheit, die eine strukturierte und zugleich allgemeine Darstellung kaum zuläßt, aber sie sind *überall* präsent und dokumentieren das euklidianistische Streben nach sicheren Grundlagen. Deduktive Bewährung *allein* erschien für solche Prinzipien, die Anspruch auf einen axiomatischen Status machen konnten, nicht ausreichend. Wir finden hier, oft in einer Person und zur gleichen Zeit[446], sowohl Prinzipienbegründungen, die im weitesten Sinne metaphysisch zu nennen sind *(M)*, als auch Begründungen, die sich explizit oder implizit auf Erfahrung berufen *(E)*. Letztere lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: solche, die auf die ‚Kraft der Induktion' pochen *(E1)*, also Prinzipien unmittelbar aus den Phänomenen durch

[443] Wolff verweist bei seinen Ausführungen zu diesem Prinzip im §346 seiner *Cosmologia Generalis* auf Newtons *Principia* und begründet es ausführlich folgendermaßen: „*Action corporis unius aequalis est reactio alterius.* Corpus enim reagit in alterum vi inertiae (§.316.), consequenter nititur adversus nisum agentis (§.319.) & actio atque reactio eodem tempore fiant (§.316.319), eodem autem tempore viribus iisdem (§.733. *Ontol.*), adeoque aequalibus (§349.737. *Ontol.*), aequales actiones producantur; actio utique & reactio aequales esse debent" (Wolff 1737, S. 252).

[444] Vgl. Watkins 1997, insbes. S. 323f.

[445] Vgl. Teil 7.1.

[446] Ein Beispiel hierfür liefert Euler; vgl. Teil 3.

schrittweise und sichere *Induktion* gewinnen zu können glauben (eine Spezialität der Newtonianer), und solche, die sich auf andere akzeptierte mechanische Sätze stützen[447] und aus ihnen das fragliche Prinzip tatsächlich *deduktiv* zu entwickeln suchen *(E2)*[448].

Die generelle Entwicklung der Begründungspraxis ist, wie bereits bemerkt, durch eine Verlagerung vom *(M)*-Typus zum *(E)*-Typus gekennzeichnet. Ich will dies an zwei Beispielen verdeutlichen:

Eine nicht nur unter Philosophen, sondern auch unter kontinentalen Mathematikern weit verbreitete Begründung des Trägheitsprinzips bediente sich explizit oder implizit des Satzes vom zureichenden Grund.[449] Diese Begründungsform wird in der zweiten

[447] Wobei diese wiederum als empirisch gerechtfertigt angesehen werden. Die hier vorgenommene Unterscheidung ist nicht trennscharf, denn wie wir gesehen haben (vgl. Kap. II, Teil 4.1), schließt der Induktivismus auch solche Phänomene ein, die bereits in Gestalt allgemeiner mechanischer *Gesetze* (wie Keplers Gesetze) auftreten, die als empirisch begründet gelten. *(E1)*-Begründungen können demnach auch *(E2)*-Elemente enthalten. Worauf es mir hier jedoch stärker ankommt, ist die Tatsache, daß der *(E1)*-Typus erkenntnistheoretisch und methodologisch meist stärker reflektiert wird als der *(E2)*-Typus, bei dem die für die Ableitung benötigten mechanischen Sätze fraglos vorausgesetzt werden. Insofern kann man *(M)*- und *(E1)*-Begründungen im weitesten Sinne als ‚philosophisch', *(E2)*-Begründungen als eher ‚wissenschaftsimmanent' bezeichnen.

[448] Was natürlich die Frage aufwirft, warum diesem Prinzip überhaupt der Status eines Axioms beigelegt wird, weil es seine Sicherheit und Evidenz offenkundig *anderen* Sätzen verdankt, die zudem in der Menge der aus den Axiomen ableitbaren Sätze wiederum enthalten sein müssen (Begründungszirkel). Ich komme hierauf zurück.

[449] Ich führe hier nur Euler und d'Alembert an. Beide formulieren das Trägheitsgesetz getrennt für Ruhe und Bewegung, Euler begründet in seiner *Mechanica* (1736) zudem auch Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit voneinander getrennt. Bei ersterer läßt er sich sogar zu der Spekulation hinreißen, daß sie selbst in einer Welt stattfände, wo der Satz vom zureichenden Grund außer Kraft gesetzt sei. Seine „Demonstratio" zur Proposition 9, wonach „ein mit absoluter Bewegung begabter Körper [...] einen geradlinigen Weg beschreiben [wird]", lautet nämlich: „Denkt man sich den Körper im unendlichen leeren Raume, so ist kein Grund vorhanden, warum er eher nach der einen als nach der anderen Seite hin von der geraden Linie abweichen sollte. Es liegt daher in der Natur des Körpers, dass er in gerader Linie fortschreiten wird. Auch in der Welt, wo dieses Princip des zureichenden Grundes nicht mehr stattfindet, ist anzunehmen, dass jeder Körper geradlinig fortschreiten muss, wenn er nicht daran verhindert wird" (Euler 1848/50 I, S. 23, vgl. auch S. 21f. bzw. Euler 1736 I, S. 29, vgl. auch S. 27f.). Der merkwürdige Hinweis, daß in dieser ‚Demonstratio' der Schlußsatz auch dann als gültig angesehen werden könne, wenn die metaphysische Prämisse nicht gelten sollte (woran Euler natürlich nicht glaubt), weist bereits auf eine zunehmende *Selbstgewißheit* der rationalen Mechanik hin, die eine Folge der ‚Diemerschen Schwerpunktverlagerung' ist. Vgl. hierzu auch Teil 3.

D'Alembert begründet den ersten Teil des Trägheitsprinzips („Ein ruhender Körper wird in der Ruhe verharren, so lange keine äussere Ursache ihn zum Aufgeben dieses Zustandes veranlasst.") mit dem Zusatz: „Denn ein Körper kann sich nicht von selbst in Bewegung setzen" (D'Alembert 1899, S. 21f. bzw. 1743, S. 3). In der Begründung des zweiten Gesetzes, das um-

Jahrhunderthälfte zunehmend unüblich: Laplace und Poisson machen noch von ihr Gebrauch, *obwohl* beide den empirischen Ursprung des Prinzips betonen[450], später jedoch wird auf diese ‚metaphysische Zusatzversicherung' in aller Regel verzichtet. Das Trägheitsprinzip gilt dann unter Wissenschaftlern meist als ein durch die Erfahrung gewonnenes und in der Erfahrung begründetes Gesetz.[451]

Ein anderes Beispiel liefert das Prinzip der kleinsten Wirkung: Maupertuis' wichtigste Begründung des Prinzips war ausgesprochen metaphysischer — nämlich teleologischer — Natur.[452] Euler sah in seiner Theorie der Materie eine Möglichkeit, dieses Prinzip metaphysisch abzusichern und unmittelbar mit einer ‚Newtonschen' Axiomatisierung der Mechanik zu verbinden.[453] Während das Prinzip in seiner *mathematischen* Gestalt in der weiteren Entwicklung der rationalen Mechanik konserviert und ausgearbeitet wurde, konnten sich beide metaphysischen Begründungszusammenhänge nicht behaupten: Wer gegen Ende des 18. Jahrhunderts das Prinzip mit der Existenz Gottes und einer allgemeinen Naturökonomie (Maupertuis) oder auch nur mit der Idee einer eindeutigen Bestimmung von Kräften durch Undurchdringlichkeit und Bewegung der Körper (Euler) verband, galt nicht mehr als ernstzunehmender Wissenschaftler. Jacobi findet 1842 Maupertuis' Spekulationen kaum der Erwähnung wert, und gegen Euler bemerkt er, daß das Prinzip „weder eine gesunde, noch überhaupt irgendeine Metaphysik" zeige.[454]

Die Beispiele ließen sich vermehren. Man kann allgemein davon sprechen, daß die Grundlagenentwicklung der Mechanik des 18. Jahrhunderts durch eine Abnahme metaphysischer Diskussionen und Intensivierung der Bemühung um deduktive Organisa-

ständlich die Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit der ungestörten Bewegung behauptet, heißt es u.a.: „Es ist ferner kein Grund vorhanden, warum der Körper nach der einen oder anderen Seite abweichen sollte" (ebd., S. 22 bzw. S. 4f.). In der Vorrede des *Traité de dynamique* erklärt er apodiktisch: „Die Bewegung ist [...] ihrer Natur nach gleichförmig" (ebd., S. 9 bzw. S. ix), zeigt sich aber zugleich besorgt über die vorhandenen ‚Beweise' dieser Aussage.

[450] Für Belege s. Pulte 1994, S. 509, Anm. 53.

[451] Manche Autoren schrecken dabei auch vor vulgärempiristischen ‚Begründungen' nicht zurück. So belegt Georg Friedrich Parrot in seiner *Übersicht des Systems einer theoretischen Physik* die Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit der Trägheitsbewegung an verschiedenen Beobachtungen und Experimenten (Parrot 1809/11 I, S. 28f.). Zum Fall der Ruhe bemerkt er: „Die Beharrlichkeit in der Ruhe bedarf keines besondern Beweises. Nur durch sie stehen alle unsere Gebäude, die Felsen und Berge" (ebd., S. 28).

[452] Ich gehe in Kap. V, Teil 2.2, unter den Punkten ‚nomothetisches Argument' und ‚Argument der Naturökonomie' näher auf diese Begründungen ein. Als ‚wichtigste' Begründung bezeichne ich hier die teleologische deshalb, weil das (dort ausgeführte) ‚architektonische' und das (ebenfalls dort zu findende) ‚kausalitätskritische Argument' zur Sicherheit und Evidenz des Prinzips nicht unmittelbar beitragen.

[453] Vgl. Pulte 1989, Teil B.II.3, insbes. S. 176.

[454] Jacobi 1884, S. 43.

tion, formale Vervollkommnung und Lösung empirischer ‚Restprobleme' gekennzeichnet ist: Während in der ersten Jahrhunderthälfte Kontroversen über das ‚Wesen' von Raum und Zeit, über den Ursprung der Gravitation und die Existenz von Erhaltungsentitäten breiten Raum einnehmen, ist die zweite Jahrhunderthälfte durch insgesamt eher technische Diskussionen über den Variationskalkül, die Potentialtheorie, die Theorie gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen der Mechanik sowie die Störungstheorie gekennzeichnet.

Dies alles zeigt eine ‚Positivierung' und ‚Entmetaphysierung' im Sinne der eingangs erläuterten ‚Kriterien-Tendenzen' zur Auflösung klassischer Wissenschaft an[455], bedeutet aber noch *nicht* die Auflösung des klassischen Wissenschaftsverständnisses der rationalen Mechanik. Die oft wenig reflektierte Berufung auf Erfahrung und Induktion hatte *nicht* das kritische Potential, die Sicherheit der mechanischen Prinzipien als Fundament einer universellen Naturbeschreibung und -erklärung in Zweifel zu ziehen, sondern sah gerade in einer metaphysikfreien mathematischen Darstellung von Erfahrung das Ideal mathematischer Naturerfassung nach dem Vorbild der Geometrie realisiert. Joseph B. Fourier etwa, einer der Wegbereiter des Comteschen Positivismus, beteiligt sich gegen Ende des Jahrhunderts an der euklidianistischen Sicherung der Lagrangeschen Mechanik mit einem ‚Beweis' des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten. Ihm voran stellt er das nicht gerade positivistisch anmutende, sondern offenkundig pseudo-aristotelische Motto: „Geometriae est probare"[456].

Begründungsversuche wie Fouriers ‚Demonstration' gehören zum Typus *(E2)*: Sie berufen sich nicht auf allgemeine metaphysische Prinzipien, sondern auf innerwissenschaftliche Sätze, die als sicher und evident gelten (hier: das Hebelprinzip), und versuchen, diese Eigenschaften auf das zu beweisende Prinzip (hier: das der virtuellen Geschwindigkeiten) zu übertragen.[457] Andere Begründungsversuche dieses Prinzips, an denen es nicht gefehlt hat[458], aber auch d'Alemberts Begründung seines Prinzips[459] sind von gleicher Art. Der *allgemeine* Zug, der hier zum Ausdruck kommt, ist der ‚Anschluß' der Mechanik als Bewegungslehre[460] an die *Statik*: D'Alembert, Fourier, Poin-

[455] Vgl. Kap. II, Teil 1.1.

[456] Fourier 1798, S. 20. Fourier schreibt dieses Motto noch Aristoteles zu, bei dem es jedoch nicht nachweisbar ist. Auf die Beweise zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten komme ich in Kap. VI, Teil 5 zurück.

[457] Zu den Einzelheiten des Fourierschen Beweises s. Benvenuto 1991 I, S. 101-105.

[458] Vgl. ebd., S. 95-142 und Grattan-Guinness 1990 I, S. 302-312 sowie Lindt 1904; vgl. auch Kap. VI, Teil 5.

[459] S. hierzu Hankins 1970, S. 190-194 und Fraser 1985.

[460] In dieser engeren Bedeutung wird ‚Mechanik' im 18. Jahrhundert auch vorwiegend gebraucht und von ‚Statik' abgegrenzt. So schreibt Euler in der Vorrede seiner *Mechanica* (1736): „Das Wort Mechanik hatte lange Zeit hindurch und hat auch noch jetzt eine doppelte Bedeutung, indem dadurch zwei Wissenschaften bezeichnet werden [...]. Der Name Mechanik wird nämlich einmal derjenigen Wissenschaft beigelegt, welche vom Gleichgewicht der Kräfte handelt und

sot und andere suchen mit Hilfe des Begriffs des ‚Moments' bzw. der virtuellen Arbeit oder Verrückung die Bewegungsgesetze als ‚natürliche' Erweiterungen von Gesetzen der Ruhe auszugeben oder auf diese zu ‚reduzieren' (wie es oft heißt). Noch Lagranges *Méchanique Analitique* weist, wie wir sehen werden, dieses Bemühen auf, und auch Mathematiker wie Maupertuis oder Euler, die nicht explizit beanspruchen, dynamische auf statische Gesetze zu ‚reduzieren', versuchen, den engen inhaltlichen und formalen Zusammenhang[461] und die ‚Harmonie'[462] zwischen statischen und dynamischen Prinzipien herauszustellen. Das zugrundeliegende Motiv scheint dabei durchgehend zu sein, auf die Prinzipien der Bewegungslehre die Evidenz und Sicherheit zu übertragen, die denen der Statik, z.T. seit Archimedes Zeiten, zuerkannt wurden. Die Statik galt eben traditionell als eine Wissenschaft, die der ‚Geometrie wie der Naturphilosophie untergeordnet ist', wie es in einem Kommentar zu Jordanus de Nemores *Elementa* heißt[463], und daher Teil hat an der Evidenz und Sicherheit der Geometrie — ein Vorzug, von dem auch die Bewegungslehre profitieren sollte.

Diese Begründungspraxis erscheint insofern zirkulär, als *nach* ‚Beweis' des allgemeinen Bewegungsprinzips die Gesetze der Statik oft wiederum als Spezialfall subsumiert wurden — es war ja *eine* übergreifende Axiomatisierung intendiert, möglichst sogar *ein* Axiom für den *gesamten* Korpus des Wissens der rationalen Mechanik. Es wäre jedoch wissenschaftstheoriegeschichtlich naiv, dies als Vorwurf an die — in aller Regel logisch äußerst versierten — Protagonisten zu richten: Worum es hier tatsächlich

dieselben mit einander vergleicht; ferner aber auch derjenigen Wissenschaft, in welcher die Natur, Erzeugung und Aenderung der Bewegung auseinander gesetzt wird. [...] Um daher jede Zweideutigkeit zu vermeiden, wird es zweckmässig sein, jene Wissenschaft, welche vom Gleichgewicht handelt, Statik [staticam] zu nennen; für die andre Wissenschaft, worin von der Bewegung die Rede ist, aber allein den Namen Mechanik vorzubehalten" (Euler 1848/50 I, S. v bzw. 1736 I, S. 7).

[461] Vgl. die Bezugnahmen in Maupertuis 1744 und 1746 (beides Arbeiten zum Prinzip der kleinsten Wirkung) zum ‚Loi du repos' (Maupertuis 1740).

[462] Vgl. bereits den Titel von Euler 1751a: „Harmonie entre les principes générales de repos et de mouvement de M. de Maupertuis„; hierzu auch Pulte 1989, S. 185-192.

[463] „Cum scientia de ponderibus sit subalternata tam geometriae quam philosophiae naturalit [...]"; zit. nach Benvenuto 1991 I, S. 14. Benvenutos These, daß diese in der frühen Neuzeit auch von Autoren wie Biagio Pelacini, Nicola Tartaglia und anderen Wissenschaftlern vertretene Auffassung durch das ganze 18. Jahrhundert hindurch wirkte, ist uneingeschränkt zuzustimmen. Fouriers Motto-Wahl (s.o.) ist demnach so zu verstehen, daß die in der Statik niedergelegte, quasi-geometrische Erfahrung benutzt wird, um auf geometrischem Wege ein Prinzip der mathematischen Naturphilosophie zu beweisen. D'Alemberts Einschätzung des Beweises seines eigenen Prinzips ist entsprechend und wird von späteren Mathematikern geteilt. Montucla lobt ihn in seiner *Histoire des mathématiques* für die benutzte „geometrische Methode" und hat keinen Zweifel daran, daß dessen mechanische Prinzipien „eine ebenso strenge Notwendigkeit besitzen wie die ersten grundlegenden Wahrheiten der Geometrie" (Montucla 1799-1802 III, S. 628).

geht, ist nicht logische Ableitung in einem strikten Sinne, sondern die Vermittlung von Evidenz und Sicherheit in einem weiteren Sinn: Die Notwendigkeit der deduktiven Organisation einer wachsenden Zahl mechanischer Sätze erfordert formale und abstrakte Prinzipien mit großer deduktiver Kraft, die schwerlich noch durch schrittweise Induktion *(E1)* oder metaphysische Argumente *(M)* begründet[464] werden, also auf diesen Wegen nicht mehr als evidente und sichere Anfänge der Mechanik eingesehen werden können. Während so *(E1)* und *(M)* zunehmend problematisch erscheinen, wird *(E2)* zum bevorzugten Typus der Begründung; man könnte ihn als den ‚bevorzugten wissenschaftsimmanenten Typus' bezeichnen.[465] Bei dieser zunehmenden Rekurrenz auf die gesichert erscheinenden Sätze der eigenen Wissenschaft handelt es sich um die begründungstheoretische Seite der Medaille, die im Kontext der deduktiven Organisation als ‚Schwerpunktverlagerung nach unten' diskutiert wurde.

IV.2.7 Begründungen des zweiten Bewegungsgesetzes

Es ist aufschlußreich, ein anderes *(E2)*-Beispiel, nämlich Begründungsversuche von ‚Newtons' zweitem Gesetz, zu verfolgen. Dieses Beispiel zeigt nicht nur, daß die Praktiker der rationalen Mechanik die oben festgestellte Begründungslücke ‚philosophischer' Newton-Rezeptoren und -Kritiker bemerkten, sondern auch, daß nicht nur altbekannte Prinzipien der Statik, sondern ebenso neue Gesetze der Bewegungslehre zu Begründungsinstanzen werden konnten:

Wie bereits bemerkt[466], bietet Newtons zweites Bewegungsgesetz in seiner *modernen* Form eine Schwierigkeit in der Anwendung auf Stoßprozesse: Beim Stoß vollkommen harter Körper würden endliche Bewegungsänderungen in unendlich kleiner

[464] Eine Sonderstellung nimmt hier das Prinzip der kleinsten Wirkung insofern ein, als es in seiner allgemeinen mathematischen Formulierung (durch Euler und später durch Lagrange) zwar die abstrakte Gestalt eines *integralen Variationsprinzips* aufweist, aber in der (verkürzten) Interpretation als *Minimumprinzip* auch noch metaphysische, nämlich teleologische und naturökonomische, Interpretationen zuzulassen scheint. Dies ist bei d'Alemberts Prinzip und dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten nicht mehr der Fall.

[465] Und zwar, allgemein und vage gesprochen, für formale und abstrakte Prinzipien (der virtuellen Geschwindigkeit, d'Alemberts Prinzip, aber auch Newtons zweites Gesetz in analytischer Formulierung, s.u.). Für relativ anschauliche Gesetze wie Newtons erstes und drittes Axiom bleibt dagegen die induktive Variante *(E1)* möglich. Der Typus *(E1)* ist ebenfalls ‚immanent' zu nennen, sofern er sich auf Beobachtungen, die dem Gegenstandsbereich der rationalen Mechanik *angehören*, berufen zu können glaubt: Sowohl *(E1)* als auch *(E2)* gehören zur ‚Baconschen Variante' der KMN; vgl. Kap. II, Teil 1.3.

[466] Vgl. Kap. III, Teil 2.1.

:eit auftreten, was die Existenz unendlich großer bewegungsändernder Kräfte impli-
ierte.[467]

Die Doktrin harter Körper, an die Newton glaubte, hätte so nur um den Preis der ufgabe des Ideals einer umfassenden Axiomatisierung aufrechterhalten werden kön-
ıen. Da für Newton dieses euklidianistische Ideal nicht zur Disposition stand, war er ezwungen, das zweite Bewegungsgesetz als

$$F \sim (mv) \quad \text{und nicht als} \quad F \sim m\frac{dv}{dt} \quad \text{bzw.} \quad F \sim ma$$

zu formulieren.

Jakob Hermann — bezeichnenderweise ein Leibnizianer — scheint 1716 der erste gewesen zu sein, der ‚Newtons' zweites Axiom in der zweiten, modernen Form aufstellte.[468] Daniel Bernoulli führt diese Form zehn Jahre später weder auf Newton noch auf Hermann, sondern auf Galilei zurück[469] und bemerkt, das Gesetz sei nur „kontingent wahr"[470]. Statt der Beziehung[471]

$$dv = p\,dt$$

zu folgen, könnte es die Natur vorgezogen haben, den Zuwachs der Geschwindigkeit dv nicht proportional dem Zeitelement dt der einwirkenden Kraft p zu regeln, sondern proportional zu *irgendeiner* Funktion dieser Kraft, etwa[472]

$$dv = p^2dt \quad \text{oder} \quad dv = p^3dt,$$

woraus ganz verschiedene Bewegungsgesetze resultieren würden. Bernoullis Argumentation dient dazu, die Überlegenheit eines ‚notwendigen' Gesetzes der Statik (wie der

[467] Es ist interessanterweise das *Leibnizsche* Programm, das mit dieser modernen Form verträglich ist und zu ihrer Durchsetzung beigetragen hat: Leibniz' Kontinuitätsauffassung verbietet abrupte Bewegungsänderungen und daher die Existenz vollkommen harter Körper. In *seinem* Programm sind daher alle Bewegungsänderungen mit *endlichen* ‚Newtonschen' Kräften ($F = ma$) erklärbar; s. hierzu näher Hankins 1967. Eulers rationale Mechanik (vgl. Teil 3.2) liefert das beste Beispiel für diese Synthese.

[468] Hermann 1716, S. 3; vgl. Hankins 1967 und 1970, S. 178. Daß Hermann unter Leibnizschem Einfluß stand, erleichterte aufgrund des Leibnizschen Kontinuitätsprinzip die Formulierung der ‚modernen' Form des Gesetzes; vgl. Anm. 592.

[469] Bernoulli 1726, S. 199; zu Bernoullis ‚axiomatischem Stil', der in diesem Werk zum Ausdruck kommt, vgl. auch Dhombres 1986a.

[470] Bernoulli 1726, S. 199.

[471] Ebd., S. 199. Hier steht p („pressione") und nicht F für die einwirkende Kraft.

[472] Ebd., S. 199. Bernoulli schreibt $dv = pp\,dt$ etc.

Parallelogrammregel der Kräfte), das „geometrisch streng beweisbar“[473] sei, gegenüber den ‚kontingenten‘ Gesetzen der Mechanik (wie dem zweiten Bewegungsgesetz) aufzuzeigen.

Euler, der in seiner Mechanica (1736) den Anspruch erhebt, die „wahren Principien der Mechanik, aus denen man alles abzuleiten hat, was die Aenderung der Bewegung betrifft“, so zu beweisen, daß man sie „nicht nur als gewiss [certa], sondern als nothwendig wahr erkennen [necessaria vera esse intelligantur]“ werde[474], mußte an Bernoullis Unterscheidung und namentlich an dessen These vom kontingenten Charakter des zweiten Gesetzes Anstoß nehmen: „Es ist klar, dass dieser Lehrsatz nicht nur wahr ist, sondern auch nothwendig wahr sein muss, so dass ein Widerspruch entstehen würde, wenn man $dc = p^2\,dt$ oder irgendeine andern Potenz von p in dt multiplicirt gleichsetzen wollte. Da Daniel Bernoulli [...] alle diese als gleich wahrscheinlich angenommen hat, war ich um die strengen Beweise dieser Sätze sehr besorgt“.[475]

Der so annoncierte Beweis[476] ist allerdings von heutiger Warte weder ‚streng‘ zu nennen, noch zeigt er explizit einen Widerspruch alternativer Formulierungen des zweiten Gesetzes auf. Bei näherer Betrachtung reduziert er sich vielmehr auf einen Appell an die *mathematische Intuition*, daß nämlich eine konstante bewegende Kraft p während einer unendlich kleinen Zeit dt, die sie auf einen Körper wirkt, in diesem eine Geschwindigkeitsänderundung dv herruft, die zu dt *proportional* ist ($dv \sim dt$) und diese andererseits bei konstanter Einwirkungszeit dt der Größe der einwirkenden Kraft *proportional* ist ($dv \sim p$), also bei veränderlichen Kräften und Zeiten auch die behauptete Proportionalität ($dv \sim pdt$) bestehe. Diese Proportionalität erscheint *mathematisch* unmittelbar einleuchtend und darum das zweite Gesetz als ‚notwendig‘ — ein typisches Beispiel dafür, wie die Mathematik in der KMN Evidenz und Notwendigkeit der Prinzipien *erzeugt*.[477]

Aber auch Euler war später offenbar nicht mehr völlig von der Beweiskraft seiner Argumentation überzeugt: In einem Brief an Maupertuis diskutiert er die Frage, ob es möglich sei, „de prouver la verité des princips de méchanique par celle des loix de collision en les supposant constatées par l'expérience“[478]. Obwohl er, wie wir sehen werden, den Erhaltungsgesetzen der Mechanik keine tiefere Bedeutung beimißt, benutzt er sie hier als durch die *Erfahrung* bestätigte Gesetze, um zu zeigen, daß die wechselseitigen Wirkungen der beiden Körper im Stoß keiner anderen Beziehung zwischen Geschwindigkeitsänderung und Kraft folgen können als dem zweiten Gesetz,

[473] Einen solchen Beweis bezweckt Bernoulli mit seiner Untersuchung gerade. Vgl. hierzu auch Benvenuto 1991 I, S. 118-121.

[474] Euler 1848/50 I, S. 6 bzw. 1736 I, S. 10.

[475] Ebd., S. 49 bzw. S. 56 (§152). Euler schreibt für die Geschwindigkeit c statt v.

[476] Ebd., S. 49 bzw. S. 55 (§150, ‚Demonstratio‘).

[477] Vgl. hierzu die Ausführungen zu den ‚Funktionen der Mathematik‘ in Kap. II, Teil 2.1.

[478] Brief an Maupertuis vom 26. Juli 1747 (*Opera omnia* A VI, S. 77).

weil sonst eben diese Erhaltungsgesetze nicht ‚erhalten' würden. Der Struktur nach ein *indirekter* Beweis, gehört er doch zum Typus *(E2)*: Die durch die *Erfahrung* bestätigten Gesetze stellen die Konklusion dar, der die Prämisse angepaßt werden muß, um den Schluß als wahr anzusehen. Hier ist nun der *Widerspruch* offenkundig, von dem schon in der *Mechanica* die Rede war: Andere Formulierungen des zweiten Gesetzes widersprechen akzeptierten Gesetzen der Mechanik, auf die zu verzichten man nicht bereit ist. Euler sieht natürlich, daß sein indirekter ‚Beweis' dem zweiten Gesetz nicht die Notwendigkeit verleihen kann, die er ihm verleihen möchte: Der Anspruch, „que cette verité est aussi nécessaire que celles de la géometrie"[479] wird weiterhin auf den früheren ‚Beweis' der *Mechanica* gegründet und auch später nicht zur Disposition gestellt.[480] Es wird aber deutlich, daß zur ‚Notwendigkeitssicherung' durch mathematische Intuition eine Sicherung in *niederstufigeren* mechanischen Sätzen hinzutritt. Ich interpretiere dies als einen weiteren Beleg für die Schwerpunktverlagerung nach unten, wie sie für die entwickelte klassische Wissenschaft behauptet wurde. Die weitere Analyse der Begründungsversuche des zweiten Gesetzes — über Lagrange und damit über die hier beabsichtigte Entwicklungsskizze hinaus — würde zeigen, daß sich diese ‚Abwärtsbewegung' fortsetzt.[481] Die begründungstheoretische Entwicklung dieses Gesetzes läuft

[479] Ebd., S. 79. Euler meint, sich hier wiederum gegen Leibniz und Wolff richten zu müssen.

[480] Vgl. insbes. Eulers *Theoria motus* (1765). Euler spricht hier davon, daß alle mit dem zweiten Gesetz konkurrierenden Formeln „offenbare Widersprüche enthalten" würden: „Man darf demnach auf keine Weise daran zweifeln, dass dieses Princip zu den nothwendigen Wahrheiten gezählt werden müsse" (Euler 1853, S. 80 bzw. 1765, S. 82, §177).

[481] Gegen Ende des Jahrhunderts setzt sich Laplace im ersten Buch seiner großen *Mécanique céleste* zweimal mit der Frage auseinander, ob einwirkende Kraft und Geschwindigkeitsänderung tatsächlich dem zweiten Gesetz folgen (Laplace 1799-1825 I, S. 17-20 und S. 74-79, vgl. auch *Œuvres* VI, S. 155-161; eine gute Zusammenfassung gibt Dugas 1955, S. 354-356 und S. 357-359). Ohne hier auf die Einzelheiten näher eingehen zu können, kann zu diesen beiden Versuchen folgendes gesagt werden: Wie Euler sieht auch Laplace das Problem, die gewünschte Abhängigkeit nachzuweisen: „[...] la force est proportionnelle à la vitesse. C'est ce que nous ne pouvons pas savoir *a priori*, vu notre ignorance sur la nature de la force motrice; il faut donc encore, sur cet objet, recourir à l'expérience; car tout ce qui n'est pas une suite nécessaire du peu de données que nous avons sur la nature des choses n'est pour nous qu'un résultat de l'observation" (ebd., S. 17). Zunächst argumentiert Laplace, ebenfalls in Form eines indirekten ‚Beweises', daß eine andere Abhängigkeit von Kraft und Geschwindigkeit als die vom zweiten Gesetz ausgesagte zu beobachtbaren Phänomenen der *Erdbewegung* in Widerspruch stünde (ebd., S. 20). Die falsche Konklusion ist also, anders als bei Euler, kein allgemeines Gesetz, sondern eine *Einzeltatsache*; daher spreche ich von einer *weiteren* Schwerpunktverlagerung nach unten.

Die zweite Diskussion *scheint* zunächst mit der ersten in Widerspruch zu stehen. Hier zeigt Laplace, bereits ausgestattet mit dem formalen Apparat von Lagranges *Méchanique Analitique*, daß auch für den Fall, daß die Kraft eine allgemeine Funktion der Geschwindigkeit sei, mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten die Erhaltung der *vis viva* und der Schwerpunkt-

offenbar parallel zu der der analytischen Prinzipien: Mit der Zunahme formaler Darstellungmöglichkeiten mechanischer Prinzipien werden mathematische ‚Evidenzen' (wie die direkte Proportionalität) fragwürdiger. Weder die Berufung auf schrittweise Induktion noch auf metaphysische Prinzipien können diesen Evidenzverlust auffangen, sondern nur Erfahrung, die bereits gesetzlich verfaßt ist *(E2)*. Es ist zunehmend das ganze *System* mechanischen Wissens, das zählt.

IV.2.8 Mach, Truesdell und die Entwicklung des 18. Jahrhunderts

Zum Schluß dieses allgemeineren Teils will ich meine Interpretation der Grundlagenentwicklung der rationalen Mechanik kurz zu derjenigen Machs und Truesdells in Kontrast setzen: Ernst Mach sieht das 18. Jahrhundert im wesentlichen durch eine formale Ausarbeitung der Newtonschen Mechanik gekennzeichnet, die zwar an sich wichtig ist, aber nicht oder nur wenig zum tatsächlichen Naturverständnis beiträgt.[482] Seinem Phänomenalismus erscheint die ganze Orientierung der zeitgenössischen ‚Geometer' hin auf strenge Begründung und deduktive Ordnung verfehlt: „Man kann nicht

bewegung sowie Flächen (d.h. der allgemeine Drehimpulserhaltungssatz) und sogar das Prinzip der kleinsten Wirkung in verallgemeinerter Form *gültig* bleiben. Andere ‚zweite Gesetze' würden also sehr wohl ein kohärentes System der Mechanik ergeben. Laplace versteht diese Untersuchung jedoch als eine bloße deduktive Übung ohne Anspruch auf Realitätsbeschreibung oder Erklärung — „a purely mathematical generalisation", wie Dugas (1955, S. 357) richtig bemerkt. Diese *zweite* Diskussion weist darauf hin, daß gegen Ende des Jahrhunderts die ‚semantische Entladung' (s.o.) der Mathematik bereits weit fortgeschritten ist.

Es bleibt jedoch festzustellen, daß Begründungen von der Art, wie sie Laplace in seiner *ersten* Diskussion gibt, noch kein hypothetisch-deduktives Denken auf ‚axiomatischer Ebene' der Mechanik bedeuten: Die Übereinstimmung von deduktiven Folgerungen, die aus den allgemeinsten Prinzipien gezogen werden, mit Beobachtungen *bewährt* diese Prinzipien nicht, sondern ist eher als ein Zeichen ihrer unbestreitbaren, aber empirisch nur unzureichend darlegbaren Wahrheit zu verstehen. So dürfte wohl auch Laplaces zusammenfassende Bemerkung zu den beiden ersten Bewegungsgesetzen am Ende der ersten Diskussion zu verstehen sein: „Voila donc deux lois du mouvement: savoir, la loi d'inertie et celle de la force proportionelle à la vitesse, qui sont données par l'observation. Elles sont les plus naturelles et les plus simples que l'on puisse imaginer, et sans doute elles dérivent de la nature même de la matière; mais, cette nature étant inconnue, elles ne sont pour nous que des faits observés, les seuls, au reste, que la Mécanique emprunte de l'expérience" (Laplace 1799-1825 I, S. 20).

[482] „Die Aufgabe der ältern, in einem Gebiet grundlegenden Forscher ist eine ganz andere als die der spätern. Die erstern haben nur die wichtigsten Tatsachen aufzusuchen und zu konstatieren [...]. Sind einmal die wichtigsten Tatsachen gegeben, dann kann man dieselben in der mathematischen Physik deduktiv und logisch verwerten, kann das Gebiet ordnen [...]. Die eine Aufgabe ist so wichtig wie die andere. Man darf aber beide nicht miteinander vermengen" (Mach 1933, S. 68).

mathematisch beweisen, daß die Natur so sein müsse, wie sie ist".[483] Mach spricht daher kritisch von einer verbreiteten „Sucht zu beweisen", die „zu einer *falschen* und *verkehrten Strenge*" führe.[484]

Clifford Truesdell sieht im Unterschied zu Mach das 18. Jahrhundert durch eine fruchtbare inhaltliche Weiterentwicklung älterer, v.a. kontinentaler Ansätze gekennzeichnet und belegt diese Sicht eindrucksvoll. Er teilt jedoch Machs kritische Sicht auf die Begründungspraxis der rationalen Mechanik. Zu den zahlreichen, *logisch* oft durchaus zirkelhaft zu nennenden ‚Beweisen' mechanischer Gesetze bemerkt er: „In those times it was not always clearly realized that *something* must be assumed [...] — in geometry, too, just as much as in mechanics".[485] Beiden ist in der Beschreibung und teilweise auch in der Kritik recht zu geben, aber beide sehen — wenngleich aus unterschiedlichen Perspektiven — an den *Gründen* der konstatierten ‚Beweissucht' vorbei: Mach projiziert *sein* Verständnis der Mechanik als einer physikalischen Experimentaldisziplin in die Geschichte hinein und verkennt dabei, daß sie als mathematische Disziplin den Forderungen der *Mathematik* nach strenger Begründung und deduktiver Ordnung folgt. Nach seiner Diagnose ist die ‚Beweissucht' der Mechanik sozusagen erzeugt durch das schädliche ‚Opium traditioneller Metaphysik'; sie ist zu eliminieren und wurde nach seiner Auffassung in der späteren Entwicklung der rationalen Mechanik durch Lagrange auch tatsächlich eliminiert.[486] Deren Formalisierung wird fehlrekonstruiert als *positivistische* Befreiungstat.

Truesdell auf der anderen Seite sieht vorwiegend den mathematischen Charakter der rationalen Mechanik und führt die ‚Beweissucht' der Mechaniker *allein* hierauf zurück. So erkennt er zwar, daß die Mechanik der allgemeinen Praxis der zeitgenössischen Mathematik durchaus folgt, aber er verkennt nicht nur, daß in einer Zeit der Koexistenz rivalisierender mechanischer Programme die Ableitung (‚Erklärung') der Sätze eines anderen Programms eminent philosophische Bedeutung hatte und auch philosophisch motiviert sein konnte, sondern auch, welche *Erkenntnishindernisse* bei der Begründung und Integration der jeweiligen Resultate zu überwinden waren und wie sich diese Integration eigentlich vollzieht. Er übersieht schließlich, was die weitere Untersuchung deutlich machen soll, auch den eigentlichen historischen Grund für den — von ihm gelegentlich beklagten — ‚bloß formellen' Charakter der Mechanikentwicklung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Diese Entwicklung ist aber weder Ausdruck einer

[483] Ebd., S. 68.

[484] „Solche Beispiele falscher Strenge finden sich fast in jedem Lehrbuch" (ebd., S. 72). Machs Kritik ist allgemein gemeint, stützt sich aber besonders auf Daniel Bernoullis Ableitung der Parallelogrammregel der Kräfte. S. zu diesem „geometrischen Beweis" ebd., S. 39-44, insbes. das Resümée S. 44: „An Bernoullis Ableitung setzen wir demnach aus, daß das leichter Beobachtbare auf das schwer Beobachtbare zurückgeführt wird".

[485] Truesdell 1960b, S. 10.

[486] Vgl. Mach 1933, insbes. S. 421f. und S. 429-457.

begrüßenswerten ‚positivistischen Läuterung' (Mach) noch einer bedauerlichen ‚konzeptuellen Armut' (Truesdell), sondern sie ist am besten zu verstehen als eine ‚Fortsetzung des mechanischen Euklidianismus mit anderen Mitteln'. Ihr sind die folgenden Punkte gewidmet.

IV.3 Zwischen Mathematik und Metaphysik: Eulers rationale Mechanik

Euler nimmt unter den zahlreichen ‚Geometern' des 18. Jahrhunderts, die die Entwicklung der rationalen Mechanik vorangebracht haben, eine Ausnahmestellung ein; kein anderer Forscher der Zeit hat einen auch nur annähernd gleichen Einfluß auf ihre Ausgestaltung genommen.[487] Auf ihn geht die erste allgemeine Formulierung des Prinzips der kleinsten Wirkung (1744), des zweiten ‚Newtonschen' Bewegungsgesetzes (1750), des Drehimpulserhaltungssatzes (1755), der Bewegungsgleichungen einer ‚idealen' Flüssigkeit (1755), der Bewegungsgleichungen eines starren, rotierenden Körpers (1760) und anderer Gesetze, die heute zum Standardrepertoire eines Lehrwerkes der klassischen Mechanik gehören, zurück. Das Werk keines anderen Mathematikers widerlegt die ‚Mach-Kuhnsche' These vom normalwissenschaftlichen Charakter der nachnewtonschen Mechanik so eindrucksvoll wie das Eulers.

Der zweite und wichtigere Grund, warum ich hier auf einige Aspekte gerade *seines* Denkens eingehe, um die bisher nur allgemein dargelegte Entwicklung zwischen Newton und Lagrange zu beleuchten, ist der ‚repräsentative' Charakter seines Werkes. Ernst Cassirer etwa bemerkt: „Die beiden Bestrebungen, die im Titel des Newtonischen Hauptwerks nebeneinander stehen, finden in *Euler* ihre typische Verkörperung: er ist der eigentliche und klassische Zeuge des Geistes der *mathematischen Naturphilosophie*".[488] Weder soll diese These, noch sollen Eulers verschiedene Beiträge zur Grund-

[487] Bereits der Enneström-Index der Eulerschen Werke von 1910 umfaßte 866 Arbeiten Eulers, darunter eine Reihe umfangreicher Lehrwerke. Clifford Truesdell schätzt, daß es sich dabei um etwa ein Drittel der im Zeitraum von 1725 bis 1780 *überhaupt* veröffentlichten Arbeiten zur Mathematik und mathematischen Physik handelt (Truesdell 1972, S. 53); mehr als Dreiviertel der Eulerschen Forschungen betreffe die Mechanik direkt (Truesdell 1957, S. 254; vgl. auch Truesdell 1982).

[488] Cassirer *Erkenntnisproblem* II, S. 472. Weiter heißt es: „Das Wort eines neueren Geschichtsschreibers der Mathematik, daß das ‚wissenschaftliche Bewußtsein in der Mitte des 18. Jahrhunderts am vollständigsten durch Euler vertreten wird', gilt mehr noch als für den Inhalt der sachlichen Probleme, die sich bei ihm finden, für die methodische Art ihrer Auffassung und Bearbeitung". Während das zitierte Urteil des ‚neueren Geschichtsschreibers der Mathematik' nicht belegt werden konnte, heißt es bei dem Mathematikhistoriker und Euler-Biographen Otto Spiess ganz ähnlich, Euler sei „der universellste Mathematiker der Epoche, der eigentliche Repräentant des auf mathematisch-mechanische Naturerklärung gerichteten Geistes seiner Zeit.

legung der klassischen Mechanik hier im einzelnen ausgeführt werden. Die folgenden Bemerkungen dienen vielmehr allein dazu, die im letzten Teil vorgestellten Thesen am Beispiel zu illustrieren. Es geht also darum zu verdeutlichen, wie es zu einer Integration von Leistungen der verschiedenen Programme kommen konnte und wie sich die hieraus resultierende Spannung von axiomatisch-deduktiver Organisation und naturgesetzlichem Gehalt der Mechanik konkret manifestiert.

IV.3.1 AFE-Charakter der Eulerschen Mechanik und Probleme ihrer Axiomatisierung

Eulers Programm einer rationalen Mechanik erweist sich bei näherer Analyse als striktes AFE-Projekt im Sinne der eingangs vorgenommenen Bestimmung der KMN:[489] Es ist *axiomatisch*, weil es die Existenz von begründbaren Prinzipien behauptet, die das Gesamt mechanischen Wissens beinhalten[490], *fundamentalistisch*, weil es diese Prinzipien als „Wahrheiten jenseits allen Zweifels" oder „unbestreitbare Wahrheiten"[491] ausweist, und *essentialistisch*, weil diese Prinzipien die ‚Wesenseigenschaften' der Körperwelt repräsentieren und sogar mit Notwendigkeit aus ihnen folgen sollen.[492]

Eulers Essentialismus wurde bereits an anderer Stelle[493] als ein im wesentlichen *Cartesianischer* rekonstruiert: Er geht aus von Descartes' Unterscheidung von aktiver *res cogitans* und passiver *res extensa* und sieht in der Ausdehnung, der Trägheit (als Ausdruck der Passivität der Körper) und (ab 1750) der Undurchdringlichkeit solche Wesenseigenschaften, aus denen *alle* Naturphänomene erklärt werden müssen. Dies bedeutet insbesondere, daß es keine Fernwirkungskräfte geben kann, sondern alle Phänomene auf Druck- und Stoßprozesse zurückgeführt werden müssen. Es kann aber auch keine ‚energieartigen' und *in* den Körpern lokalisierten Entitäten geben, auf deren Erhaltung die (allein wirklichen) Nahwirkungsprozesse zurückgeführt werden könnten: Eulers Essentialismus impliziert eine Ablehnung *aller Arten* innerer aktiver Kräfte, denn diese stünden im Widerspruch zum passiven ‚Wesen' der Körperwelt. Euler lehnt

Wer sein Lebenswerk schildern wollte, hätte die Geschichte der mathematischen Wissenschaften im achtzehnten Jahrhundert zu erhellen „ (Spiess 1929, S. 29).

[489] Vgl. Kap. II, Teil 2.2.

[490] Vgl. etwa Teil 2.4, Anm. und Zit. 412.

[491] Vgl. etwa Euler 1748b, S. 376 (§1).

[492] Dieser Essentialismus ist in allen Schriften Eulers zu den Grundlagen der Mechanik und Physik mit Händen zu greifen. Im Fragment *Anleitung der Naturlehre*, das aus verschiedenen Gründen etwa auf das Jahr 1755 datiert werden kann (vgl. Pulte 1989, S. 164) und das nach Hermann Weyl „in großartiger Klarheit die Grundlagen der Naturphilosophie seiner Zeit zusammenfaßt" (Weyl 1982, S. 61), findet er seinen stärksten programmatischen Ausdruck. Vgl. Euler 1755, S. 16-19 und S. 51.

[493] Vgl. zum folgenden Pulte 1989, Teil B.

deshalb Newtonsche Kräfte (wie die Gravitation) und dessen ‚aktive Prinzipien' auf ontologischer Ebene ebenso ab wie die Leibnizsche primitive aktive Kraft und die hieraus resultierende *vis viva*-Erhaltung, sofern diese als *universelles* Naturgesetz begriffen wird. Gegen die „neueren Weltweisen" — eine Bezeichnung, mit der er sich insbesondere auf Leibniz und Wolff bezieht — sieht er es als „sonnenklar dargethan [...], dass dergleichen Kräfte nur in der Einbildung Platz finden, und mit dem Wesen der Körper unmöglich bestehen können"[494].

Eulers rigider, Cartesianisch geprägter Essentialismus steht in einem Spannungsverhältnis zur tatsächlichen Anlage seiner Mechanik, das sich bereits in der sog. ‚ersten Mechanik', der *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* von 1736, manifestiert. Deren mathematischer und begrifflicher Aufbau folgt nämlich im wesentlichen Newtons *Principia* und wird, wie bereits im letzten Teil deutlich wurde, ergänzt um ‚Beweise' des Trägheitsprinzips, des (analytisch formulierten) zweiten Bewegungsgesetzes und des dritten Gesetzes. Auch wenn Euler später mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung einer *alternativen* Axiomatisierung der Mechanik leistet, geht er in seinen *mathematischen* Abhandlungen zur Mechanik in aller Regel von einem Newtonschen Ansatz aus. Er bedient sich insbesondere der Newtonschen Kraftkonzeption und entwickelt im Bereich der Himmelsmechanik die Newtonsche ‚Mechanik der Zentralkräfte' erfolgreich weiter. Auf *dieser* Ebene verhilft er der Newtonschen Mechanik zum Durchbruch und kann mit Recht als ‚Newtonianer' bezeichnet werden — vermutlich als der erfolgreichste des ganzen 18. Jahrhunderts.

Die Diskrepanz zwischen Eulers Essentialismus, der primäre Kräfte ausschließt, und seinem mathematischen Formalismus, der von Newtonschen, direktiven Kräften als Basiskonzept[495] ausgeht, legt zunächst die Vermutung nahe, Euler praktiziere einen *Instrumentalismus*, der mit dem für ihn behaupteten mechanischen Euklidianismus nicht vereinbar wäre: Es scheint nämlich, als bediene er sich des Newtonschen Kraftkonzepts auf axiomatischer Ebene aus rein pragmatischen Gründen (des empirischen Erfolges wegen), ohne es essentialistisch interpretieren zu wollen oder überhaupt so interpretieren zu können (seiner Theorie des Körpers wegen). Diese Vermutung – vom Standpunkt der KMN handelt es sich um einen ‚Verdacht' – wurde tatsächlich vorgebracht und ist insofern verständlich, als sie (er) auf eine fundamentale Spannung zwi-

[494] Euler 1746, S. 357f.

[495] Unter Basiskonzepten verstehe ich solche, die auf der Ebene der Axiome eingeführt werden und — der früheren Bestimmung der KMN zufolge — im fraglichen Programm essentialistisch zu interpretieren sind, d.h. ontologisch relevant sind: Die in den Axiomen ausgesagten Beziehungen zwischen den Basiskonzepten reflektieren die kausalen Beziehungen innerhalb der Natur. Bei Newton ist der Begriff der Kraft — entgegen den gelegentlichen Beteuerungen, daß er von Kräften ‚nur mathematisch' spreche — ein solches Basiskonzept. Euler jedoch darf seiner Materietheorie zufolge einen solchen Status von Kräften nicht akzeptieren.

schen Eulers mathematischer Formulierung der Mechanik und deren metaphysischer Fundierung verweisen kann. Aber sie ist dennoch verfehlt: Was Euler praktiziert, ist kein Instrumentalismus, sondern eine Technik des Erklärungsaufschubes[496]: Bereits in der *Mechanica* fordert er, wenn auch nicht gerade an hervorgehobener Stelle, eine mechanische Erklärung von Kräften selber. Euler hält es bereits hier für ausgemacht, „dass alle Kräfte, welche wir in der Welt wahrnehmen, aus der Bewegung hervorgehen; einem eifrigen Forscher liegt es aber ob, zu bestimmen, aus welcher Bewegung und der Bewegung welcher Körper jede einzelne, in der Welt wahrgenommene, Kraft entstanden sei"[497].

Euler selbst kann als dieser ‚eifrige Forscher' betrachtet werden: Er hat immer wieder Versuche unternommen, nicht nur (vermeintliche) Fernwirkungskräfte durch geeignete Äthertheorien auf Druck und Stoß zurückzuführen, sondern auch, seine Körpertheorie so weiter zu entwickeln, daß die *Entstehung* von Kräften im Stoß zweier Körper möglich wird, ohne damit in Widerspruch zur wesentlichen *Passivität* der Materie zu geraten. Während Newton Bewegungsänderungen auf Kräfte zurückführt, geht es Euler darum, Kräfte aus Bewegungen zu erklären und so eine *mathematische* Newtonsche Mechanik der Kräfte *metaphysisch* durch ‚Materie in Bewegung' zu legitimieren. Seine Lösung sei hier nur kurz angedeutet:

Im Jahre 1750 stellt Euler in seinem Essay *Découverte d'un nouveau principe de mécanique* erstmals das zweite Newtonsche Gesetz in moderner Form vor:[498]

$$I.\,2M\,ddx = P\,dt^2, \quad II.\,2M\,ddy = Q\,dt^2, \quad III.\,2M\,ddz = R\,dt^2. \qquad (1)$$

Wir haben bereits gesehen, daß diese Bewegungsgleichungen für Euler den Status eines (zu diesem Zeitpunkt sogar: des *einzigen*) Axioms der Mechanik hat: Er hält sie für die ‚einheitliche Grundlage' (*l'unique fondament*) der gesamten Mechanik.[499]

[496] Vgl. Pulte 1989, S. 110.

[497] Euler 1848/50 II, S. 15 bzw. 1736 II, S. 14 (§29). Das fragliche Kapitel handelt von nicht freien, d.h. erzwungenen Bewegungen. Solche Bewegungen mögen heute (als Zwangsbewegungen auf vorgegebenen Kurven, Flächen oder Raumausschnitten) nurmehr ‚technisch' interessant erscheinen. Für Euler jedoch sind sie paradigmatisch: In seinem ‚Cartesianischen Universum' unterliegen *alle* Köper *überall* Zwangsbewegungen.

[498] Euler 1750a, S. 90. M ist die Masse des Körpers, der Faktor 2 resultiert aus Eulers Einheitensystem; die Schreibweise der zweiten Ableitungen wurde unverändert übernommen. Es handelt sich um die heute sog. Newtonschen Differentialgleichungen der Bewegung in Cartesischen Koordinaten x, y, z; mit P, Q und R bezeichnet Euler die entsprechenden Komponenten der einwirkenden Kraft.

[499] Vgl. Teil 2.4, Anm. und Zit. 412.

Spätestens mit dieser Formulierung wird für ihn auch eine Klärung des Kraftkonzepts im Sinne seiner Materietheorie unabweisbar: Seine Behauptung, daß es sich bei dem obigen Gesetz um ein ‚notwendiges' handle, wäre im Rahmen seiner wissenschaftlichen Metaphysik von vornherein haltlos, wenn es nicht gelänge, die bewegungsverändernden Kräfte (P, Q, R) ihrerseits durch ‚Materie in Bewegung' *eindeutig zu bestimmen*. Nach verschiedenen Versuchen gibt Euler seine abschließende Antwort auf dieses Problem einen Monat nach der *Découverte* in dem Beitrag *Recherches sur l'origine des forces*. Euler argumentiert hier, daß beim Stoß zweier Körper A und B — dem Vorgang also, auf dem seinem Programm zufolge *alle* Naturerscheinungen beruhen — im Augenblick des Zusammentreffens beider im Körper A eine Kraft erzeugt wird und auf B einwirkt, die so groß ist, daß die Durchdringung von A durch B verhindert wird und umgekehrt. Kräfte *entstehen* momentan in einem Körper A, wirken im Körper B, dessen Stoß zu dieser Entstehung Anlaß gegeben hat, bewirken dort eine Bewegungsänderung gemäß der obigen Bewegungsgleichungen und *vergehen*. Sie sind ontologisch nicht primär, sondern Produkte der Bewegung der Körper und ihrer *Undurchdringlichkeit* (d.h. dem Unvermögen eines Körpers, den Raum eines anderen einzunehmen) als einer „nach Auffassung aller Philosophen ebenso allgemeinen und für alle Körper essentiellen Eigenschaft wie die Ausdehnung oder die Trägheit"[500].

In der Kausalfolge von Bewegung und Undurchdringlichkeit einerseits und Bewegungsänderung andererseits steht die Kraft also *zwischen* Ursache und Bewegung. Es kommt nun darauf an, daß diese Kraft ihrerseits durch die Ursache (Bewegung, Undurchdringlichkeit) eindeutig bestimmt ist. Eine solche Bestimmung kann nicht mathematischer Art sein, da die Undurchdringlichkeit kein quantifizierbares Konzept ist. Insofern muß Euler mit ihrer Einführung als (Teil-)Ursache von Kräften im Jahre 1750 eine wichtige Forderung der KMN, nämlich nur *mathematisch* faßbare Basiskonzepte einzuführen, *nolens volens* ‚aufweichen'.[501] Da die Undurchdringlichkeit an sich „bei gleichen Körpern in der Lage ist, einmal extrem große, ein anderes Mal sehr kleine Kräfte zu liefern, gerade wie es die Umstände erfordern"[502], kann jedoch auf ein *kräftedeterminierendes Prinzip* nicht verzichtet werden. Euler findet es im Prinzip der kleinsten Wirkung: Dieses Prinzip regelt die Erzeugung von Kräften derart, daß stets die *kleinstmögliche* Kraft zur Vermeidung gegenseitiger Durchdringung entsteht.[503] Auf ‚phänomenaler' Ebene manifestiert sich dieses Prinzip in einem kleinsten ‚Aufwand' bzw. der kleinsten *Aktion*[504] $\int mv\,ds$, und zwar zunächst in den für Euler paradigmati-

[500] Euler 1750b, S. 121 (§32).

[501] Dies war gerade sein größtes Hindernis auf dem Weg zu der beschriebenen Lösung: Bis 1750 beabsichtigte Euler eine *mathematische* Determination der Kräfte; vgl. Pulte 1989, S. 150-161.

[502] Euler 1750b, S. 118 (§25).

[503] Ebd., S. 118f. (§26).

[504] Ebd., S. 118f. (§26) bzw. Euler 1768-72 I, S. 170; vgl. hierzu auch Teil 4.2.

schen Stoßprozessen, dann aber auch bei vermeintlichen Fernwirkungsphänomenen wie der Gravitation. Das Prinzip der kleinsten Wirkung garantiert Euler so, daß eine Newtonsche Mechanik der Kräfte keinen kontingenten Charakter erhält, sondern von ‚notwendigen' Axiomen ausgehend etabliert werden kann.[505] Es handelt sich um eine *für Euler* befriedigende Klärung jenes Problems der Kraft, das ihn bereits in der *Mechanica* von 1736 beschäftigte. Es ist, wie seine zweite große Mechanik, die *Theoria motus* von 1765, zeigt, auch seine *abschließende* Stellungnahme zu diesem für ihn fundamentalen Problem.[506]

Man kann Eulers Lösung des Kraftproblems von verschiedenen Seiten her kritisieren, und zwar auch ‚immanent', d.h. von der inneren Logik seines Programms her. So wird insbesondere nicht klar, wie eine momentan in einem Körper entstehende und in einem anderen Körper wirkende Kraft seine ontologische Forderung einlöst, innere aktive Kräfte — als in Widerspruch mit der Passivität der Körper befindlich — gänzlich auszuschließen. Aber darum geht es hier nicht: Wichtig ist es vielmehr zu zeigen, wie eine im wesentlichen ‚Newtonsche' Axiomatisierung der Mechanik im Sinne des mechanischen Euklidianismus ‚gerettet' wird, *ohne* zentrale Voraussetzungen des Newtonschen Programms zu teilen. Euler war zu sehr Mathematiker und Physiker, um auf den erfolgreichen Newtonschen Zugang zu verzichten, aber auch zu sehr Naturphilosoph im Sinne der Cartesianischen Tradition, um eine Newtonsche Mechanik der Kräfte ohne weitergehende Begründung des Kraftkonzepts zu akzeptieren. Seine Auflösung dieser Spannung ist ‚konservativ', insofern sie einem *strikten Essentialismus* verpflichtet bleibt. Aber es ist auch festzuhalten, daß Euler auf mathematischer Ebene die Newtonsche Kraft als Basiskonzept einführt, obwohl diesem Konzept auf ontologischer Ebene keine primäre Entität entspricht. Ich interpretiere dies als Beispiel für die zunehmende Spannung zwischen mathematischer Darstellung und naturphilosophischem Gehalt der Mechanik, wie sie im letzten Teil allgemein konstatiert wurde.

Eulers Lösung des Kraftproblems verdeutlicht einen weiteren wichtigen Punkt: Die von der KMN geforderte *Eindeutigkeit* der Axiomatisierung steht in keiner Weise zur Disposition. Euler hätte, von einem ‚modernen' Standpunkt betrachtet, das Prinzip der kleinsten Wirkung als Möglichkeit einer alternativen, d.h. nicht-newtonschen Axiomatisierung der Mechanik auffassen können, wie dies im 19. und 20. Jahrhundert Forscher wie Helmholtz und Larmor taten; er war ja schon früh von der deduktiven Leistungsfähigkeit dieses Prinzips überzeugt und wandte es auf eine Reihe mechanischer Probleme an.[507] Tatsächlich aber nahm er diese Option nicht wahr, sondern stellte vielmehr das Wirkungsprinzip ab 1750 in den Dienst einer ‚Absicherung' der Newtonschen Axiomatisierung. Man kann diesen Verzicht sachlich dadurch begründen, daß die Einführung

[505] Vgl. die Strukturskizze des gesamten Eulerschen Aufbaus der rationalen Mechanik in Pulte 1989, S. 176.

[506] Vgl. Euler 1765 I, S. 64 bzw. 1853, S. 58 (§130).

[507] Vgl. insbes. Euler 1748a, 1751a, 1751b, 1751c.

des Prinzips der kleinsten Wirkung als Axiom, das weite Teile der Mechanik umfaßt, zu *diesem* Zeitpunkt nicht ohne einen mechanischen Energieerhaltungssatz ausgekommen wäre, der tatsächlich — vor allem aufgrund einer fehlenden Entwicklung des Potentialkonzepts — nicht erreicht war und auch Eulers kritischer Haltung gegenüber universellen Erhaltungsgrößen nicht entsprochen hätte.

Bereits 1744, als er sein Prinzip der kleinsten Wirkung annonciert, läßt er jedoch einen tieferen Grund erkennen, warum er es weniger als eine wirkliche konzeptuelle Alternative für eine Axiomatisierung der Mechanik denn als andere Sichtweise auf die *eine* zugrundeliegende Naturgesetzlichkeit versteht. Euler unterscheidet hier nämlich „direkte" und „indirekte Methode" der Mechanik, wobei erstere nach den „bewirkenden Ursachen [causis efficientibus]", letztere nach den „Endursachen [causis finalibus]" forsche.[508] Man kann den ersten Weg mit Eulers Newtonscher Axiomatisierung, den zweiten mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung in Verbindung bringen. Welcher Ansatz nun jeweils bevorzugt wird, hängt davon ab, welcher Ursachentyp leichter erkennbar sei: „Besonders aber soll man darauf sehen, auf beiden Wegen die Lösung zugänglich zu machen. Dann wird nicht nur die eine zur Bestätigung der anderen dienen, sondern die Übereinstimmung beider erfüllt uns mit höchster Befriedigung".[509] Die hier nur postulierte, aber nicht weiter erklärte ‚Übereinstimmung' beider Zugänge findet Euler später in der oben skizzierten materietheoretischen Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung, und er begründet damit auf metaphysischer Ebene sowohl seine Lösung des Kraftproblems als auch die (vom Standpunkt der KMN: *unabdingbare*) *Einheit* beider mathematischen Zugänge. ‚Newtonsche' Bewegungsgesetze und Prinzip der kleinsten Wirkung liefern die gleichen mathematischen Bestimmungsgleichungen für die konkreten Probleme und *können keine* anderen liefern: *eine* Natur, *eine* Axiomatisierung.

IV.3.2 Newtonsche Axiomatik und Integration von Erhaltungssätzen

Daß sich Euler, wie bemerkt bereits in seiner *Mechanica* von 1736, überhaupt auf mathematischer Ebene bevorzugt des Newtonschen Zugangs bedient und nicht unmittelbar an die Cartesianische Stoßmechanik anknüpft, geht zweifellos darauf zurück, daß er die mathematische und empirische Überlegenheit dieses Zugangs erkannte — ohne, wie gezeigt wurde, darum einem ‚Instrumentalismus' zu erliegen.

[508] Euler 1744, S. 231, vgl. auch 1748a, S. 1f.

[509] Ebd., S. 231; für Einzelheiten vgl. Pulte 1989, S. 133-139. Dort wird auch gezeigt, daß Eulers Ausführungen *nicht* als Appell an eine Leibnizschen ‚Harmonie zwischen den Reichen der Kraft und der Gnade' verstanden werden kann, wie es die ältere Geschichtsschreibung des Prinzips der kleinsten Wirkung wollte.

Aber Euler versuchte nicht nur, eine Newtonsche Mechanik der Kräfte auf Cartesianischer Grundlage zu etablieren, sondern auch, Elemente des Leibnizschen Programms zu integrieren, mit dem er durch seinen mathematischen Lehrer Johann Bernoulli und dessen Sohn Daniel Bernoulli gut vertraut war. Dies sei lediglich an einem, wenngleich wichtigen, Beispiel illustriert:

Obwohl Euler universelle Erhaltungsgrößen als Basiskonzeptionen der Mechanik ablehnte, weil er sie als Versuch interpretierte, Erklärungsentitäten mit ontologischem Anspruch einzuführen, was der Passivität der Körper widerspräche[510], lernte er durch die Bernoullis die Leibnizsche *vis viva* als wichtige Beschreibungsgröße für den elastischen Stoß und auch für (reibungsfreie) Zentralkraftprobleme schätzen. Bereits in seiner *Mechanica* leitet er die *vis viva*-Erhaltung für Zentralkraftprobleme in der Form[511]

$$d(v^2) = Pdx \quad \text{bzw.} \quad v^2 = const. + \int Pdx \tag{2}$$

her. Im Streit um die Erhaltung der ‚wahren' Kraft beim Stoß weist er, wie auch d'Alembert und Maupertuis, auf die unzureichende begriffliche Klärung des Problems hin und bezeichnet es als einen bloßen „Wortstreit [logomachie]"[512]. Die „wahre Kraft", so macht er später deutlich, wird durch die Impulsänderung eines Körpers in der Zeit ausgedrückt:[513]

$$F = \frac{d}{dt}(mv) \tag{3}$$

Die Cartesianische Bewegungsgröße mv und die Leibnizsche *vis viva* sind hieraus abgeleitete Größen, nämlich Zeit- bzw. Wegintegral über diese Newtonsche Kraft:[514]

$$mv = \int Fdt \quad \text{bzw.} \quad mv^2 = \int Fds. \tag{4}$$

Für Euler handelt es dabei um Größen, deren Erhaltung beim Stoß generell (mv) bzw. beim elastischen Stoß (mv^2) als *empirisch bewährt* angesehen werden kann — darum bedient er sich ja der entsprechenden Erhaltungsgesetze auch, um das zweite Bewe-

[510] Vgl. Euler 1745, S. 35.
[511] Vgl. Euler 1736 II, S. 74f. (§195). Euler schreibt v statt v^2. Das Symbol v steht bei ihm für die Fallhöhe, die dem Quadrat der Fallgeschwindigkeit proportional ist.
[512] Euler 1745, S. 34.
[513] Euler 1755, S. 62.
[514] Ebd., S. 62f. und S. 79f.

gungsgesetz nicht nur metaphysisch, sondern auch empirisch zu ‚sichern'[515]. Aber es handelt sich bei ihnen nicht um *universelle* Erhaltungsgrößen, die als Basiskonzepte seiner Mechanik in Frage kommen könnten.[516] Sie haben vielmehr den Status *abgeleiteter* Größen, deren Erhaltung, mathematisch gesprochen, von der Integrabilität der jeweils wirkenden Newtonschen Kraft F abhängt. Die Erhaltung der *vis viva*, ein Axiom des Leibnizschen Programms, und die Erhaltung des Impulses, *in nuce* ein Axiom des Cartesianischen Programms, sind in Eulers Mechanik nicht länger Axiome, sondern abgeleitete Theoreme, deren Geltung von den (mathematischen) Voraussetzungen des jeweiligen Falles abhängt. Sie sind daher nützlich, um bestimmte mechanische Problemklassen zu behandeln, aber nicht mehr. Mit der Integration dieser einstigen Grundsätze in eine Newtonsche Axiomatik geht, wie an verschiedenen anderen mechanischen Sätzen ebenso klar gemacht werden könnte, eine deutliche ‚mathematische Nivellierung'[517] einher: Sie verlieren ihren axiomatischen Status, ohne der Mechanik verloren zu gehen.

IV.3.3 Metaphysische Begründung und Autonomisierung der rationalen Mechanik

Die bisherigen Ausführungen zu Euler, sowohl im letzten Abschnitt als auch in diesem, mögen am prominenten Beispiel die These[518] illustrieren, daß die erkenntnistheoretische Unterscheidung von Rationalismus und Empirismus unbrauchbar ist, um eine hochentwickelte und organisierte Theorie wie die rationale Mechanik begreifen zu können. Dies zeigt sich bereits vordergründig daran, daß Euler das Trägheitsprinzip ‚rationalistisch' durch den Satz vom zureichenden Grund, das zweite Bewegungsgesetz (unter anderem) ‚empiristisch' in *(E2)*-Manier begründet und sich zudem einer nicht weiter legitimierten ‚mathematischen Intuition' bedient, um es (sogar als ‚notwendig')

[515] Vgl. oben, Teil 2.7.

[516] Es ist daher falsch, wenn etwa Yehuda Elkana von einer „Leibniz-Euler-Lagrange-Formulierung der analytischen Mechanik" spricht, bei der „Raum, Zeit, Masse und Energie" als Basiskonzeptionen vorausgesetzt würden (Elkana 1974a, S. 49f.).

[517] Haas (1909, S. 72) faßt die beschränkte Rolle der *vis viva*-Erhaltung gegen Ende des 18. Jahrhunderts, insbesondere bei Lagrange, so zusammen: „Die mathematische Ausgestaltung, die die von Huyghens [sic!] und Leibniz begründeten energetischen Ideen im Laufe des 18. Jahrhunderts erfuhr, hat zwar viel zu der Klärung des Satzes von der Krafterhaltung beigetragen, dieses Prinzip jedoch seiner universellen Bedeutung und der Hegemonie, die es noch zu Leibnizens Zeit in der Physik inne hatte, fast völlig beraubt; der nivellierende Einfluß der mathematischen Methode hatte zur Folge, daß es an der Schwelle des 19. Jahrhunderts nur mehr in einem enge begrenzten Teile der theoretischen Mechanik eine bescheidene Rolle spielte".

[518] Sie wurde offenbar erstmals klar von Lakatos artikuliert; vgl. Kap. I, Teil 2.4, insbes. Anm. 194.

abzusichern. Seine Cartesianisch gefärbte Fundierung einer Newtonschen Mechanik der Kräfte bedient sich spekulativer Argumente über den Zusammenhang von Materie, Bewegung und Kräften einerseits und mechanischer Prinzipien (nämlich dem der kleinsten Wirkung und dem zweiten Bewegungsgesetz) andererseits, wobei offenkundig ‚Vernunftgründe' im weitesten Sinne (aktive Kräfte widersprächen der passiven Verfaßtheit der Materie) und ‚empirische Gründe' (Bewährtheit der genannten Prinzipien) zusammenkommen. Liegt nun die Quelle der ‚unbestreitbaren Wahrheit' der mechanischen Axiome in der Vernunft oder der Erfahrung, sind sie Sätze *a priori* oder *a posteriori*? Es scheint, als sei für Euler diese ‚klassische' Frage im wesentlichen falsch gestellt.

Wenngleich Euler keine systematische philosophische Grundlegung seiner eigenen Mechanik unternommen hat, kann man diese ‚Falschheitsthese' *weitgehend* aus seinen erkenntnistheoretischen Ausführungen rekonstruieren. Dies sei hier nur kurz begründet, denn es ist das einschränkende ‚weitgehend', das auf das eigentlich Interessante seiner Begründungsbemühungen verweist:

Euler unterscheidet in seinen berühmten *Lettres à une Princesse d'Allemagne* drei Formen von Wahrheit: empirische („physische"), „logische oder demonstrative" und historische („moralische").[519] Alle menschliche Erkenntnis fällt unter diese drei Formen, die stets wohlunterschieden werden sollen. Sein Erkenntnisoptimismus[520] manifestiert sich in der Überzeugung, daß zwar keine dieser Erkenntnisformen von vornherein irrtumsfrei sei, aber jeder Irrtum an der Realität aufweisbar und durch Befolgung gewisser Regeln eliminierbar sei, so daß sowohl empirische als auch logische als auch historische *Gewißheit* möglich ist.[521] Die sinnliche Wahrnehmung zeichnet sich nicht durch einen besonderen Status ihrer Gewißheit aus — vielmehr müssen wir alle drei Erkenntnisarten für „gleich gewiß halten"[522] —, sondern dadurch, daß sie zeitlich den beiden anderen vorhergeht und jene erst ermöglicht. Zudem vermittelt uns der Wahrnehmungsprozeß selbst eine zwar nicht beweisbare, aber unmittelbare Einsicht in die

[519] Euler 1986, S.133-142 bzw. 1768-72 I, S. 272-290 (115. -122. Brief).

[520] „Es giebt gewisse Merkmale, die uns in den Stand setzen, die Wahrheit von dem Irrthume zu unterscheiden: und jede von unsern drey Erkenntnisquellen hat gewisse ihr eigenthümliche Merkmale. [...] Die Wahrheit ist so fest in uns gegründet, daß wir selbst bey der größten Sucht, an allem zu zweifeln, wider Willen auf sie zurückkommen müssen" (ebd., S. 136 bzw. S. 279f.; 118. Brief).

[521] Ebd., S. 136f. bzw. S. 279-281 (118. Brief).

[522] Vgl. ebd., S. 137 bzw. S. 281 (119. Brief): „Es giebt also drey Quellen, woraus wir alle unsre Erkenntnisse schöpfen und die wir für gleich gewiß halten müssen, sobald nur die nöthige Vorsicht zur Verwahrung gegen den Irrthum gebraucht wird. Daraus entstehen dann drey verschiedene Arten der Gewißheit".

Existenz von Objekten außerhalb unseres Bewußtseins, so daß die „Überzeugung von der Existenz der Außenwelt eines der vornehmsten Gesetze der Natur" sei.[523]

Die Frage nach der Gewißheit mechanischer Prinzipien richtet sich von vornherein auf die beiden ersten Erkenntnisformen, und da die Mechanik „eine der vornehmsten [Wissenschaften] der Mathematik"[524] ausmacht, ist sie Teil der Frage nach der Gewißheit der Mathematik. Eulers eher beiläufig gegebene Antwort, daß die Gewißheit der Sätze der Mathematik („géometrie") eine „logische oder demonstrative" sei[525], ist aber selbst für Teilgebiete wie die Arithmetik oder Euklidische Geometrie unzureichend, weil sie sich offenkundig nur auf ableitbare Theoreme, aber nicht auf Axiome erstreckt[526]. Sie gibt keinen Aufschluß über die Gewißheit der *Axiome* der Mathematik, insbesondere nicht der Mechanik.

Bliebe die Möglichkeit, daß er ihnen empirische Gewißheit beilegt. Euler entwickelt in den *Lettres* eine sensualistische Ideenlehre, die hier Aufschluß geben könnte: Alle Ideen haben ihren Ursprung in der sinnlichen Wahrnehmung. Im Verstand werden aus einfachen Ideen („idées simples"), die mit Einzelwahrnehmungen korrespondieren, in einem *abstraktiven* Prozeß allgemeine Ideen oder Begriffe („idées générales" bzw. „notions générales") gebildet.[527] Alle Allgemeinbegriffe, darunter auch mathematische wie Zahl und Ausdehnung, beruhen somit auf Sinneswahrnehmung. Gleichwohl können ihre Verbindungen *logisch* wahr sein: Der Satz ‚Alle Körper sind undurchdringlich' ist logisch wahr, weil wir einen Begriff von ‚Körper' gebildet haben, der Ausdehnung, Undurchdringlichkeit und Trägheit von vornherein einschließt. Ein Schatten ist ausgedehnt, aber nicht undurchdringlich und wird auch von niemandem als ‚Körper' angesprochen.

Da die Mathematik auf der Ebene empirisch gewonnener Allgemeinbegriffe operiert, kann sie in einem weiten Sinne bei Euler durchaus als *empirisch* begründet ange-

[523] Ebd., S. 135 bzw. S. 277f. (117. Brief). Der Solipsismus erscheint Euler daher als unwiderlegbare, aber auch unaufrichtige philosophische Position.

[524] Ebd., S. 63 bzw. S. 127 (58. Brief).

[525] Ebd., S. 137 bzw. S. 281 (119. Brief).

[526] „Jeder will gerne sein eigenes Urtheil frey behalten, und wenn er von einem fremden den Grund und den Beweis nicht einsieht, so wird er nicht überzeugt. Euklid hätte uns nur vergebens die schönsten Wahrheiten der Geometrie vorgesagt, wenn er nicht zu unsrer Ueberzeugung hinlängliche Beweise hinzugesetzt hätte; denn auf sein bloßes Wort würden wir sie niemals geglaubt haben" (ebd., S. 138). Euler läßt sich meines Wissens nirgendwo auf die Frage ein, ob die *Axiome* der Euklidischen Geometrie, die hier offenbar *nicht* gemeint sind, sondern als Beweisprämissen vorausgesetzt werden, für ihn Vernunftwahrheiten sind. Bemerkenswert ist auch, daß er — der alle Gebiete der Mathematik mit großer Intensität bearbeitet hat — sich mit Beweisen des Parallelenaxioms nie beschäftigt zu haben scheint.

[527] Ebd., S. 107-113 bzw. S. 216-230 (96.-101. Brief) und S. 139-142 bzw. S. 283-290 (120.-122. Brief).

sehen werden.[528] Sofern ihren *Axiomen* Gewißheit zugesprochen wird, kann es sich letztlich nur[529] um eine *empirische* Gewißheit handeln. Mathematik ist für Euler eine *Wirklichkeitswissenschaft*.

Euler wendet sich daher — und auch hier weist seine Argumentation eine Gemeinsamkeit mit derjenigen d'Alemberts auf[530] — emphatisch dagegen, abstraktiv gewonnene mathematische Allgemeinbegriffe und physische Einzeldinge nach dem Schema ‚Idealität-Realität' zu unterscheiden. Die Eigenschaften der Allgemeinbegriffe der Mathematik müssen sich immer in den spezielleren, mit physikalischen Einzeldingen korrespondierenden Ideen wiederfinden, so daß auch für Euler (wie für d'Alembert) ein ‚Anwendungsproblem' im modernen Sinne nicht existiert: „Alles, was einem allgemeinen Begriff zukömmt, kömmt auch den untergeordneten zu, und alle die Eigenschaften, die mit ihm verbunden sind, sind auch nothwendig mit den unter ihm begriffenen Individuis verbunden".[531] ‚Mathematische' Ausdehnung etwa ist kein idealer, für die Physik unbrauchbarer Begriff, sondern ist *real* in dem Sinne, daß die Eigenschaften, die die Mathematik von ihr aussagt, auch von (notwendig ausgedehnten) physischen Körpern ausgesagt werden können. Eulers bevorzugtes (weil auf Leibniz' Monadenlehre abzielendes) Beispiel hierfür ist die unendliche Teilbarkeit der Ausdehnung: Sie ist mathematisch möglich *und also auch* physisch.[532] Wären solche Schlüsse nicht erlaubt, würde die Geometrie eine „ganz unnütze und vergebliche Spekulation" sein[533]; diejenigen, die „zwischen den abstrakten und wirklichen Gegenständen" unterscheiden, „erwägen nicht, daß keine einzige Folgerung, kein einziger Schluß mehr gelten würde, wenn es nicht erlaubt wäre, von jenen auf diese zu schließen; denn was thun wir in allen unsern Schlüssen anders, als daß wir die besondern Begriffe für die allgemeinen setzen".[534]

Bis zu diesem Punkt können Eulers philosophische Streifzüge wohl zeigen, daß für ihn mechanische Axiome nicht *a priori* im Sinne materialer metaphysischer Vernunftwahrheiten sind, denn solche Wahrheiten kennt seine Erkenntnistheorie nicht. Sie sind auch als mathematische Sätze nicht a priori gültig, denn die Mathematik insgesamt ist keine Wissenschaft a priori in dem Sinne, daß ihre Axiome und (*qua* Übertragung Eulerscher ‚logischer Wahrheit') Theoreme unabhängig von jeder Erfahrung gelten würden. Also sind die mechanischen Axiome nach Euler in keinem üblichen Sinne als

[528] Hierauf hat wohl zuerst Edmund Hoppe hingewiesen; vgl. Hoppe 1904, S. 158.

[529] ‚Nur' hier zu verstehen im logischen, ausschließenden Sinne (keine logische oder historische Gewißheit), aber nicht im (ab)wertenden Sinne: Empirische und logische Gewißheit stehen für Euler auf einer Stufe.

[530] Und liefert einen weiteren Beleg für die ‚semantische Geladenheit' der Mathematik im allgemeinen; vgl. zu d'Alembert Teil 2.1. Die Einschränkung ‚im allgemeinen' wird noch näher begründet.

[531] Ebd., S. 143 (124. Brief).

[532] Ebd., S. 141-145 (122.-125. Brief).

[533] Ebd., S. 145 (125. Brief).

[534] Ebd., S. 141 (122. Brief).

Sätze *a priori* anzusprechen. Andererseits wird man die mechanischen Axiome im Sinne Eulers nicht als *a posteriori* in dem Sinne verstehen können, daß sie ‚nur' durch Erfahrung begründet wären, denn die Erfahrung kann die ihnen unterstellte Notwendigkeit nicht erzwingen. Weder a priori noch a posteriori: Das ist es, was die obige ‚Falschheitsthese' meint.

Eulers erkenntnistheoretische Ausführungen können auch plausibel machen, warum ihm die Anwendbarkeit mechanischer Axiome (sind sie denn einmal gefunden) auf konkrete physikalische Körper unproblematisch erscheint: Es sind Aussagen über allgemeinste (und nur allgemeinste) Körpereigenschaften und daher auf alle physischen Körper anwendbar. Es sind also *synthetische*, gehalterweiternde Sätze. Zudem haben sie als *mathematische* Sätze Teil an der Evidenz und Gewißheit, die er der Mathematik generell zuerkennt. Aber woher die behauptete Notwendigkeit?

Weder a posteriori (aber synthetisch), weder a priori (aber mathematisch, notwendig und unbezweifelbar gewiß): Es scheint, als habe sich Euler mit seinen Geltungsansprüchen für die Axiome der Mechanik philosophisch hoffnungslos übernommen. Dies ist tatsächlich der Fall, aber auf eine ‚raffiniertere' und reflektiertere Weise, als dies Eulers Erkenntnistheorie, für sich genommen, vermuten läßt. Damit komme ich zu dem ‚weitgehend', mit dem dieser erkenntnistheoretische Abriß eingeleitet wurde:

Betrachten wir Eulers *Réflexions sur l'espace et le temps*[535] von 1748, in denen er sich mit dem Status des Newtonschen absoluten Raumes und der absoluten Zeit sowie der Begründung des Trägheitsprinzips auseinandersetzt. In seiner *Mechanica* (1736) hatte er Newtons Entitäten als „rein mathematisch" bezeichnet und eine Aussage über deren ontologischen Status vermieden.[536] Es handelt sich lediglich um Begriffe, die „den Gesetzen der Bewegung angepasst sind, welche wir in der Folge entwickeln werden"[537], also um Begriffe, die *vorausgesetzt* werden müssen, um zu diesen Sätzen — gemeint ist zunächst das Trägheitsprinzip — zu gelangen.

In den *Réflexions* nimmt Euler einen anderen Standpunkt ein, der zum einen seine inzwischen erlangte erkenntnistheoretische Auffassung widerspiegelt, daß abstraktiv gewonnene mathematische Allgemeinbegriffe (wie der des absoluten Raumes) nicht als bloße ideale Vorstellungen aufgefaßt werden sollten, denen keine Realität zukommt.

[535] Euler 1748b.

[536] So heißt es etwa: „Das, was wir über den unendlichen Raum und seine Grenzen gesagt haben, muss rein mathematisch gedacht werden. Stehen diese Vorstellungen auch mit den metaphysischen Speculationen scheinbar in Widerspruch, so können wir sie doch mit Recht zu unserm Zweck anwenden. Wir behaupten nämlich nicht, dass es einen derartigen unendlichen Raum mit festen und unbeweglichen Grenzen gebe, kümmern uns auch nicht um ihr Dasein, sondern wir verlangen nur, dass derjenige, welcher die absolute Ruhe oder Bewegung betrachten will, sich einen solchen Raum vorstelle [...]" (Euler 1736 I, S. 14 bzw. 1848/50 I, S. 9).

[537] „[...] sunt enim accommodatae ad leges motus, quae in sequentibus explicabuntur" (Euler 1736 I, S. 14 bzw. 1848/50 I, S. 9).

Zum anderen macht er hier ganz allgemein klar, *wie* sich mathematische Naturwissenschaft mit ihren sicheren Gesetzen einerseits und Metaphysik[538] mit ihren Begründungsansprüchen andererseits zueinander verhalten. Nachdem er das Trägheitsprinzip in Cartesianischer Manier für Ruhe und Bewegung getrennt formuliert und beide Sätze als ‚unbestreitbare Wahrheiten' ausgewiesen hat, fährt er fort:[539]

Ces deux verités étant si indubitablement constatées, il faut absolument qu'elles soient fondées dans la nature des corps: et comme c'est la Métaphysique, qui s'occupe à rechercher la nature et les propriétés des corps, la connoissance de ces vérités pourra servir de guide dans ces recherches épineuses. Car on sera en droit de rejetter dans cette science tous les raisonnements et toutes les idées, quelques fondées qu'elles puissent paroitre d'ailleurs, qui conduisent à des conclusions contraires à ces vérités. Les premières idées que nous nous formons des choses qui se trouvent hors de nous sont ordinairement si obscures et si peu déterminées, qu'il est extrêmement dangereux d'en tirer des conséquences, dont on puisse être asseuré. C'est donc toujours une grande avance, quand on connoit déjà d'ailleurs quelques conclusions auxquelles les premiers principes de la Métaphysique doivent aboutir: et ce sera sur ces conclusions qu'il faudra règler et déterminer les premières idées de la Métaphysique.

Die Mechanik beginnt also nach Euler nicht mit metaphysisch deduzierten Prinzipien, sondern die Metaphysik endet mit mechanisch erwiesenen Prinzipien. Es ist nicht die Mechanik, die ihre Annahmen vor der Metaphysik rechtfertigen muß, sondern die Metaphysik muß ihre Lehre in Einklang mit den gesicherten Resultaten der Mechanik entwickeln. Da die Axiome der Mechanik den gesamten Korpus des mechanischen Wissens repräsentieren, sind sie es, die jedenfalls ‚festgehalten' werden müssen, wenn Wissenschaft und Metaphysik in Konflikt geraten[540]. Cassirer spricht hier zurecht von der „philosophische[n] Mündigkeitserklärung der neuen mathematischen Wissenschaften"[541]: Mit Euler erreicht die KMN eine *Selbstgewißheit*, die weitergehende philosophische Begründungen ihrer Prinzipien generell in Frage stellt und letztlich überflüssig zu machen scheint. Sie weist hin auf eine ‚Entmetaphysierung' der KMN, ohne bereits einen ‚Metaphysikverzicht' zu üben.

Aber warum verzichtet Euler nicht auf die allgemeine Begriffs- und Methodenlehre, die er als Metaphysik bezeichnet? Meine These ist, daß Eulers Essentialismus diese Konsequenz ausschließt. Die Metaphysik wird ja mit seiner ‚Unabhängigkeitserklärung' keineswegs zu einem *beliebigen* Legitimationsinstrument: Sein im wesentli-

[538] Hier ist zu beachten, daß der Begriff ‚Metaphysik' bei Euler, wie in der Zeit generell, eine weitere Bedeutung hat als heute: Er bezeichnet eine allgemeine Begriffs- und *Methoden*wissenschaft mit Begründungsansprüchen.

[539] Euler 1748b, S. 376f. (§2).

[540] So ist auch zu verstehen, daß Euler glaubt, die Entdeckung eines neuen mechanischen Prinzips (hier des der kleinsten Wirkung) könne eine neue und „wahre Metaphysik" ans Licht bringen (Euler an Maupertuis vom 10. Dez. 1745; *Opera omnia* 4, A6, S. 57).

[541] Cassirer *Erkenntnisproblem* II, S. 477.

chen Cartesianisch geprägter Essentialismus erscheint ihm vielmehr von solcher Evidenz, daß der Metaphysik die Aufgabe zufällt, zwischen den ‚Wesenseigenschaften' der Körper (Ausdehnung, Trägheit, Undurchdringlichkeit) und den Axiomen der Mechanik eine Ableitungsbeziehung herzustellen, die letztere als ‚notwendig' erweist.

Wie ein solcher ‚metaphysischer Anschluß' aussehen kann, zeigen seine eigenen Arbeiten zu den Grundlagen der Mechanik. In den *Réflexions* kommt er zu dem Ergebnis, daß absoluter Raum und absolute Zeit als „choses réelles" angesehen werden müssen, „qui subsistent même hors de notre imagination: puisqu'il seroit absurde de soutenir, que des pures imaginations pouvoient servir de fondement à des principes réels de la Mécanique".[542] Nur unter dieser metaphysischen Voraussetzung hält er es jetzt für möglich, das Trägheitsprinzip als ‚notwendig' zu erweisen. Euler kommt also zu einer ‚Newtonschen' Lösung — aber es ist, strenggenommen, die Lösung eines *anderen Problems*: Wenn die frühere Rekonstruktion zutrifft[543], leitet Newton die *Wahrheit* des Trägheitsprinzips letztlich nicht (wie beansprucht) induktiv aus der Erfahrung ab, sondern aus der Existenz des absoluten Raumes. Euler setzt die Wahrheit des Trägheitsprinzips voraus und schließt aus ihr auf die *Existenz* des absoluten Raumes. Sollte man sagen, daß hier der ‚Rationalist' Euler empirischer verfährt als der ‚Empirist' Newton, weil er vom ‚Gegebenen' (dem Trägheitsprinzip) ausgeht? Eine weitere Frage, die zeigt, daß es sich hier um wenig hilfreiche Kategorien handelt.

Einen anderen Beleg für den von Euler verfolgten ‚metaphysischen Anschluß' liefert das Problem der Kraft. Zugespitzt lautet Eulers Dilemma: Es kann zu keiner ‚Newtonschen' Lösung (Kräfte als primäre Entitäten) kommen, weil dies seinem Essentialismus widerspräche, aber auch nicht zu einer ‚Cartesianischen' Lösung (Verzicht auf Kräfte überhaupt), weil Bewegungs*gesetze* als notwendig erwiesen werden sollen, in denen der Kraftbegriff in irreduzibler Weise auftritt. Eulers Lösung dieses Dilemmas, wie sie im letzten Abschnitt beschrieben wurde, ist eine ‚metaphysische Anpassungsleistung' zwischen feststehenden essentialistischen Voraussetzungen einerseits und mathematischen Axiomen der Mechanik andererseits. Sie ist erkauft um den Preis, daß die Undurchdringlichkeit — eine *nicht* mathematische Wesenseigenschaft — neben der Bewegung als Ursache fungiert, auf die alle Kräfte zurückgeführt werden, während die Kraft — ein *nicht* wesentlicher mathematischer Begriff — als Basiskonzept in die Axiomatik der Mechanik eingeht. Axiomatik (A) und Essentialismus (E) fallen also nicht länger zusammen[544] — ein Beispiel für die Schwierigkeit, die als wichtig angese-

[542] Euler 1748b, S. 377 (§5).

[543] Vgl. Kap. III, Teil 3.

[544] Man könnte vielleicht argumentieren, daß Leibniz' Konzept der *vis viva* als einer ‚nur' derivativen Kraft in einem vergleichbaren Spannungsverhältnis zu den (ontologisch relevanten) Leibnizschen primitiven Kräften stehe. Aber bei Leibniz liegen die Verhältnisse insofern anders, als in seiner Metaphysik von vornherein die Unterscheidung zweier Ebenen (‚ontologischer' und ‚phänomenaler') angelegt ist, die durch die prästabilierte Harmonie koordiniert werden. Bei

henen Elemente der verschiedenen Programme der rationalen Mechanik in eine Theorie zu integrieren und dabei die drei Hauptanforderungen (AFE) im Sinne der KMN weiterhin zu erfüllen.

IV.3.4 Zusammenfassung

Drei allgemeinere Bemerkungen zu Eulers Projekt eines ‚metaphysischen Anschlusses' der Axiome der Mechanik sollen diesen Teil abschließen: Erstens läßt sich Euler offenbar nirgendwo über die *Eindeutigkeit* einer so begründeten Axiomatisierung aus — vermutlich gerade deshalb, weil er sie, in der AFE-Tradition stehend, als selbstverständlich voraussetzt. Zweitens ist seine Argumentation zwar philosophisch völlig unbefriedigend, insofern sie versucht, zwischen mechanischen Axiomen, die als empirisch gewiß gelten sollen, und den ‚Wesenseigenschaften' der Materie, die ebenfalls empirisch gewiß sein sollen, aber nicht als solche nachgewiesen werden können, eine ‚notwendige' Ableitungsbeziehung herzustellen; sie ist aber *nicht zirkelhaft* in dem trivialen Sinne, daß hier evidente Wahrheiten (mechanische Axiome) auch noch aus anderen evidenten Wahrheiten (‚Wesenseigenschaften') *um einer vermeintlichen Notwendigkeit willen* abgeleitet werden müßten. Euler sieht vielmehr, ungeachtet seiner schlichten erkenntnistheoretischen Ausführungen, daß die *Erfahrung* den mechanischen Axiomen nicht die Gewißheit und Geltung geben kann, die er ihnen zubilligen möchte, und er hält daher Ausschau nach einem *weiteren*, über die Erfahrung hinausgehenden begrifflichen Rahmen, der eben diese Gewißheit und Geltung verbürgen soll. Man kann daher drittens auch dann, wenn man sein hier zum Ausdruck kommendes metaphysisches Rechtfertigungsdenken verwirft, Eulers Überlegungen eine *philosophiegeschichtliche Fruchtbarkeit* kaum absprechen: Gerade seine späteren Überlegungen zur Raumproblematik, lösen die herkömmliche Unterscheidung von ‚idealen Verstandesbegriffen' und ‚realen Erfahrungsbegriffen' weiter auf[545] und stellen einen wich-

Euler ist diese Unterscheidung *erzwungen* durch die Zielsetzung, empirisch erfolgreiche (Newtonsche) Mechanik und philosophisch zufriedenstellende (Cartesianische) Metaphysik zusammenzubringen.

[545] Aufschlußreich ist hier besonders Eulers ‚zweite Mechanik', d.h. die *Theoria motus* von 1765. So bemerkt Euler zur „Idee des *Ortes*": „Die Idee der Undurchdringlichkeit stützt sich daher auf die Idee des *Ortes*, ohne welche sie durchaus nicht bestehen kann. Wäre nämlich der Ort nicht etwas von den Körpern Verschiedenes, so könnten wir auf keine Weise verstehen, was die Undurchdringlichkeit sei. Die Philosophen, welche die Wirklichkeit des Ortes leugnen, sagen zwar, die Körper existiren nothwendig ausser sich, was aber *ausser-* oder *innerhalb* sei, wenn ein Ort ohne Körper nichts ist, erklären sie keineswegs. Das, was wir oben über die absolute Ruhe und Bewegung auseinander gesetzt haben, beweist vollkommen, dass der Ort nicht ein reiner Begriff des Verstandes [merum mentis conceptum] ist und jetzt ersehen wir aus der Undurchdringlichkeit ganz deutlich, dass die Idee des Ortes mehr umfasst, als eine blosse wechselseitige

tigen Schritt in Richtung auf Kants transzendentale Raum- und Zeitlehre dar.[546] Nicht in der philosophischen Begründung, wohl aber in der *Wahrnehmung* der mechanischen Axiome als synthetisch, mathematisch und notwendig ist er auch von Kants Charakterisierung dieser Axiome als synthetischer Prinzipien a priori nicht allzu weit entfernt: Was Euler fehlt, ist Kants (allerdings entscheidendes) Verständnis des *A priori* als einer erfahrungsunabhängigen, aber gleichwohl *erfahrungsermöglichenden und -bestimmenden* Erkenntnisform. Was Euler und Kant indessen eint, ist die Idee, daß ein mechanischer Euklidianismus nur jenseits der eingefahrenen Gleise von Empirismus und Rationalismus begründbar sei. Zumindest insofern macht sich in der wissenschaftstheoretischen Entwicklung geltend, was in der wissenschaftstheoriegeschichtlichen Rekonstruktion als Begründungsproblem des mechanischen Euklidianismus immer deutlicher zutage tritt.

Beziehung der Körper, so dass nach der Aufhebung aller Körper auch für den *Ort* kein Ort übrig bleiben würde. Der Ort ist daher etwas, was von den Körpern nicht abhängt und eben so wenig ein reiner Begriff des Verstandes, was er aber ausserhalb des letztern für eine Reellität besitze, möchte ich nicht zu bestimmen wagen, wenn wir nicht auch in ihm einige Reellität anerkennen müssen. Wenn aber die Philosophen alle Reellitäten in bestimmte Klassen theilen und wähnen, dass der Ort auf keine von ihnen bezogen werden könne; so möchte ich lieber glauben, dass diese Klassen fälschlich von ihnen aufgestellt worden sind, indem sie die darauf zu beziehenden Dinge nicht hinreichend erkannt hatten. Auf ähnliche Weise ist das Verhältniss der *Zeit* beschaffen [...]" (Euler 1853, S. 56 bzw. 1765 I, S. 63; §128). Kantisch gesprochen, behaupten diese und andere Ausführungen Eulers die ‚empirische Realität' des Raumes und verweisen auf dessen ‚transzendentale Idealität'.

[546] Zum Problemkreis ‚Euler und Kant' allgemein s. Timerding 1919 und Elkana 1974b. Eine detaillierte Analyse von Eulers späterer (d.h. in den *Réflexions* und der *Theoria motus* vorgestellten) Raum- und Zeitlehre in Hinblick auf Kant ist meines Wissens nie unternommen worden und wäre, gerade auch in Hinblick auf die Frühgeschichte von Kants Wissenschaftstheorie und Naturphilosophie, sehr zu wünschen.

IV.4 Analytische Mechanik und analytische Prinzipien

Von ‚Analytischer Mechanik' und ‚analytischen Prinzipien' wurde bereits verschiedentlich gesprochen, ohne daß diesen Begriffen bisher eine präzise systematische und historische Bedeutung gegeben wurde. Eine Klärung ist vor allem unter der Fragestellung angebracht, ob mit dem Übergang von einer Newtonschen, ‚synthetischen' Darstellung der Mechanik zu einer Eulerschen und Lagrangeschen, ‚analytischen' Darstellung tatsächlich — wie behauptet worden ist[547] — ein folgenschwerer wissenschaftstheoretischer Wandel einhergeht. Hier soll zunächst die Begriffsexplikation im Vordergrund stehen, denn sie ist wichtig für ein Verständnis von Lagranges Zugang, der später noch näher zu untersuchen sein wird. Die Diskussion des behaupteten Grundlagenwandels bietet sich erst im Rückblick auf die Entwicklung des ganzen 18. Jahrhunderts, d.h. am Ende dieses Kapitels, an.

IV.4.1 Analytische Mechanik

Die (wörtliche) Rede von einer ‚Analytischen Mechanik' hat erst mit Lagranges *Méchanique Analitique* (1788) Einzug in den wissenschaftlichen Sprachgebrauch gehalten. Lagrange bezeichnet allerdings in der zweiten Auflage Eulers frühere *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* (1736) als „das erste Werk [...], in dem die Analyse auf die Wissenschaft von der Bewegung angewendet worden ist"[548]. Euler wiederum bezieht sich im Vorwort seiner ‚ersten Mechanik' ausdrücklich auf Hermanns *Phoronomia* und Newtons *Principia*, um sein Werk von jenen abzugrenzen.[549] Er macht es sich zur Aufgabe, die dort praktizierte Methode, „alles nach Art der Alten mittelst synthetisch geometrischer Beweise" zu behandeln[550], in eine analytische umzuformen. So solle die gesamte Mechanik nach einer „geebneten und gleichförmigen Methode dargestellt"[551] werden, so daß „jeder, welcher in der Analysis des Endlichen und Unendlichen hinreichende Uebung erlangt hat, alles mit bewunderungswürdiger Leichtigkeit verstehen und das ganze Werk ohne alle Hülfe durchlesen könne"[552].

Dreierlei ist hier festzuhalten: *Erstens* gebraucht Euler den Begriff ‚synthetisch' als Synonym für ‚geometrisch' und analog ‚analytisch' als Synonym für ‚mit Mitteln der

[547] Und zwar von Jürgen Mittelstraß in *Neuzeit und Aufklärung* (Mittelstraß 1970, insbes. S. 300-309) und verschiedenen anderen Veröffentlichungen. Ich gehe hierauf in Teil 6 dieses Kapitels näher ein.

[548] Lagrange 1887, S. 187 bzw. 1853/55 I, S. 243, vgl, zum folgenden auch Pulte 2001.

[549] Euler 1848/50 I, S. 2f. bzw. 1736 I, S. 8.

[550] Ebd., S. 3 bzw. S. 8.

[551] Ebd., S. 3 bzw. S. 8

[552] Ebd., S. 7 bzw. S. 11.

Differentialrechnung'. Die Begriffe haben bei ihm eine mathematische, aber keine unmittelbare wissenschaftstheoretische Bedeutung, sie werden insbesondere nicht mit Newtons Methode der Analyse und Synthese[553] in Verbindung gebracht. Im wissenschaftstheoretischen Sinne verfährt die *Mechanica* nämlich traditionell *synthetisch*: Sie beginnt mit der Erklärung von Grundbegriffen („definitio"), fährt fort mit Lehrsätzen („theorema")[554] und deren Beweisen („demonstratio"). Ausgehend von Grundbegriffen und Lehrsätzen entwickelt sie dann ein deduktives System, das alle mechanischen Sätze umfassen soll und deren Anwendung auf konkrete mechanische Probleme darstellt. Insoweit steht die *Mechanica* in der Kontinuität von Euklids *Elementen*, aber auch von Newtons *Principia* und ist in wissenschaftstheoretischer Hinsicht als ein *synthetisches* Werk zu bezeichnen.[555]

Zweitens ist festzustellen, daß Euler mit der Verfolgung der analytischen (*mathematischen*) Methode keine wissenschaftstheoretischen, insbesondere keine *begründungstheoretischen* Absichten verfolgt. Es geht ihm nicht um eine irgendwie geartete ‚Reduktion' von Mechanik auf Analysis, wie sie Lagrange später beansprucht, sondern um den Gebrauch der Analysis als Darstellungs- und Ableitungstechnik. Euler betont verschiedentlich, daß ohne deren Hilfe mechanische Sätze zwar als wahr eingesehen, aber nicht hinreichend „klar und bestimmt" dargestellt werden können, so daß bereits bei geringen Modifikationen der Probleme eine Lösung unmöglich erscheine.[556]

Hiermit geht *drittens* konform, daß Euler die analytische (mathematische) Methode nicht als die *allein* legitime betrachtet; es gibt also bei ihm keinen mathematischen Methodenmonismus. In der *Mechanica*, aber auch in der *Theoria motus* und in anderen Schriften zur Mechanik bedient er sich sowohl der Analysis als auch der Geometrie; insbesondere stellt er seine analytischen Untersuchungen von Bewegungsprozessen

[553] Vgl. hierzu Kap. III, Teil 4.1, insbes. Zit. 326.

[554] Daß Euler im Unterschied zu Newton nicht von ‚axiomata' spricht, hat seinen Grund darin, daß er sie als *beweisfähig* ansieht; vgl. die Teile 2 und 3 für seine diesbezüglichen Beweisversuche.

[555] Genauer gesagt handelt es sich bei der *Mechanica*, genau wie bei den beiden anderen wichtigen Mechaniklehrwerken im zweiten Drittel des 18. Jahrhunderts, d'Alemberts *Traité de dynamique* (1743) und Eulers *Theoria motus* (1765), um ein Zeugnis des mechanischen Euklidianismus: Jedes Werk der KMN ist ‚synthetisch' in dem weiten wissenschaftstheoretischen Sinne, in dem Newton (vgl. Kap. III, Teil 4.1) diesen Begriff gebraucht.

[556] Vgl. etwa Euler 1848/50 I, S. 3 bzw. 1736 I, S. 8.: „Was aber von allen, ohne Anwendung der Analysis verfassten, Schriften gilt, trifft vorzugsweise die Werke über Mechanik. Der Leser wird zwar von der Wahrheit der vorgetragenen Sätze überzeugt, allein er erlangt keine hinreichend klare und bestimmte Kenntniss derselben [tamen non satis claram et distinctam eorum cognitionem assequatur]. Werden daher dieselben Fragen nur ein wenig abgeändert, so wird er sie mit eigenen Kräften kaum beantworten können; wenn er nicht zur Analysis seine Zuflucht nimmt, und dieselben Sätze nach der analytischen Methode entwickelt."

häufig geometrisch dar und sorgt so auf der einen Seite für Veranschaulichung, auf der anderen Seite für mathematische Präzision.

Nimmt man diese drei Gesichtspunkte zusammen, fällt es schwer, zwischen der *Mechanica* und den *Principia* eine signifikante wissenschaftstheoretische Differenz *allein* aufgrund der Tatsache zu behaupten, daß das erste Werk ‚analytisch' und das zweite ‚synthetisch' (im mathematischen Sinne) verfährt.[557] Gegen Mittelstraß' Rekonstruktion werde ich daher die Auffassung vertreten, daß sich hier noch *kein* neuer (und gleichsam ‚degenerierter') Wissenschaftsbegriff geltend macht, und auch für Lagranges Auffassung von ‚Analytischer Mechanik' kann ein solcher Wandel *in der Hauptsache nicht* nachgewiesen werden.[558]

IV.4.2 Analytische Prinzipien

Eine engere und bestimmtere Bedeutung erhält der Begriff ‚Analytische Mechanik', wenn man ihn wissenschaftstheoretisch *definiert* als eine solche Mechanik, die ausgehend von *analytischen Prinzipien* die Gesamtheit der Sätze der Mechanik deduktiv entwickelt. Unter analytischen Prinzipien sollen dabei solche verstanden werden, die sich der höheren Analysis, d.h. der Variationsrechnung bedienen, um aus ihnen die Bewegungsgleichungen eines Körpers oder, allgemeiner, aller Körper eines mechanischen Systems abzuleiten. Analytische Prinzipien sind demnach von vornherein *Variationsprinzipien*, und diese können in integraler oder differentieller Form auftreten. Im 18. Jahrhundert wurde je eines dieser Prinzipien erfolgreich entwickelt, nämlich das integrale Prinzip der kleinsten Wirkung und das differentielle Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, heute meist (aber sehr irreführend) bezeichnet als ‚D'Alembertsches Prinzip'. Es ist hier nicht erforderlich, im einzelnen auf die mathematischen Voraussetzungen und Anwendungsbedingungen beider Prinzipien einzugehen[559]; vielmehr soll lediglich ihre Struktur in Hinblick auf die Bedeutung der Zuschreibung ‚analytisch' kurz skizziert werden.

Das von Euler und Maupertuis im Jahre 1744 unabhängig veröffentlichte Prinzip der kleinsten Wirkung besagt in moderner Darstellung, daß eine Masse m unter recht allgemeinen Bedingungen zwischen zwei gegebenen Punkten eine solche Bahn ‚wählt'

[557] Hinzu kommt, daß sich Newton bekanntlich bei der Ausarbeitung der *Principia* ebenfalls der Infinitesimalrechnung, d.h. seiner Fluxionsrechnung bedient, aber seine Resultate in der späteren Veröffentlichung ‚geometrisch einkleidet', um sie den Zeitgenossen leichter zugänglich zu machen.

[558] Näheres hierzu in Teil 6.

[559] Ausgezeichnete mathematische Darstellungen beider Prinzipien finden sich z.B. in Koenigsberger 1901, Voss 1901, Lanczos 1966 und Goldstein 1976.

(weniger anthropomorph: ‚beschreibt'), für die die Aktionsgröße ein Minimum (allgemeiner: einen stationären Wert) annimmt:[560]

$$\int mv\,ds \to Min. \quad \text{bzw.} \quad \int mv\,ds \to Stat. \tag{1}$$

Die mathematische Idee hierbei ist, die tatsächlich realisierte Bewegung vor anderen möglichen Bewegungen durch eine besondere Eigenschaft (Minimalität bzw. Stationarität der Wirkungs- bzw. Aktionsgröße) auszuzeichnen. Die allgemeinere Forderung der Stationarität ist dabei der Forderung nach dem Verschwinden der ersten Variation äquivalent:

$$\delta \int mv\,ds = 0. \tag{2}$$

Diese Forderung führt, wie die Variationsrechnung leicht zeigt, auf die Differentialgleichungen[561]

$$F_x = \frac{d^2}{dt^2}(mx);\ F_y = \frac{d^2}{dt^2}(my);\ F_z = \frac{d^2}{dt^2}(mz), \tag{3}$$

die heute als die ‚Newtonschen' Bewegungsgleichungen bekannt sind. Historisch ist hier zu beachten, daß die allgemeine Herleitung von *(3)* aus *(1)* bzw. *(2)* erst 1760 von Lagrange geleistet wurde.[562] Bis dahin blieb der Nachweis der *Übereinstimmung* des Newtonschen Zugangs gemäß *(3)* und des analytischen gemäß *(1)* auf bestimmte Probleme und Problemklassen beschränkt. In der Terminologie Eulers: Die Übereinstimmung der von ihm[563] so genannten ‚direkten Methode' und der ‚indirekten Methode' blieb bis dahin eine Übereinstimmung im Konkreten, deren Allgemeinheit ein metaphysisches Postulat. Empirisch untermauert wurde dieser Allgemeinheitsanspruch allerdings durch ein eindrucksvolles Spektrum von Deduktionen akzeptierter speziellerer mechanischer und optischer Gesetze: Maupertuis leitete aus ihm (wenngleich nicht logisch einwandfrei) die Gesetze des elastischen und inelastischen Stoßes sowie das

[560] Euler und Maupertuis gingen zunächst beide von einem Minimum der Aktion aus; Euler weitete seine Formulierung später zu ‚Minimum oder Maximum' aus, ohne seine Bevorzugung des Minimums aufzugeben (vgl. Teil 3.1).

[561] Dies sind gerade die von Euler erstmals in dieser allgemeinen Form dargestellten Gleichungen; vgl. Teil 3.1, Gl. *(1)*.

[562] Lagrange 1760b, S. 369; zur Erläuterung s. Pulte 1989, S. 247f.

[563] Vgl. Teil 3.1.

Reflexions- und Brechungsgesetz her; ebenso subsumierte er mit der Unterordnung seines *Loi du repos* unter das dynamische Prinzip auch altbekannte statische Prinzipien wie das Hebelgesetz und eine spezielle Form des später sogenannten Dirichlet-Prinzips der Statik. Euler wandte das Prinzip der kleinsten Wirkung auf Zentralkraftprobleme an und leitete die Keplerschen Gesetze her, deduzierte allgemeine mechanische Eigenschaften von Mehrkörperproblemen und setzte es erfolgreich bei theoretischen Fragen der Kontinuumsmechanik ein. Es waren gerade die Vielfalt und *Heterogenität* der Anwendungsbereiche des Prinzips der kleinsten Wirkung und die Tatsache, daß es dort nicht einfach nur Einzelprobleme löste, sondern bereits etablierte *Gesetze* abzuleiten erlaubte, die den Anspruch zu rechtfertigen schienen, daß es sich hier um ein *Metagesetz* handle, das auf *alle* Bereiche der Natur angewandt werden könne.[564] Auch auf Kant machte dieser ‚metagesetzliche' Charakter großen Eindruck; ich komme hierauf im Zusammenhang mit dem Systembegriff der KMN zurück.[565]

Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten wurde erstmals 1764 von Lagrange[566] aus einer Kombination des (eigentlich so zu nennenden) dynamischen Prinzips von d'Alembert[567] und des älteren, für ‚einfache Maschinen' und andere Spezialfälle schon von Stevin, Galilei, Johann Bernoulli, Varignon und anderen genutzten statischen Prinzips der virtuellen Arbeit bzw. Verrückung gewonnen[568]. Betrachten wir wiederum den einfachsten Fall nur einer Masse m, auf die eine Kraft $\underline{F} = (F_x, F_y, F_z)$ einwirkt. Im Falle der Statik besagt das Prinzip der virtuellen Verrückungen, daß die Masse im Gleichgewicht ist, wenn das sog. ‚Moment der Kräfte' verschwindet:

$$F_x \delta x + F_y \delta_y + F_z \delta_z = 0. \qquad (4)$$

In *moderner* physikalischer Interpretation besagt *(4)*, daß bei einer ‚virtuellen', d.h. gedachten, aber mit den konkreten physikalischen Bedingungen vereinbaren und in diesem Sinne *möglichen* Verrückung ($\delta x, \delta y, \delta z$) der Masse m keine Arbeit verrichtet wird.

[564] Bereits die Titel einiger Abhandlungen von Maupertuis und Euler lassen dies erkennen: *Accord des différentes Loix de la Nature qui avoient jusqu'ici paru incompatibles* (Maupertuis 1744); *Les Lois du Mouvement et du Repos déduites d'un Principe Métaphysique* (Maupertuis 1746); *Harmonie entre les principes générales de repos et de mouvement de M. de Maupertuis* (Euler 1751a).

[565] Vgl. Teil 7.2 und Kap. V.

[566] Vgl. Lagrange 1764.

[567] Vgl. hierzu Hankins 1970, S. 170-194 und Fraser 1985.

[568] Vgl. zur Geschichte dieses Prinzips insbes. Lindt 1904 und Benvenuto 1991; für diverse Belege zur Geschichte des Begriffs ‚Moment' in diesem Kontext auch Jacobi 1996 und die dortige Kommentierung, insbes. S. 19-21 (Anm. 32-38).

Im dynamischen Fall unterliegt die Masse m einer Beschleunigung, der eine Trägheitskraft

$$(m\frac{d^2x}{dt^2}, m\frac{d^2y}{dt^2}, m\frac{d^2z}{dt^2})$$

korrespondiert, die gemäß dem (eigentlichen) Prinzip von d'Alembert der äußeren Kraft (bis auf die Richtung) entspricht. Lagranges Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten fordert nun, daß im Falle der Bewegung bei einer virtuellen Verrückung das *gesamte* Moment M der Kräfte verschwindet:[569]

$$\left(F_x - m\frac{d^2x}{dt^2}\right)\delta x + \left(F_y - m\frac{d^2y}{dt^2}\right)\delta y + \left(F_z - m\frac{d^2z}{dt^2}\right)\delta z = 0 \qquad (5)$$

Abkürzend und symbolisch kann man für diese Gleichung das Verschwinden des gesamten Momentes der Kräfte bei einer virtuellen Verrückung auch schreiben als

$$\delta M = 0. \qquad (6)$$

Im Unterschied zum Prinzip der kleinsten Wirkung *(2)* handelt es sich bei *(6)* nicht um ein integrales, sondern um ein differentielles Variationsprinzip: Es zeichnet die tatsächlich realisierte Bewegung nicht aus durch den Vergleich virtueller Bahnkurven (d.h. über einen endlichen Zeitraum), sondern durch den Vergleich virtueller Nachbarzustände (d.h. für jeden Zeitpunkt). Da die virtuellen Verrückungen (δx, δy, δz) voneinander unabhängig sein müssen, erhält man aus *(6)* bzw. *(5)* ebenfalls unmittelbar die Bewegungsgleichungen *(3)*. Die Gleichung *(5)* erscheint dabei zunächst sogar nur als eine bloße ‚symbolische Einkleidung' von *(3)*, was jedoch, wie eine nähere Betrachtung zeigen würde, ihrer eigentlichen Bedeutung keineswegs gerecht würde: auch in dieser Hinsicht vergleichbar mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung, erlaubt sie — ohne den ‚Umweg' *(3)* — die Herleitung einer Reihe anerkannter Gesetze der rationalen Mechanik.[570]

Nicht diese Frage soll jedoch hier verfolgt werden, sondern die Frage, in welchem Sinne Prinzipien wie *(2)* und *(6)* den Begriff ‚analytisch' zu schärfen in der Lage sind. Analytisch sind diese Prinzipien und die jeweils auf ihnen aufbauende Mechanik zunächst in einem *ableitungstheoretischen* Sinne. Sie wären keine Prinzipien, und die Mechanik ergäbe keine systemförmige Theorie *ohne* Anwendung der höheren Analysis

[569] Vgl. Lagrange 1788, S. 10f. bzw. *Œuvres* XI, S. 21f. Lagrange schreibt die Kräfte nicht als Differenz, sondern als Summe, weil das negative Vorzeichen bei ihm in die virtuellen Verrükkungen eingeht.

[570] Ich komme hierauf im Zusammenhang mit Lagrange (Teil 5.2) kurz zurück.

(Variationsrechnung): Aus den Prinzipien werden nachgeordnete mechanische Sätze variationsanalytisch, in geometrisch nicht darstellbarer Weise deduziert. Anders als in Eulers *Mechanica* ist die Analysis hier also *wissenschaftskonstitutiv* (im Sinne der klassischen Wissenschaftsauffassung) dergestalt, daß sie allein die Wahrheit der Prinzipien auf ‚niederstufige' Sätze überträgt: keine Wissenschaft der Mechanik ohne Analysis.[571]

Hiermit in engem Zusammenhang steht, daß Prinzipien wie *(2)* und *(6)* — man könnte auch spätere analytische Prinzipien wie das Hamilton-Prinzip, Gauß' Prinzip des kleinsten Zwanges oder Hertz' Prinzip der geradesten Bahn heranziehen — von *skalaren* Basiskonzepten ausgehen. In diesem Sinne impliziert die Unterscheidung ‚analytisch-synthetisch' auch (zweitens) die mathematische Unterscheidung ‚skalar-vektoriell' auf axiomatischer Ebene.[572] Dies verschafft den analytischen Prinzipien den großen Vorteil, *invariant* unter Koordinatentransformationen zu sein. Diese Eigenschaft ist nicht nur von formaler, sondern von grundsätzlicher Bedeutung insofern, als aus ihr wichtige Erhaltungssätze der klassischen Mechanik wie der der Schwerpunktsbewegung und der des Drehimpulses als Invarianten (hier der Translation bzw. Rotation) zwanglos folgen. Daß die analytischen Prinzipien in der zweiten Hälfte des 18. und besonders im 19. Jahrhundert meist den Newtonschen Gesetzen vorgezogen wurden, hängt wesentlich mit dieser Integrationsleistung zusammen. Erkauft ist dieser Vorteil allerdings durch einen *Anschauungsverlust* gegenüber den älteren, synthetischen Prinzipien: Bewegung als ein stets gerichtetes Phänomen wird auf axiomatischer Ebene nicht repräsentiert: Skalare Größen wie die Aktion oder das Moment M, in späteren Formulierungen der ‚effort', die kinetische und potentielle Energie, werden in das jeweilige Prinzip *eingesetzt*, und erst der abstrakte Variationsprozeß (nach den drei räumlichen Koordinaten) beendet die ‚Richtungslosigkeit' der mathematischen Darstellung.[573]

Weiter haben analytische Prinzipien bei der Anwendung auf ein *System* von Massen den Vorzug, alle Informationen über das Verhalten des Systems in einer Funktion — wie der Aktion oder dem Moment — zu ‚komprimieren'; gerade hierin liegt ja die

[571] Dies zeigt sich an den obigen Gleichungen bereits darin, daß die Bewegungsgleichungen (3) aus (2) bzw. (6) nicht ohne einen Variationsprozeß erhalten werden können. Lagrange leitet desweiteren ohne den ‚Umweg' (3) aus (6) auch verschiedene andere mechanische Sätze wie die Integrale der Bewegung her.

[572] Bzw. weniger anachronistisch ‚skalar-richtungsabhängig', da die Mathematik erst relativ spät einen allgemeinen Vektorbegriff entwickelt; vgl. Crowe 1967.

[573] Sinnfällig wird dies besonders am Beispiel des Trägheitsprinzips: Bei Newton verdankt sich der axiomatische Charakter dieses Prinzips, wie ich zu zeigen versucht habe (vgl. Kap. III, Teil 3.1), besonders der Bezugnahme auf die Euklidische Geometrie. Die analytischen Prinzipien ‚liefern' das Trägheitsprinzip als bloßes variationsanalytisches Resultat bei vorausgesetzter Kräftefreiheit.

Möglichkeit einer ‚holistischen' Darstellung des ganzen Systems[574]. Die einzelnen Körper bzw. Massenpunkte tauchen dabei jedoch — anders als bei einer Newtonschen Behandlung — nur implizit, d.h. als Terme der fraglichen Funktion auf, nicht explizit in Form der entsprechenden Bewegungsgleichungen. Erst der Variationsprozeß gibt in der mathematischen Präsentation sozusagen den einzelnen physikalischen Objekten ihre Individualität zurück, indem er maschinengleich die jeweiligen Differentialgleichungen ‚produziert'. Dies sind Facetten der ‚semantischen Entladung' der Mathematik auf axiomatischer Ebene, auf die bereits bei der Darstellung der allgemeinen Entwicklungsstruktur hingewiesen wurde.

Hiermit wiederum hängt eng zusammen ein *dritter* und letzter, besonders wichtiger Aspekt analytischer Prinzipien, nämlich der Status der verwendeten mathematischen Konzepte. Sowohl die Aktion in *(2)* als auch das Moment in *(6)* sind lediglich *abgeleitete* Größen. Durch die wissenschaftlichen Metaphysiken der drei großen Programme wird weder die eine noch die andere als Basiskonzept ausgewiesen; sie entstammen der Begründungspraxis der rationalen Mechanik, werden aber in *(2)* und *(6)* außerhalb ihrer Entstehungskontexte auf axiomatischer Ebene eingeführt. Dies führt zu großen Schwierigkeiten bei der Begründung der jeweiligen analytischen Prinzipien, die charakteristisch für den *essentialistischen* Charakter der KMN sind:

Aktion als Produkt aus Masse m, Geschwindigkeit v und durchlaufener Wegstrecke s eines Körpers, wie sie im Prinzip der kleinsten Wirkung (Aktion) eingeführt wird, ist ein Konzept, das Leibniz bereits um 1689 als *quantitas actionis formalis* im Kontext seines ‚a priori-Beweises' der *vis viva*-Erhaltung einführt.[575] Maupertuis übernimmt diesen Begriff in seiner Formulierung des Wirkungsprinzips von 1744 zunächst ohne Bezug auf Leibniz. Seine Interpretation des Begriffes wie des Prinzips selber ist ambig: Er versteht die Aktion zunächst als eine rein deskriptive, ‚replizierbare' Größe, die aus den der direkten Messung zugänglichen Größen Masse, Wegstrecke und Zeitdauer abgeleitet ist und eine *beobachtbare Wirkung* zum Ausdruck bringt.[576] Gerade hierin sieht er ja einen Vorzug seines Prinzips gegenüber ‚kausal verdächtigen' Prinzipien, die sich des Kraftbegriffs als eines Basiskonzepts bedienen.[577] Es ist sehr bezeichnend für den andauernden Essentialismus der KMN, daß dieses Argument in der Rezeption des Wirkungsprinzips überhaupt nicht verstanden wurde: Wie bereits die Cartesianer gegen Fermats optisches Minimalprinzip der schnellsten Ankunft das Argument vorbrachten, bei der nach Fermat zu minimierenden Zeit handele es sich um eine Größe, die keine *kausale* Beziehung zum Mechanismus der Lichtausbreitung erkennen lasse und daher nicht geeignet sei, den Weg des Lichtes zu determinieren[578], kritisierten

[574] Vgl. Lanczos 1966.
[575] Vgl. Leibniz 1689, insbes. S. 346.
[576] Vgl. Maupertuis 1744, S. 425f.
[577] Vgl. hierzu auch Teil 2.6.
[578] S. hierzu Dugas 1955, S. 258; vgl. auch Sabra 1981.

Mathematiker wie Patrick d'Arcy Maupertuis' Prinzip, weil in diesem Prinzip der Aktion kein *kausaler* Status zukomme, und versuchten es so umzuinterpretieren, daß dieses ‚Defizit' behoben wird.[579] Bezeichnend ist ebenso, daß Maupertuis seine deskriptionistische Interpretation sozusagen nur ‚oberflächlich' vertritt. Unter dem von seinen Kritikern ausgeübten Rechtfertigungsdruck gibt er zu erkennen, was zunächst nur unterschwellig in seiner Interpretation der Aktion mitschwingt: Sie ist bei ihm ein Maß des *göttlichen Kraftaufwandes* in der Regulierung der Naturphänomene, und ihre Minimalität ist ein Ausdruck der Weisheit, mit der Gott die Natur regiert.[580]

Euler trifft mit seinem Prinzip der kleinsten Wirkung auf ähnliche Schwierigkeiten wie Maupertuis. Daniel Bernoulli etwa reagiert auf sein neues Prinzip mit der Bemerkung: „Aus dero Brief ersehe ich, dass ich in meiner Conjectur nicht betrogen, wenn ich gesagt habe, dass dero Observation circa orbitas planetarum, in quibus $\int v ds$ vel $\int v^2 dt$ ein minimum ist, vielleicht nur a posteriori sey gemacht worden, denn nach meinen principiis kann ich solches a priori nicht einsehen".[581]

Auch hier gilt die Frage dem *Status* der Aktionsgröße $\int mv\, ds$, und weil dieser für Euler selbst zunächst ungeklärt ist, spricht auch er von einem nur *a posteriori* ermittelten Prinzip.[582] Wie bereits dargestellt, findet er später im Kontext seiner Lösung des Kraftproblems einen Weg, die Aktion an seine wissenschaftliche Metaphysik in essentialistischer Manier anzubinden: kleinste Aktion als Ausdruck kleinster ‚Erzeugung' von Kräften durch Materie in Bewegung.

Was sich hier an Eulers und Maupertuis' Wirkungsprinzip zeigt, ist ein *allgemeines* Problem analytischer Prinzipien: Die mit ihnen eingeführten skalaren Größen rechtfertigen sich zunächst nur über die deduktiven Ableitungen; mit ihrer Einführung scheint also ein hypothetisch-deduktives Element ins Spiel zu kommen, das der KMN fremd ist.[583] Im Falle des Prinzips der kleinsten Wirkung kommen die beiden Entdecker zu (je verschiedenen) metaphysischen Klärungen des Aktionsbegriffs, die diesen ‚Verdacht des Hypothetischen', immanent betrachtet, zerstreuen. Im Zuge der Entmetaphysierung der entwickelten rationalen Mechanik verlieren deren Lösungen jedoch an Plausibilität

[579] Vgl. D'Arcy 1749, S. 532 und D'Arcy 1752, S. 504.

[580] „Notre principe, plus conforme aux idées que nous devons avoir des choses, laisse le Monde dans le besoin continuel de la puissance du Créateur, & est une suite nécessaire de l'emploi le plus sage de cette puissance" (Maupertuis 1750, S. 44f.).

[581] D. Bernoulli an Euler vom 4. Sept. 1743 (Fuss 1843 II, S. 533). Bernoulli wie Euler unterdrücken in der Formulierung des Wirkungsprinzips die Masse *m*.

[582] S. etwa Euler 1748a, S. 3.

[583] Anders verhielte es sich beim Prinzip der kleinsten Wirkung, wenn es im Rahmen des Leibnizschen Programmes zu lokalisieren wäre: Es könnte dort in der Gestalt $\int mv^2\, dt \rightarrow Min.$ als ein ‚Distributionsgesetz' der *vis viva* mv^2 interpretiert werden. Die historische Analyse zeigt indessen, daß es eben *nicht* aus diesem Programm hervorgeht.

und werden schließlich am Ende des 18. Jahrhunderts zu bloßem metaphysischen Ballast.[584] Während die Frühgeschichte des Prinzips der kleinsten Wirkung durch philosophische und wissenschaftstheoretische Kontroversen geprägt ist, geht es später vorwiegend um dessen *formale* Verallgemeinerung. Was bleibt, ist ein Prinzip der kleinsten Wirkung mit einem ‚entleerten' Aktionsbegriff.

Beim Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten liegen die Dinge zunächst insofern anders, als es — ein differentielles, kein integrales Variationsprinzip — eine teleologische Interpretation seines Basisbegriffs (im Sinne Maupertuis') ebensowenig nahelegt wie eine materietheoretische Interpretation (im Sinne Eulers). Der Momentbegriff steht seit seiner Einführung in engem Zusammenhang mit dem des *Gleichgewichts* und wird daher auch erst in Verbindung mit d'Alemberts Prinzip überhaupt von einem statischen zu einem dynamischen Prinzip. Dort aber verliert er die intuitive Kraft und Evidenz[585], die ihm in der älteren Statik generell zuerkannt wurde. Verschiedene Beweisversuche des statischen Prinzips, vor allem aber die bis weit ins 19. Jahrhundert fortdauernden Bemühungen um Sicherung des dynamischen Prinzips *(5)* bzw. *(6)* belegen, daß es zunehmend als schwierig empfunden wurde, das Moment essentialistisch im weitesten Sinne, d.h. als eine der ‚Natur' der Körper gemäße *Erklärung* von Prozessen der Ruhe und Bewegung, zu verstehen.[586] Die Durchsetzung des Newtonschen Programms in der zweiten Jahrhunderthälfte macht eine solche Interpretation geradezu unmöglich: Es sind danach direktive *Kräfte*, durch die mechanische Phänomene kausal zu erklären sind, nicht abgeleitete Momente.[587] Auch hier gibt es also, wie beim Aktionsbegriff des Prinzips der kleinsten Wirkung, ein *Bedeutungsproblem*. Daß das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit trotz dieses Problems überhaupt weiter Verwendung fand und bei Lagrange sogar zum tatsächlichen *Anfang* des Aufbaus der gesamten Mechanik avancieren konnte, verdankt es nicht seiner Erklärungskraft, sondern der deduktiven Stärke, die es erst durch Ausarbeitung der Variationsrechnung erlangte. Es behauptet sich in

[584] Vgl. hierzu auch die Teile 2.6 und 2.7.

[585] Lindt spricht in diesem Zusammenhang von „instinktiven Einsichten" und „instinktiven Kenntnissen", die an Alltagserfahrungen mit Gleichgewichtsproblemen anknüpfen; s. Lindt 1904, S. 153.

[586] S. hierzu neben Lindt 1904 auch Bailhache 1975, Benvenuto 1991 und Grattan-Guinness 1990.

[587] Auch verbietet sich in diesem Stadium eine ‚energetische' Interpretation des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten, in der Momente als mechanische Arbeit gedeutet werden könnten und später auch gedeutet wurden. Es ist vor allem dem Unvermögen des Leibnizschen Programms zuzurechnen, neben dem Konzept der *vis viva* ein ‚komplementäres', die Formulierung des mechanischen Energieerhaltungssatzes ermöglichendes Konzept einer potentiellen Energie zu schaffen, das diese Alternative ausschließt.

der Mechanik, so könnte man sagen, weniger als erklärendes Naturgesetz denn als organisierendes Axiom.[588]

IV.4.3 Ausblick

Diese kurze Betrachtung analytischer Prinzipien mag verdeutlichen, was die eigentlichen Charakteristika der Analytischen Mechanik sind. „Was heute analytische Mechanik im Gegensatz zur Newtonschen Mechanik heißt, ist genau genommen *rechnende* Mechanik“:[589] Diese Bemerkung Machs trifft zu, aber sie trifft — genauso wie die bei Dingler, Lorenzen und Mittelstraß anzutreffende Rede von einer ‚Kalkülisierung' der Mechanik[590] — *nicht* den eigentlichen Punkt. Die Ersetzung geometrischer durch analytische Verfahren bedeutet nicht *per se* eine Veränderung des Wissenschaftsbegriffs, schon gar nicht ein Ende des mechanischen Euklidianismus. Eher zeigt die überragende Bedeutung, die die (höhere) Analysis in der zweiten Jahrhunderthälfte gewinnt, einen Aufgabenzuwachs des mechanischen Euklidianismus (im Sinne deduktiver Organisation) an, der mit den alten, geometrischen Methoden faktisch nicht länger zu bewältigen war. Damit einher geht allerdings, wie dieser Teil zeigen sollte, eine *Schwerpunktverlagerung* (Bedeutungszunahme ‚analytischer' Wahrheitsvermittlung ‚nach unten'), ein *Anschauungsverlust* mechanischer Prinzipien (im Sinne zunehmend *symbolischer* Repräsentation von Eigenschaften der Bewegung) und eine *semantische Entladung* der ‚axiomatisch' eingeführten mathematischen Grundbegriffe (Aktion, Moment). Lagranges Mechanik wird zeigen, daß damit der mechanische Euklidianismus am Jahrhundertende in eine Krise gerät, der er sich allerdings nicht bewußt ist und nicht bewußt sein kann, weil er seine zentrale Voraussetzung — Mechanik *als Mathematik* — nicht problematisiert, sondern perpetuiert und sogar weiter zementiert.

[588] Es wäre insruktiv, diese These auch begriffsgeschichtlich zu untermauern: Während das Prinzip der kleinsten Wirkung trotz seines zunehmend formalen Charakters auch später oft als ‚Naturgesetz' oder ‚großes Gesetz von der Ersparnis in der Natur' bezeichnet wurde, weil es zu teleologischen und naturökonomischen Spekulationen Anlaß bot, ist beim Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten von einem Naturgesetz nicht mehr die Rede: Es wird als ‚Prinzip', als ‚eine Art Axiom' oder einfach als ‚allgemeine Formel' bezeichnet.

Ergänzend sei bemerkt, daß von einem ‚Axiom' hier natürlich nur in einem weiteren Sinne die Rede sein kann. Nicht Beweisunbedürftigkeit und Evidenz, sondern Allgemeinheit und Sicherheit sind seine wichtigsten Eigenschaften. Die diversen Beweisversuche des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten vom Typ *(E2)* am Ende des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts dienen ja, wie bereits früher ausgeführt wurde und später am Beispiel noch deutlicher wird (vgl. Kap. VI, Teil 5), eher der Evidenzvermittlung als einer logischen Ableitung.

[589] Mach 1933, S. 445.

[590] Vgl. hierzu Teil 6.

IV.5 Mechanik als Mathematik: Lagranges *Méchanique Analitique*

Fast genau ein Jahrhundert nach Newtons *Principia* (1687) veröffentlicht, stellt die *Méchanique Analitique* (1788) das erste Lehrwerk dar, das ‚analytisch' in dem (engeren) Sinne verfährt, daß es eine Axiomatisierung der Mechanik ausgehend von einem (und nur einem) *analytischen* Prinzip unternimmt. Dieses Hauptwerk Lagranges wurde paradigmatisch für die meisten Lehrwerke der theoretischen Mechanik des 19. Jahrhunderts, und es wirft ein bezeichnendes Licht auf den von seinem Autor von vornherein intendierten ‚nichtphilosophischen' Charakter, daß es von ganz *verschiedenen* philosophischen Richtungen mit ungeteilter Zustimmung aufgenommen werden konnte: Der ‚Positivist' Comte etwa versteht die *Méchanique Analitique* als Paradigma einer neuen, von falschen metaphysischen und insbesondere ontologischen Betrachtungen freien Art der mathematischen Natur*beschreibung*[591], und der ‚Phänomenalist' Mach sieht in ihr „eine großartige Leistung in bezug auf die Ökonomie des Denkens"[592]; der stark von Kant beeinflußte Whewell preist nicht nur Lagranges analytische Fähigkeiten, sondern auch seinen „transcendent generalizing genius"[593], und für William Rowan Hamilton, der zumindest in seiner Philosophie der Arithmetik und Mechanik ebenfalls an Kant anknüpft, ist die *Méchanique Analitique* schlicht „a kind of scientific poem"[594].

Von Lagrange sind nur wenige Stellungnahmen überliefert, die Hinweise auf seine wissenschaftliche Metaphysik und seine philosophischen Auffassungen im allgemeinen geben. Hierin nur eine persönliche Eigenheit zu sehen[595], hieße jedoch, die *generelle* Entwicklung der mathematischen Physik am Ausgang des 18. Jahrhunderts zu ignorieren: Lagranges philosophische Zurückhaltung, die im Vergleich mit Euler besonders offen zutage tritt, sollte eher verstanden werden als pointierter Ausdruck jenes Entmetaphysierungsprozesses, der für eine entwickelte Wissenschaft, wie sie die rationale Mechanik dieser Zeit darstellte, charakteristisch ist. Es wäre desweiteren falsch, Lagranges Zurückhaltung als Indifferenz gegenüber Grundlegungsproblemen überhaupt zu interpretieren. Seine Arbeiten zur Mechanik, aber auch zur Analysis weisen vielmehr auf eine Verlagerung von einem Begründungstypus, der im weitesten Sinne philosophisch zu nennen wäre, zu einem ‚wissenschaftsimmanenten' Begründungstypus hin.[596] Nicht Begründungsverzicht und spekulative Hypothesenbildung kennzeichnen seine wissenschaftliche Arbeit, sondern die Suche nach sicheren Grundlagen, deren

[591] Für Belege und eine Analyse des Einflusses von Lagrange auf Comte s. Fraser 1990.
[592] Mach 1933, S. 445.
[593] Whewell 1857 II, S. 95.
[594] Hamilton 1834a, S. 104
[595] Eine solche Sichtweise auf Lagranges philosophische, aber auch religiöse und politische Anschauungen wird z.B. von Sarton 1944 nahegelegt.
[596] Vgl. zur Mechanik Teil 2.6 und Teil 5.3, zu Lagranges Grundlegung der Analysis insbes. Grabiner 1981 und 1990 sowie Dugac 1990.

Anerkennung *unabhängig* von philosophischen Positionen, allein aufgrund innerwissenschaftlich zu entwickelnder Maßstäbe von Strenge und Evidenz, möglich sein solle.[597] Schließlich wäre es drittens falsch, Lagranges philosophische Zurückhaltung im Kontext der Mechanik als eine Wendung zur ‚reinen' Mathematik in dem Sinne zu verstehen, als ginge es hier nur um die Entwicklung eines Kalküls, der unabhängig von allen Erfahrungs- und Anwendungsbezügen ein logisch kohärentes System von Prämissen und Konklusionen zu entwickeln sucht. Lagranges spärliche Bemerkungen zeigen vielmehr, daß er seine Mechanik als Weiterführung des Newtonschen Projekts einer *Philosophiae naturalis principia mathematica* versteht. Er akzeptiert die wesentlichen Voraussetzungen des Newtonschen Programms — Raum-Zeit-Theorie, Atomismus, Existenz von Zentralkräften, Ablehnung von universellen Erhaltungsgrößen — und sieht gleichzeitig mit der ‚Newtonschen Philosophie' eine von problematischen metaphysischen Annahmen *freie* mathematische Naturwissenschaft realisiert.[598] Diese Haltung ist erkenntnis- und wissenschaftstheoretisch naiv, aber sie ist eben auch Ausdruck der Tatsache, daß die — bereits bei Euler erkennbare[599] — *Selbstgewißheit* der rationalen Mechanik einen Punkt erreicht, der (nachträgliche) *philosophische* Rechtfertigungen eher als schädlich denn nützlich oder gar notwendig erscheinen läßt: Wo *verschiedene* Metaphysiken[600] über die *eine* Wahrheit streiten, scheint es angeraten, direkt auf die Wahrheit des *einen* wissenschaftlichen Systems zu setzen. Die *Einheit* der Mechanik zu sichern, macht Lagrange denn auch konsequenterweise zu seiner Hauptaufgabe. Die Frage wird zu beantworten sein, inwiefern mit der *Méchanique Analitique* ein weiterer Wandel der Axiomatisierung der Mechanik einhergeht und einhergehen *muß*, um diese Zielsetzung einzulösen. Zunächst sollen Lagranges frühe, vor seinem Hauptwerk liegende Axiomatisierungsversuche beleuchtet werden, danach untersuche ich die Argumentation der *Méchanique Analitique* selbst und gebe zuletzt, das 18. Jahrhundert bereits überschreitend, einen Ausblick auf Lagranges spätere Position und die Lagrange-Rezeption.

IV.5.1 Wandelnde Prinzipien und Konzepte: Lagranges frühe Arbeiten

Als Lagrange zu Beginn der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts seine wissenschaftliche Laufbahn begann, stellte sich für ihn die Mechanik in einer wesentlich komplexe-

[597] Als er beispielsweise 1772 seinen ersten Versuch einer algebraischen Grundlegung der Analysis unternimmt, geht es ihm gerade darum, der Mathematik einen Ansatz aufzuzeigen, der „unabhängig von aller Metaphysik und aller Theorien des unendlich Kleinen und verschwindender Größen" ist (Lagrange 1772, S. 443; vgl. Grabiner 1981, S. 320).

[598] Für Belege s. Pulte 1989, S. 232-240.

[599] Vgl. Teil 3.3.

[600] Vgl. Lagrange an d'Alembert vom 27. Januar 1779 (*Œuvres* XIII, S. 336).

ren Gestalt dar als für Euler drei Jahrzehnte früher: Für ihn war bereits die ‚Prinzipieninflation' Realität, zu der seine Vorgängergeneration (Euler, d'Alembert, Maupertuis u.a.) am meisten beigetragen hatte. Die vorhandenen Prinzipien präsentierten sich bereits in analytischer oder zumindest in algebraischer Gestalt. Ein Euklidianismus, der auf ein deduktives System *aller* Gesetze der Ruhe und Bewegung aus sein mußte, hatte also von vornherein auf dieser mathematischen Darstellungsebene zu operieren. Dies ist der Grund, warum Lagrange von Anfang an auf analytische Prinzipien als ‚Kandidaten' für eine axiomatische Darstellung der Mechanik fixiert ist.

Bereits die beiden ersten, als eine Einheit zu betrachtenden[601] Turiner Arbeiten aus dem Jahre 1759 weisen die enge inhaltliche Verbindung von Variationsrechnung und Analytischer Mechanik auf, die auch für die späteren Untersuchungen und Lehrbuchdarstellungen charakteristisch ist. Anknüpfend an Eulers Arbeiten zum Prinzip der kleinsten Wirkung, kann man in ihnen den Versuch der Einlösung von Lagranges bereits früh geäußerter These sehen, bei diesem Prinzip handle es sich um den „Universalschlüssel [la clé universelle] aller Probleme, sowohl der Statik als der der Dynamik"[602]. Das Prinzip formuliert er für ein System von Massen $m_1, m_2, \ldots m_n$ mit Geschwindigkeiten $u_1, u_2, \ldots u_n$, die aufeinander mit beliebigen Zentralkräften einwirken, folgendermaßen:[603]

$$\sum_i \int m_i v_i ds_i \rightarrow Max. oder\ Min. \qquad (I)$$

Mit Hilfe seines neuartigen Variationskalküls, der hier nicht ausgeführt werden kann[604], weist Lagrange anschließend in einer Reihe weitestgehend unkommentierter Anwendungen die große Flexibilität und deduktive Leistungsfähigkeit dieses Prinzips nach: Mechanik wird präsentiert als Anwendung einer analytischen Methode — des Lagrangeschen δ-Kalküls — auf ein analytisches Prinzip. So leitet Lagrange u.a. den Satz von der Erhaltung der Schwerpunktbewegung und den der ‚Erhaltung der Flächen' (Drehimpulserhaltungssatz) für ein System von Massenpunkten mit Zentralkraft-Wechselwirkungen aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung ab. In zwei aufeinanderfolgenden Schritten geht er noch weiter über Eulers frühere Arbeiten hinaus:[605]

[601] Dies lassen bereits die Titel erkennen: „Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et les minima des formules indéfinies" und „Application de la méthode exposée dans le mémoire précédent à la solution de différens Problèmes de Dynamique" (Lagrange 1760a bzw. 1760b). Für die technische Seite dieser Arbeiten vgl. die Darstellungen Fraser 1983 und Panza 1991/92, Part I.

[602] Lagrange an Euler vom 19. Mai 1756 (Euler *Opera omnia* 4 A, 5, S. 392f.).

[603] Lagrange 1760b, S. 365; die Schreibweise der obigen Formel ist leicht modernisiert.

[604] Näher hierzu Goldstine 1980.

[605] Für die variationstechnischen Details s. Pulte 1989, S. 246-252.

Im ersten Schritt verwendet Lagrange das Prinzip der *vis viva*-Erhaltung, um für ein konservatives System aus dem Wirkungsprinzip die allgemeinen Differentialgleichungen der Bewegung herzuleiten.[606] Mit Clifford Truesdell kann man daher Lagranges *Application* als die erste Abhandlung bezeichnen, „in which an adequate statement of the laws of a fairly extensive branch of mechanics was gotten without the use of an *a priori* concept of force"[607]. Lagrange *hätte* also eher noch als Euler[608] die formalen Möglichkeiten gehabt, für einen wichtigen Bereich der Mechanik eine Axiomatisierung zu geben, die auf den Kraftbegriff ganz verzichtet. Er nimmt diese Möglichkeit, die erst im späteren 19. Jahrhundert von verschiedenen Forschern aufgegriffen wurde, jedoch ungeachtet der verschiedenen philosophischen Auseinandersetzungen seiner Zeit über den Kraftbegriff gar nicht als solche wahr: ein Beispiel dafür, daß konzeptuelle Fragen *selbst auf axiomatischer Ebene* sekundär werden, weil den Basisbegriffen nicht mehr die semantische Relevanz zukommt, die sie noch in der ‚älteren' analytischen Tradition (Euler, Maupertuis, d'Alembert) besitzen.

Der zweite Schritt stellt eine weitere Verallgemeinerung des Prinzips der kleinsten Wirkung in Aussicht, ohne diese tatsächlich zu realisieren: Lagrange diskutiert die — ebenfalls erst am Ende des 19. Jahrhunderts ausgearbeitete[609] — Möglichkeit, auch auf die Voraussetzung der *vis viva*-Erhaltung noch zu verzichten und *ohne* sie die Differentialgleichungen der Bewegung herzuleiten.[610] Er verfolgt diese Möglichkeit, vermutlich aufgrund ihrer variationstechnischen Schwierigkeiten, nicht weiter, aber gerade dies dürfte von Bedeutung für einen Wandel sein, den er einige Jahre später vollzieht: Während Euler Ende 1762 Lagrange zu seiner *Application* gratuliert, in der „das Prinzip der kleinsten Wirkung zu der größten Bedeutung gelangt, der es fähig ist"[611], ist jener bereits mit der Ausarbeitung des Aufsatzes *Recherches sur la libration de la Lune* beschäftigt, in der das Prinzip der kleinsten Wirkung durch das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten ersetzt wird.[612] Es handelt sich hier, wie bereits bemerkt wurde, um eine Kombination des D'Alembertschen Prinzips mit dem älteren Prinzip der virtuellen Verrückungen für die Statik.

[606] Ebd., S. 369; vgl. Gl. *(3)* in Teil 4.2.
[607] Truesdell 1960b, S. 33.
[608] Vgl. Teil 3.1.
[609] Vgl. hierzu Hölder 1896, insbes. S. 136f.
[610] S. hierzu Lagrange 1760b, S. 384f.
[611] Euler an Lagrange vom 9. Nov. 1762 (*Opera omnia* 4 A, 5, S. 448).
[612] Lagrange 1764, insbes. S. 10. Bei Lagranges Formulierung handelt es sich um eine Verallgemeinerung von Gl. *(5)* in Teil 4.2 auf ein System mit n Massenpunkten. Ich komme auf die mathematische Darstellung dieses Prinzips in Zusammenhang mit Jacobis ausgedehnter Lagrange-Kritik (Kap. VI, Teil 5) zurück.

Lagrange begründet diesen Wandel, der sich vordergründig als eine Abwendung von Euler und eine Hinwendung zu d'Alembert darstellt[613], meines Wissens nirgendwo. Drei Erklärungen liegen indessen vor dem Hintergrund seines analytischen Zugangs nahe, von denen allerdings nur zwei der näheren Prüfung standhalten: Einmal distanziert sich Lagrange später, in der *Méchanique Analitique* (1788), ausdrücklich von metaphysischen Interpretationen des Prinzips der kleinsten Wirkung. Er betrachtet es „nicht als einen metaphysischen Grundsatz, sondern als einfaches und allgemeines Resultat der Gesetze der Mechanik"[614]. Diese Distanzierung von Maupertuis', aber auch von Eulers Interpretation wurde ‚retrogressiv' benutzt, um die bereits um 1762 vollzogene Abwendung vom Prinzip der kleinsten Wirkung zu erklären[615] — eine Erklärung, die insofern problematisch erscheint, als Lagrange bereits in der *Application* (1760) keinerlei Neigungen erkennen läßt, diesem Prinzip irgendeine metaphysische Bedeutung beizumessen. Näher liegt es, (zweitens) die Rolle der *vis viva*-Erhaltung zu betrachten: Lagrange kann 1760 die Beziehung des Wirkungsprinzips zu diesem Erhaltungssatz nicht abschließend klären: Er möchte auf ihn verzichten, um die Mechanik ausgehend von nur *einem* Prinzip entwickeln zu können, stößt hier jedoch auf ableitungstechnische Schwierigkeiten. Der Übergang zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten löst dieses Problem: Die *vis viva*-Erhaltung wird nicht nur als vorauszusetzendes Prinzip erübrigt, sondern kann in den deduktiven Aufbau integriert werden; sie wird selber zu einem *abgeleiteten* Theorem.[616] Der Übergang vom Prinzip der kleinsten Wirkung zu dem der virtuellen Geschwindigkeiten liegt also in der Logik seines ‚Mono-Nomismus': Er möchte möglichst aus *einem* Gesetz alle Theoreme der Mechanik analytisch entwickeln.

[613] Vgl. Fraser 1983, S. 233f. Lagrange hat, wie seine Korrespondenz belegt, in den ersten Jahren seiner wissenschaftlichen Laufbahn die Diskussion mit Euler, später eher die Diskussion mit d'Alembert gesucht. Insofern auf Euler die (für Lagrange allein akzeptable) Form des Prinzips der kleinsten Wirkung zurückgeht, die er 1760 weiter verallgemeinert, und D'Alemberts Prinzip die Voraussetzung für seine Formulierung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten von 1764 abgibt, geht Lagranges ‚Prinzipienentwicklung' parallel mit seiner generellen Umorientierung von Euler zu d'Alembert.

[614] Lagrange 1788, S. 189.

[615] S. Fraser 1983, S. 234.

[616] Lagrange bemerkt zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten: „[...] c'est de ce principe que dépend celui de la conservation des forces vives, comme M. d'Alembert l'a remarqué le premier à la fin de sa *Dynamique*, ce qui peut d'ailleurs se démontrer généralement ainsi" (Lagrange 1764, S. 10). Insofern ist der Übergang vom Prinzip der kleinsten Wirkung zu dem der virtuellen Geschwindigkeiten eine Konsequenz der KMN-Forderung *(i*)*, wonach *alle* mechanischen Sätze aus den eingeführten Prinzipien erklärt werden müssen (vgl. Kap. I, Teil 2.2). Für detailliertere Analysen der mathematischen Ableitungsbeziehung zwischen dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit und dem der *vis viva*-Erhaltung bei Lagrange s. Fraser 1983, S. 233-235, Panza 1991/92, Part I und Pulte 1989, S. 252-256.

Der dritte Grund ist kein systematischer, sondern ein *historischer*: Lagrange sieht in der älteren, statischen Form des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten die ‚Wurzel' des Prinzips der kleinsten Wirkung und räumt ersterem auch *deshalb* einen Vorrang ein.[617] Dabei mag befremden, daß in einem Diskurs, der zunächst und vor allem beansprucht, *mathematisch* (genauer: *analytisch*) zu sein, von Geschichte, zumal in begründender Absicht, überhaupt die Rede ist. Ich werde hierfür im nächsten Teil eine Erklärung zu geben suchen.

Die hier vorgestellte Episode aus Lagranges früher Zeit ist bemerkenswert, weil sie den AFE-Charakter der KMN, wie er eingangs als dominierend bis ins 19. Jahrhundert hinein behauptet wurde[618], offenkundig an mehreren Stellen in Frage stellt. Der *essentialistische* Zug wird dadurch fraglich, daß die verwendeten Basiskonzeptionen (Aktion, Moment) auf keine erkennbare Art und Weise ontologische Gegebenheiten und kausale Relationen der Natur repräsentieren. Euler und Maupertuis hatten sich bemüht, diesen Zug durch ‚metaphysische Anbindungen' des Aktionsbegriffs, der in ihrem Prinzip der kleinsten Wirkung verwendet wurde, zu retten. Bei Lagrange kann von solchen Bemühungen keine Rede mehr sein: Er führt weder metaphysische noch ‚direkte'[619] empirische Evidenzen an, um Konzepte wie Aktion und Moment als ‚erklärend' im weitesten Sinne auszuweisen. Weil er solche Evidenzen offenkundig nicht sieht, kann er auch umstandslos von dem einen Konzept (verbunden mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung) zu dem anderen Konzept (verbunden mit dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten) wechseln — noch bei Euler wäre dies undenkbar gewesen.[620] Fundamentalismus und Axiomatisierungsverständnis der KMN werden insofern problematisch, als die Wahrheit der verwendeten analytischen Prinzipien zwar unterstellt, aber *nicht einsichtig* gemacht wird und diese Prinzipien selber nicht argumentativ *begründet* werden. Die empirische Verifikation der deduktiven Folgerungen reicht bekanntlich nicht aus, um die Wahrheit der Prämisse zu zeigen, aber deren Wahrheit wird auch nicht durch schrittweise Induktion oder ‚höhere' Intuition vermittelt.[621]

[617] Näheres in Pulte 1989, S. 255f.

[618] Vgl. Kap. II, Teil 2.2.

[619] Damit meine ich solche Verweise auf Aktion oder Moment, die diese als bevorzugte Größen der Bewegungserklärung rechtferigen würden. ‚Mittelbar' empirisch begründet sind diese Größen insofern, als sie die Deduktion empirisch prüfbarer mechanischer Sätze erlauben.

[620] Mit Blick auch auf diese Verwendung mathematischer Basiskonzepte habe ich an anderer Stelle Lagranges Position als ‚mathematischen Instrumentalismus' (in Abgrenzung von Eulers ‚materietheoretischem Essentialismus') bezeichnet (Pulte 1989, S. 238f.). Ich bin nunmehr der Auffassung, daß der Begriff ‚Instrumentalismus' zumindest *differenzierter* auf Lagrange angewandt werden muß, um unerwünschte Konnotationen (Beliebigkeit und fehlender ‚Realitätsgehalt' theoretischer Sätze und Begriffe) zu vermeiden. Ich komme hierauf zurück (s. Teil 5.3, Anm. 659).

[621] Vgl. Kap. I, Teil 2.2, Forderungen *(ii*)* und *(iii*)*.

Vom KMN-Standpunkt aus sind Lagranges Axiomatisierungsversuche also problematisch, und die weitere Untersuchung wird zeigen, daß Lagrange hier später eine Kurskorrektur *im Sinne* der KMN vollzieht.[622] Es wäre jedoch selbst für seine frühen Axiomatisierungsversuche falsch, anzunehmen, daß hier der ‚wissenschaftstheoretische Kern' der KMN, nämlich ihr *Prinzipiencertismus*, zur Disposition gestellt würde. Da ich in Lagranges Sicht der Axiomatisierungsproblematik zwischen den frühen Arbeiten und der ersten Auflage der *Méchanique Analitique* keinen Unterschied sehe, werde ich hierauf am Ende des nächsten Teils zusammenfassend eingehen.

IV.5.2 Die Argumentation der *Méchanique Analitique*

In der *Méchanique Analitique* präsentiert Lagrange das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten – wie bereits in den *Recherches* von 1764 und in einer späteren Arbeit[623] – als *einziges* Axiom — sozusagen als ‚Krönung' eines Werkes, das seinerseits „alle Anstrengungen, die im 18. Jahrhundert gemacht wurden, um eine rational organisierte Mechanik zu entwickeln, vereinheitlicht und krönt"[624]. Lagrange selbst bezeichnet es in der *ersten* Auflage[625] als „eine Art Axiom der Mechanik [une espèce d'axiome de Méchanique]"[626] und bringt damit zugleich dessen wissenschaftstheoretischen Status (‚Axiom') wie auch ein gewisses Unbehagen (‚eine Art') bezüglich der Verwendung dieses Titels, der traditionell eben nur *evidenten*[627] Sätzen zukommt, zum Ausdruck. Diese Spannung wird näher zu untersuchen sein. Doch zunächst zum Aufbau des Werkes:

Lagrange behandelt Statik und Dynamik formal getrennt in zwei Teilen. Im ersten Teil führt er sein Axiom historisch ein als ein Prinzip, das „die ganze Einfachheit hat, welche man bei einem Fundamentalprinzip wünschen kann"; es erscheint ihm „nicht nur an sich sehr einfach und allgemein, sondern es hat auch den ausserordentlichen Vorteil vor allen anderen voraus, dass es sich in eine allgemeine Formel übersetzen lässt, welche alle Probleme enthält, die man über das Gleichgewicht der Körper aufstel-

[622] Vgl. Teil 5.3.

[623] Lagrange 1780; s. hierzu näher Panza 1991/92 I, S. 101f.

[624] Dugas 1955, S. 332.

[625] Ich betone, daß sich die folgenden Ausführungen nur auf *diese* Auflage beziehen, weil sich Lagranges Haltung zur Frage der Axiomatisierung der Mechanik später anders darstellt.

[626] Lagrange 1788, S. 12.

[627] Lagrange selbst macht verschiedentlich deutlich, daß er Evidenz als wichtige Eigenschaft von Axiomen betrachtet; s. z.B. ebd., S. 4 (im Zusammenhang mit Archimedes), vgl. auch Teil 5.3.

len kann"[628]. Im zweiten Teil kombiniert er „das gleiche Prinzip [ce même Principe]"[629] mit D'Alemberts, wodurch er eine „vergleichbare Methode für die Probleme der Dynamik, und auch mit den gleichen Vorteilen"[630] erhält. Man kann daher mit Lagrange das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten als *ein* dynamisches auffassen, aus dem das statische durch Spezifizierung (mit verschwindenden Trägheitskräften) hervorgeht. Die Trennung von Statik und Dynamik ist dann, wie auch die Entstehungsgeschichte des Werkes belegt, vor allem eine *didaktische*. Lagranges Axiom kann für ein System mit Massen $m_1, \ldots, m_n$, die Kräften $\underline{F_i} = (X_i, Y_i, Z_i)$ unterliegen, auf folgende allgemeine Form gebracht werden:[631]

$$\sum_{i=1}^{n}\left[\left(X_i - m_i\frac{d^2x_i}{dt^2}\right)\delta x_i + \left(Y_i - m_i\frac{d^2y_i}{dt^2}\right)\delta y_i + \left(Z_i - m_i\frac{d^2z_i}{dt^2}\right)\delta z_i\right] = 0. \qquad (2)$$

Auf diese Beziehung läßt sich nach Lagrange „die ganze Theorie der Dynamik zurückführen", wobei die Bestimmung der jeweiligen Bewegung zu einer „Sache des bloßen Kalküls" werde.[632] Wie schon 1764 und in einer späteren Arbeit, leitet er aus ihr den Schwerpunkt- und Flächensatz sowie (für zeitunabhängige Zwangsbedingungen) das Prinzip der *vis viva*-Erhaltung her. Er integriert jedoch nunmehr unter der Voraussetzung, daß dieser Erhaltungssatz gilt, auch das Prinzip der kleinsten Wirkung in allgemeiner Form — eine „sehr bemerkenswerte Eigenschaft der Bewegung"[633], aber eben „nicht ein metaphysischer Grundsatz, sondern ein einfaches und allgemeines Resultat"[634]. In dieser engen Form, gebunden an die Voraussetzung der *vis viva*-Erhaltung, wird das Prinzip der kleinsten Wirkung in der Folge für fast ein Jahrhundert kanonisiert und dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten untergeordnet. Schließlich sei noch hervorgehoben, daß Lagrange aus seinem Axiom auch die nach ihm benannten Bewegungsgleichungen herleitet[635] — ein wichtiges mathematisches Instrument in der weiteren Entwicklung der Dynamik. Zusammenfassend — und ohne auch nur auf die wichtigsten Teile der *Méchanique Analitique* näher eingehen zu können — kann man sagen,

[628] Lagrange 1788, S. 10 und S. 12; Übers. nach Lagrange 1887, S. 18f. und S. 20. Diese Übersetzung der *zweiten* Auflage wird herangezogen, wenn Übereinstimmung mit den zitierten Passagen der ersten Auflage feststellbar ist; andernfalls handelt es sich um meine Übersetzungen.

[629] Ebd., S. 10.

[630] Ebd., S. 181.

[631] Lagrange 1788, S. 200, vgl. auch 1811/15 I, S. 258 bzw. 1853/55 I, S. 274. Aus Einfachheitsgründen und in Hinblick auf die weitere Diskussion (vgl. Kap. VI) wähle ich diese leicht modernisierte Form der Darstellung; für Details s. Pulte 1998, S. 164.

[632] Lagrange 1788, S. 216.

[633] Lagrange 1788, S. 211. Die dortige Form entspricht Gleichung Gl. *(1)* in Teil 5.2.

[634] Ebd., S. 214.

[635] Ebd., S. 216-232; zur Erläuterung s. Dugas 1955, S. 342f.

daß dieses Werk in der Tat eine Organisation der Sätze leistet, die die verschiedenen Programme der rationalen Mechanik bis zum Ausgang des 18. Jahrhunderts hervorgebracht haben: Sie schließt die systematische, theorieförmige Zusammenfassung der akzeptierten Resultate der Mechanik ab. Eine solche Integration ist eine zwingende Forderung des mechanischen Euklidianismus und *mußte*, wie ich in den vorhergehenden Teilen dargelegt habe, eine ‚Integration von unten' sein, weil *eine* allgemeinverbindliche wissenschaftliche Metaphysik, die eine ‚Integration von oben' ermöglicht hätte, nicht existierte. Lagranges Werk leistet diese Systematisierung auf eine mathematisch großartige Weise. Aber was ist, vom Standpunkt der KMN betrachtet, der wissenschaftstheoretische Preis?

Die Beantwortung dieser Frage setzt eine Klärung des Wissenschafts-, insbesondere des Axiomatisierungsverständnisses, das Lagranges frühen Arbeiten und der *Méchanique Analitique* zugrundeliegt, voraus. Weder in den älteren Arbeiten noch in Lagranges Hauptwerk finden sich hierzu explizite Stellungnahmen, die im weitesten Sinne ‚philosophisch' zu nennen wären; die *Méchanique Analitique* ist jedoch insofern aufschlußreich, als ihr Autor sich hier genötigt sieht, dem Leser den „gänzlich neuen" Plan des Werkes vorzustellen:[636]

> Es giebt bereits mehrere Werke über Mechanik, aber der Plan dieses Werkes ist gänzlich neu [entiérement neuf]. Ich habe mir vorgenommen, die Theorie der Mechanik oder die Kunst, die darauf sich beziehenden Probleme zu lösen, auf allgemeine Formeln zurückzuführen, deren einfache Entwicklung alle für die Lösung jedes Problems notwendigen Gleichungen ergiebt. [...] Dieses Werk wird übrigens noch einen anderen Nutzen haben, es wird, um die Lösung der mechanischen Fragen zu erleichtern, die verschiedenen Prinzipe vereinigen und unter einen Gesichtspunkt stellen, und es wird die gegenseitige Verbindung und Abhängigkeit derselben sowie ihre Richtigkeit und Ausdehnung zeigen. [...]
> Man wird in diesem Werk keine geometrischen Figuren finden. Die Methoden, welche ich auseinandersetze, erfordern weder Constructionen, noch geometrische oder mechanische Betrachtungen [raisonnemens géométriques ou méchaniques], sondern nur algebraische, einem regelmässigen und gleichförmigen Gange [une marche réguliere & uniforme]. Alle, welche die Analyse lieben, werden mit Vergnügen sehen, dass die Mechanik ein neuer Zweig derselben wird, und werden mir Dank wissen, dass ich die Herrschaft derselben in dieser Weise ausgedehnt habe.

Diese ‚klassischen' Worte Lagranges sind häufiger zitiert als in ihrem historisch-systematischen Kontext interpretiert worden. Vier Aspekte sollen hier beleuchtet werden:

Da ist *zunächst* Lagranges Verzicht auf Geometrie (‚keine geometrischen Figuren') und die explizite Beschränkung auf algebraische und analytische Methoden. Da es ihm darum geht, die Analysis auf Algebra in dem Sinne zu ‚reduzieren', so daß Infinitesi-

[636] Lagrange 1788, S. vf. ; Übers. nach Lagrange 1887, S. V. Man beachte, daß diese *Mechanik* selbst auf „mechanische Betrachtungen" noch verzichten zu können glaubt.

malien durch eine Theorie der Potenzreihen eingeführt und man sie „als sicheres und bequemes Mittel anwenden [kann], um die Beweise abzukürzen und zu vereinfachen“[637], und da er andererseits in der Mechanik von Infinitesimalien als etwas ‚Gegebenem' Gebrauch macht, kann man im weiteren Sinne von *einer analytischen* Methode sprechen. Lagranges *Méchanique Analitique* ist demnach, anders als Eulers *Mechanica*[638] *analytisch* in dem methodologischen Sinne, daß sie beansprucht, mit dieser mathematischen Methode *allein* eine Mechanik entwickeln zu können: Sie beansprucht, einem dezidierten *Methodenmonismus* zu folgen.[639]

Dieser Methodenmonismus ist bemerkenswert, weil wir heute wissen, daß Lagrange im ‚Entdeckungskontext' keineswegs auf geometrische Betrachtungen verzichtet, sondern diese im Gegenteil als wichtig erachtet hat.[640] Er ist aber auch im Rechtfertigungs- bzw. Begründungskontext nicht so zu verstehen, als halte Lagrange die Sätze der Geometrie für weniger sicher als die der Analysis und fordere *daher*, von ihnen keinen Gebrauch zu machen.[641] Nur der Allgemeinheitsanspruch, mit dem hier Mechanik betrieben wird (Reduktion *aller* ihrer Sätze auf ‚allgemeine Formeln' und Darstellung ‚unter einem Gesichtspunkt'), kann diesen Monismus erhellen: Lagrange reflektiert den Stand der Wissenschaftsentwicklung und kommt zu dem Schluß, daß nur analytische Prinzipien (und daher auch nur die analytische Methode) die angestrebte *Vereinheitlichung* zu leisten vermögen. Die Geometrie ist hierzu untauglich. Er tritt keinen ‚Nichtexistenzbeweis' für diese implizite Behauptung an, d.h. er zeigt nicht, daß eine in *diesem* Sinne ‚synthetisch' verfahrende einheitliche Mechanik *nicht* möglich ist, sondern nur, daß sie analytisch zu erreichen ist. Dies rechtfertigt jedoch noch nicht eine Kritik

[637] Lagrange 1853/55 I, S. XIV bwz. 1887, S. VII. Diese Bemerkung findet sich erst in der zweiten Auflage der *Méchanique Analitique*, entspricht aber auch Lagranges früherer Auffassung. Seine Arbeiten zur algebraischen Grundlegung der Analysis gehen bis auf das Jahr 1772 zurück; vgl. Grabiner 1990.

[638] Vgl. Teil 4.1.

[639] Stuloff (1968, S. 72) spricht eher affirmativ von „Methodenreinheit“.

[640] Vgl. Grattan-Guinness 1981a, S. 679, für eine entsprechende, durch Guyton de Morveau und Maurice überlieferte, Stellungnahme Lagranges.

[641] Vielmehr läßt Lagrange die Geometrie auch als mathematische Begründungsinstanz zu. So heißt es in der zweiten Ausgabe der *Méchanique Analitique* (vgl. Zitat 397 oben) vollständig: „Wir haben die gewöhnliche Bezeichnung der Differentialrechnung beibehalten, weil sie dem System der unendlich kleinen Grössen entspricht, das in diesem Werke übernommen [adopté — nicht ‚angenommen', wie es in Servus' Übersetzung heißt] worden ist. Wenn man den Geist dieses Systems recht begriffen hat, und wenn man sich von der Genauigkeit seiner Resultate durch die geometrische Methode der ersten und letzten Gründe, *oder* [meine Hervorhebung, H.P.] durch die analytische Methode der derivierten Funktionen überzeugt hat, so kann man die unendlich kleinen Grössen als ein sicheres und bequemes Mittel anwenden [...]. In gleicher Art kürzt man die Beweise der Alten durch die Methode der untheilbaren Grössen ab“ (Lagrange 1853/55 I, S. XIV bzw. 1887, S. VII).

seines analytischen Zugangs von einer Warte des ‚Als ob', d.h. von einem normativen Standpunkt, der *allein* das synthetische Verfahren[642] anerkennt und dabei — ohne einen entsprechenden Nachweis — so tut, als könne auf diesem Wege begründet erreicht werden, was Lagrange ohne Begründung (und damit letztlich: gar nicht) erreicht habe.[643]

Zweitens ist festzustellen, daß Lagranges Geometrieverzicht Voraussetzung für (aber nicht gleichbedeutend mit) seinem Anspruch ist, die Mechanik zu einem ‚Zweig der Analysis' zu machen. Man kann seine wiederholte Rede von einer ‚Reduktion' der Mechanik auf die Analysis heute wohl überhaupt nur noch *genetisch* verstehen als Artikulation eines fortgeschrittenen mechanischen Euklidianismus, der in seiner formellen Entwicklung so weit gekommen ist, daß er sich nicht nur als Teil der Mathematik in dem Sinne begreift, daß die Sicherheit ihrer Sätze und deren Zusammenhang in einem System (kurz: daß seine *Wissenschaftlichkeit*) mathematisch begründet ist — dies ist ja in der KMN generell der Fall —, sondern in dem (noch) stärkeren Sinne, daß die Mathematik eine Erfahrungswissenschaft begründen kann, *ohne* selbst noch explizit auf *Erfahrung* rekurrieren zu müssen: Die intrinsische mathematische Struktur der Natur wird gleichsam abgebildet auf den mathematischen Kalkül, der seinerseits diese Struktur offenlegt. Diese vom modernen Standpunkt durchaus befremdliche Vorstellung Lagranges wird am deutlichsten in der Anlage seiner reduktionistischen Hierarchie: Die Mechanik soll reduziert werden auf Analysis, die Analysis soll reduziert werden auf eine Algebra der Potenzreihen; deren Untersuchung in der *Théorie des fonctions analytiques* wiederum führt mechanische Begriffe wie Geschwindigkeit und Beschleunigung („force accéleratrice") als rein funktionale, raum-zeitliche Größen ein.[644] Lagrange unternimmt hier den Versuch, die Symbole der abstrakten Algebra an konkrete, erfahrungsmäßig gegebene Bewegungen anzubinden und so als realitätsvermittelnd auszuweisen — ein Versuch, der vergleichbar ist mit Newtons genetischer Anbindung seiner Fluxionsrechnung an die mechanische Bewegung.[645] Es ist hier nicht erforderlich, auf diesen Versuch näher einzugehen, weil er zum Verständnis seiner Axiomatisierung der Mechanik im engeren Sinne nicht beiträgt. Es bleibt jedoch festzuhalten, was in diesem Kontext am deutlichsten zutage tritt: Lagrange ist offensichtlich der Überzeugung, mit seiner analytischen Darstellung der Mechanik eine Leistung gleichen Ranges vollbracht zu haben wie Descartes mit der Begründung der analytischen Geometrie. Den klarsten Beleg für eine Perpetuierung des Euklidianismus und, kritisch gewendet, für Lakatos' These, daß es sich dabei um ein Programm der ‚Trivialisierung der Erkenntnis' handelt, gibt er selbst mit der lapidaren Formulierung: „Man

[642] Wobei ‚synthetisch' sowohl im hier diskutierten mathematischen als auch in dem weiter unten diskutierten wissenschaftstheoretischen Sinne zu verstehen ist.

[643] Ich komme hierauf im Zusammenhang mit Mittelstraß' Kritik an Lagrange zurück; s. Teil 6.

[644] Lagrange 1797a, insbes. S. 223-226; s. hierzu näher Panza 1991/92, Part 2.

[645] Vgl. Kap. III, Teil 3.1.

kann also die Mechanik als eine Geometrie mit vier Dimensionen und die Analysis der Mechanik als eine Ausdehnung der geometrischen Analysis betrachten".[646]

Die bisherige Beschreibung und Analyse der Mechanik Lagranges und ihrer Programmatik impliziert bereits einen weiteren, *dritten* Aspekt, der — anders als der augenfällige Geometrieverzicht — in der Geschichtsschreibung der Mechanik weitgehend ignoriert wurde: Die *Méchanique Analitique* ist meines Wissens unter den großen Lehrwerken der rationalen Mechanik das einzige, das nicht zu Beginn Definitionen und Analysen von *Grundbegriffen* wie Raum, Zeit, Materie bzw. Masse und Kraft bereitstellt. Im wissenschaftstheoretischen Sinne verfährt das Werk also nur noch insofern synthetisch, als die verschiedenen Gesetze der Bewegung und Ruhe aus einem Prinzip deduziert werden, nicht aber in dem Sinne, daß auch die begrifflichen Voraussetzungen der Theorie zu Anfang dargelegt werden. Lagranges Methodenmonismus impliziert eben nicht nur die Ausschließung anderer *mathematischer* Methoden, sondern auch *außermathematischer* Methoden: Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Analysen und Rechtfertigungen der Grundbegriffe wie auch der Gesetze und praktischen Verfahren seiner Mechanik fehlen zu Beginn völlig, aufs Ganze gesehen fast vollständig. Die *Méchanique Analitique* unterscheidet sich hierin nicht nur von den früheren Werken eines Descartes, Newton oder Leibniz, sondern auch von den unmittelbaren Vorläuferwerken, d'Alemberts *Traité de dynamique* und Eulers *Mechanica* und *Theoria motus*:[647] Zu diesem Bruch zwingt das Ideal einer ‚rein analytisch' verfahrenden Mechanik.

Wie ist *viertens* angesichts dieses Ideals (und dessen behaupteter Originalität) zu erklären, daß Lagrange sowohl zu Beginn des statischen als auch des dynamischen Teils den *systematischen* Ausführungen längere *historische* Bemerkungen, von denen später u.a. Mach profitierte, vorausschickt? Zwar ist zurecht bemerkt worden, daß historische Exkurse in Lehrwerken dieser Zeit an der Tagesordnung waren[648] — Indikatoren eines aufkeimenden historischen Bewußtseins in den Naturwissenschaften und der Mathematik. Lagranges diesbezügliche Ausführungen gehen aber über die üblichen Darstellungen mit deren Heroisierungen großer Vorläufer, Traditionsbildungs- und Abgrenzungsbemühungen, oft auch der Betonung des eigenen ‚historischen' Ranges deutlich hinaus: Er gibt ausführliche Darstellungen der statischen Prinzipien seit der Antike und der dynamischen ab Galilei.[649] Im Vordergrund steht dabei von vornherein nicht so sehr die

[646] Lagrange 1813, S. 337.

[647] Man könnte sagen, daß es Lagrange um eine Aktualisierung der Newtonschen *Philosophiae naturalis principia mathematica* geht, ihm dabei aber der traditionelle Gegenstand der *philosophia naturalis* (unter der Dominanz der *principia mathematica*) abhanden kommt.

[648] „During the last quarter of the eighteenth century scientists paid considerable attention to the history of science. [...] Lagrange shared that uncritical [historical] curiosity" (Sarton 1944, S. 481).

[649] S. Lagrange 1788, S. 1-12 und S. 158-189.

Lösung konkreter, empirisch relevanter Probleme, sondern die Entwicklung der Mechanik als ‚Prinzipienwissenschaft': Lagrange breitet die Vielzahl der akzeptierten Prinzipien vor dem Leser aus und entwickelt seine Geschichte letztlich auf das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit hin[650], das durch die großen Autoritäten Galilei und Descartes gestützt wird.[651] Indem er darlegt (bzw. glaubt, darlegen zu können), „wie die Ideen, die das meiste zur Erweiterung und Vervollkommnung dieser Wissenschaft beigetragen haben, stufenweise zur Ausbildung gelangt sind"[652], entsteht vor dem Auge des Lesers eine historische Entwicklung, die *vernünftig* ist und sich auf ein vernünftiges Ende hin bewegt: die *Méchanique Analitique*. Diese Geschichtsschreibung verstehe ich daher vor allem als ‚Surrogat' für metaphysische oder empirische Begründungen seines Axioms, die im Rahmen einer strikt analytisch verfahrenden Mechanik nicht möglich sind. Beispielhaft ist sein zugleich historischer wie systematischer Abschluß der Statik: „Im allgemeinen glaube ich voraussagen zu können, dass alle allgemeinen Prinzipe, welche man noch in der Lehre vom Gleichgewicht entdecken könnte, lediglich dieses Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten sein werden, nur anders betrachtet [envisagé] und anders ausgedrückt".[653]

Die bisherigen Belege und deren Analyse sollten deutlich gemacht haben, daß trotz der AFE-Probleme der Lagrangeschen Axiomatisierung[654] von einer Auflösung des Prinzipiencertismus der KMN in Lagranges frühen Arbeiten und der *Méchanique Analitique* nicht die Rede sein kann, obwohl die Prinzipien ihren traditionellen essentialistischen und fundamentalistischen Charakter einbüßen. Wahrheit und Sicherheit der Prinzipien (der kleinsten Wirkung zu Beginn, der virtuellen Geschwindigkeiten später) manifestieren sich jedoch für ihn nurmehr in ihrer *syntaktischen* Funktion innerhalb der Theorie. In der beliebten Fließmetapher[655] könnte man dies so darstellen: Wahrheit durchdringt bereits das Gesamt akzeptierter mechanischer Sätze (dies ist die Selbstgewißheit der Mechanik, die Lagrange mit Euler teilt), und ihre Vermittlung ‚nach unten' wird garantiert durch den Variationskalkül; deren Quelle (Axiom) ist daher weniger interessant als Lieferant ‚materialer' Wahrheit denn dadurch, daß sie in Verbund mit diesem Kalkül die ‚Wahrheitsverteilung' regelt. Die Quelle ist also deshalb (und nur deshalb) bevorzugt, weil sie sich gleichsam an der richtigen *Stelle* befindet, von der aus

[650] Die Darstellung zur Statik schließt ab mit der Feststellung, daß dieses Prinzip sehr einfach und allgemein sei und alle Probleme des Gleichgewichts löse (Lagrange 1788, S. 12). Die Darstellung zur Dynamik widmet dem Prinzip breiten Raum (ebd., S. 179-182) und schließt mit einem Überblick über ‚neuere' Prinzipien, die aus dem der virtuellen Geschwindigkeiten abgeleitet werden und daher nur „Resultate", keine „ursprünglichen Prinzipien [principes primitifs]" sind (ebd., S. 182).

[651] Ebd., S. 8-12.

[652] Ebd., S. 159f. bzw. Lagrange 1887, S. 184; gemeint ist hier konkret die Dynamik.

[653] Lagrange 1788, S. 11; Übers. (mit Änderung) nach Lagrange 1887, S. 20.

[654] Vgl. das Ende von Teil 5.1.

[655] Vgl. Teil 2.5.

alle Sätze deduktiv erreicht werden können (Dies ist der Essentialismusverzicht, der Lagrange von Euler unterscheidet).

Mit Lagranges frühen Arbeiten und der *Méchanique Analitique* erreicht die Formalisierung der Mechanik einen Höhepunkt und die‚Schwerpunktverlagerung nach unten' einen Tiefpunkt.[656] Mathematische Prinzipien einer Wissenschaft werden von inhaltlichen Aussagen über Gegenstände zu formalen, ‚semantisch entladenen' Axiomen: Dies ist es, was am Ende des 18. Jahrhunderts in der rationalen Mechanik geschieht, dies ist es, was am Ende des 19. Jahrhundert in der Geometrie geschieht.[657] Der entscheidende Unterschied ist, daß die Mechanik die Möglichkeit *alternativer gleichberechtigter* Axiomatisierungen ihres Bereiches noch längst nicht in den Blick nimmt:[658] *eine Natur, eine Axiomatisierung* bleibt über Lagrange hinaus noch bis Mitte des 19. Jahrhunderts ihr Dogma. Auch in diesem Sinne ist es berechtigt, weiterhin von einem ‚axiomatisch-deduktiven' (und nicht von einem ‚hypothetisch-deduktiven') Wissenschaftsverständnis zu sprechen.

IV.5.3 Evidenzprobleme und ‚Gummi-Euklidianismus': Der späte Lagrange und die Lagrange-Rezeption

Der ‚nichtessentialistische' Zug der Lagrangeschen Wissenschaftsauffassung impliziert eine instrumentalistische Haltung gegenüber theoretischen Begriffen, der konsequent weitergeführt, zu einer instrumentalistischen oder zumindest konventionalistischen Interpretation mechanischer Axiome und damit zu einer Auflösung des mechanischen Euklidianismus selber führen *müßte*.[659] Aber Lagrange ist wissenschaftstheore-

[656] Vgl. insbes. die Teile 2.5 und 2.6.

[657] Man vergleiche Hilberts *Grundlagen* (Hilbert 1899).

[658] Lagranges ‚früher' Wechsel vom Prinzip der kleinsten Wirkung zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten deutet eine solche Möglichkeit noch *nicht* an, sondern nur, daß der Übergang von einer (als ‚defizitär' erkannten) Axiomatisierung zu der (offenbar als vollständig und richtig erkannten) Axiomatisierung aufgrund der ‚semantischen Entladung' analytischer Prinzipien leichter vollzogen werden kann. Lagrange verwendet in der *Méchanique Analitique* gerade deshalb so große Sorgfalt auf die Herleitung seines älteren Axioms aus seinem jüngeren, weil er zeigen will, daß erst dieses jüngere die *wirkliche* Grundlage der Mechanik darstellt. Die permanente Suche nach *verbesserten* Grundlagen ist ja geradezu ein Markenzeichen des Euklidianismus (vgl. Lakatos 1982 II, S. 4-8).

[659] Ich habe an anderer Stelle, um Lagranges fortgesetztem Euklidianismus ‚deskriptiv' gerecht zu werden, vorgeschlagen, zwischen einem ‚naturphilosophischen Instrumentalismus' I_1, der sich gegenüber dem Problem der Auswahl von Basisbegriffen einer wissenschaftlichen Theorie instrumentalistisch verhält (d.h. verschiedene Sätze von Basisbegriffen als möglich anerkennt und eine Auswahl nach Gesichtspunkten wie formaler Einfachheit, Anwendungsfreundlichkeit etc. trifft, ohne ihnen Realitätsgehalt zuzuerkennen), und einem ‚wissenschaftstheoretischen Realis-

tisch nicht konsequent, und im letzten Teil wurden einige Züge seines Denkens ('Anbindung' von Algebra und Mechanik, historische Begründung) aufgewiesen, die als Indizien seiner Inkonsequenz gewertet werden können. Sie beseitigen eine Spannung *nicht*, die in dem Werk selber offen zutage tritt: Es reicht nicht aus, eine allgemeine und abstrakte Formel wie *(2)* ohne weitere Begründung als ‚eine Art Axiom' auszuweisen, denn eine solche Formel empfiehlt sich nicht als evidenter Satz, von dem aus eine ganze Theorie ohne weitere Umstände entwickelt werden könnte. Lagrange selber hat dies offenbar gesehen, denn in der zweiten Auflage der *Méchanique Analitique* hält er zwar an dem Titel ‚Axiom' für sein Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten fest[660], konstatiert jedoch auch: „Was die Natur des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten betrifft, so muss man zugeben, dass dieses Prinzip an sich nicht evident genug ist, dass es als ursprüngliches Axiom hingestellt werden kann [...]".[661]

Lagrange realisiert hier, vermutlich angeregt durch eine Arbeit Fouriers, die die allgemeine, Lagrangesche Form des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten erst noch *beweisen* soll[662], daß eine Mechanik, die beansprucht, ohne metaphysische, physikalische, geometrische oder selbst ‚mechanische' Intuition auszukommen[663], schlechter-

mus' I_2, der diese instrumentalistische Sicht auf zentrale Sätze einer wissenschaftlichen Theorie oder die Theorie selbst ausdehnt, zu unterscheiden (Pulte 1998, S. 158f., vgl. Teil 5.1, Anm. 30). Ein konsequenter Instrumentalismus I_1, der (wie im Falle Lagranges) nicht durch eine adäquate Theorie der Repräsentation (wie sie etwa Heinrich Hertz mit seiner ‚Bildtheorie' zu geben sucht) ergänzt wird, *muß* nach meiner Auffassung zu einem Instrumentalismus I_2 führen. Aber er zieht diesen Schluß nicht, und dies ist der Grund, warum die Unterscheidung von I_1 und I_2 auf ihn angewandt werden kann und sollte, um deutlich zu machen, daß Lagrange weiterhin einem euklidianistischen Wissenschaftsideal anhängt.

[660] Lagrange 1853/55 I, S. 27.

[661] Ebd., S. 23; Übers. nach Lagrange 1887, S. 20.

[662] Fourier hat im Jahre 1798 im „Journal de l'École Polytechnique" einen Reigen von Beweisversuchen zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten eröffnet, und zwar mit Hinweis auf dessen herausragende Bedeutung in Lagranges Hauptwerk. An einige historische Bemerkungen zum Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, beginnend mit Archimedes, schließt er folgendermaßen an: „Depuis, la mécanique a été rapidement perfectionnée: cette science n'a plus aujourd'hui de difficultés qui lui soient propres; et considérée dans ses rapports les plus étendus, elle se réduit à une question de calcul. Ce résultat, l'un des plus beaux que l'on ait obtenus dans les sciences exactes, est l'objet de la mécanique analytique. L'auteur de ce grand ouvrage a vu dans la proposition long-temps stérile de *Bernoulli*, une vérité primordiale, dont les conséquences les plus fécondes découlent sans exception et sans effort.

Maintenant que l'importance du théorème est bien établie, il est temps de suppléer au silence de l'inventeur, et de reconnaître si le principe des vîtesses virtuelles peut être fondé sur des preuves générales, exemptes d'obscurité et d'incertitude. Je me suis proposé cette recherche [...]" (Fourier 1798, S. 21). Lagranges erster Beweisversuch erscheint im gleichen Heft des „Journal", ebenso ein Versuch de Pronys (Lagrange 1798, de Prony 1798).

[663] Vgl. Teil 5.2, Zitat 636.

dings keinen Anspruch darauf machen kann, über ein Axiom im traditionellen Sinne zu verfügen. Lagranges Ausweg aus dem Dilemma ist derjenige, der bereits früher[664] als *(E2)*-Typus ‚wissenschaftsimmanenter' Begründung charakterisiert wurde: Er unternimmt den Versuch, sein Prinzip mit Hilfe sogenannter ‚einfacher Maschinen' und mechanischer Prozesse zu *beweisen*. Den ersten Beweis („démonstration") gibt er bereits im gleichen Jahr wie Fourier (1798) und übernimmt ihn in die zweite Auflage der *Méchanique Analitique* (1811/13).[665] Dieser Beweis wurde von verschiedenen Gesichtspunkten aus angegriffen und befriedigte schließlich Lagrange selbst nicht mehr: Einige Monate vor seinem Tod gab er eine letzte Probe seines euklidianistischen Bemühens um eine strenge Begründung der Mechanik und entwickelte einen zweiten Beweis, der in die zweite Auflage der *Théorie des fonctions analytiques* (1813) aufgenommen wurde.[666]

Ich werde diese Beweisversuche später näher untersuchen, denn sie erweisen sich als wichtig für die Auflösung des mechanischen Euklidianismus.[667] Hier soll nur darauf hingewiesen werden, daß Lagranges spannungsreiche Einführung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten als ‚Axiom' der *Méchanique Analitique* eine Vielzahl gleichgelagerter Beweisanstrengungen initiierte: Fourier (1798), de Prony (1798), Laplace (1799), Lazare Carnot (1803), Ampère (1806), Augustin Cournot (1827), Gauß (1829), Poisson (1833), Ostrogradsky (1835, 1838) und Poinsot (1806, 1838, 1846) seien hier nur als prominenteste Beispiele genannt. Diese Versuche zielten ab auf eine bessere Begründung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten, manche auch auf eine weitere, über die *Méchanique Analitique* noch hinausgehende Ausdehnung seines Anwendungsbereiches (etwa auf verallgemeinerte Zwangsbedingungen in Form von Gleichungen *und* Ungleichungen). Die Begründungsversuche waren meistens vom Typus *(E2)*: Sie sollten Lagranges Axiom auf das Hebelgesetz, die Parallelogrammregel der Kräfte oder beide ‚reduzieren' (Fourier, de Prony, Laplace, Carnot, Ampère, Cournot, Poisson) oder als Implikation einer quasi-geometrischen Analyse der Begriffe ‚mechanisches System', ‚Kraft' und ‚Gleichgewicht' erweisen.[668]

Die verschiedenen Beweis- und Begründungsversuche zeigen eine „Prinzipienkrise"[669] an, die durch die *Méchanique Analitique* herbeigeführt wurde. Da diese Versuche mathematikhistorisch gut dokumentiert sind[670], ist es nicht erforderlich, hier im

[664] Vgl. Teil 2.6.

[665] S. Lagrange 1798 bzw. 1853/55 I, S. 23-26. Zu den Metamorphosen der Schreibweise des Titels s. Sarton 1944. Ich behalte hier die Schreibweise des Titels der 1. Auflage durchweg bei.

[666] S. Lagrange 1813, S. 350-357 bzw. 1847, S. 377-385.

[667] Vgl. hierzu näher Kap. VI.

[668] Für Poinsot etwa war dies der Weg, um das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten als ein „einfaches Korollar" zu erhalten (Poinsot 1806, S. 233).

[669] Vgl. Bailhache 1975, S. 7.

[670] Vgl. insbes. Bailhache 1975, Benvenuto 1991 und Grattan-Guinness 1990.

einzelnen auf sie einzugehen. Herauszuheben ist jedoch, wofür sie wissenschaftstheoriegeschichtlich stehen: Bei allen diesen Versuchen geht es um *größere* Ausdehnung, *bessere* ‚Beweise', *sicherere* Grundlagen und *höhere* Evidenz des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten.[671] Wie der späte Lagrange, wandten auch die Mathematiker der ersten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts ihre avanciertesten technischen Mittel auf, um dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten die Evidenz eines *mathematischen* Grundsatzes zu *vermitteln*, die es ‚freistehend' nicht beanspruchen konnte. Die ‚Trivialisierung der Erkenntnis', die mit Lagranges mechanischem Euklidianismus einhergeht, stößt hier offenkundig an ihre Grenzen. Ich interpretiere diese Versuche, mich des Bildes von Lakatos bedienend, als eine krisenhafte Phase des „Gummi-Euklidianismus", weil es ihnen darum geht, die „Grenzen der Selbst-Evidenz auszudehnen"[672].

Gauß, auf den ich hier zuletzt hinweisen möchte, scheint auf den ersten Blick eine Ausnahme von dieser generellen Entwicklung zu markieren: Im Jahre 1829 annonciert er sein Prinzip des kleinsten Zwanges als ein — wie es im Titel seiner kurzen Note heißt — „neues allgemeines Grundgesetz der Mechanik"[673] und geht dabei auch auf Lagranges Formulierung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten ein. Ungeachtet seines Anspruchs auf Neuheit weist er gleich zu Beginn darauf hin, daß es „kein neues Grundprincip für die Bewegungs- und Gleichgewichts-Lehre geben kann, welches der Materie nach nicht in jenen beiden [Lagranges Prinzip für die Statik in Verbindung mit d'Alemberts für die Dynamik] schon enthalten und aus ihnen abzuleiten wäre"[674], merkt jedoch kritisch an, daß Lagranges Axiom zwar „so der Stellvertreter aller andern Principe ist, ohne jedoch das Creditiv dazu so unmittelbar aufzuweisen, daß es sich, so wie es nur ausgesprochen wird, schon von selbst als plausibel empföhle"[675]. Er zieht nun aber hieraus nicht den Schluß, daß ein *neuer* Beweis des Prinzips gegeben werden müsse, der dieses Evidenzproblem beseitigt, noch fordert er auf, es als eine beliebige Setzung zu akzeptieren[676], denn es enthält ja ‚der Materie nach' die gesamte Mechanik.

[671] Sogar Poinsot, der das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten als überflüssig für eine befriedigende deduktive Organisation der Mechanik ansah, bestand auf einem „klaren und strengen" Beweis desselben (Poinsot 1806, S. 216).

[672] Lakatos 1978 II, S. 7; die deutsche Übersetzung (vgl. Lakatos 1982 II, S. 7) ist hier ungenau. Ich werde in Kap. VII, Teil 5, zeigen, wie diese ‚Dehnung' genauer aussieht.

[673] S. Gauß 1829.

[674] Ebd., S. 232.

[675] Ebd., S. 232f.

[676] Jacobi hat Gauß später in dieser Weise wiedergegeben: „Diese Ausdehnung [des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten] zu beweisen, ist keineswegs unsere Absicht, wir wollen sie [sic!] vielmehr als ein Princip ansehen, welches zu beweisen nicht nöthig ist. Dies ist die Ansicht vieler Mathematiker, namentlich von *Gauss*" (Jacobi 1884, S. 15). Der Herausgeber A. Clebsch vermutet in einer Anmerkung zu dieser Passage, Gauss habe sich „in diesem Sinne mündlich zu *Jacobi* geäussert; ein hierüber niedergeschriebener Ausspruch desselben" sei nicht zu finden

Gauß' Lösung ist vielmehr, es durch das *logisch äquivalente*, aber intuitivere Prinzip des kleinsten Zwanges zu ersetzen oder vielmehr auf diesem Wege eine andere mathematische *Perspektive* auf jenes Prinzip zu eröffnen und ihm so zu Evidenz zu verhelfen: „Es wird allezeit interessant und lehrreich bleiben, den Naturgesetzen einen neuen vortheilhaften Gesichtspunkt abzugewinnen, sei es, daß man aus demselben diese oder jene einzelne Aufgabe leichter auflösen könne, oder daß sich aus ihm eine besondere *Angemessenheit* offenbare".[677]

Eine besondere ‚Angemessenheit' sieht Gauß in seinem Prinzip des kleinsten Zwanges ausgedrückt. Wie (zunächst) das Prinzip der kleinsten Wirkung[678] ein reines *Minimalprinzip*, scheint es die Bevorzugung einer bestimmten mathematischen Größe, des sogenannten ‚Zwanges', durch die Natur selber auszusagen. Gauß stellt am Ende seiner Note eine Analogie zu seiner Methode der kleinsten Quadrate her, der der Wissenschaftler bei Meßprozessen zu folgen habe:[679]

> Es ist sehr merkwürdig, daß die freien Bewegungen, wenn sie mit nothwendigen Bedingungen nicht bestehen können, von der Natur gerade auf dieselbe Art modificirt werden, wie der rechnende Mathematiker, nach der Methode der kleinsten Quadrate, Erfahrungen ausgleicht, die sich auf unter einander durch nothwendige Abhängigkeit verknüpfte Größen beziehen. Diese Analogie ließe sich noch weiter verfolgen, was jedoch gegenwärtig nicht zu meiner Absicht gehört.

Die ‚rechnende Natur': Hier findet Gauß die Evidenz und Sicherheit des Prinzips des kleinsten Zwanges und — *qua* logischer Äquivalenz — des Lagrangeschen Axi-

(ebd., S. 15, Anm. **). Eher anzunehmen ist jedoch auch, daß Jacobi hier Gauß' Hinweis auf das fehlende ‚Creditiv' (s.o.) des Lagrangeschen Axioms dergestalt mißinterpretiert (vgl. die Kommentierung zu Jacobi 1996, S. 10, Anm. 22). Jacobis Fehlrekonstruktion ist deshalb bemerkenswert, weil sie später in Machs einflußreicher *Mechanik* in (wiederum) schiefer Weise aufgegriffen wurde (Mach 1933, S. 68) und Gauß so — gegen die ‚Beweissucht' des 18. Jahrhunderts (vgl. Teil 2.8) — zum Vertreter der wahren, nämlich Machschen Auffassung erklärt wird. Aber Gauß — eine Übergangsfigur zur Moderne in Hinblick auf die Grundlagen der Geometrie — war kein ‚Moderner' in Hinblick auf die Grundlagen der Mechanik.

[677] Gauß 1829, S. 232. Beiläufig sei darauf hingewiesen, daß Gauß hier das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten in Verbindung mit D'Alemberts Prinzip, abweichend vom generellen Sprachgebrauch (vgl. Teil 4.2, Anm. 348), als ‚Naturgesetz' anspricht — vermutlich deshalb, weil er es als anderen Ausdruck seines eigenen Prinzips versteht.

[678] Auf dieses Prinzip weist Gauß ausdrücklich hin (ebd., S. 233). Eine Gemeinsamkeit mit seinem Prinzip sieht er auch darin, daß beide sowohl Statik als auch Dynamik umfassen. Der „Geist, einmal auf einem höhern Standpunct angelangt" (ebd., S. 233), fordere, die Statik als bloßen Spezialfall der Dynamik zu behandeln und beide Bereiche unter ein Prinzip zu bringen. Hier liegt allerdings, wie die Analyse der *Méchanique Analitique* gezeigt hat, kein wirklicher Differenzpunkt zu Lagrange vor.

[679] Ebd., S. 235. Gauß ist meines Wissens auch später nicht auf diese Analogie zurückgekommen.

oms, die ihm die *Méchanique Analitique* nicht gewährt. Gauß ist daher tatsächlich keine Ausnahme von der Praxis des ‚Gummi-Euklidianismus', sondern er dehnt nur die Grenzen der Evidenz in eine *andere* Richtung als die französischen Mathematiker: Naturanthropomorphie statt Begründungen vom *(E2)*-Typus.

Der Gummi-Euklidianismus in der Mechanik würde zu einem Vergleich mit der Geometrie einladen: Die Beweisversuche des Parallelenaxioms weisen ja ebenfalls ‚Evidenzdehnungen' auf, die in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts die Entwicklung alternativer Geometrien ermöglichen sowie die Separierung von physikalischer Geometrie einerseits und formalen Axiomatisierungen der verschiedenen Geometrietypen andererseits erzwingen.[680] Der Abschied vom klassischen Wissenschaftsverständnis erweist sich hier als ein langdauernder und schmerzlicher, aber wissenschaftlich außerordentlich fruchtbarer Prozeß — nicht anders in der Mechanik. Ich werde später untersuchen, welche Implikationen sich daraus für die innermechanische Grundlagenentwicklung ergeben. Die folgenden Punkte und Kapitel gelten jedoch zunächst philosophischen Bemühungen, die KMN zu ‚konservieren', und historiographischen Fragen, die die Entwicklung der KMN im 18. Jahrhundert betreffen.

[680] Vgl. hierzu insbes. Torretti 1978, Mainzer 1980 und Boi/Flament/Salanskis 1992.

IV.6 Mechanischer Euklidianismus und konstruktivistische ‚Mythen des wissenschaftshistorischen Geistes'

Die bisherige Rekonstruktion verfolgte den Zweck, die wissenschaftstheoretische Entwicklung der rationalen Mechanik von Newtons *Principia* (1687) bis zu Lagranges *Méchanique Analitique* (1788) in ihren wichtigsten Zügen aufzuzeigen und — unter der Prämisse eines mechanischen Euklidianismus als dominierender Wissenschaftsauffassung — zu erklären. Die Geschichte der Wissenschaftstheorie hat diesem Gegenstand bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt: Es fehlt für diesen Zeitraum zwar weder an detaillierten wissenschaftshistorischen Untersuchungen, die die konzeptuelle und mathematische Entwicklung der Mechanik zum Gegenstand haben, noch an isolierten wissenschaftstheoriegeschichtlichen Untersuchungen, die sich auf einen Newton, d'Alembert, Euler oder Lagrange beziehen, wohl aber an ‚synthetisierenden' Analysen, die versuchen, den Wandel des Wissenschaftsverständnisses der rationalen Mechanik in der Aufklärungszeit zu begreifen.

IV.6.1 Eine konstruktivistische Rekonstruktion

Eine neuere Ausnahme ist die Darstellung, die Jürgen Mittelstraß in *Neuzeit und Aufklärung*[681] und einigen späteren Arbeiten[682] gegeben hat. Ich will hierauf etwas näher eingehen, weil sie mir in einigen Punkten historisch und sachlich nicht zutreffend erscheint, weil sie eine historiographische Haltung (und Kritik) zum Ausdruck bringt, die mir problematisch zu sein scheint, und schließlich, weil sie von der Wissenschaftstheoriegeschichtsschreibung meines Wissens bis heute unwidersprochen hingenommen wurde. Sie sollte aber nicht als das ‚Amen' der Forschung gelten:

Mittelstraß präsentiert die nach-Galileische Mechanikentwicklung von Newton bis Lagrange als eine wissenschaftstheoretisch *degenerative*. Galileis entscheidende Leistung sei keine wissenschaftliche, sondern eine wissenschaftsheoretische[683], nämlich die methodologische Einsicht, daß dem empirischen Teil der Physik ein getrennter protophysikalischer Teil vorauszugehen habe und sich so (und nur so) begründete wahre Sätze über die Natur gewinnen ließen.[684] Der protophysikalische oder *apriorische* Teil mit seinen terminologischen Bestimmungen und der logischen Ordnung empirie-

[681] Mittelstraß 1970, insbes. S. 264-309.

[682] Mittelstraß 1974, 1977 und 1981.

[683] „Nicht Einzelergebnisse, sondern methodische Einsichten sind das entscheidende; am Anfang einer neuen Physik stehen keine ‚besseren' Sätze über gewisse Phänomene, Sätze über die (physikalische) Welt, sondern ‚bessere' Sätze über den Aufbau der Physik selbst" (Mittelstraß 1970, S. 169; vgl. S. 235).

[684] Ebd., S. 170f. bzw. S. 234f.

freier Sätze gehe dem empirischen oder aposteriorischen Teil voraus und ermögliche erst einen Aufbau der Galileischen Bewegungslehre, die von Mittelstraß als „euklidisch, d.h. axiomatisch" gekennzeichnet wird.[685] Galilei wird so zum Ahnherren einer konstruktivistischen und *daher* eigentlich erst *wissenschaftlich* zu nennenden Physik[686], und deren entscheidende Einsicht, so lautet das Fazit, sei „die Einsicht in die *Autonomie der Vernunft*"[687].

Es sei dahingestellt, ob diese Rekonstruktion Galileis zutrifft oder ob hier nicht lediglich ein von Mittelstraß häufig beschworenes ‚empiristisches Mißverständnis' der Wissenschaftstheorie und ihrer Geschichtsschreibung durch ein ‚konstruktivistisches Mißverständnis' eingetauscht wird.[688] Hier geht es nur um den weiteren Verlauf von Newton bis Lagrange: Bei Newton steht nach Mittelstraß „in methodologischen Dingen alles auf dem Kopf"[689]; insbesondere gehe mit dessen empiristischer Methodologie die von Galilei gewonnene Unterscheidung von Protophysik und empirischer Physik wie auch die Einsicht in die Notwendigkeit von Protophysik verloren. Mittelstraß sieht hier „eine Weichenstellung, die den methodischen Charakter der neuzeitlichen Physik entscheidend verändern sollte. In welcher Art, machen Arbeiten von Leonard Euler (‚Mechanica [...]' [1736]; ‚Theoria motus [...]' [1760] [sic!]) und Joseph L. Lagrange (‚Mécanique Analytique'[1788]) deutlich. In diesen Arbeiten wird der ‚euklidische' Aufbau der Physik durch einen ‚analytischen' Aufbau ersetzt, es wird eine ähnlich umfassende Systematisierung des bisherigen physikalischen Wissens wie in Newtons ‚Principia' geleistet, jedoch auf gänzlich andere Weise".[690] Einen gewissen Abschluß der mit Newton einsetzenden, bei Euler und Lagrange sich jedoch eigentlich erst vollziehenden methodologischen und begründungstheoretischen Degeneration sieht Mittelstraß offenbar mit Lagranges *Méchanique Analitique* als erreicht an, die dann die Vorlage etwa für Fouriers Theorie der Wärme oder Maxwells Elektrodynamik abgegeben habe.[691] Er spricht hier von einem „folgenschweren Wechsel zweier Wissenschaftsbegriffe"[692], der als Ersetzung eines synthetischen durch einen analytischen Wissenschaftsbegriff beschrieben wird: „In den analytischen Theorien tritt ein *analytischer* Wissenschaftsbegriff an die Stelle eines Wissenschaftsbegriffes, der durch die Euklidische Geometrie, die Archimedische Statik, aber eben auch durch die Galileische

[685] Ebd., S. 233.

[686] „Einer Bewährung im empirischen Bereich geht eben gerade auch in der Physik, wie Galileis Begründung der Mechanik zeigt, eine *Bewährung im Formalen* voraus. Und genau diese Bewährung, für die Mechanik durch eine axiomatische Theorie geleistet, ist es, die schließlich über den *wissenschaftlichen* Charakter auch der Physik entscheidet" (ebd., S. 236).

[687] Ebd., S. 236.

[688] Vgl. ebd., S. 235f.

[689] Ebd., S. 300f.

[690] Ebd., S. 302.

[691] Vgl. ebd., S. 302-309, insbes. S. 306, sowie Mittelstraß 1981, S. 105-110.

[692] Mittelstraß 1984, S. 119.

und Newtonsche Mechanik repräsentiert ist. Der *synthetische* Wissenschaftsbegriff hört auf, methodologisches Paradigma der Theorienbildung zu sein".[693]

IV.6.2 Eine analytisch-genetische Kritik

Mittelstraß' strenge historische Unterscheidung von synthetischem und analytischem Wissenschaftsbegriff steht nun in merkwürdigem Kontrast zu der Unschärfe, die der systematischen Abgrenzung des analytischen Wissenschaftsbegriffs vom synthetischen eigen ist — und damit auch im Gegensatz zu den Ansprüchen seiner eigenen, normativen Historiographie.[694] Es wird primär behauptet, daß nach analytischem Verständnis „die Theorie eben ihren Anfang mit der Erfahrung nimmt"[695], d.h. *nicht* einen begrifflichen, protophysikalischen Teil vor einem empirischen Teil auszeichne. So gebe etwa Lagranges Mechanik keine Definitionen von Grundbegriffen (was zutrifft); „anstelle von Bewegungsaxiomen" beginne sie mit einem „System von Bewegungsgleichungen" (was nicht zutrifft).[696] In den „analytischen Systemen etwa Eulers und Lagranges„ so heißt es an anderer Stelle, finde eine „Ersetzung des axiomatischen Aufbaus der Newtonschen Mechanik durch Systeme von Bewegungsgleichungen, in deren Rahmen Messungsreihen erstmalig als methodisch primär erscheinen", statt.[697]

Hier werden einige zutreffende und einige unzutreffende historische Beobachtungen mit systematischen Überlegungen bzw. normativen Festlegungen verquickt, so daß zusammengenommen — in Anlehnung an eine spätere Veröffentlichung des Autors —

[693] Mittelstraß 1981, S. 109.

[694] Mittelstraß selbst bemerkt: „[...] trotz historischer Rechtfertigung bleibt diese Unterscheidung unbefriedigend; sie bietet eine begriffliche Alternative wohl für die Beurteilung schon vorliegender Theorien, jedoch keinen begründeten Vorschlag, wie man als Wissenschaftler in Zukunft methodisch verfahren kann" (Mittelstraß 1970, S. 307). Die weitere Diskussion wird deutlich machen, daß es auch mit der ‚Beurteilung schon vorliegender Theorien' seine Schwierigkeiten hat.

[695] Ebd., S. 308.

[696] Ebd., S. 303. Mittelstraß führt hier die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen auf. Aber Lagrange beginnt *nicht* mit ihnen seine Dynamik, sondern mit dem ‚Bewegungsaxiom' Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten. D'Alembert wird kurz zuvor als Ausnahme von der methodologischen Verirrung bei und nach Newton präsentiert, da er um ‚der Sicherheit der Mechanik' willen die Unterscheidung von Protophysik und empirischer Physik verteidigt habe. D'Alemberts Prinzip stellt für Mittelstraß „noch einmal wegen seines definitorischen Charakters ein reines Stück Protophysik dar" (ebd., S. 302, Anm. 63). Gerade an dieses Prinzip knüpft Lagranges Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten an. Ist demnach Lagranges ‚analytische Degeneration' darauf zurückzuführen, daß er d'Alemberts (vermeintlich nichtempirische) definitorische Bestimmungen nicht noch einmal nacherzählt hat?

[697] Mittelstraß 1974, S. 118f.

von konstruktivistischen ‚Mythen des wissenschaftshistorischen Geistes' gesprochen werden könnte.[698] Eine Klarstellung scheint mir besonders unter dem *historiographischen* Gesichtspunkt angebracht, unter dem Mittelstraß sein ‚Fallbeispiel' präsentiert: Es soll zeigen, daß eine „*analytische* oder *deskriptive* Wissenschaftstheorie"[699], zu der in diesem Kontext neben Stegmüller u.a. auch Kuhn und Lakatos gerechnet werden[700], aufgrund ihrer Festlegung auf inhaltliche Theorieelemente historisch nur an erklärungs-, nicht aber an begründungstheoretischem Wandel interessiert sein könne, daß sie nur eine Art Naturgeschichte[701] wissenschaftlichen Wandels zu schreiben in der Lage sei und ihr *daher* auch notwendigerweise der ‚folgenschwere' Übergang von einem synthetischen zu einem analytischen Wissenschaftsbegriff entgehen müsse. Konstruktivistische „Gründegeschichte" — die eben vor allem nach ‚konstruktiven Begründungen' von Wissenschaft fragt[702] — sei dagegen auf „das kritische Verstehen von Gründen", d.h. von „Zielen und Handlungsregeln" von Wissenschaft, aus[703] und könne *daher* eben diesen Übergang sehen und historisch begreiflich machen.

Aber gerade eine *historische Erklärung* liefert Mittelstraß' Rekonstruktion, die offenkundig an einige wissenschaftshistorisch nicht eben informierte Arbeiten von Dingler[704] und Lorenzen[705] anknüpft, überhaupt nicht: Mittelstraß konstatiert einen Wandel

[698] „Philosophische Grundlagen der Wissenschaft. Über wissenschaftstheoretischen Historismus, Konstruktivismus und Mythen des wissenschaftlichen Geistes" (Mittelstraß 1988). Den Mythosbegriff möchte ich dabei nicht so weit fassen wie Mittelstraß, der ihn dadurch kennzeichnet, daß der „rationale Mensch, wie hinter einer übermächtigen, sich selbst organisierenden Macht zu verschwinden beginnt" (ebd., S. 192), sondern schlichter als eine nicht zutreffende, rational nicht einsehbare, aber vielleicht ehrfürchtig geglaubte Erzählung: Zu einer ‚Macht' ist diese Erzählung glücklicherweise bisher nicht geworden.

[699] Mittelstraß 1974, S. 113.

[700] Vgl. Mittelstraß 1981.

[701] Vgl. Mittelstraß 1974, S. 123.

[702] Vgl. ebd., S. 140.

[703] Ebd., S. 141.

[704] Hugo Dingler schreibt 1932 in seiner *Geschichte der Naturphilosophie* zur Mechanik des 18. Jahrhunderts: „Es begann sich das Bestreben geltend zu machen, die Mechanik *rein analytisch* zu einem rechnerisch-deduktiven System zu gestalten. Dazu trachtete man Grundgleichungen zu finden, aus denen dies auf rein rechnerischem Wege geschehen könne" (Dingler 1932, S. 132). Auf Dinglers Kritik eines solchen „Komputismus" (ebd., S. 133), dem „eigentlichen Fehler dieses Empirismus" (ebd., S. 134), bezieht sich später Lorenzen (1960, S. 141), auf jenen wiederum Mittelstraß (s.u.). Was bei Dingler ‚Komputismus' heißt, wird bei Mittelstraß zur ‚Kalkülisierung'.

[705] Paul Lorenzen schreibt in *Die Entstehung der exakten Wissenschaften*: „Während von *Galilei* bis zu *Newton* die Mechanik als eine erweiterte Geometrie im Sinne *Euklids* aufgefaßt wurde — als eine „synthetische" Theorie also, die auf evidenten, durch keine Erfahrung widerlegbaren Axiomen [...] beruht — verwandelt sich mit und vor allem nach Newton diese Auffassung: es tritt jetzt das kontingente, nur durch die Erfahrung bewährte, Naturgesetz in den Vordergrund.

des Wissenschaftsbegriffs, kritisiert diesen Wandel von einem normativen Standpunkt aus und verweist im übrigen auf einen durch Newtons Methodologie in die Welt gekommenen, diffusen Empirismus in den Wissenschaften, durch den die bewährte, konstruktivistisch-Galileische Methodologie zerbrochen wurde. Er übersieht dabei vollkommen, daß es der Versuch der *Aufrechterhaltung* des mechanischen Euklidianismus ist, der es eben nicht nur mit synthetischer *Begründung*, sondern auch mit theoretischer Organisation des *Wissenschaftsgesamts* zu tun hat, der die analytische Form der Mechanik am Ende des 18. Jahrhunderts herbeiführt. Doch hierzu schweigt die ‚konstruktivistische' Geschichtsschreibung.

Ein Galilei, der Mechanik auf ‚protophysikalischer' Basis einwandfrei begründet, demgegenüber ein Lagrange, der methodologisch angeblich mit nichts anderem als ‚bloßen Messungsreihen' anhebt: Dies wirkt ein wenig, als werde ein Architekt dafür kritisiert, daß er kein Tiefbauingenieur sei. Lagrange gründet seine Mechanik ausdrücklich auf die seiner Vorgänger, insbesondere auf Galileis. Seine Mechanik integriert die begrifflichen, mathematischen und experimentellen Bemühungen zweier Jahrhunderte, zu allgemeinen Gesetzen der Bewegung und Ruhe zu gelangen. Dies ist eine *historische* Tatsache, aber darum nicht von wissenschaftstheoretischer Kritik, schon gar nicht von einer Analyse wissenschaftstheoretischen Wandels, zu ignorieren: Nicht synthetische *Grundlagen* (im Sinne des Konstruktivismus), sondern deduktive *Organisation* war Lagranges Ziel, und dieses Ziel erscheint auf seinem historischen Hintergrund durchaus *rational* begründet, weil es eben (neben synthetischen Grundlagen) vom herrschenden mechanischen Euklidianismus *auch* gefordert wurde. Das Problem ist eben, wie die bisherige Untersuchung gezeigt hat, *beide* Ziele in Einklang zu bringen. Man kann allerdings Lagrange wissenschaftstheoretisch dafür kritisieren, daß er die destruktiven Konsequenzen seines ‚rein analytischen' Zugangs für eben diesen Euklidianismus nicht gesehen hat, so wie man umgekehrt vom wissenschaftlichen Standpunkt den heutigen Konstruktivismus dafür kritisieren kann, daß er in seinen achtbaren Bemühungen um eine protophysikalische Grundlegung der klassischen Mechanik — ebenfalls ein euklidianistisches Unternehmen — inhaltlich noch nicht weit über Galilei hinausgekommen und jedenfalls längst noch nicht bei Lagrange angekommen ist, dort vielleicht nie ankommen wird. Der klassische Wissenschaftsbegriff, in *beiden* Fällen am Werke, ist eben streng in *allen* seinen Forderungen.

Abkürzend will ich meine historischen, historiographischen und systematischen Einwände gegen Mittelstraß' Rekonstruktion in folgenden Punkten zusammenfassen:

Die theoretische Physik wird eine ‚analytische' Wissenschaft" (Lorenzen 1960, S. 139f.). *Kontingente*, nur durch Erfahrung bestätigte Naturgesetze: Dies trifft nicht Newtons Verständnis, schon gar nicht das der meisten Vertreter der rationalen Mechanik im Zeitalter der Aufklärung. Mittelstraß nimmt auf Lorenzens Unterscheidung ‚analytisch-synthetisch' direkt Bezug (Mittelstraß 1970, S. 306, Anm. 69).

(1) Die wissenschaftstheoretische Unterscheidung von synthetischem und analytischem Wissenschaftsbegriff fällt bei Mittelstraß zusammen mit der *historischen* Unterscheidung vor-analytischer und analytischer Mechanik, wie sie von den Protagonisten (Euler, Lagrange etc.) selber gezogen wurde.[706] Diese Koinzidenzbehauptung ist aber *historisch* falsch: Eulers *Mechanica* (1736), aber auch seine *Theoria motus* (1765)[707] und wichtige kleinere Beiträge sind *synthetisch* im Sinne von Mittelstraß, *obwohl* sie sich der Analysis bedienen: Sie beginnen mit begrifflichen (‚protophysikalischen') Reflexionen über die Grundlagen der Mechanik und suchen erst im Anschluß an die Definition und logische Klärung der grundlegenden Konzepte Raum, Ort, Zeit, Bewegung, Ruhe, Geschwindigkeit etc. eine empirische Mechanik zu entwickeln[708].

(2) Mittelstraß' Kuhn-Kritik ist berechtigt, insofern sie auf Kuhns Interpretation der analytischen Mechanik als Normalwissenschaft im Rahmen eines Newtonschen Paradigmas abzielt.[709] Kuhns Fehlrekonstruktion ist jedoch nicht, wie Mittelstraß meint, darauf zurückzuführen, daß dessen Paradigmenbegriff gegenüber metatheoretischem Wandel sozusagen blind sei[710], sondern vielmehr darauf, daß Kuhn unbesehen eine Machsche Mechanikgeschichtsschreibung perpetuiert, die seinem Paradigmenbegriff wie auch seiner Historiographie insgesamt widerspricht.[711] Ebenso liefert Lakatos' Werk keine Stützung der Mittelstraß-These einer ‚metatheoretischen Blindheit' der sog. analytischen Wissenschaftstheorie, sondern widerlegt diese: Ein guter Teil dieses Werkes ist Fragen des metatheoretischen Wandels (wenn auch nicht der konstruktivistischen Begründung) der Wissenschaften und der Mathematik gewidmet und fordert gerade zur Analyse solchen Wandels auf.[712] Mittelstraß' Fallstudie verfehlt somit ihr Ziel historiographischer Kritik und expliziert eher die normativen Beschränkungen seiner eigenen Historiographie. Denn:

(3) Es ist die Fixierung konstruktivistischer Geschichtsschreibung auf Begründungsfragen, die im Fall der analytischen Mechanik eine angemessene *Gründegeschichte* verhindert. Dann (und nur dann) wenn in Rechnung gestellt wird, daß der mechanische Euklidianismus nicht nur nach sicheren Grundlagen, sondern auch nach deduktiver Organisation des gesamten akzeptierten Wissens strebt, läßt sich dessen Niedergang am

[706] Vgl. hierzu insbes. Teil 4.1.

[707] Vgl. Teil 6.1, Zit. 690.

[708] Man vgl. etwa die §§1-82 des ersten Kapitels, die §§ 99-117 des zweiten Kapitels und kleinere Teile der folgenden Kapitel der *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* (Euler 1736). Man könnte hier die Warnung formulieren: Nicht überall, wo (mathematisch-),analytisch' draufsteht, ist auch (wissenschaftstheoretisch-),analytisch' drin!

[709] Vgl. Mittelstraß 1974, S. 118.

[710] Man vgl. etwa die Analyse der verschiedenen Facetten des Paradigmenbegriffs in Masterman 1974 sowie Paul Hoyningen-Huenes Kritik an Mittelstraß' Kuhn-Bild (Hoyningen-Huene 1988).

[711] Näher hierzu Pulte 1989, S. 16-20.

[712] Vgl. Kap. I, insbes. Teil 2.4.

Ende des 18. Jahrhunderts historisch begreifen. Grundlegungsprobleme spielen in der Analyse metatheoretischen Wandels eine wichtige Rolle, aber eine solche Analyse darf sich eben nicht in deren Untersuchung erschöpfen.

(4) Die historiographische Einäugigkeit konstruktivistischer Geschichtsschreibung ist in der konstruktivistischen Wissenschaftstheorie selber begründet: Während sie ihre respektablen Anstrengungen auf die Lösung von Begründungsfragen der Logik, Mathematik und Wissenschaften konzentrierte, hat sie bis heute keine große Mühe auf die Beantwortung der Frage verwandt, wieweit der eigene Wissenschafts- und Theoriebegriff durch ihre rigiden Begründungsansprüche in einer Weise restringiert wird, die sie in einer (für beide Seiten schädlichen) Weise von der Wissenschaft entfernt. Gerade weil, wie Christian Thiel treffend feststellt, die „Konstruktive Wissenschaftstheorie [...] der internen Struktur wissenschaftlicher Theorien bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt und keinen eigenen Theoriebegriff entwickelt"[713] hat, blickt sie mit wenig Verständnis in die Geschichte, wenn es um eben solche Entwicklungen geht, die *Theorien als Ganzes* betreffen. Dies ist aber, wie die früheren Ausführungen dieses Kapitels deutlich machen sollten, gerade bei der analytischen Mechanik des 18. Jahrhunderts der Fall.

[713] Thiel 1996, S. 268. In historischer Perspektive ist eine der Fragen, die hier zu beantworten wären, wie eine ‚konstruktive' *Theorie* der Mechanik, die etwa das Wissen der *Méchanique Analitique* umfassen würde, auszusehen hätte. Es wäre insbesondere zu klären, wie die Spannung zwischen synthetischer Begründung und formal-axiomatischer Organisation zu lösen wäre, wie sie bereits bei Dingler, aber auch in Lorenzens Werk hervortritt: „Die axiomatische Methode, die zur ‚denkökonomischen' Behandlung von schon konstruierten Modellen dient, ist eine der großen Leistungen des 19. und 20. Jahrhunderts. Der Versuch aber, Axiome anstelle einer konstruktiven Begründung zu verwenden, führt nur dazu, daß man meint, eine axiomatische ‚Begründung' sei gegeben, wo man nur Sätze ohne Begründung hingeschrieben hat. Dadurch, daß man diese Sätze ‚Axiome' nennt, ändert sich nichts. Trotz der überragenden Bedeutung der axiomatischen Methode innerhalb der (naiven oder konstruktiven) Mathematik, bleibt der Ausdruck ‚axiomatische Begründung' sinnlos" (Lorenzen 1974, pp. 233f.).

IV.7 Kant und die rationale Mechanik des 18. Jahrhunderts: Zwei Projektionen

Ungeachtet der Schwierigkeiten des ‚praktizierenden' mechanischen Euklidianismus, wie ich sie in den früheren Teilen dieses Kapitels für das 18. Jahrhundert zu analysieren suchte, hat das Ideal einer Mechanik, die *als Naturwissenschaft* noch die Wahrheits- und Gewißheitsansprüche der *Mathematik* erheben kann, auf Philosophen und Wissenschaftler eine unverminderte Anziehungskraft ausgeübt. Kants Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft ist bis heute der einflußreichste Versuch geblieben, dieses Ideal philosophisch zu verteidigen.

Betrachtet man zunächst die historische Entwicklung der KMN hin zu Kant, zeigt sich in dessen Theorie der Mechanik eine merkwürdige Spannung von umwälzenden philosophischen Methoden und althergebrachtem Wissenschaftsideal: *Revolutionär* in dem Anspruch, mit Mitteln der Transzendentalphilosophie erfahrungsunabhängige und zugleich erfahrungskonstitutive Prinzipien der Naturerkenntnis aufweisen zu können, ist sie *konservativ* insofern, als sie eine Mechanik, die von apodiktisch gewissen und sicheren Prinzipien ausgeht, zur Grundlage der Naturwissenschaft macht und so ein *System* der Naturerkenntnis zu etablieren sucht. Es geht Kant um die Weiterführung des mechanischen Euklidianismus mit ganz neuen (weder empirischen noch traditionell-metaphysischen) Mitteln; bereits früher wurde darauf hingewiesen, daß sich diese Zielsetzung in Kants ‚Vorrede' zu den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* in einer geradezu idealtypischen Formulierung des klassischen Wissenschaftsbegriffs manifestiert.[714]

Kant selber markiert sowohl die Kontinuität, die sein Ideal mathematischer Naturerkenntnis mit der Tradition der mathematischen Physik verbindet, als auch den Bruch, den er begründungstheoretisch mit dieser Tradition vollzieht, sehr klar:[715]

> Alle Naturphilosophen, welche in ihrem Geschäfte mathematisch verfahren wollten, haben sich daher jederzeit (obschon sich selbst unbewußt) metaphysischer Principien bedient und bedienen müssen, wenn sie sich gleich sonst wider allen Anspruch der Metaphysik auf ihre Wissenschaft feierlich verwahrten. [...] Alle wahre Metaphysik ist aus dem Wesen des Denkungsvermögens selbst genommen und keineswegs darum erdichtet, weil sie nicht von der Erfahrung entlehnt ist, sondern enthält die reinen Handlungen des Denkens, mithin Begriffe und Grundsätze a priori, welche das Mannigfaltige *empirischer Vorstellungen* allererst in die gesetzmäßige Verbindung bringt, dadurch es *empirisches Erkenntniß*, d.i. Erfahrung, werden kann. So konnten also jene mathematische Physiker metaphysischer Principien gar nicht entbehren, und unter diesen auch nicht solcher, welche den Begriff ihres eigentlichen Gegenstandes, nämlich der Materie, a priori zur Anwendung auf äußere Erfahrung tauglich machen, als des Begriffs der Bewegung, der Erfüllung des Raums, der Trägheit u.s.w. Darüber aber blos empirische Grundsätze gelten zu

[714] Vgl. Kap. II, Teil 1, insbes. Anm. 42; zum folgenden auch Pulte 2001.
[715] Kant 1786, AXIIf. (*AA* 4, S. 472).

lassen, hielten sie mit Recht der apodiktischen Gewißheit, die sie ihren Naturgesetzen geben wollten, gar nicht gemäß, daher sie solche lieber postulirten, ohne nach ihren Quellen a priori zu forschen.

Diese Passage kann, neben manchen anderen der *Metaphysischen Anfangsgründe*, zugleich als eine Berufung auf und Kritik an Newton gelesen werden, wie auch die generelle Zielsetzung, die Kant mit diesem Werk verfolgt, vor allem als Versuch einer metaphysischen Begründung der *Newtonschen* Mechanik gelesen werden sollte.[716] Damit ist nicht gesagt, daß Kant inhaltlich *nur* an Newtons *Principia* anknüpft — er integriert ja bekanntlich ebenfalls Elemente des Leibnizschen Dynamismus und nimmt verschiedentlich auch auf spätere Vertreter der rationalen Mechanik wie Euler und Lambert positiv Bezug. Es soll vielmehr gesagt werden, daß die *Prinzipien*, die er als begründungsfähig und -bedürftig ansieht, im wesentlichen[717] die der Newtonschen *Principia* sind bzw. sein sollen.

Kant geht es dabei um die Begründung einer Theorie, deren Wahrheit für ihn vorderhand schon feststeht, aber (eben wegen einer *fehlenden* akzeptierbaren Begründung) nicht eingesehen werden kann: Nicht der Anspruch auf apodiktische Gewißheit der Vertreter der mathematischen Naturphilosophie des 18. Jahrhunderts wie auch der deutschen rationalistischen Schulphilosophie erscheint ihm fraglich, sondern die Begründungen, mit der dieser Anspruch eingelöst werden sollte. Ich sehe hierin eine *historische* Bedingung der Möglichkeit der Kantischen Theorie der Naturwissenschaft: Sie hat eine zweifellos gültige Naturwissenschaft vor Augen und kann von daher erst fragen, wie diese richtig zu begründen sei. Ihre *systematische* Bedingung ist der Nachweis, daß alle vorhergehenden Begründungsversuche gescheitert sind: Kant weist mit Hume und gegen Newtons explizite Methodologie nach, daß eine solche Begründung nicht *empirisch* einzufordern sei. Ebenso zeigt er gegen Wolff und andere, daß eine *dogmatische*, d.h. metaphysisch im traditionellen, rationalistischen Sinne zu nennende, Begründung ausgeschlossen ist. Schließlich macht er gegen Newtons impliziten ‚mathematischen' Prinzipiencertismus[718], der bei Lagrange zu einer expliziten Begründungsform stilisiert wird[719], geltend, daß Mathematik *per se* niemals Prinzipien der

[716] Hierzu sei vor allem an Kants klassische Worte vom Ende der ‚Vorrede' erinnert: „Newton sagt in der Vorrede zu seinen mathem. Grundlehren der Nat.-Wiss. [...]: *Die Geometrie ist stolz darauf, daß sie mit so wenigem, was sie anderwärts hernimmt, so viel zu leisten vermag.* Von der Metaphysik könnte man dagegen sagen: *sie steht bestürzt, daß sie mit so vielem, als ihr die reine Mathematik darbietet, doch nur so wenig ausrichten kann.* Indessen ist doch dieses Wenige etwas, das selbst die Mathematik in ihrer Anwendung auf die Naturwissenschaft unumgänglich braucht, die sich also, da sie hier von der Metaphysik nothwendig borgen muß, auch nicht schämen darf, sich mit ihr in Gemeinschaft sehen zu lassen" (Kant 1786, AXXIV (*AA* 4, S. 478f.)).

[717] In Teil 7.1 werde ich diese Einschränkung genauer bestimmen.

[718] Vgl. Kap. II, insbes. Teil 3.

[719] Vgl. Teil 5, insbes. 5.2.

Naturphilosophie liefern könne. So heißt es etwa im *Opus postumum*: „Wie konnte man aber mit Newton in seinem unsterblichen Werk *Philosophiae* naturalis principia mathematica eine Wissenschaft aufstellen, die ein Unding (syderoxylon) ist: denn man kann ebensowenig mathematische Anfangsgründe der Philosophie als philosophische der Mathematik denken [...]".[720] Damit ist natürlich nichts gegen mathematische Prinzipien der Naturwissenschaft gesagt — im Gegenteil müssen solche Prinzipien nach Kant ja mathematische sein, wenn es sich um eine Wissenschaft handeln soll —, sondern dagegen, solche Prinzipien einer *Philosophie*, d.h. einer zweiten Vernunftlehre mit *eigener* Erkenntnis a priori, überordnen zu wollen.[721] Der Naturwissenschaft ihren Gegenstand zu sichern, ist eine Aufgabe, die *nur* von der Philosophie geleistet und nicht an die Mathematik delegiert werden kann: „*Eigentlich* so zu nennende Naturwissenschaft setzt zuerst Metaphysik der Natur voraus; denn Gesetze, d.i. Principien der Nothwendigkeit dessen, was zum *Dasein* eines Dinges gehört, beschäftigen sich mit einem Begriffe, der sich nicht konstruieren läßt, weil das Dasein in keiner Anschauung a priori dargestellt werden kann".[722] Eher als in der (durch Hume vermittelten) Kritik der Regularitätsauffassung von Naturgesetzen, die, wie sich zeigte, an der Praxis der KMN vorbeiging, sehe ich hier eine treffende (weil die *Mathematik* betreffende) Kritik eben dieser Praxis: Sie bezieht sich in ihren begrifflichen Konstruktionen auf Objekte (Newton), zuletzt auf Gesetze über Objekte (Lagrange), aber sie kann sich dieser nicht als *Naturgegenstände* vergewissern. Mathematik ohne eine vorgängige Metaphysik der Natur bleibt ein leeres Spiel, das keine Erkenntnis vermittelt — umgekehrt kann Metaphysik der Natur ohne Mathematik nie Wissenschaft werden:[723]

[...] nach dem Vorhergehenden erfodert eigentliche Wissenschaft, vornehmlich der Natur, einen reinen Theil, der dem empirischen zum Grunde liegt, und der auf Erkenntniß der Naturdinge a priori beruht. Nun heißt etwas a priori erkennen, es aus seiner bloßen Möglichkeit erkennen. Die Möglichkeit bestimmter Naturdinge kann aber nicht aus ihren bloßen Begriffen erkannt werden; denn aus diesen kann zwar die Möglichkeit des Gedankens (daß er sich selbst nicht widerspreche), aber nicht des Objects, als Naturdinges erkannt werden, welches außer dem Gedanken (als existirend) gegeben werden kann. Also wird, um die Möglichkeit bestimmter Naturdinge, mithin um diese a priori zu erkennen, noch erfodert, daß die dem Begriffe correspondirende *Anschauung* a priori gegeben werde, d.i. daß der Begriff construirt werde. Nun ist die Vernunfterkenntniß durch Construction der Begriffe mathematisch. [...] eine reine Naturlehre über *bestimmte* Naturdinge (Körperlehre und Seelenlehre) ist nur vermittelst der Mathematik möglich, und da in jeder Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen wird, als sich darin Erkenntniß a priori befindet, so wird Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft enthalten, als Mathematik in ihr angewandt werden kann.

[720] Kant 1996, S. 32 (*AA* XXI, S. 207f.).
[721] Vgl. ebd., S. 46f. (*AA* XXII, S. 543f.).
[722] Kant 1786, AVII (*AA* 4, S.469).
[723] Ebd., AIX (*AA* 4, S. 470).

Historische Perpetuierung von Ansprüchen auf apodiktische Gewißheit und Sicherheit mathematischer Naturerkenntnis auf der einen Seite sowie systematische Destruierung der überkommenen Versuche, solche Ansprüche philosophisch zu begründen, auf der anderen Seite sind die beiden Pole, von denen aus Kant sein neues, *transzendentalphilosophisches* Begründungsprojekt in Angriff nimmt. Wenn ich dieses Projekt hier trotz seines originellen und in der Tat ‚revolutionären' Charakters[724] in die *Tradition* der KMN stelle, geschieht dies unter Berücksichtigung der Tatsache, daß bei Kant von einem ‚Essentialismus' nicht mehr die Rede sein kann, denn es geht ja hier nicht mehr um empirisch ermittelbare oder rational einsehbare ‚Wesenseigenschaften' der Gegenstände der äußeren Natur, sondern um solche Bestimmungen, unter denen wir die äußere Körperwelt überhaupt erst *erkennen* können, die uns also bereits unter Anschauungen und Begriffen gegenübertreten. Auch sind die von Kant postulierten synthetischen Prinzipien a priori, mit deren Existenz ja sein ganzes Projekt steht oder fällt, nicht im ursprünglichen Sinne[725] empirisch oder intuitiv einsehbar und verifizierbar. Sie sind jedoch Kants transzendentaler Argumentation zufolge wahre Sätze, deren Wahrheit einsehbar ist, wenn auch nicht logisch beweisbar (darum sind sie *synthetisch*); desweiteren haben sie empirischen Gehalt und sind notwendig, um Phänomene der äußeren Natur zu erklären, ohne jedoch durch die Phänomene verifiziert werden zu müssen (darum sind sie *a priori*)[726]. Diese Merkmale lassen es als wissenschaftstheoretisch legitim erscheinen, weiterhin von einem (wenngleich modifizierten) AFE-Projekt zu sprechen.

Es ist für den Zweck der vorliegenden Untersuchung nicht erforderlich, die Ausführung dieses kühnen Projekts im einzelnen zu untersuchen. Es soll jedoch diskutiert werden, inwieweit es Lösungen für die Entwicklungsprobleme der rationalen Mechanik, wie sie in den letzten Teilen diskutiert wurden, anbietet. Genauer soll den Fragen nachgegangen werden, *(1.)* was Kants Projekt zur Begründung mechanischer Prinzipien konkret beiträgt und *(2.)* wie es das Gesamt zunehmenden mechanischen Wissens in der Form eines ‚wissenschaftlichen Systems' zu halten sucht. Die beiden folgenden ‚Projektionen' sind diesen Fragen gewidmet, deren Beantwortung z.T. erst in dem folgenden Kapitel möglich sein wird.

[724] Vgl. zum Revolutionsbegriff in diesem Kontext die Arbeit von Hahn 1992.

[725] Vgl. Kap. II, Teil 2.2, Bedingungen *(iii)* und *(iv)*.

[726] Vgl. Stegmüllers Charakterisierung synthetischer Prinzipien a priori: „Es handelt sich um *wahre Aussagen über Tatsachen, deren Wahrheit definitiv festgestellt werden kann, obwohl die formale Logik für diese Einsicht nicht ausreicht und Beobachtungen für die Gewinnung dieser Einsicht nicht erforderlich sind*" (Stegmüller 1967/68, S. 9).

IV.7.1 Die ‚synthetische' Projektion: *Metaphysische Anfangsgründe*

Kants Metaphysische *Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786) sind ein Werk, dessen ‚Vorrede' viel gelesen wurde und wird.[727] Anders verhält es sich mit der Ausführung des dort skizzierten Plans in den folgenden vier ‚Hauptstücken' über Phoronomie, Dynamik, Mechanik und Phänomenologie: Ungeachtet Kants eigener Warnung, die von ihm nachgeahmte „mathematische Methode" — gemeint ist zunächst offenbar nur die Unterscheidung von Definitionen („Erklärungen"), Anmerkungen, Grundsätzen, Lehrsätzen und Beweisen — solle dem Werk kein „Gepränge von Gründlichkeit" verleihen, sondern werde vielmehr gewählt, „weil ich glaube, daß ein solches System deren wohl fähig sei und diese Vollkommenheit auch mit der Zeit von geschickterer Hand wohl erlangen könne"[728] scheinen diese Teile von philosophischer Seite doch vorwiegend als mathematisches ‚Gepränge' interpretiert (und demzufolge akzeptiert) oder einfach ignoriert, aber jedenfalls kaum kritisiert[729] worden zu sein. Bis heute gibt es meines Wissens keine Untersuchung, in der die ‚Hauptstücke' einer umfassenden Analyse unterzogen und die Tragfähigkeit der Kantschen Argumentation im einzelnen untersucht worden wäre.[730] Man wird daher wohl sagen müssen, daß der Nimbus der ‚Vorrede' weiterhin die Rezeption des Werkes bestimmt.

Synthetisch sind die *Metaphysischen Anfangsgründe* in dreierlei Hinsicht: in einer neuen, transzendentalphilosophischen (‚reine' Synthesis von Begriffen a priori; *S1*), in einer traditionellen, wissenschaftstheoretischen (Erklärung von Phänomenen und speziellen Gesetzen durch Deduktion aus Prinzipien; *S2*) und in einer traditionellen, mathematischen (*Geometrie* als Grundlage der Mechanik; *S3*). Kants Bindung an *(S3)* ist dafür verantwortlich, daß die Prinzipiendiskussion der *Metaphysischen Anfangsgründe* vor allem an Newtons *Principia* anknüpft und demzufolge Entwicklungen der analytischen Tradition, wie sie in den früheren Teilen dieses Kapitels untersucht wurden, in ihnen keine Rolle spielen, *obwohl* gerade diese einen Hinweis darauf hätten geben

[727] Die bis heute gründlichste Analyse der ‚Vorrede' gibt Plaass 1965. Sie versteht sich jedoch eher als Auslegung Kantischer Gedanken denn als kritische Analyse: „Es wird stets davon ausgegangen, daß Kant im Grunde sehr genaue, nachvollziehbare Vorstellungen von dem vor Augen hatte, was er jeweils darstellt, und es konnte daher keine andere Lösung befriedigen als eine solche, die den zu interpretierenden Text streng und konsistent konstruiert und dabei das von Kant Gemeinte ausführlicher und präzis vor Augen legt" (ebd., S. 9). Plaass Werk enthält eine Bibliographie der einschlägigen älteren Literatur. Von neueren, meist in ähnlicher Intention verfaßten Werken zu den *Metaphysischen Anfangsgründen* seien insbes. Schäfer 1966 und Gloy 1976 genannt.

[728] Kant 1786, AXXIII (*AA* 4, S. 478).

[729] Die bis heute wohl detailkritischste Auseinandersetzung dürfte Adickes 1924/25 sein.

[730] Immerhin werden in einigen neueren Untersuchungen einzelne Argumente Kants, insbesondere aus den Dynamik- und Mechanik-Teilen, kritisch hinterfragt; vgl. insbes. Friedman 1992, Watkins 1997 und 1998 sowie die dortige Literatur.

können, daß die *Mathematik* die Möglichkeit *verschiedener* konzeptueller Grundlegungen der Mechanik eröffnet.[731] Dabei ist die Einschränkung auf Geometrie keineswegs so zwingend, wie es zunächst scheinen mag: Mathematische Vernunfterkenntnis durch ‚Konstruktion der Begriffe' vollzieht sich ja bei Kant nicht nur in den ostensiven Konstruktionen der Geometrie, sondern auch in den symbolischen Konstruktionen der Algebra.[732] Erst die Bestimmung der Materie in den vier Hauptstücken verpflichtet die *Metaphysischen Anfangsgründe* auf solche Begriffe a priori, die (nur) geometrisch konstruierbar sind: Materie als „das Bewegliche im Raume" (Phoronomie), als „das *Bewegliche*, so fern es einen *Raum erfüllt*" (Dynamik), als „das Bewegliche, so fern es, als ein solches, bewegende Kraft hat" (Mechanik), und als „das Bewegliche, so fern es, als ein solches, ein Gegenstand der Erfahrung sein kann" (Phänomenologie).[733] Alle Begriffe, die Kant aus *diesen* Bestimmungen ableitet — wie etwa der der ‚bewegenden Kraft' oder der der ‚Quantität der Materie' — hängen ab vom Bewegungsbegriff, und dieser ist in der formalen Gestalt, in der er in der Phoronomie grundgelegt wird[734], ein sowohl *geometrischer* als auch *transzendentalphilosophischer* Begriff.[735]

Kants ‚geometrische Beschränkung', wie sie hier zum Ausdruck kommt, bestimmt den gesamten Aufbau der *Metaphysischen Anfangsgründe* bis hin zu ihrer Anwendung in der Physik. Gottfried Martin hat zurecht darauf hingewiesen, daß es dabei ein eigentliches ‚Anwendungsproblem' der Mathematik (auch) bei Kant nicht gibt: „Dieselbe Grundhaltung, die die Gegenstände der Mathematik in ihrer Konstruktion erzeugt, erzeugt also auch die Gegenstände der Naturwissenschaft, so daß die Gültigkeit der Geometrie in der Physik ohne weiteres gegeben ist".[736] Man muß jedoch in der Ausführung solche Folgerungen, die von Kant weitgehend logisch-konsistent entwickelt werden — ein Beispiel wäre die unendliche Teilbarkeit der Materie als Folge der unendli-

[731] Vgl. insbes. Teil 4.2 und Teil 5.1, dort bes. Zit. 242 zum Newtonschen Konzept der Kraft.

[732] „Die Mathematik aber konstruieret nicht bloß Größen (quanta) wie in der Geometrie, sondern auch die bloße Größe (quantitatem), wie in der Buchstabenrechnung, wobei sie von der Beschaffenheit des Gegenstandes, der nach einem solchen Größenbegriff gedacht werden soll, gänzlich abstrahiret" (Kant 1787, B745 (*AA* 3, S. 471)).

[733] Kant 1786, S. A1, A31, A106, A138 (*AA* 4, S. 480, S. 496, S. 536, S. 554).

[734] „Bewegung eines Dinges ist die Veränderung der *äußeren Verhältnisse* desselben zu einem gegebenem Raum" (Kant 1786, A5 (*AA* 4, S. 482)).

[735] „Bewegung eines *Objects* im Raume gehört nicht in eine reine Wissenschaft, folglich auch nicht in die Geometrie, weil, daß Etwas beweglich sei, nicht a priori, sondern nur durch Erfahrung erkannt werden kann. Aber Bewegung als *Beschreibung* eines Raumes, ist ein reiner Actus der successiven Synthesis des Mannigfaltigen in der äußeren Anschauung überhaupt durch productive Einbildungskraft und gehört nicht allein zur Geometrie, sondern sogar zur Transcendentalphilosophie." (Kant 1787, B155, Anm. (*AA* 3, S. 121f., Anm.)). Was Kant in der Phoronomie unternimmt, wenn er Bewegung als Veränderung der ‚äußeren Verhältnisse' (s.o.) eines Dings zu einem Raum untersucht, fällt gerade unter die zweite Bestimmung.

[736] Martin 1960, S. 46.

chen Teilbarkeit des Raumes, wie sie Kant gegen die ‚Monadisten' vertritt[737] —, unterscheiden von solchen Sätzen, die nur einen geometrischen Augenschein für sich in Anspruch nehmen können. So entwickelt Kant beispielsweise im Dynamik-Hauptteil die These, daß zwischen zwei materiellen Körpern sowohl Anziehungs- als auch Abstoßungkräfte entlang der Verbindungsgeraden wirken, und erklärt diese Kräfte kurzerhand per *Denknotwendigkeit* zu den einzig möglichen: „Es lassen sich nur diese zwei bewegende Kräfte der Materie denken. Denn alle Bewegung, die eine Materie einer anderen eindrücken kann, da in dieser Rücksicht jede derselben nur wie ein Punkt betrachtet wird, muß jederzeit als in der geraden Linie zwischen zweien Punkten ertheilt angesehen werden".[738] Dabei ist keineswegs klar, warum solche Kräfte nur entlang der Verbindungsgeraden wirken ‚dürfen', und die Natur setzt sich ja in der Tat großzügig über dieses Verbot hinweg, wie durch die Elektrodynamik wenige Jahrzehnte, nachdem Kant es aufgestellt hatte, offenbar wurde. An vergleichbaren Beispielen, die belegen, daß vermeintliche geometrische Evidenzen und Denknotwendigkeiten sich bei näherer Betrachtung oft als bloß kontingente, zeitgebundene Voraussetzungen einer als gültig akzeptierten (Newtonschen) Wissenschaft erweisen, herrscht in den Hauptteilen der *Metaphysischen Anfangsgründe* kein Mangel.

Nicht solcher Detailkritik soll hier jedoch nachgegangen werden, sondern der Frage, wieweit Kants geometrische Beschränkung *(S3)* seine Prinzipienbegründung bestimmt, wieweit sie also wissenschaftstheoretisch relevant bzw. für den synthetischen Aufbau der Mechanik im Sinne von *(S2)* maßgeblich ist. Kant führt im Mechanik-Hauptteil der *Metaphysischen Anfangsgründe* drei Gesetze der Mechanik ein, die den Analogien der Erfahrung nachgebildet sind und denen jeweils ein apriorischer ‚Beweis' nachgestellt wird. Sie stimmen nur teilweise mit Newtons ‚axiomata sive leges motus' überein, und nur das erste[739] scheint mir von *(S3)* unabhängig zu sein. Dieses erste Gesetz Kants behauptet die allgemeine Erhaltung der „Quantität der Materie"[740] und ist bei Newton nicht zu finden. Sein zweites Gesetz sagt: „Alle Veränderung der Materie hat eine äußere Ursache", und wird (fast wörtlich) mit Newtons Formulierung des Trägheitsgesetzes gleichgesetzt[741]. Das dritte Gesetz Kants schließlich faßt Newtons drittes Gesetz der Bewegung in die Worte: „In aller Mittheilung der Bewegung sind Wirkung und Gegenwirkung einander jederzeit gleich".[742] Unterstellt man die plausible These, daß es Kant mit den *Metaphysischen Anfangsgründen* vor allem um eine Begründung der

[737] Vgl. Kant 1786, A43 (*AA* 4, S. 503-508); vgl. näher Schäfer 1966, S. 77-81.

[738] Kant 1786, A35 (*AA* 4, S. 498).

[739] Zur Vorgeschichte bei Kant und für eine nähere Erläuterung s. Adickes 1924/25 I, S. 299-301.

[740] Kant 1786, A116 (*AA* 4, S. 536).

[741] Vgl. ebd. A119 (*AA* 4, S. 543).

[742] Ebd. A121 (*AA* 4, S. 544). Newton spricht mathematisch präziser von gleicher Größe und *entgegengesetzten* Richtungen der Wirkung (vgl. Kap. III, Teil 2.1, Zit. und Anm. 264).

Newtonschen Mechanik ging, erscheint es sinnvoll, diese Gesetze mit Newtons Axiomen A_i zu konfrontieren:

(A_1) Trägheitsgesetz: Wenngleich sich Kant an Newtons Gesetzesformulierung anlehnt, verbindet er mit ihr doch eine wesentlich weitere Bedeutung: Es konstatiert zunächst die Leblosigkeit der Materie und definiert das Unlebendige als den Anwendungsbereich der Mechanik.[743] Hier gilt, daß jede Änderung des Bewegungszustandes auf eine *äußere* Ursache zurückzuführen ist, und nur in diesem Sinne ist wohl die Bemerkung zu verstehen, daß „auf dem Gesetze der Trägheit [...] die Möglichkeit einer eigentlichen Naturwissenschaft" beruhe[744], d.h. einer solchen Naturwissenschaft, die einer apodiktischen Grundlegung in einem ‚reinen' Teil überhaupt fähig ist.

In der engeren, ‚Newtonschen' Formulierung Kants verpflichtet das Trägheitsprinzip gemäß der zweiten Analogie der Erfahrung[745] dazu, *bestimmte* Bewegungsänderungen auf äußere Ursachen zurückzuführen: Das Gesetz definiert erst, wann eine Bewegungs*änderung* vorliegt — dann nämlich, wenn sie nicht geradlinig oder nicht gleichförmig (oder beides) ist. Diese Festlegung bahnt Kant bereits durch die bevorzugte Behandlung geradlinig-gleichförmiger Bewegung in der Phoronomie an, obwohl er dort gar keinen *Grund* für eine solche Bevorzugung angeben *kann*.[746] Er setzt sie bei der Behandlung repulsiver und attraktiver Kräfte in der Dynamik fort, bevor sie in der Mechanik zum Gesetz erhoben wird — ein idealtypisches Beispiel dafür, wie die euklidische Geometrie in Kants *Metaphysischen Anfangsgründen* zu naturgesetzlicher Kraft findet.[747] Ich teile dabei *nicht* die verschiedentlich anzutreffende ‚schwache' Interpretation der *Metaphysischen Anfangsgründe*, wonach es Kant lediglich um den Nachweis der Möglichkeit ging, eine als gültig erkannte Wissenschaft (nämlich Newtons Mechanik) nur mit einer nachträglichen apriorischen Begründung in Einklang zu bringen[748], sondern vertrete die ‚stärkere' Interpretation, daß es Kant durchaus auch um

[743] Vgl. A120f. (*AA* 4, S. 544). Es ist demnach denkbar, daß Materie duch eine von ihr verschiedene, aber mit ihr verbundene Substanz belebt wird und durch sie Veränderungen ohne *äußere* Verursachung erfahren kann, die aber nicht in den Bereich der Mechanik gehören.

[744] Ebd. A121 (*AA* 4, S. 544).

[745] „Alle Veränderungen geschehen nach dem Gesetze der Verknüpfung der Ursache und Wirkung" (Kant 1787, B233 (*AA* 3, S. 166)).

[746] Jedenfalls keinen nichtpragmatischen Grund. „[...] die Regeln der Verknüpfung der Bewegungen durch physische Ursachen, d.i. Kräfte, lassen sich, ehe die Grundsätze ihrer Zusammensetzung überhaupt vorher rein mathematisch zum Grunde gelegt worden, niemals gründlich vortragen" (Kant 1786 A14; *AA* 4, S. 487): Diese Vorgehensweise, zunächst die Zusammensetzung geradlinig-gleichförmiger Bewegungen zu untersuchen, ist wohl pragmatisch gerechtfertigt, aber darum noch nicht *begründet* im Sinne Kants.

[747] Vgl. hierzu auch die Analyse der Newtonschen Argumentation in Kap. II, Teil 3.

[748] So versteht etwa Gerd Buchdahl Kants Absicht: „[...] the intention is not that of deductive derivations of physical laws (in the phenomenological sense) from a priori foundations; rather, we accept the facts and principles of a given science (whatever their origin) and attempt to bring

die *Ableitung* empirisch relevanter, in der Physik als angewandter Bewegungslehre einsetzbarer Gesetze ging. So ist das Trägheitsgesetz, wie die Phänomenologie erkennen läßt[749], für Kant durchaus *auch* ein *empirischer* Satz — natürlich nicht im Sinne Newtons als ein induktiv gewonnenes und begründetes Prinzip, aber in dem Sinne, daß jede meßbare Abweichung von der Trägheitsbewegung durch eine in der Erfahrung aufweisbare (und durch weitere Erfahrung zu bestätigende) Kraft erklärt werden können muß: Eine solche Abweichung ist eine *reale* Bewegung, und sie „beweiset [...] eine bewegende Kraft"[750].

(A_3) actio = reactio: Auch dieses Gesetz ist in einer weiteren Bedeutung, die auf die dritte Analogie der Erfahrung[751] verweist und ein „Verhältnis der Gemeinschaft oder Wechselwirkung"[752] zum Ausdruck bringt, unter dem koexistierende Substanzen überhaupt nur Gegenstand der Erfahrung werden können, und in einer engeren, offenkundig an Newtons *Principia* angelehnten Bedeutung zu nehmen. Kants Beweis des Satzes in seiner engeren Bedeutung ist originell und stellt m.E. seinen wichtigsten Beitrag zur mechanischen Prinzipienbegründung dar: Das Gesetz, „welches Newton sich gar nicht getrauete a priori zu beweisen"[753], erhält durch Kants Beweis den Sinn, daß aufgrund der *Relativität* der Bewegung aller Körper deren Wechselwirkung gleich sein *muß*, d.h. diese Gleichheit ist eine *Symmetrieforderung*[754] an die Bewegung, durch die das Schwerpunktsystem der wechselwirkenden Massen ausgezeichnet wird.[755] Die empirische Bedeutung dieser Forderung macht Kant wiederum in der Phänomenologie deutlich, wenn er feststellt, daß bezüglich eines solchen Bezugssystems die Bewegung *real*

the foundational elements of this science into harmony with certain a priori or conceptual elements of experience" (Buchdahl 1986, S. 141).

[749] Man vergleiche Kants Beweis des zweiten Lehrsatzes, wonach die Kreisbewegung — der Beweis macht deutlich, daß das Argument auf „jede krummlinichte" Bewegung ausdehnbar ist — ein „*wirkliches* Prädikat" darstellt (Kant 1786, A 142f. (*AA* 4, S. 557).

[750] Ebd., A 143 (*AA*4, S. 557); zu Kants Einschränkung auf die Kreisbewegung vgl. die obige Anm.

[751] „Alle Substanzen, so fern sie im Raume als zugleich wahrgenommen werden können, sind in durchgängiger Wechselwirkung" (Kant 1787, A211/B256 (*AA* 3, S. 180)).

[752] Ebd., B258 (*AA* 3, S. 181).

[753] Kant 1786, A129 (*AA* 4, S. 549).

[754] *Hierin* stimme ich Gernot Böhmes Interpretation zu; vgl. Böhme 1986, S. 187.

[755] „[...] keine *Bewegung*, die in Ansehung eines anderen Körpers bewegend sein soll, kann *absolut* sein: ist sie aber relativ in Ansehung des letzteren, so giebts keine Relation im Raume, die nicht wechselseitig und gleich sei" (Kant 1786, A128 (*AA* 4, S. 548)); zu Kants Einführung des Schwerpunktsystems in seinem Beweis s. ebd., A124f. (*AA* 4, S. 545-547). Die Implikationen der Kantischen Argumentation für das Problem des absoluten Raumes, auf die ich hier nicht eingehen kann, werden scharfsinnig analysiert in Friedman 1992, insbes. S. 143-149.

(nicht zu verwechseln mit ‚absolut') ist: „Die Bewegung beider [Körper] ist also wirklich".[756]

(A_2) Zweites Newtonsches Bewegungsgesetz: Betrachtet man Kants synthetischen Aufbau *(S3)* auf dem Hintergrund des Newtonschen, fällt besonders ins Auge, daß Newtons zweites Bewegungsgesetz oder ein anderes Gesetz, das eine Aussage über den Zusammenhang von *Bewegungsänderungen* und deren Ursachen (Kräfte) macht, bei Kant gar nicht vorkommt, geschweige denn a priori begründet wird. Viele Kommentatoren der *Metaphysischen Anfangsgründe* haben diese Tatsache einfach ignoriert.[757] Andere, wie Michael Friedmann, haben den problematischen Versuch unternommen, dieses Gesetz als ‚implizit' im dritten Gesetz enthalten nachzuweisen[758], oder haben — nicht minder problematisch — wie Gernot Böhme angenommen, Kant habe seine eigene Bestimmung von ‚bewegender Kraft' (durch die Bewegungsgröße *mv*) mit Newtons zweitem Gesetz identifiziert.[759]

Solche Erklärungsversuche scheinen mir indeß am Kern des Problems, das Kant mit dem Kraftbegriff hat, vorbeizugehen. Zunächst ist festzustellen, daß der Kraft*begriff* bei Kant ein apriorischer Begriff ist, und wenn auch die einzelnen Kraft*gesetze* (wie etwa das Gravitationsgesetz) stets „aus Datis der Erfahrung geschlossen werden" müssen[760], so ist doch dieser Begriff selber erfahrungsunabhängig zu bestimmen und *wäre* im Sinne des zweiten Newtonschen Bewegungsgesetzes mit dem der Masse und der Bewegungsänderung (in dessen moderner Lesart: Beschleunigung) des Körpers, auf den sie einwirkt, in Verbindung zu bringen. Nun ist der Begriff der Bewegungsänderung wie der der Bewegung im eingangs diskutierten Sinne ein geometrisch konstruierbarer Begriff. Die Masse oder „Quantität der Materie" kann, wie Kant im Lehrsatz 1 der Mechanik erklärt, „in Vergleichung mit *jeder* anderen nur durch die Quantität der

[756] Kant 1786, A145 (*AA* 4, S. 558).

[757] Vgl. etwa Plaass 1965, Schäfer 1966 und Gloy 1976.

[758] Friedman argumentiert, daß Newtons zweites Bewegungsgesetz in Kants Formulierung des dritten Gesetzes enthalten sei (Friedman 1992, S. 168). Diese These braucht hier nicht weiter diskutiert zu werden, weil sie überzeugend von Watkins (1997, S. 313) entkräftet wird. Für eine andere Variante der These vom ‚impliziten Vorhandensein' des zweiten Newtonschen Bewegungsgesetzes, vgl. auch die folgende Anmerkung.

[759] „Wahrscheinlich hat Kant einfach geglaubt, daß er durch Angabe der Bewegungsgröße *mv* als desjenigen, wodurch Materie bewegende Kraft, eine vis motrix ausübt, das zweite Newtonsche Gesetz reproduziert habe. Denn er definiert ja Materie in der Mechanik als *„das Bewegliche, so fern es, als ein solches, bewegende Kraft hat"* (Böhme 1986, S. 183f.). Eine solche Erklärung würde, wenn sie denn zuträfe, eine bestürzende Unkenntnis Kants über die Grundlagen der Newtonschen Mechanik voraussetzen, denn in Newtons zweitem Bewegungsgesetz geht es ja ausdrücklich nicht um eine *bewegende*, sondern um eine *bewegungsverändernde* Kraft, nicht um die *quantitas motus*, sondern um die *vis motrix impressae*.

[760] Kant 1786, A 104 (*AA*4, S. 543).

Bewegung bei gegebener Geschwindigkeit geschätzt werden"[761]. Sie ist daher ausdrücklich nur mechanisch, *nicht* dynamisch, d.h. vermittels Kräften bestimmbar[762] — sie ist nach Kant also *geometrisch* bestimmt insofern, als Bewegung selber ein geometrischer Begriff sein kann. Eine gesetzmäßige apriorische Beziehung zwischen Kraft, Masse und Bewegungsänderung, wie sie Newton in seinem zweiten Bewegungsgesetz ausdrückt, wäre daher auf der einen Seite ebenfalls (in diesem *weiten* Kantischen Sinne) geometrisch zu konstruieren. Auf der anderen Seite aber verbietet die Bestimmung der *Kraft* in dem hier in Rede stehenden Sinne (als bewegungsverändernde äußere *Ursache*) eine solche Konstruktion:[763] Kraft in diesem Sinne ist nämlich ein Begriff der Metaphysik der Natur und nicht geometrisch (oder anderswie[764]) konstruierbar, d.h. nicht in der Anschauung darstellbar.[765] Eine gesetzliche, mathematische Bestimmung zwischen einer solchen Kraft einerseits und Masse und Bewegungsänderung andererseits *kann* es daher bei Kant *nicht* geben. Dies scheint mir auch Kant selbst auszusagen, wenn er in der zweiten Analogie der Erfahrung bemerkt: „Wie nun überhaupt etwas verändert werden könne; wie es möglich ist, daß auf einen Zustand in einem Zeitpunkte ein entgegengesetzter im andern folgen könne: davon haben wir a priori nicht den mindesten Begriff. Hierzu wird die Kenntnis wirklicher Kräfte erfordert, welche nur empirisch gegeben werden kann, z.B. der bewegenden Kräfte oder, welches einerlei ist, gewisser successiven Erscheinungen (als Bewegungen), welche solche Kräfte anzeigen".[766] Diese Bemerkung, wie auch gewisse Überlegungen Kants im *Opus postu-*

[761] Ebd., A108 (*AA* 4, S. 537).

[762] Ebd., A115 (*AA* 4, S. 541).

[763] Eine eingehende Untersuchung der Problematik der Kraft in Kants *Metaphysischen Anfangsgründen*, auf die ich mich hier beziehe, gibt Kötter 1991, insbes. S. 163-170. Offen bleibt, ob Kötter die hier gezogene Schlußfolgerung — kein zweites Newtonsches Gesetz bei Kant aufgrund ‚geometrischer Beschränkung' — mittragen würde.

[764] Auf die Problematik einer ‚metaphysischen Konstruktion' bei Kant gehe ich hier nicht ein; Näheres hierzu bei Plaass 1965, S. 74-78, Schäfer 1966, S. 30-38 und kritisch Adickes 1924/25 I, S. 267f. sowie Hoppe 1969, S. 56-61; vgl. auch Ende 1973, insbes. S. 28f.

[765] Dies läßt Kant selbst auch für die materiekonstituierenden Grundkräfte erkennen; vgl. Kant 1786, A61 (*AA* 4, S. 513). Als apriorische Begriffe sind sie nicht aus anderen konstruierbar und in der Anschauung darstellbar, sondern nur dadurch legitimiert, daß sie von der Raumerfüllung der Materie erzwungen werden: „Sie können nur angenommen werden, wenn sie zu einem Begriff, von dem es erweislich ist, daß er ein Grundbegriff sei, der von keinem anderen weiter abgeleitet werden kann (wie der der Erfüllung des Raums), unvermeidlich gehören, und dieses sind Zurückstoßungs- und ihnen entgegenwirkende Anziehungskräfte überhaupt" (ebd., A 83f.; *AA* 4, S. 524; vgl. Kant 1787, A648/B677f.; *AA* 3, S. 430f.).

[766] Kant 1787, A206f./B252 (*AA* 3, S. 178/*AA* 4, S. 138f.). Kant fährt fort: „Aber die Form einer jeden Veränderung, die Bedingung, unter welcher sie als ein Entstehen eines andern Zustandes allein vorgehen kann [...], mithin die Succession der Zustände selbst (das Geschehene) kann doch nach dem Gesetze der Causalität und den Bedingungen der Zeit a priori erwogen werden". In einer Anmerkung folgt der Zusatz: „Man merke wohl: daß ich nicht von der Veränderung

mum[767], deuten darauf hin, daß Kant Bewegungsgesetze von der Art des zweiten Newtonschen nur als *empirische* versteht und daher ausschließt. Aber auch diese Interpretation läßt die Frage offen, warum er es — auch in kritischer Absicht, d.h. als Kritik daran, daß Newton dem zweiten Bewegungsgesetz in den *Principia* den Status eines *Axioms* beilegt — in den *Metaphysischen Anfangsgründen* überhaupt nicht zur Sprache bringt. Man muß daher Kants Schweigen *unabhängig* davon, welchen Status er dem zweiten Bewegungsgesetz beimißt, als gravierenden Mangel der *Metaphysischen Anfangsgründe* bezeichnen.

Kant steht, wie die frühere Untersuchung zeigt[768], mit der *fehlenden* Begründung des zweiten Bewegungsgesetzes durchaus in der Tradition des 18. Jahrhunderts. Es ist aber der obigen Rekonstruktionsskizze zufolge nicht einfach ein Anschluß an die Begründungspraxis rationalistischer Schulphilosophen wie Christian Wolff, die hierfür ver-

gewisser Relationen überhaupt, sondern von Veränderungen des Zustandes rede. Daher, wenn ein Körper sich gleichförmig bewegt, so verändert er seinen Zustand (der Bewegung) gar nicht, aber wohl, wenn seine Bewegung zu- oder abnimmt". Letzteres erhellt, daß Kant unter Änderungen des Zustandes sehr wohl Änderungen des *Bewegungs*zustandes im Sinne des zweiten Bewegungsgesetzes versteht. Mit der ‚Form' solcher Änderungen meint er offenbar keine gesetzliche, mathematisch geregelte Bestimmung der Beziehung zwischen Kraft und Bewegungsänderung, sondern allgemeinere Voraussetzungen, unter denen solche Änderungen möglich sind.

[767] „Es ist also in einem System der Naturwissenschaft nicht zu vermeiden daß darinn nicht ein Sprung (saltus) vorgehe wenn nicht auf einen *Mittelbegriff* (nicht den logischen im Syllogism, der blos die Form des Schließens angeht sondern den realen, welcher der Vernunft ein Object darbietet) bedacht genommen wird welcher einerseits an einen Begriff des Objects a priori, andererseits an die Bedingung der Möglichkeit der Erfahrung in der dieser Begriff realisirt werden kann geknüpft ist; denn alsdann allein dient ein solcher Begriff zum Übergange von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik, der alsdann kein Sprung ist.

Dieser Begriff ist nicht der von der Materie überhaupt (dem *Beweglichen* im Raum) sondern den *bewegenden Kräften* der Materie nach besonderen Bewegungsgesetzen (der Erfahrung) deren specifischer Unterschied aber als wirkender Ursache sich durch im Raume mögliche Verhältnisse (der Anziehung und Abstoßung) als Glieder der Eintheilung der Bewegung a priori erkennen läßt" (Kant *AA* 21, S. 285f.). Auch aus dieser Bemerkung scheint Kants Dilemma heraus, den apriorischen Begriff der bewegenden Kraft nur *empirisch* mit den apriorischen Begriffen der Materie und Bewegung bzw. Bewegungsänderung in Verbindung bringen zu können. Man kann dieses Dilemma durchaus mit demjenigen vergleichen, das Euler mit Newtons zweitem Bewegungsgesetz hat: Auch Euler hat nämlich das Problem, im *mathematischen* Teil seiner Mechanik ein ‚kräftedeterminierendes' Prinzip einführen zu müssen, das die Gültigkeit des zweiten Bewegunsgesetzes garantiert. Euler findet, wie gezeigt (vgl. Teil 3.1), eine Lösung in seiner metaphysischen Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung. Kant kann in seiner (philosophisch ungleich elaborierteren) Metaphysik der Natur auf ein solches Prinzip nicht zurückgreifen und muß das Problem an die Erfahrung delegieren.

[768] Vgl. die Teile 2.6 und 2.7.

antwortlich zeichnet[769], sondern seine ‚geometrische Beschränkung' *(S3)* in Verb dung mit seiner Einführung synthetisch-apriorischer Begriffe *(S1)*: Kants *(S2)*-Lö ist nicht historisch bedingt, sondern sozusagen ‚*(S1-S3)*-induziert'.

Wenn nun diese Interpretation zutrifft, wonach es sich beim zweiten Newtonsc Bewegungsgesetz nicht nur um ein ‚kontingent unbegründetes', sondern vielmehr ein (im Rahmen der *Metaphysischen Anfangsgründe*) ‚prinzipiell unbegründba Gesetz handelt, wird man den Schluß ziehen müssen, daß Kant mit den in der ‚Vo de' erhobenen Grundlegungsansprüchen *gescheitert* ist, sofern sie sich auf die ratior Mechanik beziehen: [770]

> *Eigentliche* Wissenschaft kann nur diejenige genannt werden, deren Gewißheit apodiktisch Erkenntniß, die blos empirische Gewißheit enthalten kann, ist ein nur uneigentlich so genan *Wissen*. Dasjenige Ganze der Erkenntniß, was systematisch ist, kann schon darum *Wissensc* heißen, und wenn die Verknüpfung der Erkenntnis in diesem System ein Zusammenhang Gründen und Folgen, so gar *rationale* Wissenschaft. Wenn aber diese Gründe oder Principie ihr [...] doch zuletzt blos empirisch sind, und die Gesetze, aus denen die gegebenen Facta d die Vernunft erklärt werden, blos Erfahrungsgesetze sind, so führen sie kein Bewußtsein i *Nothwendigkeit* bei sich (sind nicht apodiktisch-gewiß) und alsdann verdient das Ganze in st gem Sinne nicht den Namen einer Wissenschaft [...].

Es ist schlechterdings nicht einsehbar, wie rationale Mechanik (so wurde sie ber von Newton genannt) eine ‚rationale Wissenschaft' (wie sie Kant hier postuliert) s kann, wenn das zweite Bewegungsgesetz Newtons oder ein logisch äquivalentes Ge sich als ein bloß *empirisches*, d.h. ‚kein Bewußtsein seiner *Nothwendigkeit*' bei s führendes Gesetz erweist. Weite Teile der Mechanik, wie sie Kant faktisch als ein stierendes Ganzes vor Augen hatte und durch apriorische Begründung in den R eines wissenschaftlichen Systems erheben wollte, fallen aus diesem System her Seine wissenschaftstheoretische Synthese *(S2)* ist unzureichend, um eine bereits stierende, empirisch erfolgreiche Mechanik auch nur in ihren wichtigsten Teilen begründen.[771]

[769] Diese These vertritt Eric Watkins in seinen (historisch sehr aufschlußreichen) Arbe Watkins 1997 und 1998.

[770] Kant 1786, AIV (*AA* 4, S. 468).

[771] Ich teile daher — wenn auch aus anderen Gründen — die Einschätzung von Hansge Hoppe, daß von den *Metaphysischen Anfangsgründen* „nur die Phoronomie als gesichert gelt kann (Hoppe 1969, S. 66). Noch weitaus kritischer, gelegentlich auf eher spitzfindigen scharfsinnigen Argumenten beruhend, ist Erich Adickes abschließendes Urteil (Adickes 192 I, S. 370-378): „So hat also gerade das Werk, durch das Kant am meisten auf die Naturwis schaft wirken und sie neu fundamentieren wollte, seine großen Schwächen. Schuld daran ist transzendentale Methode. Kant wälzt den Stein des Sisyphus; er fordert und sucht Apriorität wo sie nun einmal unerreichbar ist" (ebd., S. 378).

IV.7.2 Die ‚analytische' Projektion: *Kritik der Urteilskraft*

Obgleich die analytische Tradition der rationalen Mechanik in Kants *Metaphysischen Anfangsgründen* keine Rolle spielt, ist sie seiner Aufmerksamkeit nicht vollständig entgangen und für sein Projekt einer ‚kritischen' Begründung der Naturwissenschaft auch nicht folgenlos geblieben. Ich werde dieser kaum beachteten Seite des Kantischen Begründungsprojekts und seiner Weiterentwicklung durch Fries ein eigenes Kapitel widmen[772] und kann mich daher hier damit begnügen, sie kurz von der bisher betrachteten ‚synthetischen' Seite abzusetzen:

Kant verfolgt in den *Metaphysischen Anfangsgründen* die Zielsetzung, das KMN-Ideal eines wissenschaftlichen Systems durch einen ‚reinen' Teil synthetisch-apriorischer Begriffe und Prinzipien, der dem empirischen vorgelagert ist, zu sichern. Durch mathematische Konstruktion und Deduktion lassen sich aus ihm weitere Begriffe und Sätze gewinnen, in deren formalem Rahmen sich die empirische Begriffs- und Gesetzesbildung jedenfalls vollziehen muß — diese „Möglichkeit einer mathematischen Naturlehre selbst" soll ja die *besondere* Metaphysik der Natur gerade nachweisen.[773] Hierbei handelt es sich um die Aufgabe, transzendentalphilosophisch zu rechtfertigen, was in der allgemeinen Kennzeichnung der Funktionen der Mathematik im Rahmen der KMN als ‚Ableitungssicherheit' bezeichnet wurde.[774] Aber auch wenn man (zu Unrecht, wie gezeigt wurde) von einer *(S2)*-Vollständigkeit ausgeht und Ableitungssicherheit unterstellt, ergibt sich ein Problem, auf das Kant bereits in seiner vorkritischen Zeit aufmerksam wurde: Die Forschung weist eine Vielzahl induktiver Verallgemeinerungen (in Kants Terminologie: ‚empirischer Regeln') auf, die ganz zusammenhanglos erscheinen, sich einer Synthese im *(S2)*-Sinne entziehen. Sie bilden kein System, sondern ein bloßes ‚Aggregat' spezieller Gesetze. Es wird sich zeigen, daß Kant dieses Problem in seiner vorkritischen Phase physikotheologisch, anknüpfend an Maupertuis' *analytisches*[775] Prinzip der kleinsten Wirkung, zu lösen sucht, in seiner kritischen Periode (als Problem der Subsumierung ‚besonderer' unter ‚allgemeine' Gesetze) dagegen zu einem Problem der *Kritik der Urteilskraft* macht. Sein letztendlicher Lösungsvorschlag, basierend auf dem Prinzip der *subjektiven formalen* Teleologie, kann jedoch das

[772] S. hierzu Kap. VI.

[773] Kant 1786, AXIV (*AA* 4, S. 473), vgl. hierzu auch Hoppe 1969, S. 51f.

[774] Vgl. Kap. II, Teil 2.1.

[775] Deshalb spreche ich hier von einer ‚analytischen' Projektion — aber *auch* deshalb, weil der Anspruch, alle Sätze der Mechanik unter ein Prinzip zu bringen, für Lagranges Analytische Mechanik leitend ist (vgl. Teil 5). Lagrange löst diesen Anspruch im Sinne einer formalen Organisation eindrucksvoll für die wichtigsten Sätze der Mechanik ein, liefert aber keine Begründung im Sinne Kants und daher auch kein wissenschaftliches System im Sinne Kants. Kant gibt Begründungen für einen kleinen Bereich der Mechanik (Phoronomie bzw., im modernen Sprachgebrauch, Kinematik), aber er liefert damit keine Grundlage einer Mechanik, die nach Lagrange diesen Namen verdienen würde.

nicht leisten, was er leisten soll, nämlich die besonderen, zunächst nur induktiv gefundenen Regeln durch *Notwendigkeitsnachweis* zu eigentlichen Gesetzen zu machen und so die Idee des wissenschaftlichen *Systems* zu sichern. Es wird sich zeigen, daß dieses Ideal des mechanischen Euklidianismus zwar als regulative Vernunftidee weiterbestehen, aber keine *objektive* Bedeutung (im Sinne der Repräsentation einer Naturordnung) beanspruchen kann.

IV.7.3 Kritik und Ausblick

Kants Transzendentalphilosophie stellt zweifellos einen Wendepunkt der Philosophiegeschichte und einen wichtigen Orientierungspunkt aktueller systematischer Diskussion dar. Dies gilt auch für seinen Versuch, das wissenschaftliche Wissen seiner Zeit metaphysisch zu begründen, insbesondere also für seine Philosophie des Raumes und der Zeit sowie seine Theorie der Materie. Darüber sollte jedoch nicht übersehen werden, daß die konkrete Ausformung dieses Unternehmens, wie sie Kant vor allem in den *Metaphysischen Anfangsgründen* vorgelegt hat, durch Lückenhaftigkeit und Zeitgebundenheit gekennzeichnet ist. Vor allem letztere, d.h. die Adaption von Voraussetzungen, die dem damaligen *status quo* der Wissenschaft entsprachen, von Kant aber nicht philosophisch ‚abgesichert' werden konnten, steht in deutlichem Widerspruch zu seinem theoretischen Begründungsanspruch, der auf notwendiges und daher ‚zeitloses' Wissen von der Natur abzielt.

Es wäre nun falsch, diesen Widerspruch zu verabsolutieren, indem man aus ihm die Notwendigkeit einer Verwerfung des Kantischen Ansatzes ableitet (die faktische Wissenschaftsentwicklung gleichsam als ‚Falsifikator' eines wissenschaftstheoretischen Programms), und ebenso, ihn zu trivialisieren, indem man ihn — wie es viele Vertreter des Neukantianismus wollten — als Ausdruck einer jeweils ‚defizitären' Kantexegese wertet und so stets zugunsten des Kantischen Ansatzes entscheidet (die faktische Wissenschaftsentwicklung als unbedingter ‚Verifikator' eines wissenschaftstheoretischen Programms). Über die Angemessenheit einer Wissenschaftstheorie kann eben — um Pierre Duhem zu paraphrasieren — nicht nach ‚Kopf und Wappen' entschieden werden. Eine solche Disjunktion beruht offenbar bereits auf der *Anerkennung* des absoluten Begründungsanspruchs, den Kant mit seinem Programm verbindet und der heute nicht mehr als einlösbar angesehen wird. Gerade Kants Überzeugung von der Erkennbarkeit allgemeiner, gewisser und notwendiger Naturgesetze erscheint mit Blick auf die Grundlagenentwicklung der Mathematik und Physik der letzten eineinhalb Jahrhunderte, die die Vielheit und Fehlbarkeit wissenschaftlicher Repräsentationsmöglichkeiten von Erfahrung deutlich gemacht hat, vermessen.

Aber auch wenn man eine Rationalität faktischer Wissenschaftsentwicklung im weitesten Sinne unterstellt, kann diese die Verfehltheit der Kantischen Wissenschaftstheo-

rie nicht *beweisen*, wohl aber auf eine wesentliche Zeitgebundenheit der ‚Kantischen Aprioris', d.h. seiner Anschauungsformen und Kategorien, *hinweisen*: Diese Aprioris sind erfahrungskonstitutiv, aber auch wissenschaftsrepräsentativ, d.h. sie spiegeln den jeweiligen Stand der Wissenschaft und sind an keinem Punkt ihrer Entwicklung als endgültig auszuweisen. Will man Kants Programm heute noch als eine Möglichkeit methodisch reflektierter und empirisch interessierter Wissenschaftstheorie begreifen, die den Problemen des Induktivismus wie der traditionellen Metaphysik entgeht, muß man zuallererst seinen absoluten Begründungsanspruch aufgeben und nach Möglichkeiten suchen, sein Programm in *wissenschaftsadäquater* Weise weiterzuentwickeln. Ansätze hierzu hat es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vor allem bei William Whewell und Jakob Friedrich Fries gegeben. Aus Gründen, die bereits früher dargelegt wurden[776], beschränke ich mich hier auf Fries' Weiterführung der Wissenschaftstheorie Kants. Während die Untersuchung dieses Projektes insgesamt eine größere und *eigene* Untersuchung erfordert, die hier nicht geleistet werden kann[777], sollen im folgenden Kapitel deren Implikationen für den Wandel des Systemverständnisses der KMN analysiert werden.

[776] Vgl. Kap. II, Teil 3.3.

[777] Die Vorarbeiten hierzu erstrecken sich *auch* auf Fries' Axiombegriff in der „Philosophie der reinen Mathematik" und der „reinen Bewegungslehre", die „gleichsam die Philosophie der angewandten Mathematik" darstellt (Fries 1822; *WW* 13, S. IX und S. 397), und werden in der weiteren Ausarbeitung dieser Untersuchung Berücksichtigung finden. Grundlagen für eine *allgemeinere* Untersuchung der Wissenschaftstheorie Fries' liefern neben den ausführlichen ‚Vorbemerkungen' der Herausgeber seiner *Sämtlichen Schriften* (*WW*) vor allem Siegel 1913, Kap. III; Bonsiepen 1997, Kap. IV, verschiedene Beiträge in Hogrebe/Herrmann 1999 sowie Herrmann 2000. Zur wissenschaftstheoretischen und naturphilosophischen Fries-Rezeption und -Literatur s. auch Pulte 1999b.

V System, Theorie und Heuristik: Zur Transformation von nomothetischer Teleologie und Systemdenken bei Kant und Fries

V.1 Einführung

Die bisherige Analyse der Auflösung des axiomatischen Denkens bei den ‚Praktikern' der KMN wird im *nächsten* Teil wieder aufgenommen und weitergeführt. Im *vorliegenden* Kapitel[778] geht es darum, den Wandel des *Systemverständnisses* der KMN näher zu untersuchen. Wie bereits eingangs betont, ist eine ‚logisch-deduktive' Systemauffassung, wonach der Ableitungszusammenhang aller Sätze (hier: der Mechanik) — insbesondere aber ihre Ableitbarkeit aus ersten Grundsätzen — die Einheit des Gesamts wissenschaftlicher Erkenntnis sichert, ein zentrales Element der klassischen Wissenschaftsauffassung.[779] Von den ‚Praktikern' der KMN wird dieses Systemverständnis gewöhnlich[780] nicht näher ausgeführt: Es bleibt bei Euler, d'Alembert, Lagrange und anderen Vertretern der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts, aber auch noch bei Repräsentanten eines ‚modernen' Mechanismus wie Boltzmann oder Helmholtz, in der Regel bei Feststellungen von der Art, daß *alle* Sätze der Mechanik aus diesen oder jenen Prinzipien ‚abgeleitet' werden können müssen, daß sie auf jene ‚reduzierbar' seien oder daß sie in jenen ‚enthalten' seien. Dabei wird gewöhnlich nicht reflektiert, warum ein solches wissenschaftliches Gesamt in logischer Ordnung eine disparat begegnende, uns in einer Vielheit scheinbar zusammenhangsloser Phänomene gegenübertretende Natur beschreiben und erklären kann, wie es die KMN fordert. Um hier genauere Auskunft zu erhalten, ist es erforderlich, nicht ‚Praktiker', sondern ‚Theoretiker' der KMN zu konsultieren. Aus bereits früher dargelegten Gründen[781] schränke ich die entsprechende Untersuchung auf Kant und Fries ein. Dabei soll zwei-

[778] Dieses Kapitel stimmt inhaltlich weitgehend überein mit den Ausführungen in Pulte 1999b.

[779] Vgl. Kap. II, Teil 1.1.

[780] Eine wichtige Ausnahme im 18. Jahrhundert stellt J.H. Lambert dar. Vgl. Lambert 1782/87, hierzu auch König 1968c; zum Systembegriff allgemein s. auch die weiteren Beiträge in Diemer 1968d.

[781] Vgl. Kap. II, Teil 3.3.

erlei deutlich werden: zum einen, daß *auch* die allgemeinere philosophische und wissenschaftstheoretische Reflexion ihren Ausgang in der KMN selbst nimmt, genauer gesagt in der analytischen Mechanik (Ich habe dies im letzten Teil mit der Wendung von Kants ‚analytischer Projektion' bereits angedeutet.). Solche Zusammenhänge werden in der Regel von einer puristischen, auf vermeintlich innerphilosophische Probleme konzentrierten Philosophiegeschichtsschreibung, in der die Wechselwirkung von Philosophie und Wissenschaft ignoriert oder als kontingentes Randphänomen marginalisiert wird, durchschnitten.[782] Zum anderen soll klar werden, daß auch hier ein *Wandel* aufweisbar ist, der auf eine *Auflösung* der KMN hinweist und sich in einer methodologisch fruchtbaren Transformation des klassischen Systemverständnisses manifestiert. Es wird sich zeigen, daß dabei der Umformung der *Teleologie*, d.h. der Erforschung der Natur nach ihren Zweck- oder Finalursachen, eine wichtige Rolle zukommt.

Teleologie hat seit *der* Antike in der Naturphilosophie ihren angestammten Platz. Sie ist noch Mitte des 18. Jahrhunderts in der rationalen Mechanik anzutreffen[783], am Ende des Jahrhunderts allerdings ist sie dort jedoch als Erklärungs- und Begründungsform diskreditiert, während sie in der Biologie noch in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts verbreitet auftritt. Diese ‚teleologiespezifische Ungleichzeitigkeit' von Physik und Biologie[784] wird bei Kant besonders deutlich und ist durch Kant wohl auch am stärksten zementiert worden: In seiner Wissenschaftstheorie fungiert ja, wie wir bereits sahen, die mathematische Physik als Leitbild ‚reiner Naturwissenschaft'; die durchgängige Kausalität der Naturerscheinungen, durch die eine „spezifische Einheit der Natur"[785] begründet wird, ist eine *mechanische* Gesetzmäßigkeit. In der *Kritik der Urteilskraft* jedoch wird Kant dieses physikozentrische Ideal zum Problem, nämlich dort, wo es um die Erklärung biologischer Prozesse geht. Die Spannung zwischen allgemeinphysikalischem und kausalem Erklärungsanspruch, der teleologische Argumente ausschließt, und dem spezifischen Erklärungsproblem der Biologie, das nur durch Rückgriff auf teleologische Urteile zu lösen sei, wird in der „Analytik der teleologischen Urteilskraft" besonders deutlich:[786]

[782] Vgl. hierzu näher Pulte 1999b, insbes. Teil 2.2.

[783] Vgl. die Bemerkungen zum Prinzip der kleinsten Wirkung in Kap. IV, Teil 2.6 und 4.1; s. hierzu auch Schramm 1985 und Pulte 1989.

[784] Zwischen Physik und Biologie (ein Begriff, der sich erst um 1800 ausbildet) wird hier im Sinne einer Trennung von anorganischer und organischer Naturwissenschaft unterschieden. Dagegen umfaßte am Ende des 18. Jahrhunderts Physik noch „die gesamte Lehre von der Natur der Körperwelt", sogar „im weitläufigsten Sinne des Wortes [...] alles, was jemals über die Körper erfahren oder gedacht worden ist" (Gehler 1790-98 III, S. 488; Art. ‚Physik'), schloß also das Organische als Gegenstandsbereich mit ein. Diese Begriffsverwendung ist besonders bei Kant zu beachten.

[785] Martin 1960, S. 140.

[786] Kant 1790b, A303/B307 (*AA* 5, S. 382).

Arithmetische, geometrische Analogien, imgleichen allgemeine mechanische Gesetze, so sehr uns auch die Vereinigung verschiedener dem Anschein nach von einander ganz unabhängiger Regeln in einem Princip an ihnen befremdend und bewunderungswürdig vorkommen mag, enthalten [...] keinen Anspruch darauf, teleologische Erklärungsgründe in der Physik zu sein; und wenn sie gleich in der allgemeinen Theorie der Zweckmäßigkeit der Dinge der Natur überhaupt mit in Betrachtung gezogen zu werden verdienen, so würde diese doch anderwärts hin, nämlich in die Metaphysik, gehören und kein inneres Princip der Naturwissenschaft ausmachen: wie es wohl mit den empirischen Gesetzen der Naturzwecke an organisirten Wesen nicht allein erlaubt, sondern auch unvermeidlich ist, die teleologische *Beurtheilungsart* zum Princip der Naturlehre in Ansehung einer eigenen Classe ihrer Gegenstände zu gebrauchen.

Die Physik andererseits *beruht* auf einer durchgängigen mechanischen Gesetzmäßigkeit und darf sich keiner ‚teleologischen Erklärungsgründe' bedienen. Gleichzeitig wird hier aber auch Kants — nur auf Erfahrung beruhende und somit in seinem Sinne *nicht* begründete[787] — Überzeugung sichtbar, daß das Organische mit seinen ganzheitlichen Organisationsformen niemals allein durch mechanische Gesetzmäßigkeit würde erklärt werden können. Die besondere Beschaffenheit unseres Verstandes bedürfe hierzu „einer andern Art der Causalität, als der der Naturgesetze der Materie, nämlich nur nach der der Zwecke und Endursachen".[788]

Weil es einen ‚Newton des Grashalms'[789] nicht geben kann, muß einer *objektiven* und *materialen* Teleologie[790] *nolens volens* eine gewisse Rolle in der Theorie der Biologie eingeräumt werden. Um diesen Schluß dreht sich ein guter Teil der wissenschaftstheoriegeschichtlichen Diskussion zu Kants Teleologie. Sowohl die Prämisse, als auch die Konklusion, als auch der Status des Naturzweckbegriffs in seinem System wurden und werden recht kontrovers diskutiert.[791]

Fries hat Kants Theorie der objektiven Teleologie entschieden abgelehnt, ja er spricht hier *sogar* von „dem größten Fehler, der noch in Kants Spekulation stehen geblieben ist, nämlich von der Kritik der teleologischen Urtheilskraft, oder von der Idee

[787] Vgl. ebd., A264/B268 (*AA* 5, S. 359f.).

[788] Ebd., A346/B350 (*AA* 5, S. 408).

[789] Vgl. ebd., A334/B338 (*AA* 5, S. 400); zu diesem Metonym wie auch anderen Metonymen, die sich auf Newton beziehen, s. Dierse 1986.

[790] Objektiv in dem Sinne, daß der Begriff eines Gegenstandes (d.h. hier: des Organismus) ohne Zweckmäßigkeit nicht möglich sei (Kant 1790b, A264/B268; *AA* 5, S. 359f.); material bzw. real (im Unterschied zu bloß formal) in dem Sinne, daß die Zweckmäßigkeit einen empirischen Bezug aufweist — „weil es existirende Dinge sind, die empirisch gegeben sein müssen, um erkannt werden zu können, und nicht eine bloße nach einem Princip a priori bestimmte Vorstellung in mir. Daher die letztere (empirische) Zweckmäßigkeit als *real*, von dem Begriff eines Zwecks abhängig ist" (ebd., A271/B275; *AA* 5, S. 364).

[791] An umfassenden Untersuchungen zu Kants Teleologie seien hier v.a. genannt Stadler 1874; Ungerer 1922; Düsing 1968; McLaughlin 1989; zur neueren wissenschaftstheoretischen Diskussion sei verwiesen auf Engels 1982.

einer Teleologie der Natur nach Begriffen", und fordert, „auch den Organismus dem allgemeinen Mechanismus der Natur zu unterwerfen"[792]. Eine Form teleologischer Erklärung, die (nach Kant) aus der Physik auszuschließen sei, darf (nach Fries) auch in der Biologie kein ‚Reservat' finden. Die mathematisch-mechanische Behandlung biologischer Prozesse erklärt Fries deshalb zur größten Aufgabe künftiger Naturforschung[793] — eine Forderung, die in der Philosophiegeschichte zurecht als konsequente Fortsetzung der Elimination teleologischer Naturerklärung, wie sie von Kant begonnen wurde, ihren Platz gefunden hat.[794]

Es erscheint aus zwei Gründen sinnvoll, diesen Hinweis auf die gut dokumentierte ‚biologische' Seite des Teleologieproblems bei Kant und Fries vorauszuschicken: Zum einen steht sie bei *beiden* im Mittelpunkt der Diskussion; zum anderen gibt es aber auch eine Parallele zu der ‚mathematisch-physikalischen' Seite des Problems, die hier untersucht werden soll und ihren Ausgangspunkt in der analytischen Mechanik hat. Diese Seite wird bei Kant so gut wie bei Fries relativ knapp behandelt; dennoch läßt sich die These vertreten, daß sie im Rahmen ihrer jeweiligen Wissenschaftstheorien als die *grundlegendere* anzusehen ist, eben weil die mathematische Physik für beide Philosophen das Leitmodell von Wissenschaftlichkeit schlechthin darstellt.

Konkret soll im *folgenden* untersucht werden, wie eine Konzeption von teleologischer Erklärung aus *Gesetzen* in Kants und Fries' Wissenschaftstheorie Eingang findet und dort ‚kritisch' transformiert wird. Mit Kant gesprochen, geht es hier nicht um die objektive materiale Teleologie des Organischen, sondern um die *subjektive formale Teleologie*, d.h. nicht um eine innere Zweckmäßigkeit bestimmter Dinge der Natur, sondern um die formale (gesetzes- und systemartige) Angemessenheit von Natur *überhaupt* für unser Erkenntnisvermögen. Es ist *diese* (und *nur diese*) Form von Teleologie, die in einer Analyse des Wandels *Mathematischer* Naturphilosophie ihren Platz hat und haben *muß*.

[792] Fries 1804, S. XIII (*WW* 3, S. 17; vgl. auch *WW* 4, S. 58).

[793] Fries 1822, S. 585. Sein Schüler Matthias Jakob Schleiden erklärt später teleologisches Denken rundweg zu einem „Nothbehelf für beschränkte Köpfe" (Schleiden 1848 S. 158).

[794] „In noch konsequenterer Weise als Kant bricht er mit der vitalistisch-teleologischen Auffassung", konstatiert etwa Konstantin Oesterreich in seiner Bearbeitung des ‚Ueberweg' zu Fries (Ueberweg 1916, S. 136).

Die fragliche *Transformation* nomothetischer Teleologie betrachte ich, vorweg bemerkt, als *exemplarisch* für den Übergang von einer klassischen zu einer modernen Wissenschaftsauffassung, wie er eingangsskizziert wurde.[795] Insbesondere sei hier noch einmal an zwei der dort aufgeführten allgemeinen ‚Kriterien-Tendenzen' erinnert, die mir für die hier zu analysierende Entwicklung charakteristisch zu sein scheinen: die ‚Entmetaphysierung' von Wissenschaft und deren zunehmender, durch Hinterfragung von Voraussetzungen und Methoden wissenschaftlicher Arbeit gekennzeichneter ‚Reflexionscharakter'.[796]

[795] Vgl. Kap. II, Teil 1.1 (Diemers ‚Kriterien-Tendenzen').
[796] S. hierzu näher Diemer/König 1991, S. 4f.

V.2 Nomothetische Teleologie im 18. Jahrhundert

V.2.1 Zwei Formen von Teleologie

Christian Wolff *bestimmt* in seiner erstmals 1728 erschienenen *Philosophia rationalis sive logica* die Teleologie (*teleologia*) als den Teil der Philosophie, der die Gründe der natürlichen Dinge nicht von einer Wirkursache (*causa efficiens*), sondern von ihrem Zweck (*finis*) her zu erklären sucht.[797] Ungeachtet der philosophischen Kritik bleibt sie als *Physikotheologie*, d.h. von der Absicht geleitet, aus besonders zweckmäßig erscheinenden Einrichtungen und einer besonderen Ordnung der Natur auf die Existenz Gottes (als Urheber dieser Zweckmäßigkeit und Wohlordnung) zu schließen, in vielfachen, heute oft kurios erscheinenden Variationen nachweisbar.[798] Für die folgende Diskussion ist es wichtig, zwei verschiedene Formen teleologischer Argumentation auseinanderzuhalten, für die die Literatur offenbar keine etablierten Begriffe bereithält. Ich greife daher auf Windelbands bekannte Kunstausdrücke[799] zurück und unterscheide zwischen idiographischer und nomothetischer Teleologie.[800]

[797] S. Wolff 1740 I, S. 38; zur näheren Erläuterung der Wolffschen Teleologie sei verwiesen auf Poser 1981a.

[798] „Es gab u.a. Astro-, Chiono-, Chorto-, Hydro-, Ichtyo-, Insekto-, Lithio-, Locusta-, Pyro-, Rana- oder Sismotheologien (d.h. Stern-, Schnee-, Gras-, Wasser-, Fisch-, Insekten-, Stein-, Heuschrecken-, Feuer-, Frosch- oder Erdbebentheologien)", bemerkt hierzu Thiele 1996, S. 375 (Anm. 4); s. hierzu auch Schramm 1985, S. 38-55.

[799] Vgl. Windelband 1894, S. 145

[800] Matthias Schramm spricht in seiner detailreichen Geschichte des teleologischen Denkens verschiedentlich von der „alten" und der „neuen Teleologie" (Schramm: 1985, insbes. S. 25-31). Während er die „alte Teleologie" wesentlich durch Aristoteles geprägt sieht, hebt er den Rückgriff auf die Konzeption des *Naturgesetzes* als entscheidenden Gesichtspunkt der „neuen Teleologie" hervor: Da es sich hier um eine spezifisch neuzeitliche Konzeption handelt, konnte sie für Aristoteles weder bei „formal-vergleichenden Zweckmäßigkeitsbetrachtungen" noch bei der Erforschung der „materialen inneren Zwecke" eine Rolle spielen (ebd., S. 28f.). Hierin ist Schramm uneingeschränkt zuzustimmen. Nun kennzeichnet er die „neue Teleologie" auch verschiedentlich als eine *formale* (vgl. ebd., z.B. S. 70-77, 89, 157), während ich die Bezeichnung *nomothetisch* für geeigneter halte: Das eigentlich Charakteristische der „neuen Teleologie" ist, daß sie von allgemeinen und notwendigen *Naturgesetzen* ausgeht und ihrerseits deren Gesetzescharakter begründet. Dies kommt im Begriff ‚formale Teleologie' nicht hinlänglich zum Ausdruck, denn eine formalteleologische Argumentation kann sich auch auf ein Einzelnes beziehen: So ist etwa Eulers Begründung dafür, daß das menschliche Auge eine besondere Zweckmäßigkeit aufweist, durchaus formalteleologisch zu nennen (vgl. ebd., S. 159f.). Sie *bedient* sich zwar mathematischer Naturgesetze, aber sie stützt ihr eigentliches Zweckmäßigkeitsargument nicht auf Naturgesetzlichkeit, sondern auf die besondere Zusammenpassung der einzelnen Teile des Auges, für deren Beurteilung die Gesetze nur als Kriterienmaßstäbe fungieren. Es handelt sich

Beide Arten verfolgen das Ziel, Zweckmäßigkeiten in der Natur aufzudecken, in aller Regel mit der weitergehenden physikotheologischen Absicht, Hinweise auf oder Beweise für die Existenz eines zwecksetzenden Schöpfergottes zu liefern. Sie unterscheiden sich jedoch — dies ist hier besonders hervorzuheben — *formal* in der Art der dabei verwendeten Naturzwecke. Die idiographische Teleologie geht, wie der Name sagt, von einer Beschreibung des Eigentümlichen bzw. Besonderen aus. Sie findet eine Zweckmäßigkeit der Natur in Einzelphänomenen wie z.B. einem Kristall, dem Bau eines Insekts oder einer Blüte, der Anordnung unseres Sonnensystems oder — ein immer wiederkehrendes und geradezu paradigmatisches Beispiel — dem Bau des menschlichen Auges.

Nomothetische Teleologie dagegen bezieht sich auf *Naturgesetze*, die eine besondere Zweckmäßigkeit aufweisen. Die physikotheologische Argumentation hebt hier darauf ab, daß Naturgesetze als Ausdruck eines göttlichen Schöpfungsplans zu verstehen seien[801], sie bringen Konstanz und Harmonie einer objektiven Naturordnung zum Ausdruck. Verbunden wird hiermit aber oft auch das subjektivistische Argument, daß die Naturgesetze eine besondere *Angemessenheit* dieser Naturordnung für das menschliche Erkenntnisvermögen aufweisen. Das Newtonsche Gravitationsgesetz beispielsweise wurde im 18. Jahrhundert oft in beiderlei Sinn als ein besonders zweckmäßiges interpretiert.[802] Als nomothetisch, d.h. gesetz*gebend* bezeichne ich teleologisches Denken aber *nicht* bereits dann, wenn die *Entdeckung* von Naturgesetzen als ein zweckgeleitetes Unternehmen angesehen wird[803], sondern erst dann, wenn die *Begründung* dafür,

daher *nicht* um ein Beispiel nomothetischer Teleologie in meinem Sinne — und es ist bemerkenswerterweise auch kein Exempel typisch neuzeitlicher Teleologie, wie die Geschichte dieses „alten Standardbeispiels" (vgl. ebd., S. 159f.) zeigt.

[801] Noch John Stuart Mills *Three Essays on Religion* von 1874 spiegeln diesen Zusammenhang wider. Vgl. Mill 1984, S. 116f.

[802] Derham etwa sieht die Zweckmäßigkeit des Gravitationsgesetzes darin, daß es die Planeten von einer Zerstreuung im Weltraum abhält (vgl. Schramm 1985, S. 36f.), also ein Planetensystem überhaupt erst konstituiert. Maupertuis entlehnt der Newtonschen Potentialtheorie das mathematische Argument, die spezielle $1/r^2$- Form biete dem Physiker den unschätzbaren Vorteil, die nahezu sphärischen Himmelskörper mathematisch wie Punktmassen zu behandeln, was bei anderen (Attraktions-) Gesetzen nicht möglich ist (s. Maupertuis 1732, S. 167-170). Derhams teleologische Argumentation ist eher objektivistisch, Maupertuis' eher subjektivistisch geprägt.

[803] Newton stellt ein gutes Beispiel dafür dar, daß eine ‚rein empirische' Gewinnung von Naturgesetzen, von denen dann erst auf eine göttliche Schöpfung geschlossen werden kann, und die ‚metaphysisch geleitete' Suche nach zweckmäßigen, den göttlichen Schöpfungsplan offenbarenden Gesetzen oft nicht voneinander getrennt werden können (vgl. Kap. I, Teil 4.3): In seiner Methodologie fordert er bekanntlich, allgemeine Sätze per Induktion aus den Erscheinungen zu ‚deduzieren' (vgl. Kap. I, Teil 4.1). Im privaten Diskurs gibt er dagegen zu erkennen, daß er diesen Weg zumindest nicht als den einzig möglichen ansieht: „When I wrote my treatise about our Systeme I had an eye upon such Principles as might work wth considering men for the beliefe of a Deity [...]" (Newton an Bentley vom 10. Dez. 1692; *Correspondence* III, S. 233). Dennoch

daß es sich bei gewissen festgestellten Regelmäßigkeiten um eigentliche, d.h. durch Allgemeinheit, Notwendigkeit und Sicherheit gekennzeichnete Naturgesetze handelt, sich ganz oder hauptsächlich auf Zweckargumente stützt.[804]

Die generelle Entwicklung der Naturwissenschaften vom 16. bis zum 19. Jahrhundert, ist durch eine sukzessive *Verdrängung* teleologischer Denkweisen gekennzeichnet.[805] Der Aufstieg des Mechanismus ließ teleologische Argumente in dem Maße als überflüssig und metaphysisch verdächtig erscheinen, wie diese durch kausale Erklärungen und Begründungen ersetzt werden konnten.[806] Aber mit dem Mechanismus hielt die Konzeption des Naturgesetzes[807] Einzug in die Wissenschaft. Die bereits eingangs angesprochene ‚Ungleichzeitigkeit' von Biologie und Physik läßt sich hierdurch besser verstehen: Für die Biologie war — mangels allgemeiner Gesetzmäßigkeiten — bis weit ins 19. Jahrhundert hinein die hier als idiographisch bezeichnete Form der Teleologie maßgebend. Die Entwicklung innerhalb der Physik ist komplexer und läßt sich grob so skizzieren: Im 17. Jahrhundert koexistierten beide Teleologieformen. Im Verlauf des 18. Jahrhunderts wurde idiographische Teleologie mehr und mehr eliminiert und nomothetische Teleologie gewinnt die Oberhand[808] — eine Entwicklung, die eine zunehmen-

ist Newton kein Vertreter nomothetischer Teleologie in meinem Sinne, denn die *Begründung* des Gesetzescharakters seiner ‚axiomata' und des Gravitationsgesetzes beruht im wesentlichen *nicht* auf Zweckmäßigkeitsargumenten.

[804] Leibniz' Begründung der Gesetze der Physik liefert ein gutes Beispiel nomothetischer Teleologie im hier gemeinten Sinne. S. Poser 1981a, insbes. S. 105-107.

[805] Vgl. Krafft 1981. Krafft will seine Verdrängungsthese auf den Bereich der anorganischen Naturwissenschaften beschränkt wissen (ebd., S. 37). Auf beachtliche ‚Ungleichzeitigkeiten' in der Elimination teleologischen Denkens in diesem Bereich macht aufmerksam Pulte 1995. Zur Entwicklung in der deutschen Biologie des 19. Jahrhunderts vgl. insbes. Lenoir 1982.

[806] Diese Entwicklung wird besonders scharf fokussiert in der Philosophie von Leibniz: Weil er ein nachdrücklicher Verfechter nomothetischer Teleologie *und* des Mechanismus war, hat er als einer der Ersten die Vereinbarkeit teleologischer und kausalmechanischer Naturerklärung als grundsätzliches philosophisches Problem wahrgenommen und im Rahmen seiner Monadenlehre eine Lösung angeboten. Ich gehe hier auf Leibniz nicht näher ein, weil er nach meiner Rekonstruktion für die im folgenden zu untersuchende Entwicklung keine entscheidende Rolle spielte — entgegen der gängigen Geschichtsschreibung im allgemeinen und der recht einflußreichen historischen Untersuchung von Adolf Kneser im besonderen; vgl. unten Anm. 842, sowie Kneser 1928.

[807] Einen guten historischen Überblick hierzu bietet Steinle 1995.

[808] D'Alembert beispielsweise gibt 1751 folgende Definition von Finalursachen: „Le principe des *causes finales* consiste à chercher les *causes* des effets de la nature par la *fin* que son auteur a dû se proposer en produisant ces effets. On peut dire plus généralement, que le principe des *causes finales* consiste à trouver les lois des phénoménes par des principes métaphysiques" (D'Alembert 1751, S. 789). Die allgemeinere Bedeutung sieht d'Alembert bereits in der Aufdekkung von *Gesetzen*, und sie steht bei seinen weiteren Ausführungen ganz im Vordergrund — offenbar deshalb, weil die ältere, idiographische Teleologie keine ernsthafte Diskussion mehr

de Theoretisierung der Physik widerspiegelt, aber auch deren Methodisierung, die bewußt macht, daß idiographisch-teleologische Argumente sich bei genauerer Betrachtung in aller Regel entweder als banal oder als zirkulär erweisen.[809] Gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde schließlich auch die nomothetische Teleologie nur noch vereinzelt vertreten: Die mathematische Entwicklung erlaubt es dem Mechanismus, ausgesprochen zweckhaft erscheinende Gesetze (wie z.B. die Extremal- und Erhaltungsprinzipien der damaligen Physik) in ‚mechanistische Äquivalente' (Differentialgleichungen) zu übersetzen bzw. aus jenen abzuleiten und sie so gewissermaßen kausalmethodologisch zu ‚entschärfen'.[810]

Zuvor ist es besonders das Prinzip der kleinsten Wirkung, das eine gewisse ‚teleologische Sprengkraft' für den Mechanismus zu bieten scheint. Es spielt — historisch wie auch systematisch — eine Rolle für Kants subjektive formale Teleologie und bedarf daher erneut einer kurzen Betrachtung.

V.2.2 Zur teleologischen Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung

Eulers und Maupertuis' Prinzip der kleinsten Wirkung legt die Bewegung der Masse eindeutig durch eine *Minimumsbedingung*[811] fest und kann unter recht allgemeinen Bedingungen auf ein System beliebig vieler Massen ausgedehnt werden. Es scheint demnach, daß die Natur bei allen mechanischen Prozessen den *Zweck* verfolge, ihre Veränderungen mit möglichst *geringem* Aufwand zu erreichen. Ironischerweise war es *gerade* die mechanistische Prämisse, daß alle Naturvorgänge durch (eine mit wenigen ‚Wesenseigenschaften' ausgestattete) Materie und Bewegung erklärbar seien, unter der dieses Prinzip zu einem beschränkt gültigen Naturgesetz aufsteigen konnte — versehen

verdient (vgl. ebd., S. 789). Er läßt sogar eine vorsichtige Zustimmung zu Maupertuis' ‚nomothetischer' Auffassung von Physikotheologie erkennen, wonach ein Gottesbeweis nicht von der Finalität der Einzelerscheinungen, sondern von den allgemeinsten Naturgesetzen ausgehen müsse (ebd., S. 789; vgl. D'Alembert 1754, S. 296f.).

[809] „Zwar fehlt es uns nicht an oberflächlichen Schriften, deren Verfasser bey jedem einzelnen Phänomen in Declamationen über die Zwecke der Vorsehung ausbrechen: aber oft geschieht dies auf eine sehr unschickliche Art, die den Leser ermüdet, dem Kenner Verdruß erregt, dem Gegner nur neue Waffen in die Hände giebt, und im Grunde der guten Sache mehr Schaden als Vortheil bringt" (Gehler 1790-98 IV, S. 286; Art. ‚Teleologie').

[810] Am Beispiel Lagranges läßt sich dies geradezu idealtypisch nachweisen. Für Einzelheiten s. Pulte 1989, S. 230-261.

[811] Allgemeiner: die Forderung nach einem *stationären* Wert; vgl. Kap. III, Teil 4.2. Im folgenden werden mathematische und historische Details zum Prinzip der kleinsten Wirkung auf ein solches ‚Minimum' beschränkt, das für das Verständnis der weiteren Argumentation notwendig erscheint. Für alle wissenschaftshistorischen Details sei verwiesen auf Pulte 1989.

freilich mit dem Nimbus einer teleologischen, geradezu zweckoffenbarenden ‚Weltformel', die das mechanistische Programm transzendiert.

Eine solche weitgehende teleologische Interpretation vertritt v.a. Maupertuis. Während Euler in seiner Theorie der Materie eine ihn befriedigende naturphilosophische Begründung des Prinzips der kleinsten Wirkung findet[812], ist Maupertuis ein ausgesprochener Vertreter nomothetischer Teleologie, die er scharf gegen die idiographische Teleologie und deren ‚Gottesbeweis' abgrenzt.[813] Sein ‚neuer' Gottesbeweis auf der Grundlage des Prinzips der kleinsten Wirkung findet — u.a. auch bei Kant, wie wir sehen werden — einige Beachtung.

Doch es wäre falsch, den Begründungszusammenhang des Prinzips der kleinsten Wirkung ganz auf die physikotheologische Dimension einzuengen. Stilisierend kann man vier Hauptargumente unterscheiden, die Mauptertuis zugunsten seines Prinzips vorbringt. Nur die beiden ersten, eng miteinander zusammenhängenden sind physikotheologischer, die beiden folgenden dagegen wissenschafts- bzw. erkenntnistheoretischer Natur:

(1) Das nomothetische *Argument*: Ein physikotheologischer Gottesbeweis, der „vor allem den Vorteil der Evidenz, wie sie für die Wahrheiten der Mathematik charakteristisch ist"[814], hat, darf nicht von der Zweckmäßigkeit der Einzelphänomene ausgehen, sondern muß Zweckmäßigkeit in den allgemeinsten Naturgesetzen aufweisen. Die Allgemeinheit, Notwendigkeit und Gewißheit der ‚zweckoffenbarenden' Naturgesetze ist umgekehrt begründet im göttlichen Plan einer zweckmäßigen Naturordnung.[815]

(2) Das Argument der *Naturökonomie*: Die Minimierung einer bestimmten Größe (Aktion bzw. Wirkung) in allen Naturvorgängen weist auf eine ‚ökonomische' und ‚weise' Einrichtung der Natur durch Gott hin: Alle Naturvorgänge werden mit dem kleinstmöglichen Maß an (göttlichem) Aufwand vollbracht.[816]

[812] S. ebd., Kap. II, insbes. S. 171-182. Auf die methodologische Seite der Argumentation Eulers komme ich noch kurz zurück (Teil 4.4, Anm. 922).

[813] Vgl. etwa Maupertuis 1750, S. 21.

[814] Ebd., S. 22.

[815] Zum ersten Teil des Arguments vgl. (auch) oben Zitat 36. Daß es Maupertuis aber gerade auch darum geht, durch seinen Gottesbeweis den fraglichen Naturgesetzen (als logischen Folgerungen aus seinem Prinzip der kleinsten Wirkung) eine Allgemeinheit und Sicherheit zu geben, die Erfahrung und Mathematik *nicht* gewähren können, macht er wenig später deutlich (ebd., S. 23f.): Erst eine ‚Deduktion' der Gesetze aus göttlichen Eigenschaften sichert deren eigentlichen Gesetzescharakter — andernfalls könnte es sich um bloße kontingente empirische Regularitäten oder um leere mathematische Spekulationen handeln. Auf diesen Punkt wird im Zusammenhang mit Kant zurückzukommen sein (s. Teil 3).

[816] Vgl. z.B. ebd., S. xxvf. Dieses zweite Argument liefert die nähere Bestimmung dafür, warum das Prinzip der kleinsten Wirkung nach Maupertuis als zweckmäßig anzusehen ist. Es kam aber in dieser Form, d.h. als reines *Minimal*prinzip, sozusagen ‚widerlegt zur Welt': Bereits vor Maupertuis' erster Formulierung des Wirkungsprinzips gab es Beispiele, die zeigen, daß —

(3) Das architektonische *Argument*: Das Prinzip der kleinsten Wirkung hat den Status eines ‚Metagesetzes', d.h. es erlaubt die Deduktion zahlreicher spezieller, durch die Erfahrung gut bestätigter Gesetze aus den *unterschiedlichsten* Bereichen der Physik. Es wird daher nicht nur empirisch durch seine deduktiven Schlußfolgerungen bewährt, sondern hat auch eine *einheitsstiftende* Funktion für ein System empirischer Gesetze.[817]

(4) Das kausalitätskritische *Argument*: Das Prinzip der kleinsten Wirkung vermeidet die Einführung primärer Kräfte im Sinne bewegungsgenerierender Ursachen (Newton, Leibniz), die aus erkenntnistheoretischen Gründen aus der Theorie der Physik auszuschließen sind (Hume). Es liefert eine deskriptive Alternative zur problematischen Kausalerklärung durch Kräfte.[818]

Die beiden erstgenannten, physikotheologischen Argumente dominierten die philosophische Diskussion des Prinzips der kleinsten Wirkung. Das Argument der Naturökonomie wird zwar schon bald nach Maupertuis' erster Formulierung aus mathematischen Gründen als unhaltbar angesehen.[819] In der Rezeptionsgeschichte des Prinzips der kleinsten Wirkung spielt es aber gerade deshalb eine wichtige Rolle: Es trägt mit dazu bei, daß das Prinzip in wissenschaftlichen Kreisen gegen Ende des 18. Jahrhunderts als metaphysisch verdächtig gilt und generell skeptisch beurteilt wird. Das architektonische Argument wird insbesondere auch für Kant wichtig. Maupertuis' letztgenanntes

jedenfalls für den von ihm intendierten, weiten Anwendungsbereich — die Aktion auch ein *Maximum* annehmen kann. Das Prinzip der kleinsten Wirkung sollte im systematischen Kontext systematisch also korrekter als eines der *stationären* Wirkung bezeichnet werden.

[817] Vgl. hierzu Pulte 1989, insbes. S. 75-81 und S. 93f. Bereits die Titel von Maupertuis' wichtigsten Darstellungen seines Prinzips lassen dieses Argument erkennen; s. Maupertuis 1744; 1746. Das Argument läßt sich ebenso bei dem ‚gleichzeitigen' Entdecker Euler nachweisen, s. Euler 1748a. Sieht man hier von allen Detailproblemen der Herleitung ab, erlaubt das Prinzip der kleinsten Wirkung in der Tat die Deduktion einer erstaunlichen Vielzahl von Einzelgesetzen, die im 18. Jahrhundert ohne Beispiel war. Es umfaßt die Bereiche *Optik* (Reflexionsgesetz, Brechungsgesetz), *Statik* diskreter Massen und Kontinua (Hebelgesetz, Satz vom niedrigsten Schwerpunkt, spezielle Formen des sog. Dirichlet-Prinzips), *Stoßtheorie* (Impulserhaltung, vis viva-Erhaltung) und die — von Euler in den Vordergrund gestellte — *Dynamik* (Bewegungsgleichungen für Zentralkraftbewegungen). Euler bemerkte denn auch zu Maupertuis' Prinzip der kleinsten Wirkung: „ [...] on sera obligé de reconnoitre que cette idée est d'un usage universel, tant dans la Mécanique, que dans toute la Physique" (ebd., S. 39).

[818] Maupertuis hat im Anschluß an Hume, aber auch an Berkeley und Malebranche, die erkenntnistheoretische Seite von deren Kausalitäts- und Kraftkritik betont und für sein Prinzip der kleinsten Wirkung zu nutzen gesucht (s. z.B. Maupertuis 1750, S. 28-34), während Euler im Rahmen seiner Materietheorie vor allem ontologische Argumente gegen die Einführung primärer Kräfte vorbrachte. *Beide* aber sahen im Prinzip der kleinsten Wirkung die Möglichkeit, auf solche problematischen Entitäten zu verzichten. Für alle Einzelheiten und Belege s. Pulte 1989, insbes. S. 83-103 und S. 150-181.

[819] Hier ist v.a. auf die Kritik von d'Arcy und d'Alembert ab 1749 zu verweisen; s. ebd., insbes. S. 197f. und S. 214-216.

Argument dagegen hat für die Rezeption seines Prinzips keine nennenswerte Bedeutung — Symptom weitgehender Anerkennung einer ‚Mechanik der Kräfte' in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, für die die Kausalerklärung von Naturprozessen durch primäre, bewegungsgenerierende Kräfte unproblematisch erscheint. Auch Kant — „der Protagonist eines kausalen Wissenschaftsbegriffs"[820] — greift dieses Argument nicht auf.

[820] Engfer 1981, S. 119.

V.3 Nomothetische und subjektive formale Teleologie bei Kant

V.3.1 Vorkritische Rezeption der Physikotheologie

Die lebhafte Diskussion um das Prinzip der kleinsten Wirkung fällt in die späten 40er und frühen 50er Jahre des 18. Jahrhunderts, d.h. in den Zeitraum, in dem Kants „dauernde, leider nicht immer glückliche Liebe zur Physik"[821] wohl am stärksten ausgeprägt ist. Während er deren Entwicklung, insbesondere sofern sie mathematischer Natur war, in der zweiten Jahrhunderthälfte nur noch sporadisch wahrnimmt, versucht er hier noch mit den *Gedanken von der wahren Schätzung der lebendigen Kräfte* (1746, erschienen 1749)[822], in eine recht aktuelle wissenschaftliche Diskussion einzugreifen. In dieser Zeit beschäftigt er sich auch mit der Materietheorie und der Theorie des Raumes von Euler[823]. Bereits Anfang der 50er Jahre studiert er ebenfalls Maupertuis' *Essai de Cosmologie* (1750, übers. 1751), der die oben dargestellten Hauptargumente zum Prinzip der kleinsten Wirkung enthält. Es ist verschiedentlich, am detailliertesten wohl von Hans-Georg Waschkies[824], nachgewiesen worden, daß und wie diese Schrift die Physikotheologie des jungen Kant stark beeinflußte: In der *Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (1755) teilt er Maupertuis' Kritik an der älteren, idiographischen Teleologie und übernimmt dessen Gottesbeweis in seinen Hauptzügen.[825]

Hier soll nun nicht die Entwicklung von Kants Physikotheologie allgemein verfolgt, sondern der Frage nachgegangen werden, welche Rolle die Maupertuis-Rezeption für das Verhältnis von Teleologie und Naturgesetzlichkeit bei Kant spielt. Daß die ersten drei der oben dargelegten Argumente Maupertuis' zugunsten seines Prinzips der kleinsten Wirkung einen nachhaltigen Eindruck auf Kant hinterlassen haben, zeigt noch 1763 die Schrift *Der einzig mögliche Beweisgrund zu einer Demonstration des Daseins Gottes.*

Diese Schrift ist von großer Bedeutung für die Ausbildung der späteren Konzeption einer subjektiven formalen Teleologie.[826] Kants Ausführungen zu „der wichtigen Ent-

[821] Kötter 1991, S. 157.

[822] Zur Differenz von Veröffentlichungs- und tatsächlichem Erscheinungsdatum s. Adickes 1924/25 I, S. 65 (Anm.).

[823] Zu dem er im Zusammenhang mit dem Erscheinen seines o.g. Erstlingswerkes erstmals Kontakt sucht. S. den Brief Kant an Euler vom 23. Aug. 1749 (abgedruckt in Fischer 1985, S. 217-218; die Akademie-Ausgabe der Werke Kants enthält diesen Brief nicht).

[824] S. Waschkies 1987, S. 562-583 und die dort (insbes. S. 562f.) aufgeführte Sekundärliteratur.

[825] S. Kant 1755, insbes. AXIIIf., AXXVIIIf. und A144-A148 (*AA* 1, S. 222f., S. 227f. und S. 331-334).

[826] Hierauf wird bereits aufmerksam gemacht von Buchdahl 1969, insbes. S. 486-493.

deckung des Herrn v. Maupertuis [...], die er in Ansehung der Wohlgereimtheit der notwendigen und allgemeinsten Bewegungsgesetze gemacht hat", verdienen daher eine ausführliche Wiedergabe und Analyse:[827]

Der Herr v. Maupertuis bewies [...]: daß selbst die allgemeinsten Gesetze, wornach die Materie überhaupt wirkt, sowohl im Gleichgewichte als beim Stoße, sowohl der elastischen als unelastischen Körper, bei dem Anziehen des Lichts in der Brechung eben so gut, als beim Zurückstoßen desselben in der Abprallung, einer herrschenden Regel unterworfen sind, nach welcher die größte Sparsamkeit in der Handlung jederzeit beobachtet ist. Durch diese Entdeckung sind die Wirkungen der Materie ungeachtet der großen Verschiedenheiten, die sie an sich haben mögen, unter eine allgemeine Formel gebracht, die eine Beziehung auf Anständigkeit, Schönheit und Wohlgereimtheit ausdrückt. Gleichwohl sind die Gesetze der Bewegung selber so bewandt, daß sich nimmermehr eine Materie ohne sie denken läßt, und sie sind so nothwendig, daß sie auch ohne die mindeste[n] Versuche aus der allgemeinen und wesentlichen Beschaffenheit aller Materie mit größter Deutlichkeit können hergeleitet werden. Der gedachte scharffsinnige Gelehrte empfand alsbald, daß, indem dadurch in dem unendlichen Mannigfaltigen des Universum Einheit und in dem blindlings Nothwendigen Ordnung verursacht wird, irgend ein oberstes Principium sein müsse, wovon alles dieses seine Harmonie und Anständigkeit her haben kann. Er glaubte mit Recht, daß ein so allgemeiner Zusammenhang in den einfachsten Naturen der Dinge einen weit tauglichern Grund an die Hand gebe, irgend in einem vollkommenen Urwesen die letzte Ursache von allem in der Welt mit Gewißheit anzutreffen, als alle Wahrnehmung verschiedener zufälligen und veränderlichen Anordnung nach besondern Gesetzen.

Zunächst macht der Hinweis auf ‚die größte Sparsamkeit in der Handlung' deutlich, daß Kant hier noch Maupertuis'Argument der Naturökonomie anerkennt.[828] Aber dieses Argument ist nicht zentral für seinen Gedankengang: wohl möglich, daß er auch anderen Merkmalen (wie z.B. der Symmetrie) eine ‚Beziehung auf Anständigkeit, Schönheit und Wohlgereimtheit' zusprechen würde. Wichtiger ist Kant offenkundig das architektonische Argument: Die Unterordnung *ganz verschiedenartiger* Gesetze unter *eine allgemeine Formel* verweist auf eine Einheit, die durch die Vielfalt der Einzelgesetze verdeckt wird. Nicht Ökonomie, sondern *Einheit der Natur* steht also im Mittelpunkt seiner Teleologie.

Welche Rolle spielt nun das nomothetische Argument, wie steht es insbesondere um die *Begründungsfunktion*[829], die dieses Argument für Naturgesetze (auch) erfüllen soll? Kants Behandlung dieser Frage ist verwickelt und begrifflich nicht immer klar, insbesondere nicht in Hinblick auf den Terminus ‚Notwendigkeit'. Dieser Begriff ist aber

[827] Kant 1763, A63f. (*AA* 2, S. 98f.); zu den von Kant angesprochenen ‚allgemeinsten Gesetzen', die unter die ‚allgemeine Formel' der kleinsten Wirkung gebracht werden, vgl. Anm. 817.

[828] Was darauf hindeutet, daß er die innerwissenschaftliche Rezeption des Prinzips der kleinsten Wirkung nicht weiter verfolgt hat (vgl. Anm. 819).

[829] Es ist wichtig zu beachten, daß Kant selbst die obigen Ausführungen in den Kontext der seinerzeit vieldiskutierten Frage stellt, „ob die Bewegungsgesetze notwendig oder zufällig sein" (ebd., A64; *AA* 2, S. 99).

der Dreh- und Angelpunkt seiner Argumentation, denn damit eine Regelmäßigkeit der Natur als ein *Gesetz* bezeichnet werden kann, ist für Kant neben der Allgemeinheit vor allem die Notwendigkeit dieser Regel sicherzustellen. In seiner Argumentation lassen sich zwei Arten von Notwendigkeit unterscheiden, die er selbst oft nicht trennt, wie auch zwei Thesen zur Notwendigkeit der Einzelgesetze: Ich nenne sie

(a) die ‚Aufwärtsthese' von der internomischen Kontingenz und intranomischen Notwendigkeit;

(b) die ‚Abwärtsthese' von der inter- und intranomischen Notwendigkeit.

Damit ist folgendes gemeint:

(a) Empirisch festgestellte Regelmäßigkeiten für bestimmte Bereiche der Natur sind — zunächst und für sich betrachtet — zufällig. Sie ‚hängen' an Einzelphänomenen und können auch durch Induktion in keinem Sinne als notwendig erwiesen werden. Einen Notwendigkeitsbeweis sieht Kant aber als erbracht an, wenn ein Einzelgesetz (wie z.B. das des elastischen Stoßes) aus der ‚allgemeinen und wesentlichen Beschaffenheit aller Materie [...] hergeleitet werden' kann. Diese Notwendigkeit, wie problematisch ihr Nachweis auch sein mag, bezieht sich jedenfalls auf das Verhältnis von Subjekt und Prädikat *innerhalb* einer Gesetzesaussage; ich nenne sie daher *intranomisch*.

Kants Notwendigkeitsbestimmung ist hier noch — anders als später in den *Metaphysischen* Anfangsgründen — eine ‚essentialistische' im traditionellen Sinne, d.h. sie setzt eine Wesenskenntnis der Materie voraus. Nun unterliegen verschiedenartige Körper auch Gesetzen mit ‚großen Verschiedenheiten'. Selbst wenn jedes einzelne als notwendig erwiesen werden kann, weisen sie noch keinen Zusammenhang auf, sondern stellen ein zufälliges Nebeneinander dar. Die Kontingenzbehauptung Kants bezieht sich offenbar auf die Beziehung mehrerer Gesetze zueinander; ich nenne sie daher *internomisch*. Gelingt es nun — auf welchem Wege auch immer —, die verschiedenen Einzelgesetze unter eine gemeinsame Regel zu bringen, werden jedoch internomische Kontingenz und intranomische Notwendigkeit *im Verbund* zum Problem: Notwendigkeit der Einzelgesetze ohne Notwendigkeit ihres Zusammenhangs ist etwas nur ‚blindlings Nothwendiges'. Will man nicht bei einem ‚befremdlich Ungefähr', bei einer rätselhaften Zufälligkeit im Nebeneinander des Notwendigen, stehenbleiben, muß man auf einen gemeinsamen Grund der verschiedenen Notwendigkeiten schließen.[830] Da die intranomischen Notwendigkeiten in den Eigenschaften der Materie verankert sind, ist auch ‚dieses gemeinschaftliche Principium', das eine internomische Notwendigkeit begründen soll, auf eine geschaffene Materie zu beziehen. Soviel zur Begründung der ‚Aufwärtsthese'.

[830] „Denn wer wollte dafür halten: daß in einem weitläufigen Mannigfaltigen, worin jedes einzelne seine eigene völlig unabhängige Natur hätte, gleichwohl durch ein befremdlich Ungefähr sich alles sollte gerade so schicken, daß es wohl mit einander reimete und im Ganzen Einheit sich hervorfände" (ebd., A65; *AA* 2, S. 99).

(b) Kants Ausführungen zu dem fraglichen Prinzip verweisen schon auf seine spätere, transzendentale Theorie der Erfahrung. Er fordert nämlich, daß[831]

> dieses gemeinschaftliche Principium nicht blos auf das Dasein dieser Materie und der ihr ertheilten Eigenschaften gehen müsse, sondern selbst auf die Möglichkeit einer Materie überhaupt und auf das Wesen selbst [...], weil das, was einen Raum erfüllen soll, was der Bewegung des Stoßes und Druckes soll fähig sein, gar nicht unter andern Bedingungen kann gedacht werden, als diejenige sind, woraus die genannten Gesetze nothwendiger Weise herfließen. Auf diesen Fuß siehet man ein: daß diese Bewegungsgesetze *der Materie* schlechterdings nothwendig seien, das ist, wenn die Möglichkeit der Materie voraus gesetzt wird, es ihr widerspreche, nach andern Gesetzen zu wirken, welches eine logische Nothwendigkeit von der obersten Art ist [...].

Kants Argument besagt, daß aus der inneren Möglichkeit der Materie sowohl intranomische als auch internomische Notwendigkeit folgen: Andere als die jeweils festgestellten Einzelgesetze würden dem Begriff der Materie widersprechen (intranomische Notwendigkeit), aber ebenso eine Zusammenhanglosigkeit der verschiedenen notwendigen Einzelgesetze (internomische Notwendigkeit). Wenn die Naturforschung entgegen dieser Einsicht internomische Kontingenz (‚Zufälligkeit im Realverstande') konstatiert, ist dies darauf zurückzuführen, daß ‚die Data und das Reale' durch „irgend ein Principium, in welchem das Mannigfaltige Einheit, und das Verschiedene Verknüpfung bekommt, gesetzt sei"[832]; diese Zufälligkeit beruht also auf deren *Setzungscharakter* selber.

Für die weitere Diskussion bleibt bei diesem zweiten, ‚abwärtsgerichteten' Notwendigkeitsnachweis besonders dies festzuhalten: Sowenig Kant hier die intranomische Notwendigkeit der Einzelgesetze als logische Folge einer (zuvor als notwendig erwiesenen) ‚allgemeinen Formel' (wie Maupertuis' Prinzip) versteht, sowenig versteht er auch die internomische Notwendigkeit als eine Ableitungskonsequenz aus dieser Formel. Beide bezieht er vielmehr direkt auf die ‚innere Möglichkeit von Materie'. Es ist also bei ihm (anders als bei Maupertuis) *nicht* so, daß die allgemeine Formel als Prämisse für eine Ableitung von ‚Notwendigem aus Notwendigem' fungiert, sondern vielmehr so, daß diese Formel eine symbolische Darstellung der inneren Möglichkeit von Materie abgibt, d.h. auf beiderlei Notwendigkeit verweist, diese aber nicht beweist.

Daß Kant diese Möglichkeit und damit die Einheit und Ordnung der Naturgesetzlichkeit in Gott selber verortet, macht seine weitere Diskussion deutlich.[833] Daher er-

[831] Ebd., A65 (*AA* 2, S. 99f.)

[832] Ebd., A66 (*AA* 2, S. 100).

[833] S. z.B. ebd., A 80f. (*AA* 2, S. 107): „Diese Einheit aber [...] ist in dem hier angeführten Falle nothwendig und klebet dem Wesen der Sache an, und alle Wohlgereimtheit, Fruchtbarkeit und Schönheit, die ihr in so fern zu verdanken ist, hängt von Gott vermittelst der wesentlichen Ordnung der Natur ab, oder vermittelst desjenigen, was in der Ordnung der Natur nothwendig ist. Man wird mich hoffentlich schon verstehen, daß ich diese Nothwendigkeit nicht auf das Dasein

scheint es auch gerechtfertigt, den vorkritischen Kant (noch) als Vertreter einer nomothetischen Teleologie zu bezeichnen: Gott ist für ihn der Grund der inneren Möglichkeit der Materie und damit der Grund sowohl der (intranomischen) Notwendigkeit der Einzelgesetze als auch der (internomischen) Notwendigkeit, d.h. der Einheit und Ordnung der Einzelgesetze.[834]

Abschließend sei zum *Einzig möglichen Beweisgrund* darauf hingewiesen, daß Kant seine Teleologiediskussion mit der Unterscheidung einer ‚notwendigen Ordnung der Natur' für den Bereich des Anorganischen und einer ‚zufälligen Ordnung der Natur' für den Bereich des Organischen fortsetzt und so in eine Richtung lenkt, die die spätere Unterscheidung von objektiv-materialer und subjektiv-formaler Teleologie bereits erkennen läßt. Wenngleich er auch dort nicht explizit intra- und internomische Notwendigkeit im obigen Sinne auseinanderhält, finden sich doch Hinweise auf eine solche Differenzierung[835], ohne die ein guter Teil seiner Argumentation redundant oder zirkulär erscheinen muß. Damit ist aber nicht gesagt, daß es sich hier *per se* um unproblematische Notwendigkeitsbegriffe handeln würde. Im Gegenteil: Kant macht vor allem nicht klar, wie eine internomische, aber *nichtlogische* Notwendigkeit, d.h. ein notwendiger Zusammenhang von Gesetzen *ohne* deduktive Ableitung aus *einem* Gesetz (und ohne weitere Kriterien für die Ausschließung anderer ‚möglicher' Gesetze) überhaupt vorzustellen sei. Es scheint, daß es sich hier um eine Notwendigkeit handelt, die überhaupt nur einem göttlichen Verstand, der gleichsam vom ‚gemeinschaftlichem

dieser Dinge selbst, sondern lediglich auf die in ihrer Möglichkeit liegende Übereinstimmung und Einheit [...] erstreckt wissen will". Kant bezieht sich mit dem „angeführten Falle" auf die ‚notwendige Ordnung der Natur' (s.u.).

[834] „So God is here *both* the ground of the ‚inner possibility' of matter and its laws, *and* of the higher-order unity of all empirical laws [...]" (Buchdahl 1969, S. 493). Hierin ist Buchdahl trotz mancher Interpretationsdifferenzen (s. etwa Teil 3.3, insbes. zu Anm. 856) zuzustimmen. Von diesem Ergebnis her könnte man die obige Analyse auch so zusammenfassen: Das architektonische Argument *motiviert* bei Kant die Suche nach einer internomischen Notwendigkeit, das nomothetische Argument *garantiert* diese Notwendigkeit.

[835] So bemerkt Kant z.B. einleitend zur o.g. Unterscheidung der beiden Ordnungen der Natur, daß die „Verknüpfung verschiedener Arten von Dingen" zufällig im Sinne einer Abhängigkeit von „der Willkür des obersten Urhebers" sei. Aber: „ [...] so bleibt gleichwohl eine Art der Nothwendigkeit übrig, die sehr merkwürdig ist. Es gibt nämlich viele Naturgesetze, deren Einheit nothwendig ist, das ist, wo eben derselbe Grund der Übereinstimmung zu einem Gesetze auch andere Gesetze nothwendig macht. [...] Es ist nothwendig, daß zu den übrigen der Grund anzutreffen sei, so bald auch nur zu einem einzigen derselben Grund da ist" (Kant 1763, A78; *AA* 2, S. 106). Kant spricht hier von einer notwendigen Ordnung der Natur — ich bezeichne diese „sehr merkwürdige" Notwendigkeit als *internomisch* und nur diejenige Notwendigkeit als *intranomisch*, die Kant von vornherein (vgl. These *(a)*) aus allgemeinen Wesenseigenschaften der Materie begünden möchte.

Principium' aus abwärts auf die Vielzahl der Einzelgesetze blickt, zugänglich ist. Dieser Punkt wird auch beim kritischen Kant im Auge zu behalten sein.

V.3.2 Subjektive formale Teleologie im Rahmen des kritischen Systems

Wie so oft bei Kant, wird auch das alte Problem der Beziehung von Teleologie und Naturgesetzlichkeit im kritischen System in neuer Form gestellt. Es gehört dort zu den neuralgischen Punkten seiner theoretischen Philosophie, weil es an der ‚Schnittstelle' von Verstand und Vernunft, konstitutiven Begriffen und regulativen Ideen, objektiv gültiger Naturerkenntnis und subjektiv geforderter Naturordnung angesiedelt ist. Hier steht weiter die Frage im Mittelpunkt, wie und mit welchem Erfolg Kant die Notwendigkeit empirischer Einzelgesetze *teleologisch* absichert. Meine These wird sein, daß Kant dieses — für seine Auffassung eines Systems der Natur zentrale — Problem letztlich nicht ‚kritisch' bewältigen kann, sondern ‚vorkritisch' perpetuiert.

Der Schlußteil der „Transzendentalen Dialektik", insbesondere der dortige Anhang, aber auch die beiden Einleitungen zur *Kritik der Urteilskraft* liefern wichtige Anhaltspunkte für diese These. Zunächst ist jedoch auf seinen veränderten Standpunkt zur Physikotheologie hinzuweisen:

Kants Kritik der herkömmlichen Gottesbeweise in der Transzendentalen Dialektik schließt auch den physikotheologischen ein:[836] Weder darf aus bedingten Naturzweckmäßigkeiten und -ordnungen auf die Existenz einer unbedingten, göttlichen Ursache geschlossen, noch umgekehrt eine Einheit und Ordnung der Natur aus einer solchen Ursache abgeleitet werden. Die Idee Gottes ist, wie jede Idee im kritischen System, nur regulativ, nicht konstitutiv — ein Leitfaden zur Bildung und Ordnung von Erfahrung, aber nichts, was objektive Erfahrung begründen, d.h. Begriffe möglicher Erfahrung geben könnte.[837] Auch die Vorstellung einer Natur als systematisch geordneter Einheit ist derart: Die Vernunft nötigt uns, die Natur so zu denken, *als ob* sie (von einer ‚höchsten Intelligenz') systematisch und zweckmäßig eingerichtet worden sei.[838] Einen Anklang an Maupertuis' Kritik idiographischer Teleologie findet sich dabei in Kants Forderung, nicht „bloß einige Naturstücke" als zweckmäßig zu betrachten, sondern der Natur „eine Zweckmäßigkeit nach allgemeinen Gesetzen [...], von denen keine beson-

[836] Kant 1787, A620/B648ff (*AA* 3, S. 413ff.).
[837] Vgl. ebd., A643/B671ff. (*AA* 3, S. 427ff.)
[838] S. ebd., A699/B727ff, insbes. A700/B728 (*AA* 3, S. 459ff., insbes. S. 459f.): „Denn das regulative Gesetz der systematischen Einheit will, daß wir die Natur so studiren sollen, *als ob* allenthalben ins Unendliche systematische und zweckmäßige Einheit, bei der größtmöglichen Mannigfaltigkeit, angetroffen würde."

dere Einrichtung ausgenommen" ist, zugrunde zu legen.[839] Aber auch eine solche Zweckmäßigkeit nach allgemeinen Gesetzen steht unter der Einschränkung des ‚Als ob' und ist ohne konstitutiven Gehalt. „Allgemeine mechanische Gesetze", so spielt er nun auf Maupertuis an, enthalten „keinen Anspruch darauf, teleologische Erklärungsgründe in der Physik zu sein"[840].

Der kritische Kant vollzieht also einen klaren *Bruch* mit derjenigen Form von Teleologie, die ich eingangs als nomothetisch gekennzeichnet habe. Aber es bleibt das vorkritische Problem, eine Natur, die wir in vielen ihrer Einzelgesetze bereits erfaßt haben, auch als *System* zu begreifen. Als Problem der Unterordnung von (bereits bekanntem) Besonderen unter ein (noch aufzusuchendes) Allgemeines betrifft dies die reflektierende Urteilskraft. Kant artikuliert es daher nicht zufällig am deutlichsten in der ersten Einleitung seiner *Kritik der Urteilskraft*:[841]

> ... es könnte die Mannigfaltigkeit und Ungleichartigkeit der empirischen Gesetze so groß sein, daß es uns zwar teilweise möglich wäre, Wahrnehmungen nach gelegentlich entdeckten besondern Gesetzen zu einer Erfahrung zu verknüpfen, niemals aber, diese empirischen Gesetze selbst zur Einheit der Verwandtschaft unter einem gemeinschaftlichen Prinzip zu bringen, wenn nämlich, wie es doch an sich möglich ist (wenigstens so viel der Verstand an sich ausmachen kann), die Mannigfaltigkeit und Ungleichartigkeit dieser Gesetze [...] unendlich groß [wäre und] uns an diesen ein rohes chaotisches Aggregat und nicht die mindeste Spur eines Systems darlegte, ob wir gleich ein solches nach transzendentalen Gesetzen voraussetzen müssen.

Kant beschwört hier die Gefahr einer Baconschen *physica sparsa* auf Gesetzesebene, d.h. einer in viele empirische Einzelgesetze zerstreuten Natur, deren Einheit die Vernunft zwar fordert, der Verstand aber nicht aufweisen kann. Die erste *Kritik* habe zwar gezeigt, daß „die gesamte Natur, als der Inbegriff aller Gegenstände der Erfahrung, ein System nach transzendentalen Gesetzen, nämlich solchen, die der Verstand selbst a priori gibt", ausmache. Insofern sei „nun Erfahrung überhaupt nach transzendentalen Gesetzen des Verstandes als System und nicht als bloßes Aggregat anzusehen. Daraus folge aber nicht, daß die Natur, auch nach *empirischen* Gesetzen, ein für das

[839] „Denn so allein kann das Princip der zweckmäßigen Einheit den Vernunftgebrauch in Ansehung der Erfahrung jederzeit erweitern, ohne ihm in irgend einem Falle Abbruch zu thun" (ebd., A692/B720; *AA* 3, S. 455).

[840] Kant 1790b, A302/B307 (*AA* 5, S. 382). Eine andere Anspielung auf Maupertuis' Prinzip, aber wohl auch Fermats optisches ‚Prinzip der schnellsten Ankunft' wie auch die taxonomischen Systeme der damaligen Biologie findet sich in der *Ersten Einleitung*: „Alle jene in Schwang gebrachte Formeln: die Natur nimmt den kürzesten Weg — *sie tut nichts umsonst — sie ist reich in Arten, aber dabei doch sparsam in Gattungen*, u.d.g. sind nichts anders als eben dieselbe transzendentale Äußerung der Urtheilskraft, sich für die Erfahrung als System und daher zu ihrem eigenen Bedarf ein Princip fest zu setzen. Weder Verstand noch Vernunft können a priori ein solches Naturgesetz begründen" (Kant 1790a, S. 23).

[841] Ebd., S. 21f.

menschliche Erkenntnisvermögen *faßliches* System sei".[842] Kant selbst bedient sich der treffenden Metapher vom „Labyrinth der Mannigfaltigkeit möglicher besonderer Gesetze"[843] — ein Labyrinth für den Verstand, das für die Vernunft gleichsam als planvolles ‚euklidisches Wegenetz' gedacht werden können *muß*.

Der ‚Ariadnefaden', der aus diesem Labyrinth herausführen soll, ist nun zwar wieder die Teleologie, allerdings nicht mehr die nomothetische Teleologie aus vorkritischer Zeit, sondern das transzendentale Prinzip der Urteilskraft. Kant kennzeichnet es als „die subjektiv-nothwendige transzendentale Voraussetzung, daß jene besorgliche grenzenlose Ungleichartigkeit empirischer Gesetze und Heterogenität der Natur nicht zukomme, vielmehr sie sich, durch die Affinität der besonderen Gesetze unter allgemeinere, zu einer Erfahrung, als einem empirischen System, qualifiziere".[844] Das Prinzip ist *subjektiv*, weil die reflektierende Urteilskraft bei seiner Anwendung auf eine Angemessenheit der Natur ‚gleichsam zu eigenem Gunsten' setzt, *notwendig*, weil ohne seine Anwendung das Besondere gar nicht unter ein Allgemeines subsumiert werden könnte, und *transzendental*, weil es sich um eine allgemeine und apriorische Voraussetzung dafür handelt, die Natur (als Mannigfaltigkeit empirischer Gesetze) zum Objekt der Erkenntnis zu machen. Ich werde hier im folgenden von einer *subjektiven formalen Teleologie*[845] sprechen.

[842] Ebd., S. 21f.

[843] Ebd., S. 22. Es könnte sich hier um eine (weitere) Anspielung auf Bacon handeln. Zu dessen Verwendung der Metapher s. Krohn 1994, S. 69-75.

[844] Kant 1790a, S. 22

[845] Kant selbst verwendet die wörtliche Bezeichnung ‚subjektive formale Teleologie' nur selten. Er legt sie aber verschiedentlich nahe, etwa durch Wendungen wie „die formale Zweckmäßigkeit (sonst auch subjective genannt)" (Kant 1790b, AXLVIII/BL; *AA* 5, S. 193). Auch die Bestimmung *subjektiver* Zweckmäßigkeit für einen Erfahrungsgegenstand als „Übereinstimmung seiner Form, in der *Auffassung* (apprehensio) desselben vor allem Begriffe, mit den Erkenntnisvermögen, um die Anschauung mit Begriffen zu einem Erkenntniß überhaupt zu vereinigen" (ebd., AXLVI/BXLVIII; *AA* 5, S. 197), bringt deren *formalen* Charakter zum Ausdruck. Die „tiefgreifende Uneinheitlichkeit in der verwendeten Terminologie" Kants (Engfer 1981, S. 128) läßt es zudem als legitim erscheinen, subjektive formale Teleologie hier *nur* im wissenschaftstheoretischen Kontext — Kant würde sagen, im Sinne des ‚szientifischen Vernunftbegriffs' — zu verstehen, d.h. aus dem allgemeineren Kontext der ästhetischen Urteilskraft auszugrenzen.

V.3.3 System und Gesetzesnotwendigkeit

Die subjektive formale Zweckmäßigkeit soll zwar nur regulativ und nicht konstitutiv sein, aber auch die Aufgabe erfüllen, die im *Einzig möglichen Beweisgrund* der nomothetischen Teleologie zukam: Sie muß die *Notwendigkeit* der Einzelgesetze sichern, denn erst dann kann überhaupt von Gesetzen (und nicht bloß von induktiv gewonnenen Regeln) gesprochen werden[846], erst dann sind empirische Regeln sozusagen *systemfähig*. Andererseits kann diese Notwendigkeit nach Kant nur unter der *Voraussetzung* einer zweckmäßigen Einheit der Erkenntnis sinnvoll gedacht werden. Diese Vernunftidee postuliert ja gerade, wie er bemerkt, „vollständige Einheit der Verstandeserkenntniß, wodurch diese nicht bloß ein zufälliges Aggregat, sondern ein nach nothwendigen Gesetzen zusammenhängendes System wird".[847]

Versucht man, den hier in Rede stehenden Begriff von *Notwendigkeit* der Einzelgesetze näher zu bestimmen, fallen wichtige Parallelen, aber auch Unterschiede zum *Einzig möglichen Beweisgrund* ins Auge: Die fragliche Notwendigkeit ist natürlich erstens keine empirische, d.h. sie kann durch Erfahrung weder eingesehen noch begründet werden. Es handelt sich zweitens nicht um die Notwendigkeit, die durch den kategorialen Rahmen des Verstandes gegeben und in der Synthesis der Apprehension allen Erscheinungen der Natur zugrundegelegt wird.[848] Sie ist aber drittens auch keine logische Notwendigkeit in dem Sinne, daß sie aus der Deduktion der Einzelgesetze aus einem höheren, ‚architektonischen' Prinzip gewonnen werden könnte. Wir kommen nämlich zu einem solchen architektonischen Prinzip überhaupt nur durch Subsumierung des Besonderen unter Allgemeines mittels *reflektierender* Urteilskraft, die —

[846] In diesem Sinne spricht Kant von „Regeln" der Natur, die dem Verstand „nur empirisch bekannt werden können, und die in Ansehung seiner zufällig sind. Diese Regeln [...] muß er sich als Gesetze (d.i. als nothwendig) denken: weil sie sonst keine Naturordnung ausmachen würden, ob er gleich ihre Nothwendigkeit nicht erkennt, oder jemals einsehen könnte" (Kant 1790b, AXXXIII/BXXXV; *AA* 5, S. 184, vgl. auch S. 183). Naturgesetze sind für ihn allgemeine empirische Regeln, deren Notwendigkeit gesichert (aber nicht unbedingt erkannt) ist.

[847] Kant 1787, A645/B673 (*AA* 3, S. 428).

[848] Kant macht bereits in der „Transzendentalen Deduktion der reinen Verstandesbegriffe" auf die begrenzte ‚deduktive Reichweite' der Kategorien aufmerksam: „Auf mehrere Gesetze aber als die, auf denen eine *Natur überhaupt* als Gesetzmäßigkeit der Erscheinungen in Raum und Zeit beruht, reicht auch das reine Verstandesvermögen nicht zu, durch bloße Kategorien den Erscheinungen a priori Gesetze vorzuschreiben. Besondere Gesetze, weil sie empirisch bestimmte Erscheinungen betreffen, können davon *nicht vollständig abgeleitet* werden, ob sie gleich alle insgesamt unter jenen stehen" (Kant 1787, B165; *AA* 3, S. 127). In der „Transzendentalen Analytik" nennt er diese Notwendigkeit „hypothetisch", aber ausdrücklich nicht (mehr) „blind" (ebd., A228/B279f.; *AA* 3, S. 194).

anders als die bestimmende Urteilskraft — keine Notwendigkeit ‚transportieren' kann. *Architektonische Prinzipien haben also selber keine Notwendigkeit.*[849]

Während die erste und dritte Negativbestimmung mit dem *Einzig möglichen Beweisgrund* konform gehen, weist die zweite auf eine wichtige Differenz hin: Die intranomische Notwendigkeit glaubte Kant dort noch essentialistisch (aus dem Wesen der Körper) begründen zu können. Die Verstandeskategorien liefern nun hierfür keinen ‚Ersatz', d.h. sie reichen in der Regel nicht aus, um die Gesetzlichkeit im spezifischen Einzelfall aufzuweisen. Analog zu den oben (Teil 3.1) ausgeführten Thesen *(a)* und *(b)* können daher jetzt folgende Thesen unterschieden werden:

(a)* die ‚Aufwärtsthese' von der intra- und internomischen Kontingenz;

(b)* die ‚Abwärtsthese' von der intra- und internomischen Notwendigkeit.

Die Differenz zwischen *(a)* und *(a*)* zeigt sich v.a. darin, daß Kant in der *Kritik der Urteilskraft* zwischen inter- und intranomischer Notwendigkeit — auch im Ansatz — keinerlei Unterscheidung mehr vornimmt: Die subjektive formale Teleologie induziert internomische Notwendigkeit (Übergang vom Aggregat zum System), aber auch intranomische Notwendigkeit der Einzelgesetze.[850] Letztere stellt der vorkritische Verstand kraft seiner Einsicht in das Wesen der Materie selber fest, ohne die Vorstellung einer Natureinheit und -ordnung ins Spiel bringen zu müssen, für den kritischen Verstand gibt es keine Gewähr, auch nur eine von beiden zu erkennen.

Eine tieferliegende Differenz weisen *(b)* und *(b*)* auf, da sich die Bedeutung von ‚Abwärts' grundlegend geändert hat: Während in *(b)* inter- und intranomische Notwendigkeit durch eine nomothetische Teleologie *begründet* werden, können sie in *(b*)* nach der subjektiven formalen Teleologie nur vorgestellt bzw. *gefordert* werden. Die wichtige *regulative* Funktion einer solchen Vorstellung ist Kant ohne weiteres zuzugestehen. Aber erschöpft sich darin die ‚Notwendigkeit der Notwendigkeit', d.h. Kants Forderung, daß die vielen empirischen Regelmäßigkeiten als notwendig angesehen werden *müssen*?

Kant betont wieder und wieder, daß die Notwendigkeit der Einzelgesetze (und damit das ganze System der Erfahrung) keine unserer Erkenntnis zugängliche sei.[851] Es ist daher auch kein Zufall, daß seine Rede immer dann indirekt und von Analogien zwi-

[849] Kant führt verschiedene Beispiele solcher Gesetze an, die ich (wie Maupertuis' Prinzip) als ‚architektonisch' bezeichne, so z.B. Fermats Prinzip: „Die Natur nimmt den kürzesten Weg (lex parsimoniae)", aus dem Brechungs- und Reflexionsgesetz der Optik abgeleitet werden können. Es handelt sich für ihn ausdrücklich um „Regeln, deren Nothwendigkeit man nicht aus Begriffen dartun kann". Sie geben nicht an, „wie geurtheilt wird, sondern wie geurtheilt werden soll; und da kommt diese logische objective Nothwendigkeit nicht heraus, wenn die Principien bloß empirisch sind" (Kant 1790b, AXXIX/BXXXI; *AA* 5, S. 182).

[850] Vgl. z.B. ebd., AXXV/B XXVII (*AA* 5, S. 180). Daß Kant hier nicht zwischengesetzliche und einzelgesetzliche Notwendigkeit trennt, bemerkt bereits Buchdahl 1969, S. 518.

[851] Vgl. z.B. Kant 1790b, AXXXI/BXXXIII (*AA* 5, S. 183f.); s. hierzu auch Anm. 846.

schen Verstandes- und Vernunftvermögen getragen ist, wenn er sie näher zu
men sucht: Nach „der Analogie einer Causalbestimmung der Erscheinungen"
den Verstand solle eine systematische Verknüpfung der Einzelgesetze durch
nunft gedacht werden. Die subjektive formale Teleologie wird hier für ihn zu
Kausalität zweiter Ordnung, die zwar nicht konstitutiv ist für unmittelbare E
aber für die Bildung eines *Systems* der Erfahrung — man könnte sie bezeic
Kants ‚metaphysischen Kitt' zwischen einer Vielzahl ‚Humescher Regularitä
erforderlich ist, um die Systemidee für die Erfahrung zu retten. Kant hält diese
notwendig, um überhaupt begründet von empirischer *Wahrheit* sprechen zu k
Aber es wäre nach meiner Interpretation falsch, ihm hier einen Begriff von n
Notwendigkeit zu unterschieben, wie ihn die neuere Wissenschaftstheorie disk
oder gar eine subtile und erfolgreiche Begründung einer solchen.[854] Denn glei
auf welche Form von „necessitarianism"[855] bei solchen ‚modernisierenden' In
tionen Bezug genommen wird, geht es doch stets um die Modalität bestimmt
kalischer *Aussagen*. Die durch Kants subjektive formale Teleologie induzie
wendigkeit ist aber offensichtlich gar nicht begrifflicher, sondern *intuitiver*
Kant denkt hier gar nicht an eine Gesetzesnotwendigkeit für den menschlich
dern für einen ‚höheren' Verstand: Wir müssen, so sagt er in der „Dialektik
logischen Urtheilskraft", neben unserem Verstand „zugleich einen andern
denken, in Beziehung auf welchen und zwar vor allem ihm beigelegten Zweck
Zusammenstimmung der Naturgesetze mit unserer Urtheilskraft, die für
Verstand nur durch das Verbindungsmittel der Zwecke denkbar ist, als *no*
vorstellen können".[856]

[852] Kant 1787, A700/B728 (*AA* 3, S. 459).

[853] „Denn das Gesetz der Vernunft, sie [diese Einheit nach Prinzipien der Vernunft] z
ist nothwendig, weil wir ohne dasselbe gar keine Vernunft, ohne diese aber keinen z
hängenden Verstandesgebrauch und in dessen Ermangelung kein zureichendes Merkm
scher Wahrheit haben würden, und wir also in Ansehung des letzteren die systematisc
der Natur durchaus als objectiv-gültig und notwendig voraussetzen müssen" (ebd., A
AA 3, S. 432).

[854] Anklänge hierzu finden sich bei Buchdahl 1969, S. 518 (mit kritischem Bezug au
Kneale und Braithwaite), aber v.a. bei Kitcher 1986.

[855] S. für eine erste Charakterisierung dieser Position z.B. Swartz 1985, S. 38-49.

[856] Kant 1790b, A344/B348 (*AA* 5, S. 407). Für weitere, auch entlegene Belege zu di
deren Verstand' s. Düsing 1968, S. 66-74. „Die Idee eines solchen anderen Verstandes
die kritische Umwandlung von Kants früherer Physikotheologie nach ‚verbesserter
anzusehen", bemerkt Düsing zurecht (ebd., S. 69).

Vor dem Hintergrund der bisherigen Rekonstruktion ist es wohl berechtigt, diesen anderen Verstand als den zugleich diskursiven und intuitiven *göttlichen* Verstand zu interpretieren — als den ‚langen Schatten', den die nomothetische Teleologie der vorkritischen Periode noch auf Kants kritisches System wirft.[857]

[857] Insofern handelt es sich hier um ein Beispiel für die bei Kant gelegentlich noch anzutreffende „gefährliche Nähe zur Physikotheologie des 18. Jahrhunderts" (Bonsiepen 1997, S. 98).

V.4 Fries' methodologische Auflösung von Kants subjektiver formaler Teleologie

V.4.1 Funktionale Spaltung der subjektiven formalen Teleologie

Fries thematisiert das Problem einer Teleologie der Natur in seinem philosophischen Werk immer wieder, angefangen mit der frühen Schrift *Reinhold, Fichte und Schelling* (1803) bis hin zum zweiten Band seiner *Geschichte der Philosophie* (1840). Zwei Konstanten fallen dabei ins Auge: zum einen seine ungeteilte Zustimmung zu Bacons Warnung vor Naturzweckbegriffen als wissenschaftlichen Erklärungen[858], zum anderen sein Vorwurf an Kant, er habe — entgegen dieser Warnung — eine begriffliche Teleologie zur Naturerklärung zugelassen. Diese Kritik bezieht sich v.a. auf Kants objektive Teleologie des Organischen, die Fries ganz aus seiner Wissenschaftstheorie eliminiert hat[859], aber in gewissem Sinne auch auf die hier zur Diskussion stehende subjektive formale Teleologie. Um zu verstehen, warum diese Teleologieform in der ihr von Kant zugedachten Funktion bei Fries keinen Platz mehr hat, ist es wichtig, zunächst den veränderten theoretischen Rahmen ins Auge zu fassen:

Die Kritik der Kantischen Teleologie exemplifiziert Fries' allgemeinere und häufig vorgebrachte These, Kant trenne nicht hinreichend zwischen Verstand und Vernunft. Fries nimmt hier eine schärfere Abgrenzung vor und führt — bildlich gesprochen — zwischen beiden die *Ahndung*[860] als ‚neutrale Vermittlungszone' ein: Sie schlägt die Brücke zwischen dem Wissen (Verstandeserkenntnis) und dem Glauben (Vernunftüberzeugung). Ein Vermittlungsproblem entsteht nämlich nach Fries dadurch, daß Wissen und Glauben im gleichen Bewußtsein präsent sind und daher aufeinander bezogen werden *müssen*. Während Wissen in (endlichen) Begriffen und Glauben in (ewigen) Ideen gegeben ist, gehört zur Ahndung das Gefühl: „Die Erkenntnis durch reines Gefühl nenne ich die Ahndung des Ewigen im Endlichen".[861] Die Ahndung ist offen-

[858] Vgl. Fries 1832 (*WW* 12, S. 80); daneben auch Fries 1837/1840 II. (*WW* 19, S. 281f.) (In den Fällen, wo bei Fries keine gesonderte Paginierung der jeweiligen Werke angeführt wird, stimmen Paginierung von Werken und den entsprechenden Bänden der *Sämtlichen Schriften* (*WW*) überein).

[859] „Im zweyten Theil der Kritik der Urtheilskraft giebt Kant dann noch einen zweyten Theil der objektiven Teleologie als logische Teleologie hinzu. Dies ist der einzige größere Theil der Lehre, in welchem ich auch dem Gehalt nach Kant's Behauptung unrichtig finde. [...] Ich habe also diesen Theil der objektiven Teleologie ganz beseitigen müssen" (Fries 1828/31/31 I, S. XXX; *WW* 4, S. 58; vgl. auch Fries 1804, S. XIII; *WW* 3, S. 17). Eine Untersuchung besonders dieser Seite des Teleologieproblems bei Fries gibt Mao 1990; s. hierzu auch Gregory 1994.

[860] Zu Fries' Theorie der Ahndung s. Hogrebe 1996, S. 59-64, sowie Weiß 1912.

[861] Fries 1805, S. 176 (*WW* 3, S. 604). „Alle Teleologie der Natur beruht somit auf einem Gefühl [...]", bemerkt Fries an anderer Stelle (ebd., S. 218f.; *WW* 3, S. 646f.). Es ist hierbei wichtig

kundig als eine ‚Verlängerung' der ästhetischen Urteilskraft Kants zu verstehen; sie ist für Fries der *einzige* legitime Ort einer *eigentlich* so zu nennenden Naturteleologie: „Es ist also das Thema der Ahndung einerley mit dem der Teleologie der Natur".[862] Diese Teleologie ist nun zwar eine subjektiv-formale, aber eben auch nur eine rein ästhetisch-religiöse Beurteilung der Natur nach Zwecken, d.h. insbesondere: Sie erfüllt *keinerlei* Funktion für die Begründung wissenschaftlicher Erkenntnis. Ihr einziger[863] Gegenstand ist die unmittelbar gefühlte „Schönheit und Erhabenheit" der Natur.[864]

Wenn Teleologie der Natur weder zur Konstitution von Einzelerfahrung noch von empirischen Theorien beitragen kann, sondern in der Wissenschaft nur als „bildliche Vorstellung"[865] einen Platz hat, steht nicht zu erwarten, daß Fries sie im Sinne Kants zu nutzen sucht, um ein System der Erfahrung zu sichern, d.h. insbesondere: die Notwendigkeit der ‚besonderen empirischen Gesetze der Natur' zu begründen. Dies ist denn auch in seinem Werk tatsächlich nirgendwo der Fall.

Damit ist aber Kants Labyrinth-Problem natürlich noch nicht vom Tisch, und es stellt sich die Frage, ob Fries hier die Idee eines Systems der Erfahrung nicht einfach preisgibt. Diese Frage wird mit einem definitiven ‚Ja *und* Nein' zu beantworten sein: ‚Ja' für die sogenannte *natürliche Weltansicht*, ‚Nein' für die sogenannte *ideale Weltansicht*. Es handelt sich hier um zwei gleichrangige, aber in keiner Weise aufeinander reduzierbare Beurteilungsarten der Dinge: die eine faßt die Natur nach Begriffen, die

zu beachten, daß Gefühl (bzw. Ahndung) von Fries nicht als ‚zweitklassige' Erkenntnis diskreditiert wird: Wissen, Glaube und Ahndung sind für ihn drei völlig unterschiedliche, aber gleichwertige Erkenntnisquellen; Naturteleologie im Bereich der Ahndung ist für ihn also *ein* durchaus achtbarer Weg der Naturauffassung.

[862] Ebd., S. 181 (*WW* 3, S. 609); vgl. Teil 3.2, Anm. 68 zu *meiner* Unterscheidung von ästhetischer Urteilskraft und subjektiver formaler Teleologie: Ahndung als ‚Verlängerung' der ästhetischen Urteilskraft meint hier gerade, daß in ihrem Kontext Teleologie *nicht* wissenschaftsrelevant werden kann.

[863] Einschränkend sei bemerkt, daß Fries selbst unentschieden läßt, ob dieser Teleologie auch zweckmäßig erscheinende mathematische Naturgesetze (wie etwa ein Prinzip der kleinsten Wirkung) als *symbolische* Verweisungen auf Vernunftideen gelten könnten: Solche Gesetze haben zwar als ‚Konstruktionen nach Begriffen' in der Ahndung selbst keinen Platz. Die Ahndung wäre aber wohl nach Fries' Theorie in der Lage, solche Gesetze in ihrer bloßen ästhetischen Wirkung gleichsam als ‚symbolische Aufforderung' wahrzunehmen, zwischen mathematischen Begriffen (wie dem der kleinsten Wirkung) und Ideen (wie der Gottes) einen Zusammenhang herzustellen. Fries spricht zwar beiläufig vom „mathematisch Erhabenen" und auch von „mathematischer Schönheit" (Fries 1828/31/31 III, S. 290; *WW* 6, S. 306), deutet aber eine solche ‚symbolische' Interpretation mathematischer Naturgesetze nicht an. Gleichwohl ließe sie sich offenbar als weitere Exemplifizierung dessen betrachten, was Wolfram Hogrebe zurecht „die Bedeutung von Symbolismen für die Sedimentierung von Ahnungen" bei Fries nennt. (Hogrebe 1996, S. 63).

[864] Zur Definition dieser Begriffe s. Fries 1805, S. 220 (*WW* 3, S. 648).

[865] Ebd., S. 197 (*WW* 3, S. 625); s. hierzu näher Teil 4.3, insbes. Zitat 905.

andere nach Ideen auf[866]; nur die erste kann daher für wissenschaftliche Erkenntnis dung von Bedeutung sein. Nach Fries' häufig vorgebrachter Kritik hat nun aber K diese beiden Ansichten nicht hinreichend auseinandergehalten. Erst im nächsten kann und soll diese Kritik inhaltlich gefüllt werden; hier wird vorerst nur ihr *formu* Argumentationsgang skizziert, d.h. es geht darum, die von Fries vorgenommene E engung des Problemlösungsrahmens darzustellen, in dem sich die weitere Diskuss abspielen wird. Man kann hier drei Schritte unterscheiden:

(1) Der Ausgangspunkt läßt sich so fassen, daß Kant Verstandes- und Vernunft mögen nicht hinreichend getrennt und damit einer „Verwechslung von Theorie Idee"[867] Vorschub geleistet habe. Eine Unterscheidung von Theorie und Idee ist a unumgänglich, um die legitimen Ansprüche wissenschaftlicher Erkenntnis bestimm und sie gegen überzogene, von der idealen Weltansicht fälschlich an sie herangetrag Ansprüche abgrenzen zu können: Wissenschaft entwickelt sich in Gestalt von *Theo* Die notwendige Abgrenzung von Theorie und Idee impliziert *auch* die Forderung n einer Unterscheidung zweier Arten von Regulativen, die von Kant häufiger durch andergebracht werden: der „idealen Regulative" auf Seiten der Ideen bzw. der Vern und der „heuristischen Maximen" auf Seiten der Theorie bzw. des Verstandes.[868] L tere werden von Fries auch „Maximen des systematisirenden Verstandes" oder einf „systematisirende Maximen" genannt.[869] Ideale Regulative und heuristische Maxim sind die beiden ‚Spaltprodukte' der subjektiven formalen Teleologie Kants.

(2) Deren Unterscheidung ist für Fries' theoretische Philosophie generell von deutung.[870] Im vorliegenden Kontext wird sie wichtig, um seine These zu verstel Kant habe die Ideen zwar als *regulativ* ausgegeben, sie tatsächlich aber auch *konstit* gebraucht. Fries nimmt hier eine Umdeutung bzw. wissenschaftstheoretische Konkr sierung der Kantischen Begriffe ‚konstitutiv' und ‚regulativ' vor, deren Verständnis die Begründung dieser These wichtig ist: Ein Prinzip heißt konstitutiv, „wenn es, bald es gegeben ist, sich selbst den Fall seiner Anwendung bestimmt, so daß die *s sumierende Urtheilskraft* im Stande ist, aus ihm Wissenschaft in theoretischer Form entwickeln; *regulativ* hingegen heißt ein Princip, wenn die *reflectirende Urtheilsk* erst zu ihm hinzu den Fall der Anwendung und seine constitutive Bestimmung such muß".[871] Konstitutive Prinzipien, so könnte man vorläufig sagen, ermöglichen Theo regulative Prinzipien ermöglichen Verallgemeinerung. Es ist wichtig zu sehen,

[866] Vgl. Fries 1828/31/31 II, S. 294-308 (*WW* 5, S. 310-324). Ausführlich untersucht Fries' „Spaltung der Weltansichten", die hier nicht weiter ausgeführt werden kann, von Nel 1962, insbes. S. 677-680.

[867] Fries 1828/31/31 II, S. 317 (*WW* 5, S. 333).

[868] Vgl. ebd., S. 297ff. (*WW* 5, S. 313ff.).

[869] Ebd., z.B. S. 307 (*WW* 5, S. 323).

[870] S. hierzu die gute Darstellung bei Elsenhans 1906 I, S. 335-345.

[871] Fries: 1828/31/31 II, S. 295 (*WW* 5, S. 311).

diese Unterscheidung bei Fries — anders als bei Kant — bereits *relativ zu einer Theorie* erfolgt und auch innerhalb einer Theorie keine absolute ist: *Regulative Prinzipien können konstitutiv werden.*

Die Begründung dieser These ist hauptsächlich methodologischer Art[872]; vorerst interessiert hier nur ihre *Funktion* im Rahmen der Kant-Kritik: Nach Fries hat Kant die ‚potentiell' konstitutive Funktion *gewisser* regulativer Prinzipien nicht gesehen. Indem er den Ideen eine regulative Funktion für die Urteilskraft zugestanden habe, billige er ihnen implizit (als „physikalischen Regulativen") auch eine erfahrungskonstitutive Funktion zu, „nachdem er ihnen anfangs alle Ansprüche constitutiv abgesprochen hatte"[873].

(3) Die Spaltung der subjektiven formalen Teleologie nach *(1)* beseitigt dieses Problem durch eine Differenzierung zweier Arten von *Regulativen*, die in Kants Ideengebrauch nicht getrennt werden: Nach Fries sind Regulative *von Theorien* und Regulative *in Theorien* zu unterscheiden. Die *idealen Regulative* enthalten allgemeine Ziel- und Formbestimmungen *von Theorie* und dienen hauptsächlich der Abgrenzung von Theorien gegenüber Ideen[874]; sie sind *nicht* konstitutiv und können es auch nicht werden. Die *heuristischen Maximen* sind Regulative *in Theorien*: Sie dienen der Unterordnung des Besonderen (einzelner Erfahrung, besonderer empirische Gesetze) unter das Allgemeine (besondere Gesetze, Gesetze höherer Stufe), sind also induktionsleitend. Auf sie (und *nur* sie) will Fries seine in *(2)* wiedergegebene These angewandt wissen: Heuristische Maximen bzw. Maximen des systematisierenden Verstandes können erfahrungskonstitutiv werden.

Beide Arten von Regulativen sind auf *Einheit* aus — gerade darum lassen sie sich als ‚Spaltprodukte' von Kants subjektiver formaler Teleologie verstehen. Es gibt jedoch einen wichtigen Unterschied, wie Fries bemerkt:[875]

> Diese Maximen [des systematisierenden Verstandes] enthalten die Ansprüche der Einheit an *jedes wirklich gegebene* Mannichfaltige, also nach einem Momente der Urtheilskraft, dagegen die Idee aus der höchsten Forderung der Einheit für *jedes irgend zu gebende* Mannichfaltige nach dem Momente der Vernunft entspringt.

Die heuristischen Maximen operieren auf dem Bereich tatsächlich gegebener Erfahrung, die idealen Regulative auf dem Bereich überhaupt möglicher Erfahrung — eine

[872] S. hierzu die Darstellung in Teil 4.2.

[873] Fries 1828/31/31 II, S. 330 (*WW* 5, S. 346).

[874] S. hierzu näher ebd., S. 316f. (*WW* 5, S. 332.). *„Es giebt keine Theorie aus Ideen"*, bemerkt Fries an anderer Stelle (ebd., S. 307; *WW* 5, S. 323) und sieht darin geradezu „das Resultat der ganzen Kantischen Kritik der reinen Vernunft" — ein Resultat allerdings, das Kant selbst nicht immer genügend beachtet habe.

[875] Ebd., S. 307 (*WW* 5, S. 323); zur Erläuterung s. Teil 4.2.

Differenz, die aus der Trennung der beiden Weltansichten resultiert und die mit Hilfe von Fries' Theoriebegriff zu präzisieren sein wird.

Fries stellt nun — wie v.a. das *System der Logik* und die *Neue oder anthropologische Kritik der Vernunft* zeigen — Kants Labyrinth-Problem von vornherein in den Kontext der *natürlichen Weltansicht*. Gerade durch diese Einschränkung des Problemrahmens *kann* es überhaupt erst zu einem Gegenstand seiner Wissenschaftstheorie werden. Es tritt hier auf als Problem der Theoriegenese, aber auch der Theorieanwendung, d.h. der Unterordnung von Einzelfällen (Einzelerfahrungen oder besonderen Gesetzen) unter die Prinzipien einer Theorie: Selbst eine Theorie, die über konstitutive, d.h. über *mathematische*[876] Prinzipien verfügt, kann nicht bis zum empirischen Einzelfall hin entwickelt werden, denn die ‚deduktive Reichweite' solcher Prinzipien ist begrenzt:[877]

> Wir können nämlich in jedem mathematischen System von den obersten Principien aus vorwärts das System entwickeln, indem wir jede Komplexion selbst aus ihren Elementen zusammenstellen; wir kommen aber mit diesen Evolutionen immer nur bis an eine bestimmte Gränze, wo uns die Zusammensetzung der Complexionen zu groß wird. Hier schlagen wir den umgekehrten Weg der Beobachtung ein, fassen das Zusammengesetzte als Ganzes auf, und versuchen nur die Complexionen im Großen in einer Involution zu ordnen, ohne die Evolution bis ins Einzelne zu vollenden. Das letztere Verfahren der Induction fordert eine möglichst genaue Entwikkelung der constitutiven Gesetze, um bestimmte heuristische Maximen zu erhalten; es bleibt aber in seiner eigenen Sphäre unentbehrlich, indem alle theoretischen Zusammensetzungen doch immer nur allgemeine Regeln behandeln, ohne sich bis zur einzelnen Geschichte durchfinden zu können.

Die Erfahrung der Unvollendetheit jeder praktisch durchgeführten ‚Evolution' einer Theorie ist nur ein Ausdruck ihrer Unvollendbarkeit, und diese wiederum ist eine zwingende Folge einer Beschränkung auf die natürliche Weltansicht. Das Zitat macht aber auch deutlich, daß diese Beschränkung die Anforderung an wissenschaftliche Erkenntnisbildung nicht erleichtert, sondern erschwert: Es geht gleichsam darum, Theorie und Erfahrung in ein ‚dynamisches Gleichgewicht' zu bringen, um möglichst *vollständige* wissenschaftliche Erklärungen zu erzielen — ein Problem der Ausbalancierung von Deduktion und Induktion, konstitutiven Gesetzen und heuristischen Maximen. Diese Forderung geht über Newtons Methode der Analyse und Synthese wesentlich hinaus, und sie basiert auf der Einsicht in die beschränkte ‚deduktive Reichweite' mathematischer Prinzipien, die der älteren KMN fremd ist.

[876] Vgl. Fries 1837, S. 383 (*WW* 7, S. 551); s. hierzu auch Teil 4.2.

[877] Fries 1828/31/31 II, S. 296f. (*WW* 5, S. 312f.). Es geht hier generell um die Unterordnung von Besonderem unter Allgemeines, d.h. um ein Problem der subsumierenden Urteilskraft. Dazu gehört auch die Herleitung ‚besonderer empirischer Gesetze' aus allgemeineren Gesetzen. Vgl. hierzu auch Kants Position (Teil 3.3, insbes. Anm. 848).

Bevor dieser Komplex näher ins Auge gefaßt wird, bleibt folgendes Zwischenergebnis festzuhalten: Gemäß der Unterscheidung von Wissen, Glaube und Ahndung sind in Hinblick auf die Teleologieproblematik drei funktional völlig unterschiedliche Teile auseinanderzuhalten: *induktionsleitende* heuristische Maximen auf der Ebene des Verstandes (Wissen), *theoriebeschränkende* ideale Regulative auf der Ebene der Vernunft (Glaube) und eine *assoziierende* ästhetisch-religiöse Naturteleologie (Ahndung). Die beiden erstgenannten Regulative gehen aus einer Spaltung von Kants subjektiver formaler Teleologie (im hier verwendeten Sinne dieser Bezeichnung) hervor, aber allein die heuristischen Maximen spielen eine Rolle für Fries' Wissenschaftstheorie, nur etwaige in diesem Bereich angesiedelte Residuen von Teleologie sind daher im folgenden noch von Interesse.

V.4.2 System, Theorie und heuristische Maximen

Mit der *Spaltung* der subjektiven formalen Teleologie geht bei Fries ihre *Restringierung* auf Theorie einher: Kants subjektive formale Teleologie ist ‚global', d.h. sie bezieht sich auf das gesamte System der Natur bzw. System der Erfahrung. Dieser umfassende Systembegriff ist für Fries nur noch im Rahmen der idealen Weltansicht von Bedeutung. Für die natürliche Weltansicht, die allein die Entwicklung von Wissenschaft ermöglicht, ist die eigentliche Erkenntniseinheit die *Theorie*[878]; ‚System' bezeichnet im Regelfall nur noch die *Form* der Unterordnung von besonderer unter allgemeinere Erkenntnis in einer Theorie.[879]

Als Theorie definiert Fries „eine Wissenschaft, in der die Thatsachen in ihrer Unterordnung unter die allgemeinen Gesetze erkannt und ihre Verbindungen aus diesen erklärt werden"[880]. Entscheidend ist nun, daß die von einer Theorie verkörperte *Einheit* nicht durch die Erfahrung selber gegeben werden kann, noch allein durch die Philosophie, da deren notwendige Grundsätze gar nichts über die einzelne Tatsache aussagen können.[881] Vielmehr handelt es sich bei ihr um eine *mathematische* Einheit: Nur die reine Anschauung umfaßt Einzeltatsache und allgemeine Regel, nur die *Mathematik*

[878] „Wir fordern also Theorie in strengster Bedeutung von jeder natürlichen Ansicht der Dinge, aber eben in ihrem Gegensatze gegen die ideale Ansicht" (ebd., S. 329; *WW* 5, S. 345).

[879] „Die Darstellung einer Erkenntniss nach der Unterordnung des Besonderen unter das Allgemeine heisst der Form nach ein *System*, der Materie nach *Wissenschaft*" (Fries 1804, S. 136; *WW* 3, S. 160; vgl. *WW* 7, S. 374). Wenngleich Fries' Gebrauch des Systembegriffs nicht durchgehend dieser Definition folgt, handelt es sich hier doch um die für ihn typische Bestimmung.

[880] Ebd., S. 373 (*WW* 7, S. 541).

[881] Vgl. ebd., S. 383 (*WW* 7, S. 551).

kann daher die Verbindung beider leisten: „Wir kommen also überhaupt zur Theorie und zur Erklärung nur durch Mathematik".[882]

Hieraus ergeben sich zwei wichtige Schlußfolgerungen: Zum einen kann eine Theorie nur solche empirischen Gegebenheiten erklären, die unter denselben Größenbegriffen stehen. Zum anderen[883]

> [...] folgt, daß es so viel unabhängige theoretische Anfänge in unsrer Erkenntniß geben müsse, als es verschiedene Qualitäten gibt. Nun gibt es der letztern in der Naturlehre sehr mancherley, also ist alle theoretische Aufgabe in unsern Erkenntnissen eine beschränkte, die Theorien unsrer Wissenschaft lassen sich nicht in ein System zusammen vereinigen, sondern es gibt so viele einzelne, von einander getrennte Theorien als es getrennte Qualitäten gibt.

Es gibt bei Fries also einen *Theorienpluralismus*, der ersichtlich den Rahmen des Kantischen Systembegriffs sprengt. Dieser Punkt ist von entscheidender Bedeutung, um den Unterschied zwischen Kants subjektiver formaler Teleologie und Fries' heuristischen Maximen zu verstehen, denn diese Maximen korrespondieren mit konkreten Theorien, die einen beschränkten Erfahrungsbereich haben *müssen*.[884] In diesem Sinne beziehen sich die Maximen auf ein „wirklich gegebenes Mannichfaltiges" (dessen ‚Wirklichkeit' eine solche der *Praxis* wissenschaftlicher Theoriebildung ist), und nicht auf „jedes irgend zu gebende Mannichfaltige" (also nicht auf ein umfassendes, der Wissenschaft gar nicht zugängliches System der Erfahrung).[885] Da Fries zwischen System und Theorie klar unterscheidet, versteht er das Labyrinth-Problem, d.h. die mangelnde ‚deduktive Reichweite' konstitutiver Prinzipien, weniger als Defizit von Theorie, sondern eher als eine Aufgabe empirischer *Methodologie*. Dies wird klar, wenn man betrachtet, wie er die *Ausbildung* von Theorien versteht:[886]

[882] Vgl. ebd., S. 383 (*WW* 7, S. 551).

[883] Ebd., S. 384 (*WW* 7, S. 552). Die reine Bewegungslehre nimmt hier eine übergeordnete Stellung ein, auf die zurückzukommen sein wird (s. Teil 4.4): Auch wenn verschiedene Qualitäten wie Farben und Töne eine eigene Theorie erfordern, können die Körper, denen diese zukommen, doch innerhalb der Bewegungslehre untersucht werden. Wer deren Erklärungen verwirft bzw. nur eigentümliche Erklärungen (und also Theorien) fordert, „der verwechselt die Interessen der Aesthetik mit denen der Wissenschaft" (Fries 1822; *WW* 13, S. 19; s. hierzu auch: Amir Arjomand 1990, S. 102f.). Es bleibt hier aber zu beachten, daß die Bewegungslehre solche Naturphänomene, in denen ‚eigene' Qualitäten eine Rolle spielen, in keiner Weise eindeutig bestimmt, sondern eine wesentlich *heuristische* Funktion hat (vgl. Teil 4.4, Anm. 915).

[884] „Jede physikalische Theorie muß sich beschränken, die Verhältnisse einzelner Theile aus einer unendlichen Geschichte zu erklären, sie darf nie auf eine Totalität ihres Ganzen Anspruch machen. Diese Totalität denken wir nur nach Ideen, Ideen aber sind eben physikalisch von gar keinem Gebrauch" (Fries 1828/31/31 II, S. 329; *WW* 5, S. 345).

[885] Vgl. Teil 4.1, Zitat 877.

[886] Vgl. zu dieser Zusammenfassung insbes. Fries 1828/31/31 II, S. 309-316 (*WW* 5, S. 325-332) und Fries 1837, S. 426-433 (*WW* 7, S. 594-601).

Die Theoriebildung beginnt, wie alle Erkenntnis, mit der Erfahrung und arbeitet sich vermittelst Induktion und Spekulation zu allgemeinen Begriffen, Regeln und Klassifikationen empor, im günstigsten Fall bis hin zu konstitutiven Prinzipien. Der Prozeß der sukzessiven Verallgemeinerung ist dabei *nicht* linear: Bereits erzielte Regeln müssen am Einzelfall überprüft werden und dienen ihrerseits als Leitfäden für weitere Verallgemeinerungen. Diese Leitfäden haben also einen Ankerpunkt in bereits gemachter Erfahrung. Die Spekulation sorgt für einen zweiten, apriorischen Ankerpunkt: Durch mathematische und philosophische Abstraktion zeigt sie auf, welche allgemeinsten Gesetze für einen gewissen Erfahrungsbereich überhaupt möglich sind und wie sich diese Gesetze zu (möglicherweise bereits vorhandenen) konstitutiven Theorien verhalten.[887] Die so zweifach ‚befestigten' Leitfäden sind nichts anderes als Fries' heuristische Maximen bzw. Maximen des systematisierenden Verstandes. Sie sind es, die die weitere Theoriebildung in Form der *rationellen* Induktion, die von einer ungeleiteten empirischen Induktion wohl zu unterscheiden ist, regulieren. Im ‚Erfolgsfall' führen sie zur Auffindung konstitutiver Prinzipien.

Mit diesem *regressiven* Vorgang wird jedoch nur die genetische Entwicklung hin zu einer (konstitutiven) Theorie beschrieben.[888] Der Idealfall einer solchen Theorie, wie sie Fries in der Himmelsmechanik gegeben sieht[889], ist jedoch die Ausnahme. In vielen Bereichen, etwa in der Naturgeschichte, liegen aber Theorien vor, die Fries selber — leicht irreführend — als ‚regulativ' bezeichnet: Ihre Gesetze sind nur mehr oder weniger wahrscheinliche Verallgemeinerungen, wobei zu beachten bleibt, daß auch deren heuristische Maximen auf allgemeinste konstitutive Prinzipien hin orientiert sein müssen.[890] Fries spricht daher allgemein von „zweyerley Weise", auf die sich „theoretische Wissenschaft" ausbilden läßt:[891]

> Einmal nach der progressiven Methode der subsumirenden Urtheilskraft erhalten wir *constitutive Theorien* und dann nach der regressiven Methode der reflectirenden Urtheilskraft *regulative Theorien*. Die constitutiven Theorien laufen systematisch in der Darstellung von ihren Principien

[887] Auch wenn es für Fries keine Theorie ohne Mathematik, insbesondere also ohne mathematische Abstraktion, geben kann, ist für die Ausbildung *verschiedener* Theorien die philosophische Abstraktion entscheidend, denn sie ist „eine *qualitative*, welche allgemeine Begriffe aussondert, *unter* denen das Mannigfaltige der einzelnen Fälle steht" (Fries 1837, S. 410; *WW* 7, S. 578).

[888] Diese *genetische* Entwicklung meint Fries, wenn er z.B. sagt: „Alle Theorie bildete sich entweder durch Speculation oder durch Induction" (Fries 1828/31/31 II, S. 311; *WW* 5, S. 327), denn beide Verfahren sind regressiv.

[889] Vgl. z.B. ebd., S. 329 (*WW* 5, S. 345). Laplaces Mechanik des Himmels führt Fries auch an verschiedenen anderen Stellen als Muster einer „Theorie in strengster Bedeutung" ein.

[890] Weil alles Naturgeschehen unter der reinen Anschauung steht. Vgl. Fries 1837, S. 428 (*WW* 7, S. 596).

[891] Ebd., S. 427f. (*WW* 7, S. 595f.).

aus, sie fordern also ein Princip, das aus sich selbst Entwickelungen zuläßt, das heißt, sie fordern eine scharf bestimmte mathematische Aufgabe. [...] *Regulative Theorien* bedürfen zuerst der Induction als des Verfahrens der Erfindung, um von den Thatsachen aus erst die allgemeinen Gesetze zu finden, die hier als Principien der Theorie geltend gemacht werden sollen.

Es gibt also sowohl eine progressive Ausbildung von Theorie aus spekulativ gewonnenen Prinzipien, bei der Erfahrung immer ‚im Lichte von Theorie' gemacht wird, als auch eine regressive Theoriebildung, bei der — wie es die Herausgeber seiner *Sämtlichen Schriften* treffend formulieren — die Theorie „im Schatten der Beobachtung" steht.[892] Nur wenn es — im allgemeinen durch ein Wechselspiel beider Methoden — gelingt, zu einer umfassenden konstitutiven Theorie zu gelangen, können die Gesetze einer Theorie in einen logisch-deduktiven Zusammenhang gebracht werden, nur dann hat es auch Sinn, von der ‚Notwendigkeit' besonderer Gesetze zu sprechen. Aber dafür gibt es weder eine Garantie noch ein zwingendes Erfordernis.

Diese methodologischen Überlegungen führen Fries zu einer wichtigen Schlußfolgerung: Wenn heuristische Maximen als Leitfäden rationeller Induktion eine apriorische ‚Verankerung' aufweisen und wenn sich weiter Theorie allgemein im Wechselspiel von regressiver und progressiver Methode ausbildet, ist es gar nicht möglich, zwischen bloß regulativer und konstitutiver Funktion dieser Maximen zu unterscheiden. Heuristische Maximen der rationellen Induktion haben also konstitutiven Gehalt.[893]

Auf dieser Schlußfolgerung beruht auch der gegen Kant erhobene Vorwurf der „Vermengung und Verwechslung von Theorie und Idee"[894]: Weil Kant natürliche und ideale Weltansicht nicht genügend auseinanderhält, unterscheidet er auch nicht zwischen den heuristischen (bzw. ‚systematisierenden') Maximen des Verstandes und den regulativen Idealen der Vernunft, die *beide* im regulativen Gebrauch der Ideen am Werke sind. Der regulative Gebrauch von Ideen geht also, was Kant nicht wahrhaben wollte, über die bloße Erfahrungs*regulation* hinaus.[895]

[892] Vgl. König/Geldsetzer 1979, S. 31*.

[893] Man kann diese Aussage im Sinne von Fries wohl so erläutern: Heuristische Maximen sind verallgemeinernde Hypothesen über einen bestimmten Erfahrungsbereich unter gewissen, apriori gegebenen Einschränkungen: Die Spekulation liefert nämlich einen strukturellen Rahmen von Bedingungen, in dem sich die Hypothesenbildung vollziehen muß. Die Zahl möglicher bzw. sinnvoller Hypothesen wird hierdurch auf ein überschaubares Maß beschränkt. Die empirische Prüfung entscheidet dann darüber, welche Hypothese tatsächlich zutrifft. Eine so (durch eliminative Induktion) bestätigte Hypothese ist konstitutiv (vgl. Zitat 871) in dem Sinne, daß sie neue, in der Hypothesenbildung selbst nicht bedachte Anwendungsfälle beinhaltet. So ist z.B. Newtons Gravitationsgesetz, als Hypothese am System Erde-Mond entwickelt, konstitutiv in der Anwendung der Gravitationstheorie auf andere Körper des Sonnensystems.

[894] Vgl. Fries 1828/31/31 II, S. 317 (*WW* 5, S. 333).

[895] Vgl. ebd., S. 330 (*WW* 5, S. 346).

Indem Fries die Theorie zur Einheit der Erfahrung macht, deutet er natürlich Kants Begriffe ‚regulativ' und ‚konstitutiv' um: Einheit der Erfahrung ist ein sinnvolles Ziel nur relativ zu einer bestimmten Theorie, also können auch deren Regulative und Konstitutive nur *theoriespezifischer* Art sein. Man könnte hier von einer *Lokalisierung durch Empirisierung*[896] sprechen. Fries spitzt durch diese Empirisierung aber auch ein wissenschaftstheoretisches Problem zu (und bietet eine achtbare methodologische Auflösung an), das bei Kant letztlich ungeklärt bleibt[897], das Problem nämlich, wie sich theoretische Vereinheitlichung von Erfahrung in allgemeinen Gesetzen einerseits und Erfahrungskonstitution (im Sinne einer Gewinnung objektiver wissenschaftlicher Einzelerfahrung) andererseits zueinander verhalten. Kants Forderung nach Einheit der Erfahrung ohne Erfahrungskonstitution, seine subjektive formale Teleologie des ‚Als ob', vermag hier kaum zu befriedigen. Fries' Standpunkt kann demgegenüber durchaus *modern*[898] genannt werden. Theoretische Vereinheitlichung und Konstitution wissenschaftlicher Erfahrung sind für ihn zwei verschiedene Seiten der gleichen Medaille.

V.4.3 Die Teleologie der Natur als bildliche Umkehrung der Kausalreihe

Daß Fries im Kontext der Teleologiediskussion Konsequenz und Modernität bescheinigt wird, könnte ohne die Klärung des folgenden Problems verwegen erscheinen: Fries spricht verschiedentlich, zumeist im Rahmen seiner Kritik von Kants objektiver Teleologie des Organischen, von Naturteleologie *allgemein* als einer „Maxime der Naturlehre" und sogar von einer „regulativen leitenden Maxime"[899]. Vor dem Hintergrund der bisherigen Ausführungen zum konstitutiven Gehalt heuristischer Maximen erscheinen solche Redeweisen widersinnig: Sie widersprechen nicht nur seiner kritischen generellen Haltung zur Naturteleologie[900], sondern, wie aus dem letzten Teil klar wird, auch einem zentralen Punkt seiner Kant-Kritik.

Die genauere Betrachtung zeigt jedoch, daß es sich hier eher um eine begriffliche Unschärfe denn um ein tieferliegendes Problem seiner Wissenschaftstheorie handelt.

[896] Vgl. ebd., S. 311 (*WW* 5, S. 327).

[897] Wie Kants vergeblicher Versuch, die Notwendigkeit der besonderen empirischen Gesetze zu sichern, am deutlichsten zeigt (s. Teil 3.3). Im Rahmen von Fries' Wissenschaftstheorie handelt es sich bei diesem Versuch, abgesehen von den seltenen Fällen vollständiger konstitutiver Theorien, um eine nachgeradezu sinnlose Zielsetzung.

[898] So ließen sich z.B. manche Parallelen aufweisen zu Kitcher 1981.

[899] S. z.B. Fries 1837, S. 431 (*WW* 7, S. 599) und Fries 1805, S. 184f. und S. 191 (*WW* 3, S. 612f. und S. 619).

[900] „Jeder Versuch zu einer theoretischen Naturzwecklehre muß also einen innern Widerspruch enthalten" (Fries 1832; *WW* 12, S. 831.

Es geht Fries nämlich um Folgendes:[901] Der Weg von der Beobachtung zur Theorie, wie er oben dargestellt worden ist, geht aus von — möglicherweise sehr verwickelten — *Wirkungen* hin zu deren *Ursachen*. Z.B. kann in der Biologie eine bestimmte Blütenform den Ausgangspunkt der Untersuchung markieren, deren Endpunkt letztlich eine Erklärung dieser Form durch die Zusammenwirkung verschiedener Kräfte sein soll. Dabei wird eine Kausalkette von Ursachen und Wirkungen *regressiv*, d.h. von den Wirkungen zu deren Ursachen hin, durchlaufen, und die jeweiligen Wirkungen werden als Zwecke von (noch unbekannten) Mitteln *vorgestellt*. Im Erfolgsfall, d.h. nach Aufdeckung dieser Mittel (Ursachen), wird anschließend die Kausalkette *progressiv*, d.h. von den Ursachen hin zu deren Wirkungen, ‚abgearbeitet'. Im regressiven Gang zeigt sich zunächst ein „*nexus finalis*", der sich aber in der anschließenden progressiven Entwicklung immer als ein „*nexus effectivus*" entpuppt.[902] Die Natur als Mechanismus und die Natur als System von Endursachen unterscheiden sich daher für Fries nur in der Perspektive der Betrachtung.[903]

Es ist wichtig, hier seine ‚bildliche' Redeweise von einer teleologischen Maxime — im Unterschied zu den bisher untersuchten heuristischen Maximen — genau zu fassen: Zwar hat die Teleologie eine — im Einzelfall vielleicht sogar unverzichtbare[904] — heuristische Funktion für die Naturforschung, aber sie kann *nie* konstitutiv werden: Weder die philosophische Spekulation — hier bewegt sich Fries ganz im Rahmen der Kantischen Kategorien — noch (natürlich) die mathematische Spekulation liefern eine apriorische ‚Verankerung', die die Einführung eines Naturzweckbegriffs in die theoretische Naturlehre rechtfertigen könnte. Zwischen den heuristischen Maximen im oben erläuterten Sinn und der teleologischen Maxime muß daher deutlich unterschieden werden.[905]

Die (erlaubte) heuristische Vorstellung einer Naturzweckmäßigkeit verhält sich zu einem (unerlaubten) Naturzweck*begriff* wie eine „bildliche Vorstellung" zu einem „optischen Betrug"[906]. Die Einführung einer objektiven Teleologie des Organischen[907]

[901] Vgl. hierzu insbes. Fries 1837, S. 430f. (*WW* 7, S. 598f.) sowie Fries 1805, S. 191-199 (*WW* 3, S. 619-627).

[902] Ebd., S. 191 (*WW* 3, S. 619). Am Rande sei vermerkt, daß Fries von diesem Ansatz her auch seine Auflösung von Kants objektiver Teleologie des Organischen betreibt. Zentral für seine Argumentation ist hier die Bestimmung von organisierten Prozessen als *Kreisläufen* von Ursachen und Wirkungen; s. ebd., S. 193-197 (*WW* 3, S. 621-625).

[903] Vgl. z.B. ebd., S. 197 (*WW* 3, S. 625).

[904] So spricht Fries davon, das „Princip der wirkenden Ursachen" und das „Princip der Endursachen" seien „beyde für die Beobachtung nothwendig" (ebd., S. 191; *WW* 3, S. 619).

[905] S. ebd., S. 196f. (*WW* 3, S. 624f.).

[906] Vgl. hierzu Fries' Ausführungen ebd., S. 187 und S. 197 (*WW* 3, S. 615 und S. 625).

[907] Vgl. ebd., S. 191-194 (*WW* 3, S. 619-622).

ist Fries ein Beweis dafür, daß Kant Opfer eines solchen Betruges wurde.[908] Aber auch die subjektive formale Teleologie beruht nur auf dem Irrglauben, die scheinbare Zufälligkeit im Nebeneinander ‚heterogener' Gesetze müsse durch einen ‚Zwang zum System' aufgehoben werden, statt hierin ein Ergebnis von Induktionen über heterogene Einzelerfahrungen zu sehen, die zwar unter notwendigen Gesetzen stehen, in ihrer spezifischen, geschichtlichen Form aber nie vollständig erfaßt werden können. Sie erweist sich so als trügerische Projektion einer nichtbegrifflichen, ‚höheren' Einheit, die für die Erfahrung irrelevant ist:[909]

Da findet es sich denn, dass wir nach Begriffen für die wirklichen Zwecke, und den Endzweck der Welt als Natur gar nicht zu denken haben, sondern alles nur auf die Zusammenstimmung des mannigfaltigen zu Einem hinausläuft, ohne dass diese Einheit durch einen Begriff bestimmt würde. Die Unmöglichkeit, die Natur als ein Ganzes zu begreiffen, macht es uns zugleich unmöglich, die Idee eines Endzwecks bestimmt, auf sie zu beziehen, und ihre Zweckmäßigkeit nach Begriffen zu verfolgen.

V.4.4 Das Prinzip der kleinsten Wirkung als allgemeinstes indirektes Gesetz der Bewegung

Fries hat bemerkt, daß in seiner Zeit Teleologie als eine „Maxime der Naturlehre [...] stark aus der Mode"[910] gekommen ist, und er hat eine wissenschaftstheoretische Analyse gegeben, die diese Entwicklung als eine durchaus *begründete* ausweist. Umgekehrt läßt sich seine Interpretation von Teleologie als ‚bildlicher' Umkehrung von Kausalreihen als eine — modern gesprochen — plausible *wissenschaftspsyschologische*[911] Erklärung der Tatsache verstehen, warum teleologische Betrachtungen in der Entwicklung der Naturwissenschaften überhaupt eine so große Bedeutung *gewinnen* konnten: Der Gedanke einer Zweckmäßigkeit bestimmter Naturerscheinungen drängt sich auf, wenn die Wissenschaft induktiv von den Erscheinungen (Wirkungen) zu de-

[908] Daß aber auch Fries dem „sehr hohen Grad von Illusion" (ebd., S. 187; *WW* 3, S. 615) der ‚bildlichen' Teleologie nicht ganz entkommen ist, zeigt sich darin, daß er im *System der Logik* die „teleologische Naturbeschreibung" überhaupt in eine Stufenfolge, die von den regulativen bis zu den konstitutiven Theorien reicht, aufnimmt und ihr dabei „theoretische Ansprüche" *nicht* ganz abspricht (Fries 1837, S. 430f.; *WW* 7, S. 598f.). Dies müßte er aber, wenn er seine Bildinterpretation (vgl. Anm. 905) durchgängig beachten würde.

[909] Fries 1805, S. 199 (*WW* 3, S. 627).

[910] Ebd., S. 184f. (*WW* 3, S. 612f.).

[911] Wie Fries selbst bemerkt: „[...] unsere Zweckbegriffe sind von psychischem Ursprung und können daher nur bey der geistigen Ansicht der Dinge von Anwendung seyn" (Fries 1824; *WW* 8S, S. 429). Der Gebrauch des Zweckbegriffs in der Wissenschaft beruht auf einer Verwechslung der geistigen (‚idealen' und ‚ästhetischen') Weltansicht mit der natürlichen.

ren noch unbekannten Ursachen voranschreitet.[912] Er ist nie schädlich und k
sehr nützlich sein, um zu kausalen Erklärungen zu gelangen — aber er ist i
behrlich, wenn diese Erklärungen einmal gelungen sind.

Fries hat diese ‚Bildinterpretation' der Naturteleologie in der *Mathemati*
turphilosophie (1822) auch auf das Prinzip der kleinsten Wirkung rückbe
jenes Paradebeispiel nomothetischer Teleologie aus dem Bereich der analyti
chanik also, das am Anfang dieser Entwicklung stand. Diese Anwendung sei
logiekritik soll hier noch kurz beleuchtet werden, denn zum einen läßt sich
zeigte generelle Entwicklung so illustrieren, zum anderen hat das Beispiel
von Fries' Wissenschaftstheorie eine herausragende Bedeutung. Es geht hie
um ein Gesetz der „reinen Bewegungslehre", d.h. jener Wissenschaft, die Frie
metaphysische Erkenntnisse angewandte Mathematik"[913] bestimmt. Sie ist ein
ordnete Theorie, weil ihre Gesetze für alle Gegenstände der äußeren Naturle
müssen, unabhängig von deren etwaigen besonderen Qualitäten (und somit v
deren Theorien, unter die sie fallen mögen), und sie ist eine konstitutive Th
excellence, da es sich bei diesen Gesetzen um allgemeinste *mathematische*
mungen der Bewegung handelt.[914] Die Bewegungsgesetze dienen folglich a
heuristischen Maximen untergeordneter naturwissenschaftlicher Theorien al
sche Ankerpunkte.[915] Es ist daher im Rahmen von Fries' Wissenschaftstheorie
zeigen zu können, daß sich unter den konstitutiven Bewegungsgesetzen keine
findet, das *nur* teleologisch zu verstehen ist.

Nun hatte bereits Lagrange mathematisch nachgewiesen, daß sich Maupert
zip der kleinsten Wirkung im Rahmen einer Mechanik, wie sie Newton ve
Korollar gewinnen läßt: Die Eigenschaft kleinster Wirkung wird bei ihm zu ei
allgemeinen, aber eben nur *abgeleiteten* Eigenschaft von Zentralkräften.[916] Frie
natürlich dieses Resultat[917] und zog aus ihm die wissenschaftstheoretische Kon
In der *Mathematischen Naturphilosophie* wird das Prinzip der kleinsten Wir
ganz im Sinne von Lagranges *Méchanique Analitique*, aber auch von Fries'

[912] Vgl. Fries 1805, S. 190 (*WW* 3, S. 61).

[913] Fries 1822 (*WW* 13, S. 397).

[914] Vgl. ebd. (*WW* 13, S. 3): Die „einzig *vollständig wissenschaftliche* Erkenntniß d
schen" sei „*die Erkenntniß von der Welt der Gestalten und deren Bewegung* [...]. Nu
Erkenntniß der Gestaltung und Bewegung der Wesen kann der Wechsel ihrer Zustände
dig und unmittelbar aus den allgemeinsten Gesetzen eingesehen werden".

[915] „Die reine Theorie schreibt uns also nicht einen bestimmten Erklärungsgrund be
Erscheinungen vor, sondern *sie leitet uns nur im Suchen* und zeigt uns, wenn wir in irge
Gebiet das Ziel einfachster Erklärungen erreicht haben" (ebd.; *WW* 13, S. 400f.). Mit de
Theorie' ist hier die Theorie der Bewegung gemeint.

[916] S. hierzu Pulte 1989, S. 252-259.

[917] Vgl. Fries 1822 (*WW* 13, S. 532-538).

Methodologie — als „allgemeinstes indirectes Grundgesetz“[918] in die Bewegungslehre integriert und so methodologisch ‚entschärft'. Sein Argumentationsgang ist dabei folgender:

Die konstitutiven Prinzipien der reinen Bewegungslehre sind im wesentlichen die ‚Newtonschen' Grundgesetze der Mechanik — Gesetze allerdings, die Newton fälschlich als empirisch verstand und deren Ursprung und synthetisch-apriorischer Charakter erst durch Kants *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* philosophisch aufgeklärt wurde.[919] Zuvor hat sich die Bewegungslehre, wie jede Theorie, von der Seite der Erfahrung her durch Spekulation und Induktion ausgebildet:[920] Dabei kam es nicht gleich zur Aufdeckung konstitutiver Gesetze über wirkende Kräfte, sondern zunächst zur Formulierung solcher Sätze wie dem der Konstanz des Schwerpunkts, dem der Erhaltung der lebendigen Kraft (*vis viva*) oder auch dem der kleinsten Wirkung.[921] Diese zunächst bloß empirischen Regeln nennt Fries „indirecte Gesetze“, weil er im Kontext der Bewegungslehre — offenbar Euler folgend[922] — die regressive Methode als eine „indirecte“ und die progressive Methode als eine „directe“ versteht.[923] Es handelt sich bei diesen Gesetzen in mathematischer Terminologie um ‚Integrale der Bewegung'. Sie werden als Zwischenresultate der Induktion auf dem Weg zu einer konstitutiven Mechanik der Kräfte gefunden.[924] Fries versteht sie als wichtige, in manchen Bereichen der Physik sogar unentbehrliche[925] Zwischenstufen einer Leiter, die zu den

[918] Ebd. (*WW* 13, S. 538).

[919] Vgl. ebd. (*WW* 13, S. 397f. und S. 408).

[920] Vgl. ebd. (*WW* 13, S. 398f.).

[921] Vgl. ebd. (*WW* 13, S. 403f.).

[922] Euler unterscheidet in seinem Werk *Methodus inveniendi* in Hinblick auf das Prinzip der kleinsten Wirkung zwei Wege, „die Wirkungen in der Natur zu erforschen, einmal aus den bewirkenden Ursachen, was man die direkte Methode zu nennen pflegt, zweitens aus den Endursachen“, wobei er letztere auch als „indirecte Methode“ bezeichnet, die dann angewandt werden soll, wenn „die bewirkenden Ursachen zu verborgen liegen“ (Euler 1744, S. 231). Ähnlich spricht Fries davon, daß die indirekte Methode manche Erfolge zeige, „wenn man auch die zwischenwirkenden Kräfte noch nicht kennt“ (Fries 1822; *WW* 13, S. 404). Er kannte die meisten von Eulers Hauptwerken (wie z.B. die *Mechanica* und die *Lettres*), und wenngleich er dessen *Methodus inveniendi* nicht zitiert, kann vermutet werden, daß er sich hier implizit auf Euler bezieht.

[923] Fries 1822 (*WW* 13, S. 403f.; vgl. auch S. 444f. und S. 583f.).

[924] „So wird man bey der Behandlung einzelner Erfahrungen immer zuerst auf indirecte Methoden geführt werden, da wo man noch nicht alle Gesetze der einwirkenden Kräfte errathen hat“ (ebd.; *WW* 13, S. 404). Als historische Behauptung trifft dies nur dann zu, wenn man nicht bereits in Newtons *Principia*, sondern erst in Kants *Metaphysischen Anfangsgründen* eine konstitutive Theorie der Bewegungslehre als erreicht ansieht, was Fries in der Tat tut: Eine Reihe von Gesetzen, die Fries als ‚indirekte' bezeichnet, sind erst im Verlauf des 18. Jahrhunderts formuliert worden.

[925] Vgl. ebd. (*WW* 13, S. 408f.).

konstitutiven ‚Gesetzen der wirkenden Kräfte' hinführt und die *nach* Aufdeckung d ser Gesetze weggeworfen werden kann: Eine Ausbildung von Theorie kann auf verzichten.

Für vermeintliche Zweckmäßigkeiten indirekter Gesetze, etwa für die vom Prin der kleinsten Wirkung suggerierte Naturökonomie, gilt also die oben vorgestellte ‚Bi interpretation' der Teleologie ohne Abstriche: Bei Anwendung der direkt-progressiv Methode, d.h. bei Entwicklung der Bewegungslehre aus deren konstitutiven Gesetze erweist sich ‚kleinste Wirkung' als eine bloße allgemeine mathematische Eigensch von Kräften.[926] Fries selber schließt den Kreis, wenn er zum einstigen Prototyp n mothetischer Teleologie, der ‚Weltformel' von Maupertuis, bündig erklärt:[927]

Maupertuis fand sein Gesetz der kleinsten Wirkung nur durch die Induction und begründete fälschlich aus teleologischen Principien, da es doch als ein ganz allgemeines Naturgesetz d indirecten Methode aus den ersten Grundsätzen der Bewegung folgt.

[926] Zur Anwendung der ‚Bildinterpretation' auf Maupertuis' Prinzip vgl. ebd. (*WW* 13, S 597f.).

[927] Ebd. (*WW* 13, S. 405).

V.5 Zusammenfassung

Wenn die in diesem Kapitel vorgeschlagene Rekonstruktion adäquat ist, vollzieht sich bei Kant und Fries eine Transformation dessen, was als nomothetische Teleologie in der analytischen Mechanik des 18. Jahrhunderts seinen Ausgang nahm. Sie wird zunächst vom vorkritischen Kant im Kontext der Physikotheologie adaptiert und anschließend im kritischen System in eine subjektive formale Teleologie überführt. Weil beide Transformationen gleichsam ‚invariant' gegenüber der Idee eines ‚Systems der Erfahrung' sind, kommt der subjektiven formalen Teleologie eine Aufgabe zu, die derjenigen der früheren nomothetischen Teleologie sehr ähnlich ist: Rettung des Systemgedankens durch Sicherung der *Notwendigkeit* der besonderen empirischen Gesetze. Es zeigt sich aber, daß es dabei nicht um eine avancierende Form ‚nomischer Notwendigkeit' geht, sondern eher um ein ‚retardierendes Potential' des Systemdenkens — um Notwendigkeit für einen ‚anderen', göttlichen Verstand und daher ohne wissenschaftstheoretisch benennbare Funktion.

Fries' funktionale Spaltung der subjektiven formalen Teleologie geht mit einer Trennung von System- und Theoriebegriff einher und führt hier zu einer wissenschaftstheoriegeschichtlich bedeutsamen Methodologisierung: Einheit der Erfahrung wird zu einer Aufgabe wissenschaftlicher Theorien, und die heuristischen Maximen des Verstandes werden zu einem wichtigen Element methodisch reflektierter Theoriebildung. Naturteleologie erweist sich als eine hiervon noch zu unterscheidende ‚bildliche' Maxime der Naturbeobachtung, deren praktische Nützlichkeit über ihre *prinzipielle* Entbehrlichkeit nicht hinwegtäuschen sollte. Die Anwendung dieser Teleologiekritik auf die Bewegungslehre zeigt schließlich, daß nomothetische Teleologie in ihrer ursprünglichen Absicht verfehlt ist und sich bei genauerer Betrachtung als der ‚indirekte' Teil einer Methodologie der mathematischen Physik entpuppt. Hier ist also eine Entwicklung *von der Physikotheologie zur Methodologie* zu konstatieren, die ein Beispiel für die ‚Entmetaphysierung' und den methodologischen ‚Reflexionscharakter' liefert, die für den Übergang von klassischer zu moderner Wissenschaft charakteristisch sind. Wenngleich Fries mit seinem von Kant geprägtem Verständnis mechanischer Prinzipien als synthetischer Sätze a priori einer Variante des axiomatischen Denkens der KMN im wesentlichen verhaftet bleibt[928], soll zumindest erwähnt werden, daß er auch bei ihnen eine bemerkenswerte *Umdeutung* vornimmt: Zwar darf nicht übersehen werden, daß diese Leitfäden bei jeder Beobachtung vorauszusetzen sind. Aber insofern die reine Theorie der Bewegungslehre insgesamt keine ‚Erklärungsgründe' liefert, sondern als heuristisches Instrument der Suche nach solchen Erklärungen fungiert[929], werden *auch* die Prinzipien dieser Theorie zu ‚heuristischen Leitfäden' der Naturforschung.

[928] Eine These, die hier nicht näher ausgeführt werden kann (vgl. Kap. IV, Teil 7.3, Anm. 777).
[929] Vgl. Fries 1822 (*WW* 13, S. 400f.)

Fries' methodologische Auflösung der Teleologie, die hier im Mittelpunkt sta
ersichtlich von zwei ‚leitenden Maximen' geprägt: Zum einen geht es ihm um
Weiterführung der von Kant begonnenen, aber nach seiner Auffassung nicht k
quent genug durchgeführten Teleologiekritik. Zum anderen will er Wissenschafts
rie und wissenschaftliche Praxis zusammenhalten. Letztere gab nicht nur zu der
Anlaß, warum in entwickelten Wissenschaften wie der Physik (aber zunehmend
der Biologie) teleologische Erklärungen sukzessive eliminiert wurden — offenk
mehr als eine bloße ‚Modeerscheinung'[930] — , sondern zeigte vor allem, daß i
sich ausdifferenzierenden Wissenschaften Erkenntnisbildung nicht auf eine abs
Systemidee hin orientiert ist und orientiert werden kann, sondern
reichserfahrungsnäherer' Maximen bedarf. Kants Anerkennung der besonderen en
schen Gesetze *als solcher* und in ihrer Heterogenität weist bereits auf das Problem
bietet aber mit einer Teleologie des ‚Als ob' keine befriedigende Antwort.[931]

Fries trägt mit seiner Separierung von System und Theorie zur Zurückdrängun
für die KMN so wichtigen Systemideals bei.[932] Seine Kritik der subjektiven form
Teleologie Kants richtet sich dabei wesentlich gegen den ‚KMN-stabilisierenden'
such Kants, eine deduktiv nicht aufweisbare Notwendigkeit der empirischen Einz
setze mit Hilfe der Systemidee zu retten.

[930] Vgl. Teil 4.4, Zitat 910.

[931] Dieses ‚Als ob' wird ja von Fries nicht verboten, darf aber nach seiner Kritik nie das l
Wort sein.

[932] Vgl. Kap. II, Teil 1.1

VI Die ‚rein mathematische' Auflösung der Klassischen Mathematischen Naturphilosophie

VI.1 Das Problem der Anwendung von Mathematik: Rückblick, Problemstellung und Einordnung

In diesem Kapitel greife ich die frühere Untersuchung des axiomatischen Denkens der KMN (Kap. IV) auf und führe sie weiter. Wie gezeigt wurde, führt die analytische Tradition der Mechanik bei und im Anschluß an Lagrange in einen ‚Gummi-Euklidianismus', der den Prinzipiencertismus der älteren KMN zu konservieren sucht, ohne deren Essentialismus und Fundamentalismus zu perpetuieren. Es sind keine eigentlichen erkenntnis- oder wissenschaftstheoretischen *Argumentationen* mehr, die diesen Prinzipiencertismus aufrechterhalten, sondern dies bewirken die deduktive und zunehmend formalisierende *Praxis* der mathematischen Physik, der *Glaube* an die intrinsische mathematische Struktur der Natur, die durch die Analytische Mechanik enthüllt worden sei, und die *Geschichte* der Disziplin als ‚vernünftiger' Prozeß auf eine bestimmte Axiomatisierungsform hin: Lagranges *erkenntnistrivialisierendes* Diktum von der ‚Mechanik als einer Geometrie mit vier Dimensionen'[933] machte klar, daß der mechanische Euklidianismus als Wissenschaftsideal weiter besteht, während Lagranges (und anderer) spätere Beweis*versuche* des an die Spitze der *Méchanique Analitique* gestellten Axioms (des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten) ebenso klar machten, daß die *analytische* Tradition auf keine irgendwie ‚prinzipiensichernde' Intuition mehr zurückgreifen kann, die ihrem geometrischen Vorbild gewöhnlich zuerkannt wurde. Der Vorzug der Analytischen Mechanik liegt so, wie bereits bemerkt, nicht mehr in der vom älteren mechanischen Euklidianismus geforderten eigentlichen axiomatischen Begründung, sondern nurmehr in der (ebenfalls von jenem geforderten) deduktiven *Organisation* der akzeptierten Sätze der rationalen Mechanik: ein eindrucksvolles ‚architektonisches' Bauwerk, aber *ohne Fundament*. Es ist, wie wir sahen, *ein* Ausgangspunkt für Kants und Fries' Erörterungen zur formalen Teleologie und zum Systemideal der KMN (Kap. V).

[933] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2, Zit. 546.

Auf der anderen Seite beansprucht die *synthetische* Tradition, wie sie Kant in Bezugnahme vor allem auf Newton weiterzuführen sucht, gerade, eine solche axiomatische Grundlegung zu liefern, die die mathematische Physik selbst nicht liefern könne.

Doch wie wir sahen (Kap. III, Teil 7.1) sind die *Metaphysischen Anfangsgründe* unzureichend, um die wichtigsten Teile der bereits existierenden, empirisch überaus erfolgreich agierenden Mechanik ihrer Zeit grundzulegen — sie liefern sozusagen ein Fundament, das nur einen kleinen Teil des *bereits existierenden* Bauwerkes zu stützen vermag.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts steht die KMN also offenbar vor einem *Begründungsdilemma*. ‚Offenbar' ist dieses Dilemma in der Zeit allerdings nur für diejenigen, die mit der analytischen Tradition und, allgemeiner, mit der Praxis der mathematischen Physik vertraut sind. Hierzu zählt Fries, und seine diesbezüglichen wissenschaftstheoretischen Reflexionen (Kap. IV, Teil 4.4) können als Versuch verstanden werden, analytischen Prinzipien (wie dem der kleinsten Wirkung) eine *methodologische* Funktion im Rahmen eines synthetischen, Newton-Kantischen Aufbaus der Mechanik zuzuweisen. Aber damit wird das Problem nicht gelöst, das die weitere Mechanikentwicklung aufgibt: Diese Entwicklung wird im wesentlichen[934] von der analytischen Tradition bestimmt, die eben analytische Prinzipien nicht (nur) heuristisch versteht, sondern weiterhin als *Axiome* an den Anfang ihres deduktiven Aufbaus der Mechanik stellt.[935]

[934] Zumindest beiläufig sei erwähnt, daß im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert Mathematiker wie G. Monge, L. Poinsot, M. Chasles und A.F. Möbius *auch* eine mathematisch avancierte *geometrische Mechanik* ausbildeten, die sich stark an technischen Anwendungen orientierte und sich in Teilen als auf das ‚Konkrete' und die ‚Anschauung' gerichteter *Gegenentwurf* zur analytischen Tradition verstand (s. Ziegler 1985), aber auf die weitere theoretische Ausbildung der Mechanik keinen wesentlichen Einfluß nahm. Auch finden sich historisch bedeutungslos gebliebene Versuche, eine synthetische Mechanik direkt in Rückgriff auf der Grundlage der Methoden und Lehrsätze der antiken Geometrie zu etablieren. So veröffentlicht J.W.H. Lehmann 1831 ein Lehrwerk über *Anfangsgründe der höheren Mechanik nach der antiken, rein geometrischen Methode bearbeitet*, das die „abgehandelte Mechanik als rein mathematische Wissenschaft" (Lehmann 1831, S. X) versteht und sich insofern auf Lagrange beziehen könnte, aber zugleich beklagt, daß „der antike Geist durch das Abstracte der neueren analytischen Operationen fast erdrückt wurde" (ebd., S. IV). Tatsächlich geht es Lehmann um eine Wiederbelebung des *‚antiken* Geistes' der Strenge, indem problematisch erscheinende imaginäre, irrationale und unendlich kleine Größen (vgl. ebd., S. VI) aus der mathematischen Darstellung ausgeschlossen werden und die „räumliche Anschaulichkeit" zum durchgängigen Prinzip erhoben wird (vgl. ebd., S. XI). Zum Variationsansatz der analytischen Mechanik bemerkt er, auf Eulers *Methodus inveniendi* (Euler 1744) anspielend, bündig: „Den Satz der kleinsten Wirkung, die Theorie der Brachistochrona, so wie andere Gegenstände, welche sich auf die curvas maximi minimive proprietate gaudentes oder auf die *Variationsrechnung* beziehen, nach der antiken Methode zu begründen, ist mir bisher nicht gelungen" (ebd., S. XI).

[935] Einen gewissen Endpunkt dieser Entwicklung markieren am Ende des 19. Jahrhunderts Helmholtz' *Studien zur Statik monocyklischer Systeme* und die damit zusammenhängenden

Die weitere Untersuchung des axiomatischen Denkens wird sich daher auf *diese* Tradition konzentrieren. Die *systematische* Problemstellung kann dabei in bestimmter Hinsicht spezifiziert werden:

Bereits bei Lagrange, dessen *Méchanique Analitique* für die weitere Entwicklung der analytischen Tradition bis zur Jahrhundertmitte paradigmatisch wurde, konnte von einem Essentialismus und Fundamentalismus im Sinne der älteren KMN nicht mehr die Rede sein. Die von ihm vorgeschlagene Axiomatisierung ist *formaler* Art und die verschiedenen Versuche (Kap. IV, Teile 5.2 und 5.3), seine Analysis als ‚natürlich' und seine Axiomatisierung als gewiß und eindeutig auszuweisen, ‚leben' gleichsam von der Tradition der Mathematik als einer *mathesis mixta*, deren Erfahrungs- und Realitätsbezug *per se* gesichert erscheint. Dies mag sich *post festum* als ein schwaches Band zwischen Naturordnung und Axiomatisierung darstellen, es ist aber zu vergegenwärtigen, daß dieses Band an der Wende zum 19. Jahrhundert weder in der Geometrie noch in der Mechanik in Frage stand, und es würde von unhistorischem Denken zeugen, hier einfach erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Naivität am Werke zu sehen: Es ist eben nichts weniger als der klassische Wissenschaftsbegriff, der dabei auf dem Spiel steht, und es ist dieser traditionelle Wissenschaftsbegriff, der eine *formal gewordene* Axiomatisierung wie die der *Méchanique Analitique* als *‚natürlich* per Tradition' stützt.

Wie kann es in diesem Entwicklungsstadium der KMN zur Auflösung axiomatischen Denkens kommen? Ich habe eingangs (Kap. II, Teil 2.4) argumentiert, daß diese Auflösung nur ‚von oben' erfolgen kann: Sie stellt die mathematischen Prinzipien der Mechanik *als Axiome* in Frage, oder aber sie findet nicht statt. Meine These wird nun genauer sein, daß es die Mathematikentwicklung und ein gewandeltes, durch die ‚Schulphilosophien' *nicht* herbeigeführtes (und erst später von ihr reflektiertes) Verständnis des Erfahrungs- und Realitätsbezuges von Mathematik sind, die diese Auflösung initiieren: Konkret ist es erst das mit der Entstehung der sogenannten ‚reinen Mathematik' auftretende *Anwendungsproblem*, das hier symptomatisch wird.

Ein eigentliches Problem der Anwendung von Mathematik auf Erfahrung im hier gemeinten Sinne kennen beide philosophische Richtungen *nicht*, die für die Entwicklung der KMN im fraglichen Zeitraum interessant sind: der *Kantianismus* nicht, weil ihm zufolge die apriorischen Konstruktionen der Mathematik in Raum und Zeit immer

Untersuchungen *Ueber die physikalische Bedeutung des Princips der kleinsten Wirkung* (Helmholtz 1884 und 1886). Bei Helmholtz wird ein verallgemeinertes Prinzip der kleinsten Wirkung (wieder) an den Anfang des deduktiven Aufbaus der Mechanik (und damit, nach Helmholtz, auch der theoretischen Physik insgesamt) gestellt; zugleich wird es als heuristisches Prinzip empfohlen: „Jedenfalls scheint mir die Allgemeingültigkeit des Princips der kleinsten Wirkung so weit gesichert, dass es als heuristisches Princip und als Leitfaden für das Bestreben, die Gesetze neuer Klassen von Erscheinungen zu formuliren, einen hohen Werth in Anspruch nehmen darf" (Helmholtz 1886, S. 210).

auch *synthetisch* (im Sinne von ‚empirisch gehalterweiternd') sind[936], der ältere *Positivismus und Empirismus* nicht, weil ihnen zufolge die (für die Mechanik relevante) Mathematik von der Erfahrung abstrahiert und daher immer auf (weitere) Erfahrung anwendbar ist. So nimmt es nicht wunder, daß die an Kant orientierten Mechanikdarstellungen der Jahrhundertwende von einer synthetisch-apriorischen Begründung der Mechanik nach Vorbild der *Metaphysischen Anfangsgründe* ausgehen[937], während die meisten Lehrbücher einer — im einzelnen meist pauschalen und undifferenzierten — rein *empiristischen* Prinzipienbegründung verpflichtet sind[938], aber *beide* Seiten die *Sicherheit* der Mathematik auf ihrer Seite wähnen. Interessanter als solche Darstellungen erscheinen mir die folgenden ‚wissenschaftsnahen', aber ‚philosophischeren' Beispiele, die ich den Ausführungen zu der (für Deutschland zunächst spezifischen) Entwicklung einer ‚reinen Mathematik' in kontrastierender Absicht voranstelle. Es geht mir dabei darum, zu zeigen, in welcher Weise hier ein Anwendungsproblem der Mathematik im Kontext der Mechanik *nicht* auftritt oder aber unbefriedigend gelöst wird. Ich stelle die drei Beispiele zunächst kurz vor und gebe anschließend eine zusammenfassende Beurteilung.

VI.1.1 Positivismus: Auguste Comte

Auguste Comtes Positivismus ist bekanntlich der mathematischen und naturwissenschaftlichen Entwicklung des 18. und frühen 19. Jahrhunderts besonders stark verpflichtet: Nach Vorbild gerade der mathematischen Physik fordert er, *alle* Phänomene

[936] Die apriorischen Konstruktionen der Mathematik in Raum und Zeit sind *synthetisch*: Sie machen Aussagen über die Struktur von Raum und Zeit und also auch über die empirischen Objekte in Raum und Zeit; vgl. hierzu auch Körner 1968, S. 33f. und Martin 1960, S. 45f.

[937] An Lehrbüchern, die maßgeblich von Kant beeinflußt wurden, sei neben Fries 1813 und 1822 (vgl. Kap. V) insbes. hingewiesen auf die frühen Werke Fischer 1797, Gren 1797, Link 1798. Eine umfassende Untersuchung der Wirkung Kants in der Physik und angewandten Mathematik des späten 18. und frühen 19. Jahrhunderts steht immer noch aus; wichtige Hinweise finden sich in Rosenberger 1882-80 III, Stichweh 1984, Jahnke 1990a, Lind 1992 sowie verschiedenen Beiträgen in Jahnke/Otte 1981, Mehrtens/Bos/Schneider 1981 sowie König 1990.

[938] Die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts ist gerade in Deutschland durch eine geradezu inflationäre Vermehrung von Mechanik-Lehrbüchern, die vielfach von französischen Vorbildern profitieren, gekennzeichnet (eine diesbezügliche Bibliographie von mir ist in Ausarbeitung); für Hinweise s. einstweilen Stichweh 1984 und Lind 1992. Für den oftmals unreflektierten Empirismus vieler Autoren stehen insbesondere die zahlreichen Beispiele, das Trägheitsprinzip an Experimenten und Alltagsbeobachtungen zu ‚verifizieren' — Parrots Begründung des Trägheitsprinzips für den Fall der Ruhe an Bergen u.ä. (vgl. Kap. IV, Teil 2.6, Anm. 451) ist hier in der Tat nur die ‚Spitze eines Berges'.

als notwendige Folgen einer möglichst kleinen Zahl unabänderlicher Naturgesetze aufzufassen, die es durch Beobachtung und Experiment zu ermitteln gilt.[939]

In Comtes Wissenschaftsklassifikation bildet die Mathematik *begründungstheoretisch* betrachtet dennoch in gewisser Hinsicht die ‚Basis': Sie ist für das „Individuum wie für die Gattung der einzig notwendige Ursprung rationaler Positivität"; diese „Anfangswissenschaft [science initial]" zerfalle in „drei großen Zweige: Kalkül [le calcul], Geometrie und Mechanik", bei denen es sich um den „wahren Ursprung des ganzen Wissenschaftssystems"[940] handle.

Wie jede Wissenschaft geht nun nach Comte auch die Mathematik aus den Tatsachen hervor. Geometrie und Mechanik definieren, wie er im *Cours de Philosophie positive* näher ausführt, den Bereich der *„mathématique concrète"*, deren Gegenstand die mathematische Gesetzmäßigkeit der natürlichen Phänomene ist; sie sind daher „fundamentale Naturwissenschaften [science naturelles fondamentales]"[941]. Im ‚positiven' Stadium sind diese frei von ontologischen Aussagen über das ‚Wesen' der Dinge und metaphysischen Spekulationen im allgemeinen; in der Mechanik etwa hört die Frage nach Ursprung und Natur der *Kraft* auf, Gegenstand der Untersuchung zu sein, sie beschränkt sich auf eine Darstellung quantitativer Gesetzmäßigkeiten der Phänomene. Insofern folgt Comte ganz dem Essentialismusverzicht der mathematischen Physik des ausgehenden 18. Jahrhunderts, auf die er sich vornehmlich bezieht.

Der ‚Kalkül' als allgemeine und abstrakte Wissenschaft von der Größe definiert nun gegenüber den ‚konkreten' Disziplinen Geometrie und Mechanik den Bereich der *„mathématique abstraite"*; er stellt eine logische ‚Verlängerung' konkreter Meßprozesse und der Verknüpfung von Meßresultaten dar und ist deshalb nicht (unmittelbar) auf die Phänomene der Außenwelt angewiesen.[942] Dieser Teil der Mathematik ist nach Comte „als einziger rein instrumentell, und nichts anderes als eine große und bewundernswerte Ausdehnung der natürlichen Logik auf eine gewisse Klasse von Deduktionen".[943]

[939] Vgl. Ueberweg 1916, S. 498-501, insbes. S. 498.

[940] Comte 1979, S. 209. Iring Fetscher übersetzt hier stattdessen „le calcul" mit „Arithmetik", was offenkundig nicht Comtes Intention trifft: „Le calcul" ist Comtes Ausdruck für die allgemeine und abstrakte Wissenschaft von den Größen [grandeurs] und deren Relationen und umfaßt neben der Arithmetik auch die Algebra *und* die Infinitesimalrechnung. S. hierzu Comte 1975, S. 83-95 (Quatrième Leçon).

[941] Ebd., S. 74 (Troisième Leçon).

[942] „[...] la partie concrète de toute question mathématique est nécessairement fondée sur la considération du monde entérieur, et ne saurait jamais, quelle qu'y puisse être la part du raisonnement, se résoudre par une simple suite de combinaisons intellectuelles. La partie abstraite, au contraire, quand elle a été d'abord bien exactement séparée, ne peut consister que dans une série de déductions rationelles plus ou moins prolongées" (ebd., S. 73).

[943] Ebd., S. 64 (Deuxième Leçon).

Stellt nun dieser ‚instrumentelle' Charakter der abstrakten Mathematik die konkrete Mathematik (hier: die Mechanik) vor ein *Anwendungsproblem* in dem Sinne, daß erstere ständig Gesetzesentwürfe im Sinne formaler Hypothesen hervorbringt, unter denen letztere auf empirischem Wege entscheiden muß, aber vielleicht nicht eindeutig entscheiden kann? Keineswegs. Vielmehr verhält es sich so, daß wir auf dem Wege der Induktion von einzelnen und möglicherweise komplexen zu immer allgemeineren und einfacheren Tatsachen aufsteigen und zu den Tatsachen der Geometrie und Mechanik als ‚allgemeinsten, einfachsten, abstraktesten, irreduzibelsten und von allen anderen unabhängigsten' gelangen.[944] Die Erkenntnis der Grundgesetze der Wirklichkeit kommt auf der Ebene der konkreten Mathematik zu einem *Abschluß*. Der weitere ‚Aufstieg' zur abstrakten Mathematik hat von der ‚Plattform' der konkreten Mathematik aus zu erfolgen, aber kann (weil er von äußerer Erfahrung unabhängig ist) keine Möglichkeiten eigentlicher Erkenntniserweiterung bringen. Die abstrakte Mathematik, am weitesten von der Erfahrung entfernt, bleibt so in Bezug auf die konkrete Mathematik vollkommen passiv: Sie ist ‚instrumentell', wie Comte selbst ja im obigen Zitat andeutet, aber eben nicht in dem Sinne, daß sie der konkreten Mathematik Gesetzeshypothesen bereitstellt, sondern in dem Sinne, daß sie an den *bereits vorhandenen* Gesetzen der konkreten Mathematik Deduktionen vorzunehmen erlaubt, die die Anwendung dieser Gesetze auf *weitere* Phänomene ermöglichen.[945] Sie spinnt, metaphorisch gesprochen, mit ihren eigenen Gesetzen als Erweiterungen einer ‚natürlichen Logik' die deduktiven Fäden, die die ‚Knoten' der konkreten Mathematik (Gesetze der Geometrie und Mechanik) mit dem bunten Gewebe der Einzelphänomene verbinden — aber sie trägt nicht das Geringste zur ‚Knotenbildung' selber bei.[946]

Diese kurzen Ausführungen mögen ausreichen, um zu erklären, daß es bei Comte ein Anwendungspoblem der Mathematik in Hinblick auf mechanische Prinzipien nicht

[944] „On voit, en effet, que les phénomènes géométriques et mécaniques sont, de tous, les plus généraux, les plus simples, les plus abstraits, les plus irréductibles et les plus indépendants de tous les autres, dont ils sont, au contraire, la base" (ebd., S. 64).

[945] Vgl. Comtes Ausführungen zu der Unterscheidung von konkreter und abstrakter Mathematik ebd., S. 65-82 (Troisième Leçon). Cassirers Kritik, daß Comte ohne nähere Begründung zum einen am „alten Primat der Mathematik" festhält und andererseits die Erfahrungsbasis auch der Mathematik betont, ist ohne Einschränkung zuzustimmen: „[...] die These, daß zwischen empirischem und geometrischem Wissen kein prinzipieller Unterschied bestehe, bleibt bei Comte, wie in anderen Systemen des Empirismus, im wesentlichen ein bloßes Postulat und wird in gewissem Sinne nur als erkenntnistheoretisches Dogma aufgestellt und verteidigt" (Cassirer *Erkenntnisproblem* IV, S. 46f.).

[946] Damit ist natürlich nicht gesagt, daß die abstrakte Mathematik empirisch irrelevant ist, denn sie dehnt die Anwendung der Gesetze deduktiv auch auf *neue* Phänomene aus. Gerade ihre deduktive Leistung ist es ja im übrigen, die der Baconschen Wissenschaft fehlt, um ‚klassisch' im KMN-Sinne zu sein; vgl. Kap. II, Teil 1.3. Comte liefert ein Musterbeispiel für die dort vorgenommene ‚Baconsche Erweiterung' der KMN.

gibt und auch nicht geben kann. Sie dürften desweiteren plausibel machen, warum für ihn Lagranges *Méchanique Analitique* geradezu den Idealtypus der positiven Wissenschaft verkörpert.[947] Comte kritisiert zwar den Anspruch Lagranges, Mechanik auf Analysis ‚reduzieren' zu wollen[948], aber hierbei handelt es sich keineswegs um eine Kritik an Lagranges mechanischem Euklidianismus selbst, sondern nur daran, daß die damit implizierte Wissenschaftsauffassung einer *Mechanik als Analysis* den Erfahrungsursprung dieser Wissenschaft, der nach Comte noch bei ihren allgemeinsten und abstraktesten Prinzipien gegeben ist, verdunkle. In Comtes ‚Baconscher' Variante der KMN kann daher die *Méchanique Analitique*, befreit von Lagranges ‚reduktionistischem Mißverständnis', auch als Musterbeispiel einer naturwissenschaftlichen Theorie fungieren, die den Verzicht auf ontologische Aussagen und metaphysische Spekulationen generell mit größter empirischer Allgemeinheit und mathematischer Sicherheit verbindet.

VI.1.2 Empirismus: John Herschel

Zeitgleich mit dem ersten Band des *Cours*, in dem Comte u.a. seine Philosophie der Mathematik entwickelt, erscheint John Herschels *A Preliminary Disourse on the Study of Natural Philosophy* (1830). Es handelt sich dabei um eine Wissenschaftstheorie der Physik, die die Methodenlehre des britischen *Empirismus* — eine Bezeichnung, die

[947] Vgl. Comtes relativ detaillierten Ausführungen zu den verschiedensten Bereichen der „mécanique rationnelle" (Comte 1975, S. 226-440 (Quinzième Leçon bis Vingt-Septième Leçon)).

[948] „[...] l'analyse mathématique, quelle que soit son extrême importance [...] ne saurait être, par sa nature, qu'un puissant moyen de déduction, qui, lorsqu'il est applicable, permet de perfectionner une science au degré le plus éminent, après que les fondements en ont été posés, mais qui ne peut jamais suffire à établir ces bases elles-mêmes. S'il était possible de constituer entièrement la science de la mécanique d'après de simples conceptions analytiques, on ne pourrait se représenter comment une telle science deviendrait jamais vraiment applicable à l'étude effective de la nature. Ce qui établit la réalité de la mécanique rationenelle, c'est précisément, au contraire, d'être fondée sur quelques faits généraux, immédiatement fournis par l'observation, et que tout philosophie vraiment positif doit envisager, ce me semble, comme n'étant susceptibles d'aucune explication quelconque" (ebd., S. 227f.; Quinzième Leçon). Diese Kritik Comtes an Lagrange ist, immanent betrachtet, stimmig, weil sich Lagrange mit dem Anspruch, die Mechanik auf die Analysis und damit auf die abstrakte Mathematik zu reduzieren, während doch die allgemeinen Tatsachen („faits généraux") auf der Ebene der konkreten Mathematik (als allgemeinster Naturwissenschaft) angesiedelt sind.

Comte ausdrücklich nicht auf seinen *Positivismus* angewendet wissen möchte[949] — bis hin zu J.S. Mills *Logic* (1843) und darüber hinaus entscheidend geprägt hat.[950]

Ich stelle hier Herschels *Discourse* neben Comtes *Cours*, ohne auf gravierende wissenschaftstheoretische Differenzpunkte näher einzugehen: Wiederum soll nur die Rolle der Mathematik bei der mechanischen Prinzipienbildung und -begründung beleuchtet werden.

Für Herschel gehören die Bereiche der Mathematik, die Comte unter ‚calcul' bzw. ‚mathématique abstraite' faßt (Algebra, Arithmetik, Analysis), zur „abstract science", die er von einer „natural science" unterscheidet.[951] Beide gehen auf verschiedene Erkenntnisquellen zurück: erstere auf „memory, thought, and reason"[952], letztere allein auf „observation" und „experiment", d.h. auf äußere Erfahrung.[953] Während die ‚abstract science' durch besondere Erkenntnissicherheit ausgezeichnet ist[954], betont Herschel häufig die Vorläufigkeit und Fehlbarkeit unseres Erfahrungswissens von der Natur.[955] Die von Herschel konstatierte Differenz der Erkenntnissicherheit schwindet jedoch auf interessante Weise, wenn man den Prozeß genauer betrachtet, der nach seiner Auffassung zu eigentlicher naturwissenschaftlicher Erkenntnis — nämlich der Kenntnis von allgemeinen *Naturgesetzen*[956] — führt, und zumindest *hier* rückt Herschel

[949] S. Comte 1979, S. 33; hierzu auch Cassirer *Erkenntnisproblem* IV, S. 16f.

[950] Zu Herschels Methodologie s. insbes. Agassi 1969, Cannon 1961, Charpa 1987 und König 1968a, S. 210-219.

[951] „Science is the knowledge of many, orderly and methodologically digested and arranged, so as to become attainable by one. The knowledge of reasons and their conclusions constitutes *abstract*, that of causes and their effects, and of the laws of nature, *natural science*" (Herschel 1830, S. 18). Zur Arithmetik und Algebra vgl. ebd., S. 19f.

[952] Ebd., S. 18. Im vollen Wortlaut: „Abstract science is independent of a system of nature, — of a creation, — of every thing, in short, except memory, thought and reason".

[953] Vgl. ebd., S. 76. Herschel spricht von „experience" als „the great, and indeed only ultimate source of our knowledge of nature and its laws" und unterscheidet im Anschluß zwischen „observation" und „experiment". Daß seine erkenntnisgenetische Unterscheidung von ‚abstract science' und ‚natural science' problematisch und wenig reflektiert ist, zeigt sich bereits daran, daß er unter Erfahrung ausdrücklich „not the experience of one man only, or of one generation, but the accumulated experience of all mankind in all ages, registered in books or recorded by tradition" (ebd., S. 76), versteht, so daß diese in die Erkenntnisgewinnung der ‚natural science' einzugehen hätte, während er ‚memory' gerade (eindeutig) der ‚abstract science' zuordnet.

[954] Vgl. ebd., S. 19f.

[955] Es ist deshalb auch zutreffend, Herschel in einer *allgemeinen* ‚Geschichte der Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaften' einer „assertorisch-empirischen Linie" (König 1968a, S. 209f.) zuzuordnen, obwohl er, wie im folgenden deutlich gemacht werden soll, aufgrund seines Verständnis mechanischer Prinzipien durchaus der KMN zugerechnet werden sollte.

[956] „We must never forget that it is principles, not phenomena, — laws, not insulated independent facts, — which are the objects of enquiry to the natural philosopher" (Herschel 1830., S. 13f.).

auch deutlich an Comte heran: Dieser Prozeß ist induktiv, abstrahierend und — Herschel bezieht sich hier auf Newtons Methode der Analyse und Synthese[957] — ein *analysierender* Vorgang[958]. Er führt von komplexen Phänomenen zu einfacheren und allgemeineren, bis er zu solchen gelangt, die (im Prozeß der Analyse) besonders häufig auftreten und sich einer weiteren Zergliederung widersetzen:[959]

On those phenomena [...] the greatest pains and attention ought to be bestowed, not only because they furnish a key to the greatest number of enquiries, and serve to group and classify together the greatest range of phenomena, but by reason of their higher nature, and because it is in these that we must look for the direct action of causes, and the most extensive and general enunciation of the laws of nature. These, once discovered, place in our power the explanation of all particular facts, and become grounds of reasoning, independent of particular trial: thus playing the same part in natural philosophy that axioms do in geometry; containing [...] all that our reason has occasion to draw from experience to enable it to follow out the truths of physics by the mere application of logical argument. Indeed, the axioms of geometry themselves may be regarded as in some sort an appeal to experience, not corporeal, but mental.

Hier wird die Geometrie, wie bereits in Comtes konkreter Mathematik, an das Ende eines induktiven Prozesses gestellt, der in konkreten Phänomenen seinen Ausgang nimmt — wenngleich Herschels Schlußbemerkung deren empirischen Charakter (in dem Sinne, daß ihre Begriffe und Sätze nur der *äußeren* Erfahrung entstammen) relativiert.[960] Diese Relativierung fehlt nun gänzlich, wenn er im Anschluß zu den Begriffen und Sätzen der *Mechanik* kommt — wie auch eine Erklärung dafür, daß er hier die gleiche Erkenntnissicherheit wie in jedem anderen Bereich der Mathematik (d.h. den Bereichen, die der ‚abstract science' zugewiesen sind) anzutreffen meint:[961]

By far the most general phenomenon with which we are acquainted, and that which occurs most constantly, in every enquiry into which we enter, is motion, and its communication. Dynamics, then, or the science of force and motion, is thus placed at the head of all the sciences; and, happi-

[957] Vgl. Kap. III, Teil 4.1.

[958] Vgl. insbes. Herschel 1830, Kap. II.

[959] Ebd., S. 94f.

[960] Im Kontext seiner Diskussion der ‚abstract science' bemerkt Herschel: „As the universe exists in time and place; and as motion, velocity, quantity, number, and order, are main elements of our knowledge of external things and their changes, an acquaintance with these, abstractedly considered [...] must evidently be a useful preparation for the more complex study of nature" (ebd., S. 19). Diese Bemerkung deutet eher darauf hin, daß er *alle* mathematische Erkenntnis, sogar die der Arithmetik und Algebra, als der äußeren Erfahrung entstammend ansehen könnte. Tatsächlich muß man konstatieren, daß bei Herschel, wie auch bei Comte, eine eigentliche wissenschaftstheoretische Auseinandersetzung mit den *Grundlagen* der Mathematik und Fragen ihrer Anwendbarkeit in den Naturwissenschaften fehlt.

[961] Ebd., S. 96.

ly for human knowledge, it is one in which the highest certainty is attainable, a certainty no way inferior to mathematical demonstration. As its axioms are few, simple, and in the highest degree distinct and definite, so they have at the same time an immediate relation to geometrical quantity, space, time, and direction, and thus accomodate themselves with remarkable facility to geometrical reasoning.

Mehrere Gesichtspunkte erscheinen hier beachtenswert: Erstens wäre die behauptete Sicherheit mechanischer Sätze offenkundig *nicht* einmal dann erwiesen, wenn man Herschels Unterscheidung von ‚abstract science' und ‚natural science' und deren Charakterisierung als zutreffend unterstellen würde, denn die Mechanik steht aufgrund ihrer induktiven Ausbildung an der Spitze der ‚natural science', während Herschel Erkenntnissicherheit zunächst nur für die ‚abstract science' behauptet hatte. Zweitens weist die behauptete Nähe von Geometrie und Mechanik eine Gemeinsamkeit mit Comtes ‚konkreter Mathematik' auf: Beide Wissenschaften, soviel läßt sich nach den obigen Belegen wohl auch für Herschel sagen, gewinnen ihre Begriffe und Sätze aus der Erfahrung, und beide können ihre Sätze *mit Sicherheit* auf weitere Erfahrung anwenden. Drittens verhält es sich mit Herschels mathematischen Bereichen der ‚abstract science' (Algebra, Arithmetik) ebenso wie mit Comtes ‚abstrakter Mathematik': Sie dienen der Mechanik als Instrumente der Deduktion aus (bereits vorhandenen) Gesetzen, aber sie tragen nicht zur Gesetzesbildung bei. Es besteht *nicht* die Gefahr, daß eine ‚reine Mathematik', die sich von der Erfahrung gelöst hat, unterschiedliche Entwürfe bereit stellt, um die Mechanik zu axiomatisieren, sondern die Gefahr ist vielmehr, daß eine solche Mathematik nicht hinreichend entwickelt sein könnte, um alle Implikationen der *einen* (durch die Erfahrung bestimmten) Axiomatisierung ausschöpfen zu können. In diesem Sinne bemerkt Herschel zu den 'axioms' der Mechanik: „[...] their consequences may be pursued, by arguments purely mathematical, to any extent, insomuch that the limit of our knowledge of dynamics is determined only by that of pure mathematics, which is the case in no other branch of physical science".[962]

VI.1.3 ‚Semi-Kantianismus': W.R. Hamilton

Als drittes Beispiel, das der gleichen Zeit wie Comtes *Cours* und Herschels *Discourse* entstammt, sei hier William Rowan Hamilton aufgeführt, der zeitlich noch *vor*, von der Sache her *neben* C.G.J. Jacobi die Entwicklung der analytischen Mechanik in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ganz entscheidend geprägt hat.[963] Hamilton bezieht sich sowohl in seiner Philosophie der reinen Mathematik auf Kant, wenn er die

[962] Ebd., S. 96.

[963] Aus Hamiltons mechanischem Werk sind die Arbeiten Hamilton 1834a, 1834b und 1835 hervorzuheben; zu Person und Werk Hamiltons s. insbes. die Biographien von Graves 1882-91 und Hankins 1980.

Algebra als ‚Wissenschaft der reinen Zeit' definiert[964], als auch verschiedentlich in seinen philosophischen Reflexionen zur Mechanik. Aber es ist keine ‚reine' Kantische Lehre, die Hamilton hier artikuliert, sondern der (philosophisch unbefriedigende) Versuch, zwischen Kantischer ‚synthetischer' Grundlegung und ‚analytischer' mechanischer Praxis zu vermitteln:

Das Prinzip der kleinsten Wirkung betrachtet Hamilton als „the highest and most general axiom"[965] der Mechanik wie auch der Optik. Es ist für ihn ein allgemeinstes Resultat der Erfahrung, gehört also auf die Seite einer *empirischen* Mechanik. Hamilton ordnet es noch dem von ihm gefundenen ‚Law of Varying Action' — nicht zu verwechseln mit dem heute sog. ‚Hamilton-Prinzip' — über.[966] Aber als empirisches Gesetz kann es für ihn keine Mechanik begründen (Hamilton ist eben kein Empirist), sondern nur organisieren. Soweit bietet Hamilton nichts Neues gegenüber der analytischen Tradition des 18. Jahrhunderts.

Aufschlußreicher ist nun seine Unterscheidung zweier *verschiedener* Wissenschaften der Mechanik („dynamics"):[967]

[...] there are, or may be imagined, two dynamical sciences: one subjective, *a priori*, metaphysical, deducible from mediation on our ideas of Power, Space, Time; the other objective, *a posteriori*, physical, discoverable by observation and generalization of facts or phenomena: that these two sciences are distinct in kind, but intimately and wonderfully connected, in consequence of the ultimate union of the subjective and objective in God, or [...] by virtue of the manifestation which he has been pleased to make of himself in the universe to the intellect of man; so that the two sciences are never wholly seperate, but may and ought to advance together [...].

Hamilton unterscheidet im Anschluß exemplifizierend zwischen einem „metaphysical theorem", wonach wir durch unsere Denkgesetze gezwungen sind, für jeden Punkt, der sich auf einer *Kurve* (im Sinne von: ‚keiner Geraden') bewegt, eine ablenkende Kraft als *Ursache* aufzusuchen, und einem „physical result", nämlich Newtons Trägheitsprinzip („a great physical and inductive discovery"), wonach wir im Falle einer gekrümmten Bewegung eines Körpers tatsächlich einen zweiten Körper auffinden, der die Bewegung des ersten von der Geraden abbringt.[968] Das analytische Prinzip der kleinsten Wirkung gehört, wie bereits bemerkt, zu dieser *zweiten* Kategorie von Sätzen.

Es ist nun, wie Hamilton wiederum am Beispiel des Trägheitsprinzips klar macht, weder so, daß die Sätze der empirischen Mechanik einfach als empirisch *begründet*

[964] Näheres hierzu in Pycior 1976. Hamilton spricht schon 1827 von „algebra as the science of time" und fand diese Auffassung in seiner näheren Beschäftigung mit Kant nach 1830 bestätigt (s. Hankins 1980, S. 258f.).

[965] Graves 1882-91 I, S. 228f.

[966] Vgl. Hankins 1980, S. 182f.

[967] Hamilton an William Whewell vom 25. Mai 1833 (zit. nach Graves 1882-91 II, S. 48)

[968] Ebd., S. 48.

aufgefaßt werden könnten (dies unterscheidet ihn von Comte und Herschel), noch so, daß sie in irgendeiner *logischen* Abhängigkeitsbeziehung zu den *metaphysischen* Sätzen stünden (und also bereits dadurch begründet wären, daß *jene* es sind — dies unterscheidet ihn von Kant). Vielmehr stehen die empirischen Sätze nur dank einer durch *göttlichen Willen* bewirkten ‚Koordination' in einem gewissen, nicht näher ausgeführten Analogieverhältnis[969] zu den metaphysischen Denkgesetzen und sind letztlich in diesem Willen (und nur in ihm) begründet: „The metaphysical theorem I account indeed higher in dignity; but do not consider it as including the other, or as an adequate ground to us for the expectation of any one appearance, though in the Divine mind, indeed, there may be some mysterious union between the causes or first springs of our thoughts and our sensations; of the ideas which seem necessary and eternal, and of the phenomena which seem casual and changing".[970]

Weil die analytischen Prinzipien für Hamilton ganz auf der Seite der empirischen Mechanik stehen und er ihnen — anders als beim ‚empirischen' Trägheitsprinzip, das er mit einem ‚metaphysischen' Kausalitätsprinzip korrelliert — offenbar kein ‚metaphysisches Gegenüber' zuzuerkennen vermag, sie aber — ein Problem bereits der analytischen Tradition des 18. Jahrhunderts[971] — auch nicht in einsehbarer Weise als *induktiv* begründet ausweisen kann und will, sind solche unbestimmten Bezugnahmen auf einen göttlichen Willen Hamiltons einziger Weg, der ‚Entfremdung' von synthetischer Kantischer Grundlegung der Mechanik und analytischer mechanischer Praxis zu begegnen. Man darf vermuten[972], daß hierauf überhaupt erst Hamiltons Unterscheidung beider Arten von Mechanik zurückgeht: Er betont, anders als Comte und Herschel, verschiedentlich die Autonomie und Produktivität mathematischen Denkens[973] und ist als ein idealistisch und neuhumanistisch inspirierter[974] ‚reiner Mathematiker' eher einem Jacobi oder Abel denn einem Lagrange oder Laplace vergleichbar.[975] Für *ihn* entsteht ein Problem der Anwendung mathematischer Konstrukte (wie der Variationsrechnung) auf die Prinzipien der Mechanik, weil er die schöpferischen Möglichkeiten der Mathematik nicht an die Erfahrung bindet. Signifikant ist in diesem Zusammenhang, daß der koordinierende göttliche Wille bei ihm gerade dafür verantwortlich sein soll, daß die Mathematik in der ihr immanenten Produktivität bei der *Anwendung* auf empi-

[969] „[...] analogous, but distinct metaphysical theorem" (ebd., S. 48).

[970] Ebd., S. 49.

[971] Vgl. Kap. IV, Teil 2.6.

[972] Sie wird durch unveröffentlichtes Material im Nachlaß von William Whewell, mit dem Hamilton lebhaft über Grundlagenfragen der Mechanik korrespondierte, gestützt (Trinity College Cambridge, Add. Mss.a.205[12-15]).

[973] Näher hierzu Pycior 1976.

[974] Für vielfältige Belege, insbes. für den Einfluß von Coleridge und Carlyle, s. die Biographie von Hankins 1980.

[975] S. hierzu näher Pycior 1976 und Hankins 1980, Kap. VI.

rische Phänomene nicht gleichsam über unsere Denkgesetze („laws and forms of thought"), die mit den in der Realität geltenden Naturgesetzen („laws of outward appearances") in Analogie stehen sollen, ‚hinausschießen' kann: „[...] in the application of the mathematics themselves there must [...] be something meta-mathematical".[976]

Ich interpretiere solche und andere Ausführungen Hamiltons als überkommenen, hinter Kant zurückfallenden Versuch, metaphysische Begründung und fortschreitende *mathematische* Praxis der Mechanik ‚zusammenzuhalten'. Es ist ein durchaus ‚klassischer' Versuch, insofern er auf die Aufrechterhaltung des mechanischen Euklidianismus abzielt, und dennoch rührt er an den Nerv der Entwicklung, die hier in Rede steht, nämlich das *Anwendungsproblem*.

VI.1.4 Zusammenfassung

Comte und Herschel wurden hier herangezogen, um eine These zu illustrieren, die in einer breiteren Darstellung, als sie hier unternommen werden kann, erhärtet werden könnte: *Der ältere Positivimus und auch der Empirismus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts sind grundsätzlich nicht ‚prinzipienkritisch'*. Selbst J.S. Mills strenge Induktionslogik, nach der *fast* alle allgemeinen empirischen Sätze im Bereich des Hypothetischen bleiben, kennt eine (wenngleich selten auftretende) *vollständige* Verifikation durch die Erfahrung, und diese Verifikation sieht Mill charakteristischerweise im Bereich der Newtonschen Mechanik realisiert.[977] Induktivistisches *Rechtfertigungs-*

[976] Hamilton an William Whewell vom Dez. 1833 (zit. nach Graves 1882-91 II, S. 68). Im vollen Wortlaut lautet dieses aufschlußreiche Zitat: „[...] the visible world supposes an invisible world as its interpreter, and that in the application of the mathematics themselves there must (if I may venture on the word) be something meta-mathematical. Though the senses make known the phenomena, and mathematical methods may arrange them, yet the craving of our nature is not satisfied till we trace in them the projection of ourselves, or that which is divine within us; till we perceive an analogy between the laws of outward appearances and our inward laws and forms of thought; till the Will, which transcends the sphere of sense, and even the sphere of mathematical science, but which constitutes (in conjunction with the conscience) our own proper being and identity, is reflected back to us from the mirror of the universe by an image mentally discerned".

[977] Wobei sich Mill besonders auf Newtons Gravitationsgesetz bezieht (Mill 1862/63 I, S. 12-19, insbes. S. 16). Hier ist die „Bestätigung Beweis" — wobei nicht einzusehen ist, wie Mill hier Gesetzesgewißheit ansetzen kann, wenn die im induktiven Beweis vorausgesetzten Newtonschen ‚Axiome' nicht gewiß wären, denn darin liegt ja gerade die Pointe seiner zentralen Behauptung, „dass alle deductiven oder demonstrativen Wissenschaften ohne Ausnahme inductive Wissenschaften sind; dass ihr Beweis der der Erfahrung ist, dass sie aber auch vermöge des besondern Charakters eines unentbehrlichen Theils der allgemeinen Formeln, nach denen ihre Inductionen gemacht sind, hypothetische Wissenschaften sind. Ihre Schlüsse sind nur auf gewisse Voraussetzungen hin wahr, welche Annäherungen an die Wahrheit sind oder sein sollten, aber selten oder

denken kann eben *per se* keinen mechanischen Euklidianismus unterminieren, sondern nur sanktionieren.

Hamiltons Argumentation weist demgegenüber bereits auf das eigentliche Problem hin, das es im weiteren zu untersuchen gilt: Wo die Entwicklung der Mechanik im wesentlichen von einer Mathematik, die sich zunehmend in Richtung auf Formalisierung, Abstraktion und Selbstbezüglichkeit entwickelt, getragen wird, wird diese *Mathematik selbst* zum Problem des mechanischen Euklidianismus, weil sie ihre Realitätsbezüge immer weniger zu erklären und begründen weiß. Und in Hinblick auf dieses Problem vermag im Jahrhundert der Wissenschaft, wie das 19. Jahrhundert oft genannt wurde, Hamiltons göttliche ‚Metamathematik' als Lösung ebensowenig zu überzeugen wie jene noch fast einhundert Jahre später von David Hilbert beschworene — und von Leibniz kaum mehr als den Namen entlehnende — göttliche ‚prästabilisierte Harmonie' von Mathematik und Natur.[978] Nicht nur in der Geometrie, sondern auch in der Mechanik ist das Verhältnis von *Mathematik und Natur* in neuer, *moderner* Weise zu ‚koordinieren'.

niemals genau wahr sind; und diesem hypothetischen Charakter ist die eigenthümliche Gewissheit zuzuschreiben, von der man annimmt, sie sei der Demonstration inhärent (ebd., S. 303): Wenn der logische Schluß auf das Gravitationsgesetz als verifiziert betrachtet wird, muß dies auch für die Voraussetzungen gelten. Mill wendet sich dagegen, mechanischen Grundgesetzen Whewellsche Notwendigkeit zuzuschreiben (vgl. ebd., S. 291f.), aber nicht dagegen, sie als wahr oder zumindest ‚sehr nahe wahr' anzusehen. Mills Position stellt ein Beispiel für einen ‚Quasi-Euklidianismus' dar (vgl. Kap. II, Teil 2.4): Die Gewißheit der Geometrie und Mechanik ist nicht das Gleiche wie das, „was man gewöhnlich mathematische Gewissheit nennt", weil es sich um eine bloße „Gewissheit der Folgerung" handelt (ebd., S. 311f.). Das Beispiel Gravitationsgesetz zeigt gleichwohl, daß mathematische Gewißheit in einem methodisch geregelten Prozeß der Induktion erreicht werden kann.

[978] Vgl. hierzu Hilbert 1991; die Wendung Hilberts wird in Mehrtens 1990 verschiedentlich aufgegriffen (insbes. S. 15f.) und im Sinne seiner Erzählung über ‚Moderne und ‚Gegenmoderne' der Mathematik verwendet (insbes. S. 379f.).

VI.2 Jacobi und die reine Mathematik

Die Entstehung einer sogenannten ‚reinen Mathematik' im Deutschland des frühen 19. Jahrhunderts ist wissenschafts-, philosophie- und institutionengeschichtlich recht gut dokumentiert und analysiert.[979] Ihre Implikationen für das Problem der Anwendbarkeit von Mathematik in den empirischen Wissenschaften haben dagegen vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit erfahren[980] und ihre Rolle für den Grundlagenwandel der Mechanik blieb vollkommen unbeachtet. Im folgenden sollen zunächst einige Züge dieses neuen Mathematikverständnisses dargestellt werden, die für die weitere Untersuchung wichtig erscheinen (2.1). Anschließend wird Jacobis frühe Sicht des Anwendungsproblems und mathematischer Naturgesetzlichkeit dargestellt (2.2) und sein Weg hin zu einer neuen, ‚modern' zu nennenden Auffassung skizziert (2.3), die dann in den folgenden Teilen näher zu untersuchen sein wird.

Den Mathematiker C.G.J. Jacobi stelle ich aus vier Gründen in den Mittelpunkt der weiteren Darstellung: Erstens repräsentiert dieser nach C.F. Gauß und neben P.G. Lejeune Dirichlet wohl bedeutendste deutsche Mathematiker der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts das Verständnis von ‚reiner Mathematik', um das es hier geht, wie kein anderer.[981] Zweitens sind Jacobis Reflexionen zu den Grundlagen der Mechanik bis vor kurzem weitgehend unbeachtet geblieben — sie waren in ihren interessanteren Teilen nicht einmal in veröffentlichter Form zugänglich.[982] Obwohl der Mathematiker Carl Neumann schon 1869 — beinahe zwei Jahrzehnte nach Jacobis Tod — darauf hinwies, daß jener eine „Kritik der *Fundamente der Mechanik*, wie sie in solcher Schärfe wohl bis zum heutigen Tag noch niemals zur öffentlichen Aussprache gelangt sein dürfte"[983], geleistet hatte, blieb diese Kritik von der Geschichtsschreibung völlig unbeachtet — sie geriet aus verschiedenen, hier nicht näher zu erläuternden Gründen in einen ‚toten Winkel' sowohl der Wissenschafts- als auch der Philosophiegeschichtsschreibung. Drittens liegt Jacobis Kritik zeitlich deutlich *früher* als vergleichbare Kritiken des axiomatischen Denkens, wie wir sie insbesondere von Ernst Mach kennen. Viertens, und nicht zuletzt, spielt Jacobi neben Hamilton in der Mechanikentwicklung des 19. Jahrhunderts eine überragende Rolle. Als der Mathematiker Arthur Cayley im Jahre

[979] Wichtige Hinweise geben Biermann 1988, Eccarius 1977, Jahnke 1990a, Mehrtens 1981, Pyenson 1983, Scharlau 1981, Schubring 1981a, 1981b, Stichweh 1984, Struik 1981 und Stuloff 1968.

[980] Vgl. jedoch Jahnke 1985 und 1990a.

[981] Für diesbezügliche Belege s. Knobloch/Pieper/Pulte 1995.

Als emphatischer Ausdruck von Jacobis Mathematikverständnis mag einstweilen diese Bezugnahme auf Friedrich von Hardenberg dienen: „Das Leben der Götter ist Mathematik, sagt Novalis mit Recht, denn mein Leben ist jetzt das Leben der Götter" (C.G.J. Jacobi an M.H. Jacobi vom Sept. 1831; Ahrens 1907a, S. 8).

[982] S. hierzu Jacobi 1996; erläuternd auch Pulte 1994 und Pulte 1996.

[983] Neumann 1869b, S. 16.

1857 für die British *Association of the Advancement of Science* einen ausführlichen ‚Report' über die Fortschritte der theoretischen Mechanik in den fast 70 Jahren seit dem Erscheinen der *Méchanique Analitique* (1788) abgibt, stehen weder die großen französischen Analytiker noch W.R. Hamilton im Mittelpunkt seiner Darstellung. Cayleys Schlußresümee lautet vielmehr:[984]

I remark in conclusion, that differential equations of dynamics (including in the expression, as I have done throughout the report, the generalized Lagrangian and Hamiltonian forms) are only one of the classes of differential equations which have occupied the attention of geometers. The greater part of what has been done with respect to the general theory of a system of differential equations is due to Jacobi, and he has also considered in particular, besides the differential equations of dynamics, the Pfaffian system of differential equations [...] and the so-called isoperimetric system of differential equations, that is, the system arising from any problem in the calculus of variations.

VI.2.1 Reine Mathematik und Anwendungsproblem

‚Reine Mathematik' oder ‚Mathesis Pura' wurde mit unterschiedlichen Akzentuierungen schon im 18. Jahrhundert von ‚angewandter Mathematik', ‚Mathesis Mixta' bzw. vordem ‚Mathesis Applicata', unterschieden, spielte aber im Gesamtkanon der Mathematik keine erhebliche Rolle.[985] Generell kann gesagt werden, daß der Begriff für solche (und nur solche) mathematischen Untersuchungen verwandt wurde, die nicht über die Studien *bloßer Größen* (Zahlen und Ausdehnung) hinausgingen.

Die Mathematik des 18. Jahrhunderts, allem voran die Analysis, entwickelt sich nicht nur, aber vor allem *mit* solchen Problemen weiter, die von seiten der Mechanik, Astronomie und Physik allgemein an sie herangetragen werden, sondern steht auch *unter* einem ‚Primat der Nützlichkeit', der durch die Aufklärung kultiviert wird. Nützlichkeit im Sinne von Anwendbarkeit auf Probleme der äußeren Natur ist denn auch die wichtigste *Legitimationsinstanz* und verschafft angewandter Mathematik im weitesten Sinne eine Prävalenz vor solchen Untersuchungen, die sich um Klärung und Fundierung grundlegender Konzepte und Sätze bemühen.[986]

[984] Cayley 1857, S. 40.

[985] Einen guten Überblick über die deutsche Mathematik und ihre Arbeitsschwerpunkte an der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert gibt Mehrtens 1981.

[986] Euler etwa rechtfertigt in seiner Schrift *Vom Nutzen der höhern Mathematik* die Notwendigkeit derselben mit ausgiebigen ‚Beweisen' ihres ‚unwiderlegbaren' naturwissenschaftlich-technischen Nutzens. Allein die Begründung, daß „die Analysis unsere Denkkraft schärft und so zur Aufnahme der Wahrheit vorbereitet" (Euler 1942, S. 15), erscheint ihm zu ihrer Verteidigung keineswegs hinreichend. Die rationale Mechanik kann ihre Nützlichkeit nicht schon dadurch hinreichend unter Beweis stellen, daß sie Einsicht in elementare Naturprozesse verspricht, son-

Es sind sowohl mathematikinterne als auch -externe, und hier sowohl philosophische als auch institutionelle und allgemeinkulturelle, mit den Bemühungen um eine Bildungsreform eng verwobene Gründe, die an der Wende zum 19. Jahrhundert eine Umorientierung erzwingen und dazu führen, „daß sich gerade in Deutschland und damit an einer Peripherie der mathematischen Welt zum erstenmal die Disziplin ‚reine Mathematik' als Reaktion auf die universellen Entwicklungsprobleme der Mathematik bildet"[987]. Warum einen solchen, verschiedenen ‚externen' Faktoren unterworfenen Ausbildungsprozeß in einer Untersuchung zur Sprache bringen, in der es doch ‚nur' um die weitere Auflösung des axiomatischen Denkens in der *Mechanik* geht, d.h. einem Bereich angewandter Mathematik? Am Beispiel Jacobis, aber auch anhand der nachfolgenden Entwicklung (Kap. VII) wird deutlich werden, daß diese Auflösung nicht ohne den Wandel der Mathematikauffassung, der hier in Rede steht, verstanden werden kann. Der komplexe Ausbildungsprozeß reiner Mathematik in Deutschland kann hier indes überhaupt nur soweit, wie er für das *Anwendungsproblem* von unmittelbarem Interesse ist, zur Sprache kommen. In stark schematisierender Weise sollen dabei drei Komplexe unterschieden werden:

(1) Innermathematisch macht sich bereits an der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert eine zunehmende Orientierung auf *Grundlagenfragen* hin geltend — beispielhaft kann hier hingewiesen werden auf die Wiederbelebung der Diskussion um die axiomatischen Grundlagen der euklidischen Geometrie durch G.S. Klügel, C.F. Gauß, M. Ohm und andere, auf die Versuche einer algebraischen Grundlegung der Analysis im Anschluß an L. Euler und J.L. Lagrange sowie auf die Entstehung der sog. ‚Kombinatorischen Analysis' — einer „weitgehend auf Deutschland begrenzten Arbeitsrichtung", die sich im Ausgang von Lagranges Funktionentheorie entwickelte und zur Entstehung der von C.F. Hindenburg gegründeten ‚Kombinatorischen Schule' führte, die als die eigentliche ‚Keimzelle' der reinen Mathematik im Deutschland des 19. Jahrhunderts betrachtet werden kann.[988] Das Bemühen um ‚Strenge' und ‚Sicherheit' der Grundlagen führt dabei bereits *innerhalb* der Mathematik zu einer Intensivierung der Reflexion darüber, welche ihrer Teile nun auf Erfahrung angewiesen seien und welche davon *unabhängig* seien und auf bloßen Denkgesetzen basieren. C.F. Gauß berühmtes

dem erst dadurch, daß sie sich als der technischen Anwendung fähig erweist: „Ich beginne mit der Mechanik, und zwar nicht mit der Analyse komplizierterer Vorgänge, die auf die Grundgesetze der Bewegung zurückgeführt werden müssen, denn dass dies ohne gründlichste Analysis nicht möglich ist, steht ausser Zweifel. Obschon dieser höhere Teil der Mechanik ausserordentlich nützlich ist, so pflegt er doch jenem Vorwurf zu verfallen, von dem ich die gesamte höhere Mathematik befreien will. Ich spreche deshalb an dieser Stelle von jener Mechanik, die meistens als elementar betrachtet wird, und die für die Anwendung auf jede Arte von Maschinen genügt, ja eben deshalb meist als äusserst nützlich gepriesen wird" (ebd., S. 409).

[987] Stichweh 1984, S. 189.

[988] S. Jahnke 1990a, insbes. S. 173.

Diktum: „Nach meiner innigsten Ueberzeugung hat die Raumlehre in unserm Wissen apriori eine ganz andere Stellung wie die reine Grössenlehre; es geht unserer Kenntniss von jener durchaus *diejenige* vollständige Ueberzeugung von ihrer Nothwendigkeit (also auch von ihrer absoluten Wahrheit) ab, die der letzteren eigen ist; wir müssen in Demuth zugeben, dass wenn die Zahl bloss unseres Geistes Product ist, der Raum auch ausser unserm Geiste eine Realität hat, der wir a priori ihre Gesetze nicht vollständig vorschreiben können"[989], mag hier als *ein* Beispiel für die vor allem aus der Mathematik selber erwachsenden Bemühung um Abgrenzung ‚empiriefreier' und ‚empiriedurchtränkter' Bereiche mathematischen Wissens dienen. Gauß grenzt hier — eine allseits bekannte Weichenstellung für die weitere Entwicklung der Geometrie vornehmend — dieselbe von der Arithmetik ab und rückt sie in die Nähe der Mechanik. Sein ‚Gummi-Euklidianismus' im Bereich der Mechanik hat gezeigt[990], daß eine solche Abgrenzung nicht automatisch zu einer Geltungsrelativierung angewandter Mathematik führt. Wohl aber führt sie — und das ist der *hier* allein interessierende Punkt — zu einer Reflexion auf die *Anwendungsbedingungen* der reinen Mathematik, d.h. der Arithmetik als einer Wissenschaft, die apriorische Gesetze des Denkens ausdrückt: „Welches ist die wesentliche Bedingung, dass eine Verknüpfung von Begriffen als sich auf eine *Grösse* beziehend gedacht werden könne?"[991] Gauß' Frage geht dahin, warum der *Größenbegriff* geeignet sei, Anwendung in den mathematischen Naturwissenschaften zu finden, wo doch die Arithmetik diesen Begriff der Natur *nicht* empirisch entnehmen kann. Seine Antwort, die im übrigen *keine* Kantische ist, führt auf einen hochtheoretischen Größenbegriff, braucht hier jedoch nicht weiter verfolgt zu werden.[992] Es reicht der Hinweis, daß es das Verständnis von Arithmetik als *reiner* Mathematik ist, das Ansätze zu einer Theorie der Anwendung herbeiführt, soll nicht die Lösung des Anwendungsproblems in metaphysischen Spekulationen wie der einer göttlichen ‚Metamathematik' oder ‚prästabilierten Harmonie' gesucht werden.[993]

Gauß liefert nur *ein* Beispiel für die innerhalb der Mathematik sich abspielende Entwicklung. A.L. Crelle, vehementer Verfechter einer reinen Mathematik und Gründer des *Journals für die reine Mathematik*, in dem von Anfang an Anwendungsbezüge im weitesten Sinne nahezu keine Rolle spielten[994], artikuliert klar und allgemein, daß ein solches Mathematikverständnis nicht nur ein eigentliches Anwendungsproblem erst aufwirft, sondern auch überhaupt erst eigentliche Anwendung ermögliche, weil nur ein solches Verständnis es erlaube, darüber zu entscheiden, wieweit mathematisches Wis-

[989] Gauß an F. W. Bessel vom 9. April 1830 (*Werke* Erg.bd. 1, S. 487).
[990] Vgl. Kap. IV, Teil 5.3.
[991] Gauß *Werke* 10(1), S. 396 (‚Fragen zur Metaphysik der Mathematik').
[992] S. hierzu näher Jahnke 1981 und 1985.
[993] Vgl. oben Teil 1.3.
[994] Weshalb das Journal in Mathematikerkreisen gelegentlich auch scherzhaft als ‚Journal für reine, unangewandte Mathematik' tituliert wurde; Näheres zu Crelles *Journal* bei Eccarius 1977.

sen reichen könne: Erst wenn „durch fleißige Übung des *Urtheils vermittels der Mathematik* (ohne Rücksicht auf Anwendungen) ein mathematischer Geist geweckt worden ist, und nur dann erst, kann man dreister auf den Nutzen der Mathematik bei den Anwendungen rechnen. Das bloße Wissen in der Mathematik, auf *Anwendungen* berechnet [...] ist zu richtigen Anwendungen noch nicht hinreichend, sondern der mathematische *Geist*, oder die mathematische Art zu *denken*, muß der Leitfaden sein. Erst wer *damit* an die Anwendungen geht, wird weniger leicht irren, denn er wird vor allem erst untersuchen, *was* eigentlich die Mathematik zu leisten vermöge und wo und auf welche Weise das Werkzeug mit Nutzen zu gebrauchen sei".[995] Crelles Ausführungen erinnern an Kants Auffassung, wonach dort, wo sich eine Theorie als ‚praxisuntauglich' erweist, *nicht* zu wenig Aufmerksamkeit auf die Praxis, sondern vielmehr zu wenig Aufmerksamkeit auf die *Theorie* verwandt worden sei.[996] Crelles Pointe ist jedoch, daß eben nur die *Mathematik* selber die erforderliche Anwendungsreflexion leisten könne, nicht eine vermittelnde, dritte Instanz zwischen Mathematik und ihrer Anwendungsdiziplin (etwa der Physik), wie wir sie in Fries' Philosophie der Mathematik vorfinden (s. *(2.)*). Wir werden später mit Jacobis Kritik an Lagrange in der Tat einem Musterbeispiel wesentlich *mathematischer* Argumentation begegnen, das Anwendungsbedingungen benennt und deren Verletzung offen legt.[997] Eine Konzeption reiner Mathematik, soviel sei einstweilen festgehalten, impliziert von mathematischer Seite keinen einfachen Anwendungsverzicht, sondern führt, als historisches Phänomen, von vornherein die Reflexion auf Anwendungsbedingungen und Anwendungskritik mit sich.

(2) Wissenschaftstheoretisch im engeren Sinne[998], bot ja zunächst Kants Prämisse von der Existenz ‚reiner Anschauung' eine philosophische Begründung für Mathematik an, die sich selber als ‚rein' in dem Sinne verstand, daß die Begründung ihrer Sätze auf Sinneserfahrung durchgehend verzichten könne.[999] Kants Philosophie der Mathematik übte auf die Mathematik große Anziehungskraft aus und trug wesentlich mit dazu bei, daß sich in Deutschland reine Mathematik, gewissermaßen als ‚Gegenprojekt' zu den in Frankreich und England dominierenden empiristischen Auffassungen, etablieren konnte. Kants Ansatz wurde jedoch in seiner starken Orientierung am Vorbild der euk-

[995] Crelle 1845, S. IXf.; s. hierzu auch Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 104f.

[996] S. hierzu Kant 1793.

[997] Vgl. hierzu Teil 4.

[998] Vgl. hierzu in Hinblick auf Kant und Fries (etwa gegenüber Hegel und Schelling) näher Kap. I, Teil 3.3 sowie Pulte 1999a, insbes. S. 70-74.

[999] Kant selbst spricht häufig von ‚reiner Mathematik' wie auch von ‚Anwendung(en) der Mathematik', unterscheidet aber nur beiläufig und ohne nähere Erläuterungen zwischen ‚reiner' und ‚angewandter Mathematik': „Man kann, wenn man will, (so wie die reine Mathematik von der angewandten, die reine Logik von der angewandten unterschieden wird, also) die reine Philosophie der Sitten (Metaphysik) von der angewandten (nämlich auf die menschliche Natur) unterscheiden" (Kant 1785; *AA* 4, S. 410, Anm.).

lidischen Geometrie und in der weitgehenden Vernachlässigung von Analysis und ‚symbolischen' Konstruktionen generell als erweiterungsbedürftig angesehen, und zwar sowohl von philosophischer als auch von mathematischer Seite.[1000]

G.S. Klügel etwa stützt sich im Artikel ‚Mathematik' seines bekannten Wörterbuchs auf Kants Begriffe der reinen und empirischen Anschauung, um die Abgrenzung von reiner und angewandter Mathematik zu rechtfertigen: „Die reine, welche die eigentliche Mathematik ist, heißt darum so, weil alle Begriffe, alle Schlüsse, alle Zusammensetzungen und Zerlegungen der Größen unmittelbar durch den Verstand gebildet werden, ganz rein und unabhängig von aller Hilfe der sinnlichen Erkenntniß und Erfahrung".[1001] Mit Kant unterscheidet Klügel weiter innerhalb der reinen Mathematik „zwey große Abtheilungen", nämlich die „Arithmetik im weitesten Verstande" sowie die „Geometrie", während er die angewandte Mathematik in die Gebiete „physische angewandte Mathematik" und „technische Mathematik" unterteilt.[1002] Über Kant *hinausgehend*, fordert Klügel jedoch desweiteren eine spezifische, gegenstandsorientierte Methodologie für die reine Mathematik, da ihm Kants Abgrenzung von philosophischer und mathematischer Erkenntnis unzureichend erscheint: „Ferner ist nicht die Form der mathematischen Erkenntniß die Ursache, daß diese lediglich auf Quanta gehen kann, sondern umgekehrt, weil die Mathematik sich ausschließlich mit Quantis beschäftigt, hat die Erkenntniß in derselben eine eigene Form. Denn das Wesen einer Wissenschaft beruht auf ihrem Gegenstande, und ihre Methode wird hierdurch bestimmt".[1003]

Man kann Fries' *Mathematische Naturphilosophie* (1822) als den frühesten Versuch von philosophischer Seite ansehen, die Forderung nach einer eigenen mathematischen Methodologie einzulösen: Fries scheint nicht nur als erster überhaupt den Terminus ‚Philosophie der Mathematik' gebraucht zu haben[1004], er arbeitet auch als erster eine „Philosophie der reinen Mathematik"[1005] aus, d.h. eine Philosophie, die vom „vollständigen System der mathematischen Formen" handelt.[1006] Die *Konstruierbarkeit* der mathematischen Begriffe in der reinen Anschauung als Charakteristikum mathematischer (gegenüber philosophischer) Erkenntnis geschieht wie bei Kant „mit Hülfe der productiven Einbildungskraft der *eignen Einsicht* (ohne Beyhülfe sinnlicher Wahrnehmung)"[1007]. Aus diesem spontanen Vernunftvermögen in Verbindung mit der (Kanti-

[1000] Zum diesbezüglichen Einfluß Kants, aber auch der nach-kantischen philosophischen Diskussion, s. Jahnke 1990a, insbes. S. 40-58; vgl. zum Folgenden auch Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 103-106.

[1001] Klügel 1803-33 III, S. 603.

[1002] Ebd., S. 607.

[1003] Ebd., S. 619.

[1004] S. König/Geldsetzer 1979, S. 23*f. und S. 44*f. sowie Pulte 1999a, S. 74, Anm. 46.

[1005] Fries 1822 (*WW* 13, S. IX und S. 33-395).

[1006] Ebd. (*WW* 13, S. 50).

[1007] Ebd. (*WW* 13, S. 39).

schen, reinen) „Anschaulichkeit" und der „Nothwendigkeit" der mathematischen Erkenntnis läßt sich nach Fries „alle Eigenthümlichkeit der mathematischen Wissenschaften ableiten. Dem gemäß bestimmt die angewandte Logik die Regeln der mathematischen Methode".[1008] Der entscheidende Unterschied zu Kant liegt nun darin, daß Fries als *Begründungsinstanz* für die Notwendigkeit mathematischer Erkenntnis nicht die reine Anschauung, sondern die produktive Einbildungskraft der Vernunft ansetzt — die reine Anschauung wird gewissermaßen vom ‚Beweismittel' zum ‚Hilfsmittel' degradiert.[1009] Man kann hier mit Recht feststellen, daß Kants „Apodiktizitätsdualismus" von Anschauung und Denken durch einen „Apodiktizitätsmonismus" des Denkens ersetzt wird:[1010] Für Fries ist apodiktische Erkenntnis „alle diskursiv, sowohl die philosophische als auch die mathematische"[1011]. Nur scheinbar liegt hier eine *Einengung* des Kantischen Ansatzes vor: Indem Fries die reine Anschauung als *Begründungsinstanz* durch die produktive Einbildungskraft des Verstandes ersetzt, öffnet er tatsächlich den Bereich mathematischer Apodiktizität für solche Urteile, denen eine Grundlage in der Kantischen reinen Anschauung fehlt. Damit trägt er der generellen Entwicklung der Mathematik seiner Zeit, die durch zunehmende Abstraktion und Selbstbezüglichkeit auf ihre eigenen Begriffe, Gesetze und Strukturen gekennzeichnet ist, Rechnung.[1012] Auch die Tatsache, daß Fries in seiner Philosophie der reinen Mathematik der „*Zahlenlehre, Arithmetik*, deren Vorstellungsweisen auf der Zusammensetzung eines Ganzen aus gleichartigen Theilen beruht", eine „*Syntaktik oder Combinationslehre* als Lehre von den reinen Gesetzen der Anordnung gegebener Theile"[1013] vorschaltet, der es um eine *nicht* anschauliche Konstruktion der „allerallgemeinsten mathematischen Begriffe"[1014] geht, folgt dieser Entwicklung und verdankt sich insbesondere dem Einfluß der Hindenburgschen Schule.[1015]

Fries beläßt es aber in seiner *Mathematischen Naturphilosophie*, woran hier noch einmal erinnert werden soll[1016], nicht bei einer Philosophie der reinen Mathematik, vielmehr folgt jener eine „*philosophische Untersuchung der reinen Bewegungslehre*. Diese Wissenschaft ist nemlich gleichsam die Philosophie der angewandten Mathema-

[1008] Ebd. (*WW* 13, S. 39).

[1009] Vgl. Ende 1973, S. 36; s. hierzu auch König/Geldsetzer 1979, S. 60*f.

[1010] Ende 1973, S. 35.

[1011] Fries 1837, S. 248 (*WW* 7, S. 416).

[1012] Wobei Fries gerade für die Geometrie, die einen ‚Prüfstein' seiner neuen Philosophie der Mathematik hätte abgeben können, die Möglichkeit anderer (als euklidischer) Strukturen nicht wahrgenommen hat (s. König/Geldsetzer 1979, S. 63*-69*), während sich sein Unendlichkeitsbegriff kohärent in diese Philosophie einfügt (s. Schubring 1990).

[1013] Fries 1822 (*WW* 13, S. 65).

[1014] Ebd. (*WW* 13, S. 58).

[1015] „Daß die Syntaktik ihrem Princip nach von der Arithmetik unabhängig ist, ist seit *Hindenburg* unter uns entschieden" (ebd.; *WW* 13, S. 68).

[1016] Vgl. hierzu bereits die begriffsgeschichtliche Einleitung zu dieser Untersuchung. (Kap.II)

tik. Die reine Bewegungslehre [...] sey eine auf metaphysische Erkenntniß angewandte Mathematik [...]"[1017]. Liegt dieser interessanteste Teil des Friesschen Lehrwerkes auch gänzlich außerhalb des Rahmens dieser Untersuchung[1018], soll doch darauf hingewiesen werden, daß sich gegenüber Kants *Metaphysischen Anfangsgründen* die generelle Intention deutlich von der einer ‚metaphysischen *Begründungs*lehre' hin auf eine ‚methodologische *Anwendungs*lehre', nämlich die Anwendung von *Mathematik* auf metaphysische Naturerkenntnis, verschiebt. Daß Fries der Mathematik auch in der Ausbildung allgemeiner Naturgesetze eine größere Produktivität und ‚Autonomie' (hier: von der reinen Anschauung) als Kant einräumt, mag seine Wendung andeuten, die mathematische Naturphilosophie sei „die Rüstkammer aller derjenigen Hypothesen, aus welchen nachher in der Erfahrung die Erklärungen gelingen. Darin ist bei weitem das meiste von mathematischer Entwicklung, aber die Grundbegriffe sind philosophisch, und sollte es gelingen, die Naturkundigen über diese zu verständigen, so würden wir dadurch für die Disziplin der Hypothesen ungemein viel zu gewinnen"[1019]. Fries' philosophische Anwendungslehre ‚zügelt' die Mathematik gleichsam, um eine solche ‚Disziplin der Hypothesen' zu gewinnen.[1020] Dabei ist er sich mit Vertretern der Mathematik wie Gauß und Crelle durchaus darin einig, daß die Kenntnis reiner Mathematik eine notwendige Voraussetzung ist, um eine Theorie der Anwendung wirklich ausbilden zu können.[1021] Es sei in diesem Zusammenhang zumindest darauf hingewiesen, daß aus der Spannung von metaphysischer Spekulation und mathematischer Hypothesenbildung einerseits und den restringierenden Bedingungen wissenschaftlicher Erfahrung andererseits bei Fries erstaunlich *moderne* wissenschaftstheoretische Züge resultieren, die sich durch die Begriffe Heurismus, Konventionalismus, Holismus und *eingeschränkter* Falsifikationismus[1022] kennzeichnen lassen. Fries' *Mathematische Naturphi-*

[1017] Vgl. Fries 1822 (*WW* 13, S. 397).

[1018] Vgl. Kap. IV, Teil 7.3, Anm. 412.

[1019] Fries 1822 (*WW* 13, S. 10).

[1020] „[...] Abstraction der Formen von Erkenntnissen a priori ist es, was eigentlich in Philosophie und Mathematik wissenschaftlich ausgebildet wird. Daraus ergibt sich uns das Verhältniß der *reinen Mathematik* zur *angewandten Mathematik*. [...]. Die reine Mathematik hebt diese Formen [Ordnung, Zahl, Gestalt, Dauer] aus dem Ganzen der Erkenntniß heraus, betrachtet sie für sich und wird daher das Erzeugniß einer eignen *mathematischen Abstractionsweise*, in welcher wir als letzten Erfolg aller quantitativen Abstractionen die bloßen Formen der Zusammensetzung der Dinge anschaulich vor dem Bewußtseyn behalten.

Reine Mathematik hat also in sich immer den Mangel einer leeren Abstraction, sie fordert zur Ergänzung eine *theoretische Lehre* der Anwendung, in welcher bestimmter Gehalt der sinnlichen Erkenntniß, um erklärt zu werden, ihren Gesetzen unterworfen wird" (ebd.; *WW* 13, S. 49).

[1021] Näher hierzu Schubring 1981a, S. 277f.

[1022] Der im Kontext dieser Untersuchung besonders wichtige Zusatz ‚eingeschränkt' bezieht sich darauf, daß Fries mit der Forderung, „man solle keine Voraussetzung machen, welche nicht bestimmt *von der Erfahrung widerlegt werden könne*", zwar eine Poppersche Falsizierbarkeit ins

losophie illustriert, daß das Anwendungsproblem, entstehend erst durch die ‚Autonomisierung' der Mathematik, ein *wissenschaftstheoriegenerierendes* Problem darstellt.

(3) Bildungs- und kulturphilosophisch geprägt ist ein dritter Komplex, der auf die Ausbildung reiner Mathematik in Deutschland einen maßgeblichen, wenn auch im einzelnen nur schwer zu bestimmenden Einfluß ausgeübt hat: Romantik, Neuhumanismus und auch die idealistische deutsche Schulphilosophie bestimmen die breite Diskussion um eine Neuorientierung von Bildung und Wissenschaft in Preußen und anderen deutschen Staaten, die mit dem Begriff der ‚Humboldtschen Reform' nur unzureichend beschrieben wird.[1023] Im Mittelpunkt dieser Neuorientierung steht ein Wissenschafts*ideal*, das eine von praktischem Nutzen freie, um ihrer selbst willen betriebene Wissenschaft zur eigentlichen *Lebensform* des ‚gebildeten' Menschen erklärt und daher auch *Bildung* als ein nicht auf ‚äußere' Zwecke zu berechnendes, allein der Entwicklung und Vervollkommnung des menschlichen Intellektes dienendes Gut versteht. In diesem Kontext rückt die — zum Zweck der geistigen Schulung möglichst abstrakt und formal zu betreibende — reine Mathematik zum wichtigsten Bildungsgegenstand neben den alten Sprachen und der Geschichte auf. Umgekehrt wird die an Anwendung und praktischem Nutzen orientierte Mathematik der Aufklärung — geradezu idealtypisch realisiert in der französischen mathematischen Physik — zum Problem; in der Diskussion um den Bildungswert reiner Mathematik fungiert letztere nurmehr als überkommene und abzulehnende Mathematikauffassung — als Abstoßungspunkt für eine neu zu entwickelnde Konzeption reiner und tatsächlich ‚bildender' Mathematik. In diesem Sinne bemerkt ein Alexander von Humboldt, der mit der französischen Tradition wohl vertraut war und der als Naturforscher den praktischen Nutzen der Mathematik durchaus zu schätzen wußte, zur Neubestimmung der Stellung der Mathematik bereits 1797:[1024]

„In einem Zeitalter, wo man Früchte oft vor der Blüte erwartet, und vieles darum zu verachten scheint, weil es nicht *unmittelbar* Wunden heilt, den Acker düngt, oder Mühlräder treibt, [...] vergißt [man,] daß Wissenschaften einen inneren Zweck haben und verliert das eigentliche litterarische Interesse, das Streben nach Erkenntniß, als Erkenntniß, aus dem Auge. Die Mathematik kann nichts von ihrer Würde einbüßen, wenn sie als bloßes Object der Speculation, als unanwendbar zur Auflösung praktischer Aufgaben betrachtet wird. Alles ist wichtig, was die Gränzen

Spiel bringt, aber durch den Zusatz: „... es sey denn, daß die apriori bestimmte mathematische Ansicht der Körperwelt uns dazu nöthigte oder berechtigte" (Fries 1822, *WW* 13, S. 21 bzw. 23), die Grundgesetze der Bewegungslehre von Falsifikationen ausnimmt. Fries gehört daher in dieser Untersuchung trotz aller moderner Elemente (noch) auf die ‚klassische', mechanisch-euklidianistische Seite; zu den genannten modernen Elementen s. König/Geldsetzer 1979, insbes. S. 34*-36*.

[1023] Zu deren Implikationen für die Mathematik sei besonders auf Jahnke 1990a verwiesen; für weitere Literatur vgl. oben Anm. 979.

[1024] Humboldt 1797 II, S. 3-5.

unseres Wissens erweitert, und dem Geist neue Gegenstände der Wahrnehmung oder neue Verhältnisse zwischen dem Wahrgenommenen darbietet".

Was hier der Mathematik bereits vor der Jahrhundertwende selbst von naturwissenschaftlicher Seite zugestanden wird, nämlich ihre Legitimität unabhängig von und vor jeder Anwendung, wird in der Folge zu einem wichtigen Bestandteil der Bildungsdiskussion: In der Betonung der schöpferischen Kraft des Geistes, des ‚Selbstdenkens' gegenüber passiver Wahrnehmung, des Genialischen gegenüber bloßer Reproduktion und mechanischer Anwendung, der spekulativen Theorie gegenüber ungeformter Erfahrung, erlangt reine Mathematik im Bildungsbewußtsein eine herausragende Stellung. An den deutschen Universitäten führt dies erst zur Herausbildung des Berufstypus des *reinen Mathematikers*, der Forschung und Lehre gleichermaßen betreibt, letztere v.a. in der Ausbildung von Gymnasiallehrern.[1025] Es entsteht eine „neue Wirklichkeit der Mathematik"[1026], die durch Autonomie in einem weiten Sinne gekennzeichnet ist: Mathematik wird zu einer eigenständigen und starken Lehr- und Forschungsdisziplin, die ihre Gegenstände unabhängig von philosophischen Lehrmeinungen und unabhängig von möglichen Anwendungsbezügen definiert. Mathematiker wie Gauß betreiben weiterhin *auch* angewandte Mathematik, und diese bleibt inhaltlich weiterhin maßgeblich von der französischen Tradition beeinflußt. Aber sie definieren den Kern ihrer Disziplin unabhängig davon als einen ‚reinen' und auch *über* den anderen Disziplinen stehenden.[1027] Von dieser Autonomisierung und ‚Abhebung' der Mathematik wird auch das Verhältnis von Mathematik und Philosophie betroffen: Auf mathematischer Seite findet eine unübersehbare Distanzierung von *solchen* Schulphilosophien statt, die die ‚Mathematik nicht verstehen'.[1028]

[1025] S. hierzu näher Schubring 1981b und 1991.

[1026] Stichweh 1984, S. 195.

[1027] Gauß' erster Biograph Sartorius von Waltershausen überlieferte folgende Worte des ‚princeps mathematicorum': „Die Mathematik sei die Königin der Wissenschaften. [... Sie] lasse sich dann öfter herab, der Astronomie und anderen Naturwissenschaften einen Dienst zu erweisen, doch gebühre ihr unter allen Verhältnissen der erste Rang" (Sartorius 1865, S. 79). Daß Gauß wiederum in der Arithmetik die ‚Königin der Mathematik' sieht, macht unmißverständlich klar, daß es hier um eine Prävalenz von *reiner* Mathematik vor allen anderen Wissenschaften geht: Nur in der Arithmetik ist das mathematische Denken wirklich ungebunden, hat es mit den Zahlen als ‚unseres Geistes Product' (s.o.) alleine zu tun und kann seine apriorischen Gesetze uneingeschränkt zur Geltung bringen. Reine Mathematik *kann*, wie die Mechanik deutlich macht, auch angewandten (‚empiriedurchtränkten') Bereichen zu sicheren und unzweifelbaren Gesetzen verhelfen, aber sie ist in diesen Bereichen nicht *autonom* im wörtlichen Sinne, d.h. nur ihren eigenen Gesetzen unterworfen, sondern wird restringiert durch Erfahrung und die Bedingungen, unter denen der Zahlbegriff überhaupt auf die Verknüpfung empirischer Begriffe *angewandt* werden kann (vgl. oben Zit. 991).

[1028] Zur generellen Entfremdung der Wissenschaften (einschließlich der Mathematik) von der Philosophie, insbesondere vom ‚deutschen Idealismus', s. Schnädelbach 1991, S. 88-137. Für die

Wie verhält sich nun diese Entwicklung zu der unter *(1)* und *(2)* angedeuteten Diskussion des *Anwendungsproblems*? Generell kann (erstens) konstatiert werden, daß die mit ihr einhergehende scharfe Eingrenzung von reiner Mathematik, die unabhängig von jeder äußeren Erfahrung betrieben und gesichert werden kann, diese Diskussion *unterstützt* und neue Antworten auf das Anwendungsproblem ermöglicht (Dies ist, wie wir sehen werden, beim ‚späteren' Jacobi auch tatsächlich der Fall.). Hans Niels Jahnke spricht zudem (zweitens) von der Ausbildung einer ganz neuen Konzeption von Anwendung — der sog. „indirekten Anwendung" von Wissenschaft, die über die Mathematik hinausgeht: „Wissenschaft wird [...] nicht so sehr durch unmittelbare Anwendung praktisch, sondern dadurch, daß sie den Einzelnen lehrt, die Welt zu verstehen".[1029] Bezogen auf die Mathematik geht es hier um eine oft wenig differenzierte Argumentation von der Art, daß ‚Strenge' und ‚Abstraktheit' der Mathematik eine allgemeine Schulung des Geistes und eine Orientierung im Denken ermöglichten, die schließlich auch der ‚Praxis' irgendwie zugute kämen.

Hiervon ist nun aber (drittens) eine Auffassung zu unterscheiden, die ich als Rückschritt (insbesondere gegenüber Fries) interpretiere, weil sie das Anwendungsproblem nicht durch methodische Reflexion zu erhellen sucht, sondern es eher ignoriert bzw. durch überzogene erkenntnistheoretische und ontologische Ansprüche an die Mathematik einerseits und zu geringe Ansprüche an die *empirische* Seite der Naturphilosophie

Mathematik sei stellvertretend wiederum auf Gauß verwiesen: „Dass Sie einem Philosophen ex professo keine Verworrenheit in Begriffen und Definitionen zutrauen, wundert mich fast. Nirgends mehr sind solche ja zu Hause, als bei Philosophen, die keine Mathematiker sind [...]. Sehen Sie sich doch nur bei den heutigen Philosophen um, bei Schelling, Hegel, Nees von Esenbeck und Consorten, stehen Ihnen nicht die Haare bei Ihren Definitionen zu Berge. Lesen Sie in der Geschichte der alten Philosophie, wie die damaligen Tagesmänner Plato und andere (Aristoteles will ich ausnehmen) für Erklärungen abgegeben haben. Aber selbst mit Kant steht es oft nicht viel besser, seine Distinction zwischen analytischen und synthetischen Sätzen ist meines Erachtens eine solche, die entweder nur auf Trivialität hinausläuft oder falsch ist" (Gauß an H.C. Schumacher vom 1. Nov. 1844; *Werke* Erg.bd. 5(2), S. 337). —*‚Philosophen, die keine Mathematiker sind'*: Hier geht es nicht um ein pauschales Verdikt gegen die Philosophie, sondern um die Emanzipation von solcher Philosophie, die mit der Mathematik nicht ins Gespräch kommen *kann*, weil sie deren Sprache nicht (mehr) versteht — und *vice versa*. Daß Gauß dabei durchaus zu differenzieren wußte und keiner unreflektierten ‚Philosophiefeindlichkeit' das Wort redete, mögen die folgenden, an Fries gerichteten Worte illustrieren: „Ich habe von jeher große Vorliebe für philosophische Spekulationen gehabt, und freue mich um so mehr, in Ihnen einen zuverlässigen Führer bei dem Studium der Schicksale der Wissenschaft von den ältesten bis auf die neuesten Zeiten zu haben, da ich bei eigner Lektüre der Schriften mancher Philosophen nicht immer die gewünschte Befriedigung gefunden habe. [...] Ich habe oft bedauert, nicht mit Ihnen an einem Orte zu leben, um aus der mündlichen Unterhaltung mit Ihnen über philosophische Gegenstände eben so viel Vergnügen als Belehrung schöpfen zu können" (Gauß an J.F. Fries vom 11. Mai 1841; *Werke* Erg.bd. 12, S. 204f.; hierzu auch König/Geldsetzer 1979, S. 39*f. und 92*f.).

[1029] Jahnke 1990a, S. 18, vgl. 20f sowie Jahnke 1985.

andererseits trivialisiert (Diese Sicht wird beim ‚frühen' Jacobi begegnen.). Sie macht sich etwa in Schellings *Vorlesung über die Methode des akademischen Studiums* von 1802 bemerkbar, wenn dort die Rede davon ist, „daß Mathematik und Naturwissenschaft nur eine und dieselbe von verschiedenen Seiten angesehene Wissenschaft sey'n"[1030], oder auch in Novalis' Fragmenten: „Die ganze Mathematik ist eigentlich eine Gleichung im großen für die andern Wissenschaften".[1031] Man kann hier von einer geradezu „Mathematik-euphorischen"[1032] Auffassung sprechen, die die Mathematik als universelles Lösungsinstrument naturphilosophischer Probleme ausgibt, ohne einen wissenschaftstheoretischen Nachweis darüber zu führen, *worin* ihre Problemlösungskraft eigentlich besteht. Die Kehrseite dieser Auffassung ist, wofür sowohl Schellings als auch Hegels[1033] bekannte Kritiken am Mechanismus stehen mögen, eine scharfe Ablehnung der *bisher* von den Wissenschaften praktizierten Anwendungsweise der

[1030] Schelling 1976, S. 488.

[1031] Novalis 1939, S. 148.

[1032] S. Mutschler 1990, S. 57. Mutschler stellt in seiner Studie der Schellingschen Naturphilosophie bereits beim frühen Schelling ganz verschiedene Positionen zur Rolle der Mathematik fest: „Seine Stellung zur Mathematik ist von Anfang an mehrdeutig. Allein im Jahr 1797 finden sich drei sich gegenseitig ausschließende Positionen, die aber in ihrer Gegensätzlichkeit verstehbar werden, wenn man Schellings Entwicklung über einen größeren Zeitraum betrachtet. [...] 1) Eine Kantische [...]. 2) Eine Mathematik-kritische, wonach Mathematik in der empirischen Wissenschaft nichts entscheide, weil sie sich am besten auf (im schlechten Sinn) spekulative Naturtheorien anwenden werden lasse. 3) Eine Mathematik-euphorische, wonach eine ‚mathesis universalis' nicht nur alle naturphilosophischen, sondern schlechthin alle philosophischen Probleme stringent lösen werde. In der Folgezeit wird Schelling die Position 1) nie mehr expressis verbis einnehmen, er wird Position 2) polemisierend vertreten, um im Endeffekt nur noch 3) gelten zu lassen [...]" (ebd., S. 57). Die „Mathematik-euphorische" Auffassung findet — bei Schelling-Interpreten und darüber hinaus — bis heute viele Anhänger, wie einfache (Schein-) Lösungen komplizierter Probleme zu allen Zeiten *ihre* Anhänger gefunden haben und finden werden.

[1033] Vgl. die *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften* (1830), §§ 195, 246, 254-271, insbes. § 270: „Was aber durch den Begriff erkannt ist, ist für sich klar und steht fest; und die Philosophie braucht keine Unruhe darüber zu haben, wenn auch noch nicht alle Phänomene erklärt sind. Ich habe also hier nur diese Anfänge der vernünftigen Betrachtung im Begreifen der mathematisch mechanischen Naturgesetze, als dieses freien Reiches der Maße, niedergelegt. Männer vom Fach reflektieren nicht darauf. Aber es wird eine Zeit kommen, wo man für diese Wissenschaft nach dem Vernunftbegriffe verlangen wird" (*Theorie-Werkausgabe* 9, S. 106). Eine ‚List der Vernunft' brachte es indes mit sich, daß Hegels Prophezeiung gleichsam ‚invertiert' wurde: Eine sich von der Philosophie emanzipierende Wissenschaft verlangte ‚für diese (Hegelsche) Philosophie nach dem Wissenschaftsbegriff' und entschied, daß dieser Begriff der Wissenschaft selbst nicht gerecht werde. Für die weitere Entwicklung der mathematischen Physik, insbesondere die Mechanikentwicklung, blieb die Hegelsche Philosophie weitgehend bedeutungslos. Vgl. auch das Gauß-Zitat oben in Anm. 96; zum Verhältnis von (Hegelscher) Philosophie und Wissenschaft allgemein nochmals Schnädelbach 1991, S. 88-136.

Mathematik. Diese Kritiken zielen natürlich vornehmlich ab auf die ‚geistlose' und ‚tote' *Mechanik* Newtons und dessen Nachfolger, denn bei ihr handelt es sich um die einzige Wissenschaft von der Natur, die tatsächlich in weitestgehend mathematisierter Form vorlag. So findet sich etwa in Schellings o.g. *Vorlesung* die Feststellung, die „sogenannte mathematische Naturlehre" sei „bis jetzt leerer Formalismus, in welchem von einer wahren Wissenschaft nichts anzutreffen ist"[1034]. Schelling hält auch dafür, daß die ‚geistlosesten Vorstellungsarten in der Physik' den *Mathematikern* zu verdanken seien.[1035]

Kritik dieser Art trägt zur weiteren Auflösung des mechanischen Euklidianismus im hier gemeinten Sinne *nicht* bei, weil sie selbst auf dem Boden einer *klassisch* zu nennenden Wissenschaftsauffassung steht. Sie kann insbesondere nicht artikulieren, daß die Mechanik noch einen klassischen, der euklidischen Geometrie folgenden Prinzipiencertismus beinhaltet, weil diese Kritik selber ein klassisches, im Grunde pythagoräisches bzw. platonistischen Verständnis von der Rolle der Mathematik in den Naturwissenschaften perpetuiert und einer unbestimmten ‚Totalmathematisierung' aller Naturphänomene das Wort redet. Das Programm einer ‚Wiedererfindung' des Euklid durch ‚Formen reiner Vernunft'[1036] stellt den mechanischen Euklidianismus nicht in Frage, braucht daher *hier* auch nicht weiter verfolgt zu werden.[1037]

Welche Folgen hat nun die hier dargestellte Entwicklung *reiner Mathematik* für die Mechanik? Zunächst liegt auf der Hand, daß sie als *angewandte* Disziplin an dem Reputationsverlust Teil hat, von dem angewandte Wissenschaft *generell* betroffen war. Mechanik verschwindet z.T. aus den Lehrplänen der Schulen und wird in der Folge vorübergehend auch in der Universitätsausbildung zweitrangig.[1038] Entsprechend zeigt sich die Forschungsseite: Der Mathematisierungsgrad, der besonders durch die analytische Tradition Lagrangescher Prägung herbeigeführt worden war, erlaubt es *nur* dem professionellen Mathematiker, die Grundlagenentwicklung der Mechanik voranzubrin-

[1034] Schelling 1976, S. 556.

[1035] Hierzu und für weitere Belege s. Mutschler 1990, insbes. S. 58.

[1036] „Die Formen der Mathematik, wie sie jetzt verstanden werden, sind Symbole, für welche denen, die sie besitzen, der Schlüssel verlorengegangen ist, den, nach sichern Spuren und Nachrichten der Alten, noch Euklides besaß. Der Weg der Wiedererfindung kann nur seyn, sie durchaus als Formen reiner Vernunft und Ideen zu begreifen, die sich in der objektiven Gestalt in ein anderes verwandelt zeigen. Je weniger der gegenwärtige Unterricht der Mathematik geeignet seyn möchte, zu dem ursprünglichen Sinn dieser Formen zurückzuführen, desto mehr wird die Philosophie auf dem zu betretenden Wege auch die Mittel der Enträthselung und der Wiederherstellung jener uralten Wissenschaft an die Hand geben" (Schelling 1976, S. 488).

[1037] Damit ist nicht gesagt, daß die Kritik der ‚etablierten' Mechanik von seiten eines Schelling oder Hegel generell als haltlos zu verwerfen wäre (Hegels Kritik der Newtonschen Kraftkonzeption etwa erscheint mir durchaus begründet.). Es geht *hier* nur darum, daß diese Kritik nicht geeignet ist, deren Wissenschaftsverständnis zu unterminieren, sondern eher, es zu sanktionieren.

[1038] S. Stichweh 1984, S. 197f. und 244f. sowie Lorey 1916, insbes. S. 241f.

gen; zugleich sorgt die Orientierung auf ‚reine' Gegenstände dafür, daß diesbezügliche Forschung, insbesondere hinsichtlich der *Prinzipienentwicklung* der Mechanik, randständig wird. Mit Recht kann man davon sprechen, daß die Forschung zur analytischen Mechanik in Deutschland nur durch einzelne „esoterische Abhandlungen, die nur einem extrem engen Kreis von Spezialisten zugänglich sind", getragen wird.[1039] Neben Gauß[1040] bleibt Jacobi in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts der einzige deutsche Mathematiker von Rang, der die analytische Tradition weiterführt.

Doch wichtiger als die zeitweilige ‚Restriktion' der Mechanik als Lehr- und Forschungsgegenstand ist für das Folgende die mit der Ausbildung reiner Mathematik einhergehende neue Perspektive *auf* die Mechanik: Sie wird, eben aufgrund ihrer Mathematisierung, weiterhin *von* Mathematikern *für* Mathematiker und Physiker gelehrt. Aber dabei handelt es sich nicht länger um den Typus des ‚Physikomathematikers', wie er von Euler, Lagrange oder Laplace repräsentiert wurde, sondern um den Typus des *reinen* Mathematikers. Er bringt die Mechanik nicht nur „in eine Abstraktionslage, die sie als Teildisziplin reiner Mathematik erscheinen läßt"[1041] — eine Beschreibung, die sehr wohl bereits auf Lagranges *Méchanique Analitique* Anwendung finden könnte. Er legt zudem auch an die Mechanik einen Wahrheitsbegriff an, der der reinen Mathematik entnommen ist: „Den Wahrheitsbegriff instruiert das Ideal deduktiver Mathematik, die ihre Prämissen direkt und ohne immer wieder erneuten Rückgriff auf Erfahrung zu sichern versteht".[1042] Hier liegt nun in der Tat ein Demarkationspunkt gegenüber der älteren Tradition der Mechanik, insbesondere *auch* gegenüber Lagrange: Tendenziell führt die Ausbildung *reiner* Mathematik zu einer *Schrumpfung* des ‚Reiches mathematischer Evidenz und Sicherheit' auf die Arithmetik sowie eine auf der Arithmetik aufbauenden Algebra und Analysis. Geometrie und Mechanik als Teile der *angewandten* Mathematik geraten dadurch, vom Standpunkt des klassischen Wissenschaftsbegriffs betrachtet, auf die ‚Verliererseite'— ihr erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Status *muß* fragwürdig werden, weil sie aus diesem ‚Reich' ausgegrenzt werden. Für die Geometrie sind die späteren Implikationen dieses Prozesses recht gut analysiert und verstanden: Ausbildung nichteuklidischer Geometrien, ‚Empirisierung' der Geometrie (Riemann, Helmholtz) und schließlich ‚Spaltung' in eine formale und axiomatisierte Geometrie einerseits und eine empirische bzw. ‚physikalische' Geometrie andererseits (Pasch, Hilbert, logischer Empirismus, Einstein u.a.). Für die Mechanik dagegen sind die Implikationen dieses Prozesses nie überhaupt nur in den Blick genommen worden, weil das modernistische Mißverständnis von Mechanik als einer *per se physikalischen*

[1039] Stichweh 1984, S. 58.

[1040] S. insbes. Gauß 1829; vgl. hierzu auch Kap. IV, Teil 5.3.

[1041] Wie Stichweh (1984, S. 197) in Hinblick auf Jacobi und mit Bezug auf Lorey (1916, S. 62) treffend bemerkt.

[1042] Stichweh 1984, S. 228.

Disziplin die Auffassung mit sich bringt, daß sie an einer ‚innermathematischen' Entwicklung, wie sie hier beschrieben wurde, gar nicht teilhaben *könne*.

Aber dem ist nicht so. Wir werden am Beispiel des ‚späten' Jacobis zeigen, daß auch die Mechanik von der Ausbildung reiner Mathematik betroffen ist, und zwar ohne irgendeinen nachweisbaren oder auch nur begründet vermutbaren inhaltlichen Zusammenhang zur Entwicklung der Geometrie. Zuvor soll am ‚jungen' Jacobi noch einmal — und ein letztes Mal — dargestellt werden, welche Anziehungskraft die klassische Wissenschaftsauffassung in einer Zeit der „Dynamisierung der Wissenschaft"[1043] (und des Wandels des Wissenschaftsbegriffs) gerade dort weiterhin ausübt, wo es um *mathematische* Naturerfassung geht.

VI.2.2 Mathematische Naturgesetzlichkeit und Anwendungsproblem beim ‚jungen' Jacobi

„Das Leben der Götter ist Mathematik, sagt Novalis mit Recht, denn mein Leben ist jetzt das Leben der Götter":[1044] C.G.J. Jacobi[1045] macht sich bereits früh das Wissenschafts- und Bildungsideal des Neuhumanismus zu eigen.[1046] In Berlin studiert er neben Mathematik auch Altphilologie bei dem berühmten Philologen August Boeckh. Auch nachdem er, vor die Alternative gestellt, „entweder der Philologie oder der Mathematik zu entsagen"[1047], sich für die Mathematik entscheidet, bleibt er dem verklärenden Bild

[1043] S. Schnädelbach 1991, S. 106f.

[1044] C.G.J. Jacobi an M.H. Jacobi vom Sept. 1831 (Ahrens 1907b, S. 8).

[1045] Wichtige biographische Informationen zu Jacobi geben Koenigsberger 1904a und 1904b sowie Ahrens 1906/07 und 1907a, der Briefwechsel Jacobis mit einem Bruder M.H. Jacobi (Ahrens 1907b) und mit Alexander von Humboldt (Pieper 1987a), Dirichlets Gedächtnisrede auf Jacobi (Dirichlet 1852) sowie Scriba 1973 und Pieper 1982.

[1046] „Jeder, der die Idee einer Wissenschaft in sich trägt, kann nicht anders als die Dinge darnach abschätzen, wie sich der menschliche Geist in ihnen offenbart: nach diesem großen Maßstab muß ihm daher manches als geringfügig vorkommen, was den andern ziemlich preiswürdig erscheinen kann. So hat man auch mir oft Anmaßung vorgeworfen, oder, wie man mich am schönsten gelobt hat, indem man einen Tadel auszusprechen meinte, ich sei stolz gegen alles Niedere und nur demüthig gegen das Höhere. Aber jener unendliche Maßstab, den man an die Welt in sich und außer sich legt, hindert vor aller Überschätzung seiner selbst, den man an die Welt in sich und außer sich legt, hindert vor aller Überschätzung seiner selbst, indem man immer das unendliche Ziel im Auge hat und seine beschränkte Kraft. In jenem Stolze und Demuth will ich immer zu beharren streben, ja immer stolzer und immer demüthiger werden" (zit nach Koenigsberger 1904a, S. 11). Dies sind Worte des gerade zwanzigjährigen Jacobi zu der Zeit, als er in Berlin sein Staatsexamen ablegte. Zweifellos wurde Jacobis Wissenschaftspathos von seinem Lehrer August Boeckh beflügelt; s. hierzu näher Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 101.

[1047] Dirichlet 1852, S. 5.

von antiker Wissenschaft und Bildung wie der „inneren Herrlichkeit des alten hellenischen Lebens"[1048] verhaftet. Die Mathematik stellt er schließlich in den *Mittelpunkt* seines intellektuellen Kosmos, weil sie die ‚reinste' und ‚vollständigste' Realisierung seines Wissenschaftsideals verspricht. Anläßlich der Disputation zu seiner Promotion im Jahre 1825 verteidigt er vor der Prüfungskommission, der u.a. auch Hegel angehört, eine These Friedrich von Hardenbergs: „Egregie asserit Novalis poeta: Der Begriff der Mathematik ist der Begriff der Wissenschaft überhaupt. Alle Wissenschaften müssen daher streben, Mathematik zu werden".[1049]

Es ist bemerkenswert, daß sich Jacobi in seinem Versuch, die Mathematik als Wissenschaft *par excellence* zu erweisen, nicht etwa auf einen Euler, der zu jener Zeit bereits sein großes mathematisches Vorbild war, noch etwa auf einen Hegel, für dessen Philosophie er in *jungen* Jahren durchaus empfänglich gewesen zu sein scheint, bezieht, sondern auf Novalis: Eulers utilitaristische Rechtfertigung von Mathematik[1050] kommt für Jacobi sowenig in Frage wie Hegels Auffassung, die zwar der Mathematik, sofern sie eine ‚Wissenschaft der endlichen Größenbestimmungen' sei, den Status einer vollkommenen und autonomen Verstandeswissenschaft zubilligt, gerade die Analysis aber — die wichtigste originäre Leistung neuzeitlicher Mathematik — dem Begründungsprimat der Philosophie unterwirft.[1051] Nach Jacobis Verständnis kann die Mathematik als *autonome* Wissenschaft sich weder durch ihren praktischen Nutzen rechtfertigen (Euler), noch sich von philosophischer Seite einschränken lassen und ihre Begründungsprobleme dorthin delegieren (Hegel). Es ist deshalb folgerichtig, wenn er in seiner Disputation auch Lagranges algebraische Grundlegung der Analysis rechtfertigt[1052], die von Hegel — gerade aufgrund der ‚präsumtiven Unmöglichkeit' der Mathematik, *nicht* jedoch der Philosophie, das Unendliche zu begreifen — kritisiert worden war.[1053]

Jacobis Disputation belegt nicht nur seine frühe Orientierung am Ideal einer reinen und autonomen Mathematik, sondern liefert auch den frühesten Beleg für sein Interesse an der analytischen Mechanik.[1054] Seine nachfolgenden mathematischen Arbeiten be-

[1048] Koenigsberger 1904a, S. 8.

[1049] Jacobi *Werke* 3, S. 44; vgl. Novalis 1939, S. 148, hierzu auch Pieper 1982, S. 6. Der Einleitungssatz läßt sich wiedergeben mit: „Besonders der Dichter Novalis hat behauptet: ...".

[1050] Vgl. Teil 2.1, Anm. und Zit. 54.

[1051] Hierzu näher Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 102 und 121, Anm. 16 und 17.

[1052] Vgl. hierzu Koenigsberger 1904a, S. 13f.

[1053] Hierzu näher Bonsiepen 1990 und Klaucke 1990.

[1054] Die fünfte und letzte der von ihm verteidigten Thesen lautet: „Theoria Mechanices Analytica causam agnoscere nullam potest, quidni, sicut differentialia prima velocitatis nomine, secunda virium insignimus, simile quid ad altiora quoque differentialia adhibeatur; de quibus theoremata proponi possint prorsus analoga iis, quae de vi et de velocitate cirumferuntur" (Jacobi *Werke* 3, S. 44). In Übersetzung: „Die Theorie der analytischen Mechanik kann keinen Grund anerkennen, warum nicht ebenso, wie wir die ersten Differentiale mit dem Namen Geschwindigkeit,

wegen sich jedoch zunächst ganz im Bereich reiner Mathematik und gelten insbesondere der Theorie gewöhnlicher und (Pfaffscher) partieller Differentialgleichungen, der Zahlentheorie, der algebraischen Funktionentheorie, der Differentialgeometrie und vor allem ausgedehnten Untersuchungen zur Theorie der elliptischen Funktionen — „Jacobis originellste[n] Leistungen“[1055], die ihm zu mathematischem Weltruhm verhalfen.

In diese Zeit fällt auch eine polemische Auseinandersetzung Jacobis mit der französischen mathematischen Physik, die sich bei näherer Betrachtung darstellt als Kontroverse zweier unterschiedlicher Mathematikbegriffe — der traditionellen französischen *mathesis mixta* und der neuen deutschen *mathesis pura*. Namentlich gegen J.B. Fourier, einem frühen Vertreter des französischen Positivismus, richtet sich die berühmt gewordene Wendung Jacobis, „ein Philosoph wie er hätte wissen müssen, daß das einzige Ziel der Wissenschaft die Ehre des menschlichen Geistes ist [le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain] und daß bei diesem Anspruch eine Frage über Zahlen ebensoviel wert ist wie eine Frage über das Weltsystem“.[1056]

Es nimmt vor diesem Hintergrund nicht wunder, daß Jacobi die Gelegenheit seiner bereits 1829 erfolgten Ernennung zum ‚ordentlichen' Professor an der Universität Königsberg, die formell 1832 mit seinem Eintritt in die Philosophische Fakultät vollzogen wurde, zu einer „fulminanten lateinischen Rede, die mit großem Pathos das Wesen der reinen Mathematik verherrlichte“[1057], nutzte. Doch nicht Belege der ‚Verherrlichung' reiner Mathematik und auch nicht Jacobis Vorstellungen über deren kontinuierlich fortschreitende „Entfaltung, die gemäß dem menschlichen Geist eingepflanzten ewigen Gesetzen geschieht“[1058], sollen hier untersucht werden, sondern seine Reflexionen auf Anwendbarkeit der Mathematik und mathematische Naturgesetzlichkeit, die bei dieser

die zweiten mit Kräften bezeichnen, etwas ähnliches auch auf höhere Differentiale angewendet werden sollte; darüber könnten ziemlich analoge Theoreme vorgelegt werden wie die, welche über Kraft und über Geschwindigkeiten in Umlauf sind“. Wir kennen Jacobis Ausführungen zu dieser These nicht, aber sie zielt offenbar darauf ab, höheren (als zweiten) Ableitungen der Ortsfunktion nach der Zeit einen Platz innerhalb der analytischen Mechanik einzuräumen. Sofern damit auch eine empirische Bedeutung dieser höheren Ableitungen gemeint sein mag, knüpft Jacobi hier an die Diskussion des zweiten Bewegungsgesetzes bei Bernoulli, Euler und v.a. Laplace an (vgl. Kap. IV, Teil 2.7).

[1055] Klein 1926/27 I, S. 109.

[1056] Jacobi an A.-M. Legendre vom 2. Juli 1830 (Borchardt 1875, S. 273); zu den Einzelheiten dieser Auseinandersetzung s. Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 106-109.

[1057] C.G.J. Jacobi an M.H. Jacobi vom 9. Aug. 1832 (Ahrens 1907b, S. 13). Jacobi hielt die Rede am 7. Juli 1832; ihr folgt eine Disputation und „ein ungeheurer Schmaus von 21 Personen“ (ebd., S.13). Sie wurde erstmals 1901 von Walter von Dyck veröffentlicht (Jacobi 1901) und wird hier nach der Übersetzung in Knobloch/Pieper/Pulte 1995 zitiert (Jacobi 1995).

[1058] Jacobi 1995, S. 113.

Gelegenheit *auch* hervortreten. Sie zeigen wiederum, daß die frühe Bezugnahme auf Novalis[1059] keineswegs zufällig erfolgte, sondern wohlüberlegt war:[1060]

> Sowohl die natürliche Welt als auch der seiner selbst bewußte Mensch wurden von dem besten und größten Gott geschaffen; es gelten dieselben ewigen Gesetze des menschlichen Geistes, dieselben der Natur; das ist die Bedingung, ohne die die Welt nicht verstehbar wäre, ohne die es keine Erkenntnis der Gegenstände der Natur gäbe. [...] Wir wollen die Natur betrachten, soweit sie mathematische Gesetze ausdrückt. Nicht durch die äußeren Sinne allein konnte das lenkende Gesetz mit Hilfe einer so großen Vielfalt von Erscheinungen und gleichsam eines Wirrwars erkannt werden, dem jene Erscheinungen in größter Näherung gehorchen, wenn man nicht selbst an die Betrachtung der Natur in dem Glauben und der Überzeugung herangegangen wäre, daß man die Begriffe des Geistes in der Natur ausgedrückt fände. Die der Natur eingepflanzten mathematischen Ideen hätten nicht wahrgenommen werden können, wenn nicht die Mathematik schon aus eigenem Antrieb des menschlichen Geistes gemäß den der Natur eingepflanzten Gesetzen errichtet worden wäre. [...] In dem Maße, wie der menschliche Geist bei der Entfaltung der Kunst Fortschritte macht, in dem Maße entfaltet ihm die Natur auch die ihr eingepflanzte Mathematik.

Jacobis frühe Auffassung von mathematischer Naturgesetzlichkeit und des Anwendungsproblems, wie sie sich hier ausdrückt, weist starke platonistische Züge auf: Gott hat den menschlichen Intellekt mit mathematischen Begriffen und Gesetzen ausgestattet und diese auch *in* der Natur selber realisiert. Die Erfahrung stößt nur auf einen ‚Wirrwarr' von Erscheinungen und kann nicht — jedenfalls nicht allein — zu den mathematischen Naturgesetzen gelangen. Hierzu bedarf es zuerst und vor allem des mathematischen Intellekts, der — nach dem Vorbild der Apollonischen Kegelschnitte und der Keplerschen Gesetze[1061] — ‚aus eigenem Antrieb' diese Gesetze antizipiert und erst dadurch — wenn auch in unreiner und nur angenäherter Form — in der Natur erkennt. Jacobi bezieht sich dabei nicht zufällig auf Kepler, der sich in seinem Werk *Harmonices mundi* und andernorts explizit in die Tradition des Neuplatonismus stellt.[1062] Wenn-

[1059] Novalis betont ja nicht nur wiederholt, eine Wissenschaft, die man „der Algebra vergleichen" könne, müsse „Basis aller Wissenschaften und Künste" und auch selbst „eine Wissenschaft und Kunst" sein (Novalis 1939, S. 158; vgl. auch 150). Er ist auch durch Plotin mit dem Neuplatonismus bestens vertraut und pflegt selbst eine (im einzelnen nicht näher ausgeführte) Auffassung vom Verhältnis Mathematik - Natur, das als *platonistisch* bezeichnet werden kann: Für ihn *ist* die Mathematik eine Naturwissenschaft in dem Sinne, daß ihre Strukturen stets Aussagen über die Natur beinhalten: „Ihre Verhältnisse sind Weltverhältnisse", heißt es bei Novalis, und auch: „Ihre vollständige Anwendbarkeit ist ein notwendiges Postulat ihres Begriffs. Sie ist der vollgültige Zeuge des Naturidealismus" (ebd., S. 148).

[1060] Jacobi 1995, S. 112f.

[1061] Vgl. ebd., S. 113; vgl. auch später S. 113f.

[1062] Die *Weltharmonik* beginnt bereits mit einem Proklos-Motto aus Buch I des Euklid-Kommentars: „Für die Betrachtung der Natur leistet die Mathematik den größten Beitrag, indem sie das wohlgeordnete Gefüge der Gedanken enthüllt, nach dem das All gebildet ist ... und die

gleich Jacobi nicht explizit ausführt, *welche* mathematischen Naturgesetze er in seinen Ausführungen vor Augen hat, besteht kein Zweifel, daß es ihm um Keplers Gesetze der Planetenbewegung, aber *auch* um die mechanischen Gesetze der analytischen Tradition Eulers und Lagranges geht.[1063] Es handelt sich hier nach Jacobi um ‚ewige' Gesetze der Natur, die die Mathematik einmal offenzulegen hat und die dann der weiteren Naturforschung ihren sicheren Weg weisen — es geht mit anderen Worten um einen traditionellen mechanischen Euklidianismus, wie er in den ‚Mathematik-euphorischen' Strömungen[1064] von Neuhumanismus und Idealismus konserviert wurde.

In *dieser* Konsequenz fällt Jacobis Standpunkt denn auch mit dem von ihm bekämpften Standpunkt Fouriers[1065] zusammen. Der Streit geht nicht um Evidenz und Sicherheit mathematischer Naturgesetze (denn beide glauben an sie), letztlich auch nicht um die Bedeutung praktischer mathematischer Forschung für die Aufdeckung solcher Gesetze (sie ist ebenfalls für beide unstrittig), sondern darum, *worin* mathematische Sätze — hier allerdings auch mathematische Naturgesetze — begründet sind:

Für Fourier ist Mathematik *in der Natur* realisiert[1066] — dies war bereits die Auffassung Lagranges — und nirgendwo sonst. Mathematische Naturgesetze sind daher der Natur auf dem Wege der Erfahrung — und keinem anderen Wege — abzugewinnen *und* zu begründen. Für den frühen Jacobi sind mathematische Strukturen und Gesetze dagegen in der Natur *und* im menschlichen Geist realisiert, aber ersteres ist nicht relevant für die *Genese* unseres Wissens über mathematische Naturgesetze (und für Mathematik überhaupt), weil wir über keinen entsprechenden Erfahrungszugang zur Natur verfügen, sondern diese Gesetze, wie alle Mathematik, in unserem Geiste bilden, wohl aber für die *Begründung* mathematischer Naturgesetze. Wie bereits Hamilton, setzt auch der frühe Jacobi letztlich auf ‚göttliche Koordination', wenn es um die Begründung der Anwendbarkeit von Mathematik auf die Natur geht — Gott garantiert, daß wir der Natur keine mathematischen Gesetze aufprägen, die nicht in ihr bereits ‚angelegt' sind. Die Differenz zu Fourier liegt vor allem in dieser Begründung für die Anwendbarkeit von Mathematik, sodann aber auch in der Art und Weise, *wie* Mathematik überhaupt auszubilden ist: Eine von Naturphänomenen ausgehende und auf Naturbeschreibung und -erklärung orientierte Mathematik im Sinne Fouriers ist für Jacobi

einfachen Urelemente in ihrem ganzen harmonischen und gleichmäßigen Aufbau darlegt, mit denen auch der ganze Himmel begründet wurde, indem er in seinen einzelnen Teilen die ihm zukommenden Formen annahm" (Kepler 1939, S. 11). Die allgemeine Kepler-Verehrung in der deutschen Naturphilosophie der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts kontrastiert, nebenbei bemerkt, auffällig mit der Newton-Verehrung der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts: Unter Einfluß des Neuhumanismus und Idealismus (wie natürlich auch eines erwachenden Nationalbewußtseins) wird Kepler oft zu einer ‚Gegenfigur' Newtons stilisiert.

[1063] Vgl. Jacobi 1995, S. 114.

[1064] Vgl. oben Teil 2.1.

[1065] S. zu ihm bereits Kap. IV, Teil 2.6.

[1066] Vgl. Fourier 1884, S. XIII.

gänzlich *überflüssig*, weil die ‚innere' Aufdeckung mathematischer Strukturen *per se* schon Aussagen über die Natur impliziert, aber auch *schädlich*, weil der ‚Wirrwarr' der Phänomene von der Bildung wesentlicher, d.h. *mathematischer* Strukturen der Natur wegführt. Wenn also die „französischen Geometer", so lautet Jacobis Schlußfolgerung, „das Heil der Mathematik allein aus physikalischen Fragestellungen erstreben, verlassen sie den wahren und natürlichen Weg der Disziplin" — schlimmer noch: „Dadurch nehmen nicht nur die reine Mathematik, sondern auch deren Anwendungen selbst auf physikalische Fragestellungen nicht geringen Schaden".[1067]

VI.2.3 Physikalisierung und Historisierung: Jacobis Weg zu einer neuen Sicht des Anwendungsproblems

Die frühen Ausführungen Jacobis lassen sich, genauso wie Hamiltons Stellungnahmen zu mathematischer Naturgesetzlichkeit und Anwendbarkeit von Mathematik sowie auch Gauß' Artikulation eines ‚Gummi-Euklidianismus', als *Übergangssymptome* interpretieren: Eine traditionelle Auffassung von mathematischer Naturgesetzlichkeit und -ordnung soll unter Rückgriff auf überkommene, argumentativ nicht mehr überzeugende metaphysische Annahmen, die dazu bestimmt sind, Natur und Mathematik ‚zusammenzuhalten', gesichert werden. Jacobis Ausführungen illustrieren zugleich, daß es keinen ‚Automatismus' gibt, wonach die Konzeption reiner Mathematik *per se* eine Reflexion auf das Problem der Anwendbarkeit erzwingen könnte. In seinem Falle ist es ein diffuser, durch die Mathematikeuphorie des Neuhumanismus und Idealismus wiederbelebter Platonismus, der einer eigentlichen Anwendungsreflexion im Wege steht. Reine Mathematik ist so, historisch betrachtet, eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Ausbildung einer Theorie der Anwendung.

Beim jungen Jacobi mag das Ausbleiben von Anwendungsreflexionen auch damit zu tun haben, daß er zunächst (d.h. in der *ersten*, bis 1834 zu datierenden Schaffensperiode) nicht nur reine Mathematik ‚predigt', sondern auch nahezu *ausschließlich* praktiziert: Erst als er in Königsberg mit dem Astronomen F.W. Bessel in Kontakt kommt und mit dem Physiker F.E. Neumann 1834 das berühmte Königsberger mathematisch-physikalische Seminar gründet, das mit seiner forschungsnahen Lehre und der engen Verzahnung theoretischer (insbesondere mathematischer) und experimenteller Inhalte Vorbildcharakter für die mathematisch-naturwissenschaftliche Ausbildung in Deutschland bekommt[1068], trifft er auf *tatsächliche* Anwendungsprobleme: Mit Bessel pflegt Jacobi schon bald einen intensiven Austausch zu astronomischen Fragen[1069], und Neu-

[1067] Jacobi 1995, S. 114.

[1068] S. hierzu die sehr instruktive und detaillierte Untersuchungen Olesko 1980 und 1991.

[1069] Dieser wird durch den (leider noch nicht veröffentlichten) Briefwechsel Bessel-Jacobi im Nachlaß von F.W. Bessel (Ms. B15) dokumentiert.

mann bezieht Jacobi regelmäßig in die mathematische Behandlung eigener Probleme der theoretischen Physik ein[1070]. Das so geweckte Interesse Jacobis für die empirischen Wissenschaften bleibt jedoch zunächst gleichsam ‚passiv', d.h. er veröffentlicht keine Arbeiten, die für die Astronomie oder mathematische Physik bedeutsam wären.[1071]

Eine Wende wird eingeleitet mit W.R. Hamiltons berühmtem (ersten) Essay *On a General Method in Dynamics*[1072]. Jacobi lernt ihn bald nach der Veröffentlichung kennen, und es ist die Motivation des *reinen* Mathematikers, die durch den von Hamilton aufgedeckten Zusammenhang zwischen Variationsrechnung und Theorie der partiellen Differentialgleichungen geweckt wird und ausgedehnte eigene Untersuchungen zur analytischen Mechanik anregt. Aus ihnen gehen u.a. das berühmte ‚Jacobi-Poissonsche Theorem' und Jacobis ‚Prinzip des letzten Multiplikators' hervor, die heute zu jeder Standardvorlesung über analytische Mechanik gehören; in verschiedenen Aufsätzen und Vorlesungen macht er diese Ergebnisse öffentlich.[1073] Seine Königsberger *Vorlesungen über Dynamik* vom Wintersemester 1842/43, obwohl erst 1866 von A. Clebsch veröffentlicht, lösten in Deutschland die großen französischen Lehrwerke ab und blieben bis zum Ende des 19. Jahrhunderts das wichtigste Lehrwerk der analytischen Mechanik.

Jacobi wird also gleichsam ‚wider Willen' *auch* zum mathematischen Physiker — einem Wissenschaftler-Typus, den er einige Jahre früher so vehement kritisiert hatte: Die von ihm selbst getroffene Unterscheidung zwischen reiner und angewandter Mathematik verliert offenkundig ihre praktische Relevanz in einem wissenschaftlichen Umfeld, das von der Mathematik eben *auch* (weiterhin) erwartet, daß sie der Naturbeschreibung und -erklärung ‚dient'. Aber diese Unterscheidung erweist sich auch als theoretisch nicht hinreichend trennscharf angesichts einer analytischen Mechanik im Stile Lagranges und Hamiltons, deren naturphilosophische Traditionen und Gehalte unter einem formal-abstrakten Gewand kaum mehr erkennbar sind und daher diese Mechanik in die Nähe zur reinen Mathematik zu rücken scheinen.[1074] Jacobis Interesse gilt denn auch in dieser *zweiten* und mittleren Periode (d.h. etwa dem Zeitraum von 1834-1844), ungeachtet der ‚Initiation' in die mathematische Physik von physikalisch-

[1070] Moritz Heinrich Jacobi stellt daher schon bald nach der Ankunft seines Bruders in Königsberg fest, daß dieser beginnt, sich *auch* mit den empirischen Wissenschaften zu beschäftigen: „Astronomie und Physik, ad 1 im kleinen Bären, Pendelversuche!! Dreiecksnetze und Karten! ... Aber was wird Steiner, was Rötscher, was Hegel dazu sagen, wenn er hört, dass Du dem Werth beilegst, was das Resultat schlechter Wiederholung, beharrlicher Beobachtung ist" (M.H. an C.G.J. Jacobi vom 5. Okt. 1826; Ahrens 1907b, S. 2f.).

[1071] Genauer hierzu Pulte 1996, S. XXIIf.

[1072] Hamilton 1934a.

[1073] S. hierzu wiederum näher Pulte 1996, S. XXIII-XXV.

[1074] Vgl. Stichwehs treffende Beschreibung oben (Kap. 2.1, Zitat 109). Eine ‚inverse' Entwicklung zeigt sich ironischerweise bei Fourier; vgl. Scharlau 1981, S. 345 und Knobloch/Pieper/Pulte 1995, S. 109.

astronomischer Seite, mehr den strukturellen Zusammenhängen verschiedener mathematischer Disziplinen (Variationsrechnung, Theorie partieller Differentialgleichungen, Theorie gewöhnlicher Differentialgleichungen, Theorie der Invarianten), die in der analytischen Mechanik ausgedrückt sind, als der Frage, was nun diese Mechanik über die physikalische Realität aussagt. Bezeichnenderweise beginnt die *Dynamik* denn auch mit den Worten: „Diese Vorlesungen werden sich mit den Vortheilen beschäftigen, welche man bei der Integration der Differentialgleichungen der Bewegung aus der besonderen Form dieser Gleichungen ziehen kann. In der ‚Mécanique analytique' findet man Alles, was sich auf die Aufgabe bezieht, die Differentialgleichungen aufzustellen und umzuformen, allein für ihre Integration ist sehr wenig geschehen".[1075] Von Felix Klein und anderen sind Jacobis Beiträge zur Mechanik, gerade mit Bezug auf die *Dynamik*, als nur an innermathematischen (genauer gesagt: *analytischen*) Problemen interessierte Untersuchungen interpretiert und wegen mangelnder physikalischer Relevanz kritisiert worden.[1076]

Nicht nur diese Kritik teilt Jacobis *Dynamik* mit Lagranges *Méchanique Analitique*[1077], sondern auch die Ablehnung metaphysischer Begründungen für mechanische Prinzipien.[1078] Jacobi scheint in seiner *Dynamik*, wie bereits Lagrange die Mechanik, als Teil der Analysis präsentieren zu wollen — mit dem Unterschied, daß er auf Lagranges befremdliche Manöver verzichtet, diese ‚Inklusion' noch irgendwie als gerechtfertigt auszuweisen.[1079]

Doch weder die Kritik an Jacobi noch die Parallele zu Lagrange greifen, wenn es um den ‚späten' Jacobi geht, der allerdings von der Geschichtsschreibung bis heute gänzlich ignoriert wurde: Die *dritte* und letzte Phase, die man in Jacobis Auseinandersetzung mit Fragen der mathematischen Physik ausmachen kann, beginnt etwa mit Jacobis Rückkehr nach Berlin im Jahre 1843. Sie findet ihren deutlichsten Ausdruck in seinen *Vorlesungen über analytische Mechanik* (1847/48), bei denen es sich nicht nur um seine letzte Mechanik-Vorlesung handelt, sondern die auch seine letzten Stellungnahmen zum Problemkreis der Mechanik *überhaupt* beinhalten[1080] (Auf sie wird in den beiden folgenden Teilen ausführlicher zurückzukommen sein.).

[1075] Jacobi 1884, S. 1.

[1076] Vgl. etwa Klein 1926/27, S. 203 und 206f.

[1077] Vgl. etwa Poissons Kritik an Lagrange (Poisson 1829, S. 391; hierzu näher Duhem 1980).

[1078] Am sinnfälligsten im Kontext des Prinzips der kleinsten Wirkung (s. Jacobi 1884, S. 43f.); vgl. hierzu auch Kap. IV, Teil 2.6, Zit. 449.

[1079] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2.

[1080] Jacobi 1996; eine vergleichende Inhaltsbeschreibung, die die *Dynamik* von 1842/43 und die *Analytische Mechanik* von 1847/48 gegenüberstellt, findet sich bei Pulte 1994, S. 505-507.

Schlagwortartig kann man die Vorgeschichte zur *Analytischen Mechanik* durch die Begriffe *Physikalisierung* und *Historisierung* bezeichnen.[1081] Damit ist *keine* Abkehr Jacobis von seinem Ideal reiner Mathematik gemeint — wir werden vielmehr festellen, daß er an diesem Ideal bis zu seinem Lebensende festhält —, sondern eine Entwicklung, in der die *Differenz* von reiner Mathematik und ihren Anwendungen in der Physik genauer in den Blick kommt.

Von einer Physikalisierung kann man sprechen, weil sich bei Jacobi in der zweiten Berliner Zeit mit seinem Biographen L. Koenigsberger ein „immer wachsendes Interesse an der mathematischen Physik"[1082] konstatieren läßt. Er pflegt nicht nur seine alten Königsberger Kontakte zu Physikern und Astronomen, sondern weitet diese aus und intensiviert sie. Hierzu einige Beispiele: Mit F.E. Neumann und W. Weber diskutiert Jacobi 1845 und 1846 Fragen der Elektrodynamik. „Ich bin jetzt sehr mit der mathematischen Theorie der Induction beschäftigt, indem Neumann eine Abhandlung darüber vom höchsten Werth in der Akademie drucken lässt, die ich corrigire und dabei Formeln und Construktion umarbeiten muss [...]"[1083], schreibt er Anfang 1846. Für Neumanns Schüler G.R. Kirchhoff, der im gleichen Jahr von Königsberg nach Berlin kam und gerade durch eine Arbeit zur Induktion Aufmerksamkeit erregte, interessiert sich Jacobi „in hohem Grade" und hätte „ihn am liebsten in seine Nähe gezogen"[1084].

Ein anderes Beispiel betrifft die ‚Theorie der Centralsonne' des Dorpater Astronomen J.H. von Mädler, die 1846 in wissenschaftlichen Kreisen für beträchtliches Aufsehen sorgt. Mädler glaubt, aus Beobachtungen zu verschiedenen Zeitpunkten eine Eigenbewegung der Fixsterne auf einen gemeinsamen Punkt, eine sog. ‚Centralsonne' im Bereich der Plejaden, ableiten zu können. *Mathematisch* ist seine Theorie von völlig untergeordnetem Interesse; Jacobi schaltet sich dennoch in die Diskussion ein und wird zu einem der härtesten Kritikern Mädlers. Dessen „sogenannte Entdeckung" will er nicht als „unschuldigen Scherz" durchgehen lassen, weil sie auf einer *methodisch unzulässigen* Auswertung einer „ungeheuren Menge von Beobachtungen" beruhe.[1085]

Schließlich sei noch auf den berühmten Vortrag *Ueber die Erhaltung der Kraft* verwiesen, den Hermann von Helmholtz am 23. Juli 1847, also knapp drei Monate vor Beginn der *Vorlesungen über analytische Mechanik*, in der Berliner Physikalischen Gesellschaft hält. Der Vortrag stößt, wie Helmholtz selbst berichtet, bei den Berliner

[1081] S. hierzu bereits Pulte 1994, S. 502-505 und Pulte 1996, S. XXIX-XXXXXIII; im folgenden gebe ich (bis auf kleinere Änderungen) letztere Darstellung wieder.

[1082] Koenigsberger 1904b, S. 427.

[1083] C.G.J. an M.H. Jacobi vom 24. Jan. 1846 (Ahrens 1907b, S. 132); s. näher Pulte 1994, S. 504.

[1084] Koenigsberger 1904a, S. 365; hierzu auch Jungnickel/McCormmach 1986 I, S. 153f.

[1085] Vgl. die diesbezüglichen Ausführungen in Jacobi 1996, S. 123f. und den dortigen Kommentar zur Vorgeschichte.

„physikalischen Autoritäten" auf Ablehnung; Jacobi ist der einzige, der seine Argumentation positiv aufnahm und ihn gegen Angriffe verteidigte.[1086]

Wiederum ist Jacobis Interesse hier nicht allein das des ‚reinen' Mathematikers: Er ist überzeugt, daß es sich bei Helmholtz' Energieerhaltungssatz um ein physikalisches Gesetz von großer naturphilosophischer Tragweite handelt. Unter den „allgemeinen dynamischen Gesetzen" ist es ihm „das mächtigste und wichtigste aller Principien [...] welches die ganze Natur beherrscht"[1087].

Die Physikalisierung des Denkens Jacobis in der zweiten Berliner Zeit wird von einer nicht weniger auffälligen, in ihrer Wirkung wohl noch wichtigeren *Historisierung* begleitet: Zwar interessiert er sich bereits früh für die Geschichte seines Faches, wie besonders einige Nachschriften seiner Königsberger Vorlesungen belegen.[1088] Ab Mitte der vierziger Jahre beläßt er es jedoch nicht mehr bei solch eher ‚informellen'[1089] historischen Exkursen: Während seines Italienaufenthaltes stellt er im April 1844 in der Bibliothek des Vatikans Quellenstudien zu Diophant an; über zahlentheoretische Probleme in den dort aufgefundenen Manuskripten berichtet er der Akademie kurz vor Beginn seiner letzten Mechanikvorlesung.[1090] Seine weiteren Quellenstudien in diesen Jahren beziehen sich u.a. auf Ptolemäus[1091] und Leibniz[1092]. Im Januar 1846 hält er in der Berliner ‚Singakademie' einen vielbeachteten Vortrag über Descartes.[1093]

Daß Jacobi seine historischen Forschungen intensiviert und vor allem, daß er sie auch auf die *Mechanik* ausdehnt, geht auf eine Intervention von A. von Humboldt im Herbst 1846 zurück: Humboldt, mit der Ausarbeitung seines *Kosmos* beschäftigt, bittet Jacobi um die Beantwortung einer Reihe von Fragen zur Geschichte der griechischen Mathematik.[1094] Jacobi forscht daraufhin einige Monate intensiv über die Geometrie, Algebra, Astronomie und die Mechanik der Antike, wobei der „Ocean von Untersu-

[1086] Helmholtz 1966, S. 23; vgl. auch Jacobi 1996, S. 105, Anm. 166.

[1087] Jacobi 1996, S. 104.

[1088] In dieser Hinsicht sind besonders seine Königsberger Vorlesungen über die *Theorie der Zahlen* vom Wintersemester 1836/37 und über *Variationsrechnung* vom Wintersemester 1837/38 interessant. Beide Nachschriften wurden von Rosenhain angefertigt (Nachlaß Jacobi; III, Ms. A6 bzw. Ms. A5). Eine Auflistung der historischen Aktivitäten Jacobis gibt Pieper 1987b, S. 30f., Anm. 130.

[1089] Eine frühe Ausnahme stellt hier Jacobis im Mai 1835 gehaltener Vortrag über die Pariser *École Polytechnique* dar, der postum veröffentlicht wurde (Jacobi 1891).

[1090] Nämlich im August 1847; s. Koenigsberger 1904a, S. 319 und 413f. Jacobi versucht später, eine Diophant-Ausgabe zu initiieren, die jedoch nicht realisiert wird (vgl. ebd., S. 464).

[1091] S. hierzu Koenigsberger 1904a, S. 466 und 469.

[1092] Zu Jacobis Archivrecherchen bezüglich Leibniz s. Jacobi 1996, S. 177f. und Koenigsberger 1904a, S. 495f.

[1093] Zur Rezeption vgl. Koenigsberger 1904a, S. 358.

[1094] Offenbar erstmals in einem (verschollenen) Brief vom September oder Oktober 1846. S. hierzu und zu der folgenden Korrespondenz der beiden Gelehrten Pieper 1987b, insbes S. 73f.

chungen“[1095], in den er durch diese Anfrage gestürzt wird, sich offenbar auch auf die jüngere Wissenschaftsentwicklung ausdehnt. Im April 1847 schreibt er an Humboldt: „Was meine eignen Arbeiten über analytische Mechanik betrifft, so macht mir eine historische Einleitung, die ich vorsehen will, eine unglaubliche Mühe“[1096].

Jacobis wissenschaftshistorische Untersuchungen in dieser Zeit sind für die bald folgenden *Vorlesungen über analytische Mechanik* in zweifacher Hinsicht wichtig: Zum einen manifestieren sie sich in einer Reihe historischer Exkurse und Notizen, die diese Vorlesung — insbesondere im ersten Teil — enthält.[1097] Von Interesse sind aber auch Jacobis Ausführungen zur Geschichte des Prinzips der kleinsten Wirkung im weiteren Verlauf der Vorlesung[1098], denn diese dürften inhaltlich im wesentlichen identisch sein mit einem Vortrag, den er am 15. Juli 1847 in der Berliner Akademie hält, aber nicht veröffentlicht und dessen Manuskript heute als verschollen gilt.[1099]

Jacobis historische Ausführungen zeichnen ein Bild von der Entwicklung der Mathematik, das — dem Wissenschaftsgeschichtsverständnis der Zeit gemäß — durch kumulativen, von wenigen großen ‚Geistesheroen' herbeigeführten Fortschritt geprägt ist. An den Arbeiten seines mathematischen Vorbildes L. Euler schätzt er besonders die Wahl geeigneter konkreter Beispiele, durch die allgemeine mathematische Methoden nicht nur *illustriert*, sondern auch *exhauriert* werden.[1100] Das „große Verdienst Lagranges„ sieht er in der Entwicklung eines formalen Kalküls der Analytischen Mechanik mit deutlich *denkökonomischer* Funktion[1101], wodurch dieser „der Analysis den Vortheil erhalten hat, den die Geometrie gewährt, wo man durch Linien Ausdrücke darstellt, die durch Formeln sehr complicirt auszudrücken wären“[1102]. Bedeutsamer mathematischer Fortschritt wird nach Jacobi aber nicht allein durch neue mathemati-

[1095] „Endlich war ich dazu gekommen ein grosses Mémoire über analytische Mechanik zu schreiben [...] . Eben als ich die letzte Hand daran legen wollte, erging an mich von Humboldt eine Reihe Fragen über griechische Mathematik. Nun ist bei mir das Unglück, dass mich alles gleich in einen Ocean von Untersuchungen stürzt, so dass ich ohne H's Fragen zu beantworten, doch 2 Monate nur unter diesen Studien verbrachte“ (C.G.J. an M.H. Jacobi vom 31. Dez. 1846; Ahrens 1907b, S. 143). Jacobi sendet Humboldt im Oktober oder November ein längeres Manuskript und im Dezember nochmals ‚Aphorismen' zur Geschichte der griechischen Mathematik (Pieper 1987b, S. 74); Auszüge hiervon sind auch wiedergegeben bei Koenigsberger 1904a, S. 386-395.

[1096] C.G.J. Jacobi an A. von Humboldt vom 7. April 1847 (Pieper 1987b, S. 120).

[1097] S. Jacobi 1996, insbes. S. 1-13 und S. 18-38.

[1098] S. ebd. 1996, S. 159-182.

[1099] Mit dem Titel: *Über die Geschichte des Prinzips der kleinsten Aktion.* S. hierzu Koenigsberger 1904a, S. 303; auch Jacobi 1996, S. 159, Anm. 238.

[1100] Vgl. Jacobi 1996, S. 232.

[1101] Jacobis Urteil über Lagranges Mechanik ist, bei allen sonstigen Unterschieden, demjenigen E. Machs vergleichbar. Vgl. Jacobi 1996, S. 45, Anm. 81.

[1102] Ebd., S. 45; vgl. auch S. 193.

sche Begriffe und Kalküle erzielt, sondern auch durch neue *Auslegungen* vorhandener Sätze. Hierin sieht er ein Verdienst seiner eigenen Untersuchungen zur Mechanik.[1103] In Jacobis Bewunderung für W.R. Hamiltons „schöne Entdeckung" des Zusammenhangs zwischen Variationsrechnung und der Theorie der Differentialgleichungen, konkret für die Zurückführung der dynamischen Differentialgleichungen holonomer Systeme auf die Hamiltonsche partielle Differentialgleichung, mischt sich Kritik an der unvollkommenen Ausführung dieses Gedankens.[1104]

Die zweite Folge der oben als *Historisierung* skizzierten Entwicklung Jacobis ist grundsätzlicherer Art, denn sie betrifft den mechanischen Euklidianismus, wie ihn Lagrange noch aufrecht zu erhalten sucht: Zusammen mit der als *Physikalisierung* bezeichneten Entwicklung führt die Historisierung dazu, die Anwendbarkeit der Mathematik zur Naturbeschreibung überhaupt als *Problem* wahrzunehmen.[1105] Jacobi beschäftigt sich daher in dieser Vorlesung erstmals ernsthaft mit der Frage, inwieweit die analytische Mechanik als eine genuin mathematische Disziplin im Sinne Lagranges *auch* als eine physikalische Wissenschaft aufgefaßt werden kann. Zugespitzt tritt dieses Problem als Frage nach dem Status der Prinzipien der Mechanik auf: Wenn die Geschichte der Mechanik lehrt, daß es verschiedene Möglichkeiten gibt, die Mechanik zu axiomatisieren — etwa eine Newtonsche, eine Lagrangesche, eine Hamiltonsche — ist dies *nicht allein* ein Zeichen für die von Jacobi stets betonte Kreativität und Autonomie der Mathematik — denn *mathematisches* Denken ist es, das die verschiedenen Prinzipien entwirft. Vor allem ist hier ins Auge zu fassen, daß die Möglichkeit *alternativer Darstellungen* sich nicht mit der früheren, platonistisch gefärbten Sichtweise verträgt: Der Grundsatz des mechanischen Euklidianismus: ‚eine Natur, eine Axiomatisierung' wird zum Problem, weil die *Geschichte* ihn in Frage stellt.

[1103] Besonders in der ‚Auslegung' von Poisson 1809: In dem ‚Jacobi-Poissonschen Theorem zur Erzeugung neuer Integrale der Bewegung, einer Eigenschaft von Differentialgleichungen, bei der „man den Satz, auf welchem dieselbe beruht, dreißig Jahre vor Augen hatte, ohne diesen Umstand daraus abzulesen" (Jacobi 1996, S. 132f.; s. dort auch Anm. 206). Es liegt nahe, den ‚Auslegungscharakter' zumindest mancher neuer mathematischer Sätze bei Jacobi mit seiner frühen philologischen Sozialisation durch A. Boeckh (vgl. Teil 2.2), in Verbindung zu bringen.

[1104] S. Jacobi 1996, S. 225-227 und S. 260. In einem Brief an den Astronomen H.C. Schumacher bemerkt er in typischer Überspitzung: „Hamilton [...] hat eine große Fähigkeit, aus einer bedeutenden Gedanken nichts zu machen. Er hätte die ganze Mécanique Analytique von Lagrange umgestalten können, aber er hat nicht verstanden, was er gemacht hat" (C.G.J. Jacobi an H.C. Schumacher vom 25. Jan. 1847; Nachlaß Schumacher; M. 21, Bl. 25^r; vgl. aber auch Jacobi 1996, S. 226, Anm. 334).

[1105] Ein Problem, das sich beim ‚frühen' Jacobi angesichts dessen Platonismus (vgl. Teil 2.2) nicht wirklich stellt, aber durch die ‚Erweiterung' seines Bildes der theoretischen Mechanik um die historische und die physikalische Dimension auf die ‚Tagesordnung' kommt. Zur Frage der Anwendung der Mathematik in Astronomie und Mechanik im Briefwechsel Jacobis mit Humboldt s. Pieper 1987b, S. 77f., 104-106, 109f. und 124f.

Ende 1846 schreibt Jacobi an A. von Humboldt, daß er in der „Publication mächtiger Arbeiten" unterbrochen werde, „welche eine seit 10 Jahren versprochene Reform der analytischen Mechanik betreffen"[1106]. Die Quellenlage läßt keine näheren Aufschlüsse darüber zu, worum genau es Jacobi bei dieser Reform geht — sicherlich nicht ‚nur' um eine neue Sicht auf ihre Grundlagen, wie sie durch Physik und Geschichte nahegelegt wurde, sondern auch um eine neue, geschlossenere Gesamtdarstellung aller Resultate der analytischen Mechanik.[1107] Fest steht jedoch *auch*, daß die hierauf folgenden *Vorlesungen über analytische Mechanik* ein neues Verständnis von mathematischer Naturgesetzlichkeit und des Anwendungsproblems offenbaren: Nicht mehr aprioriische *Natur*gesetze, die durch den ‚eigenen Antrieb' des mathematischen Denkens erfaßt werden können[1108], bestimmen das Bild, sondern eine differenziertere und in der Tat ‚moderne' Auffassung, wie der folgende Teil zeigen soll.

[1106] C.G.J. Jacobi an A. von Humboldt vom 21. Dez. 1846 (Pieper 1987b, S. 99); vgl. hierzu auch oben Anm. und Zit. 1095.
[1107] Vgl. Pulte 1996, S. XXVIIf.
[1108] Vgl. Teil 2.2, Zit. 1060.

VI.3 ‚Vom Standpunkt der reinen Mathematik': Jacobis konventionale Mechanik

Ein detaillierter inhaltlicher Vergleich der *Analytischen Mechanik* und der älteren *Dynamik* erübrigt sich an dieser Stelle:[1109] Als ein Beleg für die Physikalisierung des Jacobischen Denkens, d.h. die stärkere Orientierung seiner Mechanik an realen Bewegungsprozessen und das stärkere Interesse an den empirischen Implikationen mechanischer Sätze im allgemeinen, sei beispielsweise angeführt, daß die *Analytische Mechanik* im Unterschied zur *Dynamik* der Störungstheorie und ihrer Anwendung auf unser Planetensystem breiten Raum widmet.[1110] Die Historisierung zeigt sich in einer Fülle von Notizen zur Geschichte der Mechanik, die von den Vorsokratikern über Aristoteles bis hin zu Galilei, Leibniz, Newton, Lagrange und Hamilton reichen.[1111]

Neben diesen beiden Aspekten besteht der auffälligste und wichtigste Unterschied beider Vorlesungen darin, daß Jacobi in der *Analytischen Mechanik* der eigentlichen Theorie der Mechanik einen Teil vorschaltet, in dem er sich ausführlich mit Grundlegungsfragen auseinandersetzt: Von diesem Teil, der fast ein Drittel der gesamten Vorlesung ausmacht, findet man in der *Dynamik* wenig mehr als die Aufstellung der dynamischen Differentialgleichungen und ihre Einkleidung in das (heute so genannte) d'Alembertsche Prinzip. Insofern kann man die *Analytische Mechanik* ‚in erster Näherung' als eine Erweiterung der *Dynamik* um eine historische und systematische Grundlagenreflexion zur Mechanik betrachten.

Im folgenden soll es lediglich um Jacobis systematische Ausführungen gehen. Mit Abstand den breitesten Raum nimmt hier seine ausgedehnte Kritik an Lagranges ‚Axiom'[1112], d.h. dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten und den späten Versuchen Lagranges, dieses zu beweisen, ein. Aus Darstellungsgründen gehe ich auf diese Kritik erst später und gesondert ein (Teil 4). Zunächst soll Jacobis Sicht der *Méchanique Analitique* und der analytischen Tradition allgemein beleuchtet werden (3.1), anschließend gehe ich näher auf Jacobis Verständnis mechanischer Prinzipien als Konventionen ein (3.2) und vergleiche seine diesbezüglichen Ausführungen mit denjenigen Poincarés (3.3).

[1109] S. hierzu näher Pulte 1994, S. 505-507.

[1110] Jacobi widmet ihr sieben Vorlesungen, in der älteren Dynamik nur eine Stunde. S. Jacobi 1996, S. 264-301.

[1111] S. hierzu die verstreuten Bemerkungen in Jacobi 1996, insbes. S. 1-38 und 172-180.

[1112] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2, insbes. Zit. 526.

VI.3.1 Die neue Sicht der analytischen Tradition

Jacobi stellt sich bereits mit der Wahl des Titels für seine letzte Mechanikvorlesung in die *analytische* Tradition. Als deren Urheber sieht er wiederum seinen großen mathematischen Lehrmeister Euler an[1113], ist sich aber auch darüber im klaren, daß es Lagranges *Méchanique* Analitique war, die dieser Tradition erst ihre paradigmatische Gestalt gab. Er distanziert sich bereits in der *Dynamik* von Eulers Bemühungen um eine metaphysische Begründung ihrer Prinzipien und adaptiert *dort* offenkundig Lagranges ‚rein analytisches' Verständnis.[1114]

In der *Dynamik*, aber auch später in der *Analytischen Mechanik*, bezeichnet Jacobi mathematische Gesetze der Mechanik (wie etwa das d'Alembertsche Prinzip, das Hamilton-Prinzip oder das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten) als ‚symbolische Formen' oder ‚symbolische Ausdrücke'[1115], wenn es ihm dabei lediglich um die ‚rein mathematische' oder *analytische* Seite dieser Sätze geht — um ihre logischen Beziehungen untereinander und zu spezielleren mathematischen Sätzen der Mechanik, d.h. um ihre deduktiven Implikationen im allgemeinen. In ihrer ‚Symbolik', so macht er an anderer Stelle deutlich, bestehe gerade die Leistungsfähigkeit der Mathematik: „Will man als Analyst reden, so muß man sagen, daß die Stärke der Mathematik in der Symbolik bestehe, indem man damit ein ganzes System von Gedanken durch ein Zeichen fixiert, um mit dem Erblicken dieses Zeichens sogleich an diese Gedankenreihe erinnert zu werden, ohne nötig zu haben, sie noch einmal durchzudenken".[1116] Reine Mathematik im Sinne Jacobis ist ein logisches Operieren mit symbolischen Formen als abgekürzten Gedankenreihen; solange diese nicht verlassen werden, kann über ihre Wahrheit (im Sinne logischer Folgerichtigkeit) entschieden werden. Lagranges *Méchanique Analitique* ist *diesbezüglich* für Jacobi zu *jeder* Zeit ein Vorbild: Sie verkörpert ihm das symbolische Operieren der reinen Mathematik idealtypisch und kondensiert dabei mathematisches Denken in einem umfassenden ‚Gedanken', dem *analytischen* Prinzip.[1117]

[1113] Zum berühmten ‚Additamentum II' von Eulers *Methodus inveniendi* (Euler 1744) bemerkt er: „Dieser [appendix] ist von der größten Wichtigkeit, aus ihm ist die ganze neue analytische Mechanik hervorgegangen" (Jacobi 1996, S. 164).

[1114] Für verschiedene Belege vgl. Pulte 1996, S. XLIII.

[1115] Vgl. etwa Jacobi 1884, S. 12 und Jacobi 1996, S. 6.

[1116] Koenigsberger 1904b, S. 550. Das Zitat ist der Nachschrift einer Vorlesung über *Die allgemeine Theorie der krummen Flächen und Kurven doppelter Krümmung* entnommen, die Jacobi im Wintersemester 1848/49 in Berlin hielt.

[1117] „Von einem gewissen Standpunkte aus verschwinden die einzelnen Disziplinen. Operationen in der Algebra, Geometrie, Mechanik gehen in einem allgemeineren Gedanken auf. Dieser Gedanke leitete zuerst Lagrange, als er versuchte, alle mathematischen Wissenschaften aus einem Prinzipe abzuleiten. Der Fortschritt der einen Wissenschaft ist dann bei einem solchen Ineinandergreifen zugleich ein Fortschritt der übrigen Disziplinen" (ebd., S. 550). Diese Stel-

Doch in der *Analytischen* Mechanik wird Jacobi diese ‚rein mathematische' Sicht der Mechanik — aus Gründen, die ich bereits in deren Vorgeschichte lokalisiert und analysiert habe — zum Problem: Jacobi sieht hier nicht mehr nur die ‚symbolische Kraft' und deduktive Leistungsfähigkeit, sondern eben auch die Grenzen der *Méchanique Analitique*: Da ist zum einen die faszinierende, an die Mathematikeuphorie der frühen Jahre anklingende Idee, die Mechanik könne durch „analytische Operationen" die „mechanische Communication der Kräfte" ersetzen: „[...] man hat hier das vollkommene Gegenbild einer rein mathematischen Operation von dem, was in der Natur vorgeht, das ist eigentlich immer die Aufgabe der angewandten Mathematik".[1118] Daß sich „alles reducirt [...] auf die mathematische Operation", erscheint Jacobi nun zwar als die „möglichst große Vereinfachung, welche man von einem Problem machen konnte, das in seinen einzelnen Beispielen die größte Mühe machte und die größten Schwierigkeiten zu überwinden erforderte, und das ist eigentlich der große Gedanke, der in der analytischen Mechanik von Lagrange niedergelegt ist".[1119] Dieser ‚große Gedanke', namentlich die Anwendung der Lagrangeschen Differentialgleichungen, habe jedoch „auch den Nachtheil, daß man sich ganz davon entwöhnt, die Wirkungen der Kräfte zu verfolgen, und den wahren Nutzen kann der Satz erst für diejenigen haben, bei denen er der Schluß ist von angestellten Betrachtungen und Untersuchungen, wenn man sich erst im Einzelfall selber diese Mühe gegeben hat, durch die Verfolgung der Kräfte und die Einsicht in ihre gegenseitigen Modificationen zu solchen Resultaten zu gelangen, die dann alle zusammen von der einzigen Formel umfaßt werden".[1120]

Jacobi entdeckt den konkreten physikalischen ‚Einzelfall': Wenn der Lagrangesche Formalismus keine *rein mathematische*, bloß symbolische Darstellung von Gedankenreihen bleiben soll, so lautet jetzt die ungewohnte Warnung vor ‚blinden' deduktiven Übungen, muß am *Einzelfall* empirisch überprüft werden, ob er unter die Darstellung fällt. Jacobi läßt keinen Zweifel daran, daß Lagranges Mechanik *hier* ihren neuralgischen Punkt hat:[1121]

> Der weitere Inhalt der analytischen Mechanik [Lagranges] ist dann freilich die Anwendung dieser Formeln, oder der Ausdruck der verschiedenen Eigenschaften der Körper durch Bedingungsgleichungen, und die Art, wie diese Bedingungsgleichungen bei der Transformation der Variabeln benutzt werden. Die Natur wird da jedesmal vollständig aus den Augen gerückt, und

lungnahme scheint mir, nebenbei bemerkt, eine Illustration für die These zu liefern, daß die Ausbildung reiner Mathematik tendenziell nicht Spezialisierung und partielle Isolierung mathematischer Disziplinen befördert, sondern eher ‚synthetisierenden' Charakter hat: Analogien, Strukturverwandtschaften und gemeinsame logische ‚Wurzeln' stehen im Mittelpunkt ihres Interesses; vgl. hierzu auch Scharlau 1981, S. 339.

[1118] Jacobi 1996, S. 193; vgl. S. 45.

[1119] Ebd., S. 193.

[1120] Ebd., S. 193f.

[1121] Ebd., S. 193.

es tritt an die Stelle der Constitution der Körper (je nachdem deren Elemente unbiegsam, ausdehnbar, elastisch u.s.w. sind) lediglich die bestimmte Bedingungsgleichung. Hier wird nun freilich in der analytischen Mechanik die Rechtfertigung vermißt, indem sie, um eine rein mathematische Disziplin zu bleiben, auch von dieser Rechtfertigung ganz abstrahirt [...]. Wenn die Physik nun finden sollte, daß diese Bedingungsgleichung nicht den Zustand dieses oder jenes Körpers ausdrückt, so ist das Etwas, was außerhalb des Werkes liegt; wenn z.B. die tropfbaren Flüssigkeiten als absolut incompressibel angenommen werden: ist das aber nicht mehr der Fall, so ergeben sich dadurch Abweichungen der Resultate von der Wirklichkeit.

Daß Lagranges Methodenmonismus[1122] ein *Rechtfertigungsdefizit* impliziert, wenn die analytische Mechanik (auch) eine *empirische* Wissenschaft *und also* angewandte Mathematik sein will, wird für Jacobi hier erstmals zum Problem: Lagrange gibt nicht nur faktisch keine Antwort darauf, warum die Anwendung der mathematischen Formel auf den Einzelfall gelingt — tatsächlich gelingt sie ja gar nicht ‚wirklich', weil die analytische Mechanik vom Einzelfall *absieht*, d.h. die ‚Constitution der Körper' außer acht läßt. Lagrange *kann* nach Jacobi auch prinzipiell *keine* Antwort auf diese Frage geben, weil dies die ‚rein mathematische' Beschränkung seines Werkes verbietet. Die Mechanik ist so entweder reine Mathematik, und als solche eine Kette logischer Ableitungen, über deren Wahrheit aufgrund der verwendeten Grundsätze und syntaktischer Regeln zu entscheiden wäre, *oder* sie ist angewandte Mathematik, dann aber hätte sie über gewisse Anwendungsregeln zu sprechen, was sie nicht tut. Kurz: Sie will *beides* sein, reine und angewandte Mathematik, und dies macht sie dem ‚späten' Jacobi *als Wissenschaft* verdächtig. Seine ‚Reform der analytischen Mechanik'[1123] geht dahin, ihr den Nimbus reiner Mathematik zu nehmen und sie als *angewandte* Wissenschaft zu etablieren. Dazu muß sie zuerst ihre Ansprüche auf Evidenz und Sicherheit, wie sie Lagrange vertritt, zurücknehmen, und dazu wiederum muß sie ihre Anfänge in ‚Axiomen' (früher Lagrange) bzw. ‚beweisbaren und bewiesenen Sätzen' (später Lagrange und Lagrange-Rezeption)[1124] hinterfragen. Seinen Studenten gibt Jacobi mit Blick auf Lagrange diese Warnung vor *Schein*evidenzen und -sicherheiten mit auf den Weg:[1125]

Überhaupt ist die analytische Mechanik ein Buch, vor welchem man in einiger Beziehung warnen muß, es enthält Vieles, was mehr divinatorisch ausgesprochen, als streng bewiesen ist, so daß man es mit Vorsicht gebrauchen muß, um sich nicht täuschen zu lassen und zu dem Wahne verführen, man hätte Etwas bewiesen, was nicht bewiesen ist. Es sind wenige Punkte, die nicht große Schwierigkeiten darbieten: Ich habe Schüler gehabt, die die mécanique analytique besser verstanden als ich, aber es ist manchmal kein gutes Zeichen, wenn man Etwas versteht.

[1122] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2.
[1123] Vgl. oben Teil 2.3, Zit. 1106.
[1124] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2 und 5.3.
[1125] Jacobi 1996, S. 29.

VI.3.2 Mechanische Prinzipien als ‚bloße Conventionen'

Der Hintergrund, vor dem Jacobi seine Reflexionen zu den Prinzipien der Mechanik anstellt, ist der einer reinen Mathematik, die nicht mehr *per se* schon Aussagen über die physikalische Realität impliziert, wie Jacobi in seiner frühen Laufbahn glaubte annehmen zu können, sondern die ihren freien symbolischen Konstruktionen nachgeht und daher auf empirische Relevanz von vornherein nicht rechnen kann. So verhält es sich grundsätzlich auch mit den mathematischen Sätzen der Mechanik: Als ‚symbolische Formen' sind sie Schöpfungen des mathematischen Denkens, die an die Natur herangetragen werden. Weder stammen sie aus der Erfahrung, noch kann die Erfahrung sie bewahrheiten, denn die Erfahrung sagt nichts über mathematische Sätze aus. Gleichwohl müssen ihre deduktiven Folgerungen mit der Erfahrung in Einklang stehen. Hier, wo „eine Mischung der Mathematik mit Etwas außer ihr" stattfindet, spricht Jacobi nicht mehr von „symbolischen Formen", sondern von „Conventionen". So heißt es gleich zu Beginn seiner *Analytischen Mechanik*:[1126]

> Vom Standpunkt der reinen Mathematik aus sind diese Gesetze nicht zu beweisen, bloße Conventionen, sie sind aber so angenommen, daß sie der Natur entsprechen — daher nicht a priori darzuthun, sondern [es ist] durch Experimente die Art der Entsprechung zu zeigen. Ein bündiger Beweis hiervon ist z.B. durch die Entdeckung des Leverrier'schen Planeten geliefert[1127]. Sie werden gleichwohl überall, wo eine Mischung der Mathematik mit Etwas außer ihr stattfindet, Versuche finden, diese rein conventionellen Sätze a priorisch zu beweisen, und es wird dann an Ihnen sein, den jedesmaligen Fehlschluß aufzufinden.

Der altphilologisch geschulte, sehr sprachbewußte Jacobi führt hier, ein gutes halbes Jahrhundert vor H. Poincaré[1128], den Konventionsbegriff zur Kennzeichnung mechanischer Grundgesetze ein — ein Faktum, das im Gegensatz zur gängigen Begriffsgeschichte steht.[1129] Schon unter diesem begriffsgeschichtlichen Gesichtspunkt dürfte es

[1126] Ebd., S. 3. Konkret setzt Jacobi hier die vorhergehende Kritik an Versuchen, das zweite Bewegungsgesetz zu beweisen (vgl. Kap. IV, Teil 2.7), fort. Er wendet den Konventionsbegriff, wie die weitere Diskussion deutlich machen wird, auch auf andere Prinzipien an.

[1127] Mit der Wendung ‚bündiger Beweis' bezieht sich Jacobi auf seine Auffassung, daß die Konventionen der Natur zu ‚entsprechen' haben, nicht auf die Konventionen selbst, wie aus anderen Stellungnahmen klar wird. Die Entdeckung des Neptun nach einer Vorhersage von U.J. Leverrier im Jahre 1846 sorgte in der wissenschaftlichen Welt für beträchtliches Aufsehen (s. Grosser 1970); vgl. hierzu auch Teil 5.

[1128] S. hierzu zuerst Poincaré 1897; Näheres hierzu in Teil 3.3.

[1129] Vgl. etwa die Artikel ‚Konvention' und ‚Konventionalismus' im *Historischen Wörterbuch der Philosophie* (Schrader/Kimminich 1976 bzw. Frey 1976). In einer neu zu schreibenden Geschichte dieser beiden Begriffe wäre — selbst bei Beschränkung auf den Kontext der mathematischen Wissenschaften — neben Th. Hobbes u.a. auch D. Diderot zu berücksichtigen, desweiteren *vor* Poincaré (aber nach Jacobi) auch F. Reech, L. Lange, H. Streintz u.a. Auch in einer solchen

aufschlußreich sein, festzustellen, welche Bedeutung Jacobi mit dieser Bezeichnung verbindet, denn sie ist keine ‚ad hoc-Wortschöpfung', sondern soll eine bestimmte Haltung zu den etablierten Prinzipien der Mechanik auf den Begriff bringen. Die verschiedenen Ausführungen in der *Analytischen Mechanik* legen nahe, mechanische Prinzipien als ‚Conventionen' im Sinne Jacobis durch folgende Eigenschaften zu charakterisieren: Sie sind[1130]

(1) mathematisch nicht beweisbar,
(2) der empirischen Prüfung fähig,
(3) der empirischen Bestätigung bedürftig,
(4) Setzungen, d.h. unter Alternativen wählbar,
(5) durch Einfachheit und Plausibilität gekennzeichnet.

Bereits das obige Zitat macht deutlich, daß für Jacobi ein mechanisches Prinzip *(1)* nicht mathematisch beweisbar sein kann, sondern im wörtlichen Sinne als Anfang aufzufassen ist. Wie insbesondere die später zu untersuchende mathematische Lagrange-Kritik deutlich machen wird, richtet sich diese Feststellung gegen das ‚Alltagsgeschäft' des ‚Gummi-Euklidianismus'[1131], nämlich die zahlreichen Versuche, die als grundlegend angesehenen Sätze (wie etwa das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten) selber noch durch sog. mathematische Beweise absichern zu wollen. Weiter wird deutlich, daß Jacobi mechanische Prinzipien *(2)* als empirisch prüfbar ansieht und — weil es keine mathematische Wahrheitsprüfung geben kann — eine empirische Bestätigung *(3)* auch für notwendig hält (‚[...] durch Experimente die Art der Entsprechung zu zeigen' ist). Die Vorhersage und spätere Entdeckung des Neptun (‚Leverrierscher Planet') liefert ihm ein spektakuläres Beispiel einer solchen Bestätigung — aber natürlich keinen ‚Beweis' eines mechanischen Grundsatzes: Durch Erfahrung kann keine Sicherheit der Grundlagen erreicht werden. Jacobi bringt dies dadurch zum Ausdruck, daß er mechanische Prinzipien verschiedentlich als „probabel" bezeichnet.[1132]

Besonders geht es ihm mit der Verwendung des Konventionsbegriffs darum, den *Setzungscharakter (4)* mechanischer Prinzipien zum Ausdruck zu bringen: Sie sind mathematisch *nicht* beweisbar, der empirischen Prüfung fähig und bedürftig, aber sie werden durch die Erfahrung in keiner Weise eindeutig gegeben. Vielmehr ist hier ein

gründlicheren und früher einsetzenden Begriffsgeschichte bliebe jedoch meines Wissens Jacobi der erste, der den Konventionsbegriff auf Prinzipien der Mechanik anwendet — und damit sogar noch einen spezifisch ‚konventionalen' Sinn verbindet. ‚Konventional' nenne ich seine Mechanik in Abgrenzung zu Poincarés ‚konventionalistischer' Mechanik; s. hierzu Teil 3.3.

[1130] Ich folge hier der Darstellung in Pulte 1994, S. 511f.

[1131] Vgl. Kap. IV, Teil 5.3. Gerade dieser ‚Gummi-Euklidianismus' des späten Lagrange und der französischen Lagrange-Rezeption bis in die späten 30er Jahre des 19. Jahrhunderts ist es, den Jacobi genau zur Kenntnis nimmt und zurückweist.

[1132] Vgl. etwa Jacobi 1996, S. 32f. und 59.

Spielraum vorhanden, daher auch eine *Übereinkunft* erforderlich. Dabei sind es Einfachheits- und Plausibilitätsüberlegungen *(5)*, die die Setzung von Prinzipien leiten:[1133]

Beweise gibt es eigentlich nicht, sondern man kann diese Sätze nur plausibel machen; in allen Beweisen, welche man hat, wird immer mehr oder weniger vorausgesetzt, denn die Mathematik kann die Art, wie die Beziehungen eines Systems von Punkten Abhängigkeit veranlassen, sich nicht aus den Fingern saugen, sondern es wird hier wieder eine Convention in Form eines allgemeinen Princips eintreten. Man kann die Forderung stellen, daß die Form dieses Princips möglichst einfach und plausibel sei.

Es ist zu betonen, daß Jacobi seine Überlegungen nicht auf verschiedene Darstellungen der dynamischen Differentialgleichungen durch verschiedene analytische Prinzipien (wie das der virtuellen Geschwindigkeiten oder der kleinsten Wirkung) beschränkt. Auch geht es ihm nicht um den trivialen Hinweis, daß es vom ‚Standpunkt der reinen Mathematik' aus ein leichtes ist, die bekannten analytischen Prinzipien — etwa durch je unterschiedliche Definition der erlaubten Variationsprozesse — in immer neuer ‚mathematischer Verkleidung' zu präsentieren. Vom Prozeß der Konventionalisierung ist vielmehr auch das synthetische, vermeintlich auf unmittelbarer Raum- und Bewegungsanschauung beruhende *Trägheitsprinzip* betroffen. Auch bei ihm handelt es sich zunächst lediglich um ein mathematisches Konstrukt, auch dieses Prinzip kann daher nicht von vornherein Anspruch darauf erheben, Naturgesetz zu sein:[1134]

Es ist vom rein mathematischen Standpunkt aus ein Cirkel, zu sagen, die geradlinige Bewegung ist die eigene[1135], folglich ist zu jeder andern eine äußere Hinzuwirkung erforderlich: denn man könnte mit demselben Rechte jede andere Bewegung als Gesetz der Trägheit eines Körpers setzen, wenn man nur hinzufügt, wenn er sich nicht so bewegt, ist eine Außenwirkung daran Schuld. Und wenn wir jedesmal, wenn der Körper abweicht, die äußere Einwirkung physikalisch aufweisen können, sind wir berechtigt, das Trägheitsgesetz, das nun zu Grunde lag, als Naturgesetz zu bezeichnen.

Jacobi stellt Newtons Trägheitsprinzip in einen ‚Raum' anderer möglicher mathematischer Bewegungsgesetze, denn es empfiehlt sich nicht von selbst als das *einzige* Gesetz, das kräftefreie Bewegungen darstellt. Wir könnten etwa auch die Kreisbewegung als Trägheitsbewegung *festsetzen*, wenn im Falle der Abweichung von der Kreisbahn entsprechende Kraftgesetze aufweisbar wären. Wir sehen, daß seine ‚rein mathematische' Sichtweise den Blick für das *logische* Problem schärft, um das es hier eigentlich

[1133] Ebd., S. 5. *Hier* bezieht sich Jacobi konkret auf das (im Anschluß entwickelte) Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, das er einführt, um „die allgemeinen dynamischen Differentialgleichungen zuerst in irgend einer Form auf[zu]stellen, und dann die mannigfachen Umformungen dieses Systems an[zu]geben" (ebd.).

[1134] Ebd., S. 3f.

[1135] Gemeint sein dürfte: ‚eigentümliche' oder ‚natürliche'.

geht: Das Trägheitsgesetz *definiert* ja erst, was unter einer *kräftefreien* Bewegung verstanden werden soll — und muß als eine solche definitorische Festlegung begriffen werden, wenn ein logischer Zirkel vermieden werden soll. Die Mathematik wird also bereits auf ‚prinzipieller' Ebene *semantisch* relevant, indem sie solche Festlegungen vornimmt — insofern liegt auch kein Unterschied zum älteren mechanischen Euklidianismus vor, für den Axiome *immer* semantische Bedeutung haben. Ein Unterschied liegt jedoch darin, daß Jacobis Mathematik, die sich als logisch kohärente Entwicklung symbolisch dargestellter Gedankenreihen versteht, die Freiheit hat, *unterschiedliche* Definitionen zu entwerfen: Sie ist nicht durch ‚reine Anschauung' (Kant) oder ‚physikalische Intuition' (Empirismus, Positivismus) von vornherein auf euklidische *Geradlinigkeit* und einfache algebraische *Gleichförmigkeit* fixiert, sondern kann *andere* Optionen ins Auge fassen. Dies ist der entscheidende neue Gesichtspunkt, der mit der Konzeption einer reinen Mathematik ins Spiel kommt.

Auf eine weitere logische Implikation von Jacobis Ausführungen zum Trägheitsprinzip ist hier hinzuweisen: Dieses Prinzip erhält erst in Verbindung mit *anderen* Festlegungen darüber, wie Abweichungen von der Trägheitsbewegung auf äußere Einwirkungen zurückführbar sind, überhaupt empirischen Gehalt. ‚Isolierbarkeit' von Prinzipien und ‚metatheoretische Invarianzforderung' der KMN[1136] sind daher von Jacobis Standpunkt aus — und auch hier liegt ein Bruch mit dem mechanischen Euklidianismus vor — *keine* Prinzipienkriterien mehr. Sie sind es deshalb nicht, weil die *Mathematik* beim Entwurf von Prinzipien solche Kriterien weder anwenden muß (weil sie nicht von vornherein auf die ‚Abbildung' von Naturgesetzen abzielen muß), noch eigentlich kann (sonst wäre sie gar keine freie symbolische Konstruktion), während die *Erfahrung* nur an der Übereinstimmung der deduktiven Folgerungen der Prinzipien mit den Erscheinungen interessiert ist, nicht aber daran, ob die Deduktion eine oder mehrere Prämissen enthält, und auch nicht an der Frage, ob diese Prämissen ‚Sätze' oder ‚Definitionen' heißen. Die Konzeption reiner Mathematik befördert, im Kontext der Anwendung von Mathematik auf Physik, tendenziell eine *holistische* Sicht auf die ‚Ebene der Prinzipien'.

Abschließend läßt sich zu diesem Punkt folgendes festhalten: Nach Jacobi stellt die reine Mathematik ein ‚Arsenal' von Kandidaten möglicher Konventionen zur Verfügung — Fries sprach ja bereits, wie ausgeführt, von der Mathematik als der ‚Rüstkammer der Hypothesen'[1137] — , aus denen dann unter empirischen und pragmatischen Gesichtspunkten eine Auswahl getroffen werden muß. Da die Mathematik den so zu Naturgesetzen *gemachten* Konventionen nicht die Sicherheit verleihen kann, die ‚rein'

[1136] Vgl. Kap. II, Teil 2.2.

[1137] Vgl. Teil 2.1, Zit. 1019. Der Unterschied zu Jacobi liegt bei Fries freilich darin, daß die Freiheit der Mathematik auf der Ebene der *Prinzipien* der Bewegungslehre (noch) *nicht* zum Tragen kommt: Diese Prinzipien sind für Fries wie für Kant unverrückbar.

mathematischen Sätzen eigen ist, und da dies auch die Erfahrung nicht vermag, können mechanische Prinzipien nach Jacobi grundsätzlich nurmehr als ‚probabel' gelten.

Jacobi bricht so mit dem axiomatischen Denken der KMN, insbesondere auch mit dem ‚Gummi-Euklidianismus' des späten Lagrange und seiner Epigonen: Deren Certismus und ‚Evidentialismus' wird letztlich durch eine Auffassung reiner Mathematik zu Fall gebracht, die ihre Grenzen genau zu bestimmen sucht, um innerhalb dieser Grenzen strengere Kriterien mathematischer Gewißheit und Evidenz zur Geltung zu bringen. Zugleich eröffnet diese Mathematikauffassung die Möglichkeit *alternativer* Prinzipienformulierungen — und stellt damit die Forderung der KMN nach *Einzigartigkeit* bzw. Eindeutigkeit der Systembildung[1138] zur Disposition — die in nichts anderem als der Kreativität der Mathematiker und der Autonomie der Mathematik selber angelegt ist: Die Möglichkeiten reiner Mathematik werden durch die Erfahrung nicht hinreichend restringiert, um das System der Mechanik eindeutig zu bestimmen. Aus diesen Gründen spreche ich hier von einer *‚rein mathematischen'* Auflösung der KMN.

Mit Jacobi wird die rationale Mechanik zu einer *prinzipienfalliblen* Wissenschaft, die nicht mehr an ein *fundamentum inconcussum* (für die *Mechanik* — denn dies betrifft nicht die reine Mathematik selber) glaubt und mit der Fehlbarkeit und Veränderbarkeit ihrer Grundsätze rechnet. Jacobi scheint als erster mathematischer Physiker diesen Schritt konsequent vollzogen und reflektiert zu haben, und deshalb scheint es mir berechtigt, mit *ihm* die ‚Moderne' der mathematischen Naturphilosophie beginnen zu lassen.

VI.3.3 Konventionen bei Jacobi und Poincaré

Bevor ich Jacobis neue, prinzipienkritische Position anhand seiner detaillierten Lagrange-Kritik weiter ausführe, erscheint es angebracht, seinen Konventionsbegriff mit demjenigen Poincarés zu vergleichen. Dabei wird es aus mehreren Gründen nicht darum gehen, Jacobi als den ‚eigentlichen' Begründer eines *mechanischen Konventionalismus* zu etablieren: Erstens hat Jacobi seine Überlegungen zum ‚konventionalen' Charakter mechanischer Prinzipien nicht systematisch zu einer *Lehre*, die zu einem ‚Ismus' hätte verkrusten können, ausgearbeitet.[1139] Zweitens ist zu vergegenwärtigen, daß sich Poincaré selbst dagegen verwahrt hat, seine eigenen wissenschaftstheoretischen Auffassungen mit dem Etikett ‚Konventionalismus' zu belegen[1140] — bis heute

[1138] Vgl. Kap. II, Teil 1.1, insbes. die dortigen Ausführungen zu *(2)*.

[1139] Möglicherweise hat er diese Ausarbeitung auch nicht mehr leisten *können* — eine Vermutung, die eine gewisse Plausibilität erhält, wenn man die widrigen politischen und persönlichen Umstände bedenkt, die seine letzten drei Lebensjahre begleiteten; hierzu näher Koenigsberger 1904a.

[1140] Vgl. hierzu Diederich 1974a.

mit wenig Erfolg, wie verschiedenste Geschichten der Wissenschaftstheorie belegen. Drittens (und vor allem) sprechen gute Gründe dafür, einen Konventionalismus der mathematischen Physik, wie er heute, ungeachtet Poincarés eigener Ablehnung, vor allem mit seinem Namen verbunden wird, als ein Ergebnis der *Praxis* der mathematischen Physik des späteren 19. Jahrhunderts zu verstehen, weshalb es nicht sinnvoll erscheint, einen einzelnen ‚Urheber' oder ‚Begründer' herauszuheben.[1141]

Poincaré hat seine Auffassung bekanntlich zunächst in Auseinandersetzung mit der Geometrie entwickelt. Erst später, in seiner Diskussion der Mechanik von Heinrich Hertz (1897) und in nachfolgenden Beiträgen, dehnte er seine wissenschaftstheoretischen Überlegungen auch auf die Mechanik und die Physik generell aus.[1142] Ich gehe nicht auf sprachliche, metrische und andere von Poincaré unterschiedene Festsetzungen ein; vielmehr beschränke ich mich auf die hier „eigentlich interessanten Konventionen"[1143], nämlich die Prinzipien der Mechanik und Physik, die nach Poincaré als allgemeinste Gesetze einen Theoriebildungsprozeß abschließen. Hierzu zählt er neben den drei Newtonschen Bewegungsgesetzen unter anderem auch das Energieerhaltungsprinzip: „Diese Prinzipien sind Übereinkommen [conventions] und verkleidete Definitionen [...]. Sie sind indessen von experimentellen Gesetzen abgeleitet, diese Gesetze sind sozusagen als Prinzipe hingestellt, denen unser Verstand absolute Gültigkeit beilegt".[1144]

Für Poincaré hat die Erfahrung zwar eine leitende Funktion bei der Festlegung der Prinzipien, jedoch nicht im Sinne einer direkten und eindeutigen Bestimmung. So ist etwa das Trägheitsprinzip gar kein empirischer Satz, weil seine Voraussetzungen nirgendwo in der Erfahrung gegeben sind. Ebenso ist ein solches Prinzip nicht a priori deduzierbar: „Das Trägheitsgesetz drängt sich uns nicht a priori auf [...]".[1145] Die Auszeichnung eines Gesetzes als Prinzip erfolgt immer innerhalb eines freien Spielraums und bleibt daher Sache eines ‚Übereinkommens', durch das die Gültigkeit dieses Prinzips erst *festgesetzt* wird. Hierin liegt der definitorische Charakter dieser Konventionen (‚verkleidete Definitionen'). Allerdings: „Dieses Übereinkommen ist jedoch nicht absolut willkürlich [...]; wir nehmen es an, weil gewisse Experimente uns bewiesen haben, daß es bequem ist".[1146] So werden von Poincaré verschiedene Varianten des Trägheitsprinzips erörtert, die ‚Newtonsche' ist besonders vorteilhaft allein aufgrund seiner Einfachheit.

[1141] S. hierzu näher Pulte 2000a. Im folgenden Vergleich stütze ich mich daneben auch auf Pulte 1994, S. 514-515.

[1142] S. hierzu neben Poincaré 1897 auch Poincaré 1914a, Kap. VI.

[1143] So nennt sie Diederich 1974a, S. 52.

[1144] Poincaré 1914a, S. 140.

[1145] Ebd., S. 94

[1146] Ebd., S. 138.

Einige Gemeinsamkeiten in den Auffassungen Jacobis und Poincarés zu mechanischen Prinzipien als Konventionen liegen auf der Hand[1147]: die grundsätzliche Wählbarkeit von Konventionen *(4)*, natürlich ihre mathematische Unbeweisbarkeit *(1)*, die leitende Funktion der Erfahrung bei ihrer Setzung *(3)*, Einfachheit und Plausibilität *(5)* (man vergleiche hierzu Poincarés Begriff der ‚Bequemlichkeit', der auch formale Einfachheit meint[1148]) findet man bei beiden Mathematikern. Jacobi geht nicht soweit, Konventionen wie Poincaré explizit als ‚verkleidete Definitionen' einzuführen. Seinen Bemerkungen zum Trägheitsprinzip liegt jedoch, wie wir gesehen haben, die Idee zugrunde, daß dieses Prinzip erst *definiert*, was unter einer Trägheitsbewegung überhaupt zu verstehen sei:[1149] Konventionen legen, wie Poincaré anders als Jacobi detailliert ausführt, Grundbegriffe fest, mit denen dann erst die Erscheinungen beschrieben werden können. Eine direkte, theorieunabhängige empirische Verifikation des Trägheitsprinzips ist jedenfalls aufgrund seines Konventionscharakters sowohl bei Jacobi als auch bei Poincaré ausgeschlossen.

Der wichtigste Unterschied beider Auffassungen dürfte indes darin liegen, daß Poincaré die einmal per Konvention zu Prinzipien erklärten Gesetze der Überprüfung durch die Erfahrung *(2)* gänzlich entzieht. So bemerkt er zum Trägheitsprinzip: „Niemand denkt indessen ernstlich daran, daß das Gesetz, von dem wir sprechen, jemals aufgegeben oder verbessert werden könnte. Warum? Einfach deshalb, weil man es niemals einer entsprechenden Probe unterwerfen kann".[1150] Poincarés Konventionen sind gewissermaßen ‚immun' gegenüber neuen Erfahrungsdaten. Jacobis starke Betonung des ‚Standpunktes der reinen Mathematik' bei der Festlegung von Konventionen legt nahe, daß er die Überprüfung durch Erfahrung *(2)* nicht im Detail reflektiert hat; er dürfte jedoch Poincarés Standpunkt kaum teilen. Die wiederholte Kennzeichnung mechanischer Prinzipien als ‚probabel' gültig läßt erkennen, daß er ihre empirische Widerlegung grundsätzlich für möglich hält: Sie sind eben, anders als die Gesetze der reinen Mathematik, *fallibel*. Poincaré behauptet dagegen in der Regel[1151] die ‚absolute Gültigkeit' der zu Konventionen erklärten Prinzipien.

Dies ist ein wichtiger, nicht zu vernachlässigender Differenzpunkt, und wenngleich Poincarés ‚Sicherheit per Konvention' nicht mit der ‚Sicherheit per Evidenz' des älte-

[1147] Vgl. zum folgenden die o.g. Eigenschaften *(1)-(5)* von Konventionen im Sinne Jacobis (Teil 3.2).

[1148] S. hierzu näher Diederich 1974a, S. 49.

[1149] Vgl. Teil 3.2, Zit. 1133 zu Jacobi und Poincaré 1914a, S. 93-99.

[1150] Poincaré 1914a, S. 98.

[1151] Seine diesbezüglichen Stellungnahmen sind nicht immer eindeutig: Der ‚absoluten Gültigkeit' (s.o., Zit. 1144) eines Prinzips als ‚verkleideter Definition' steht an anderer Stelle die Bemerkung gegenüber: „Das von nun an sozusagen kristallisierte Prinzip ist der Kontrolle der Erfahrung nicht mehr unterworfen. Es ist nicht wahr oder falsch, es ist bequem" (Poincaré 1910, S. 180). Auf Poincarés schwankende Beurteilung besonders auch der Newtonschen Prinzipien macht auch Wright 1975, S. 287-293, 395 und 490, aufmerksam.

ren mechanischen Euklidianismus gleichzusetzen ist, erweist sich Poincaré hier gegenüber Jacobi als der ‚konservativere' — eben weil er auf die unbedingte Stabilität mechanischer Prinzipien gegenüber Erfahrung *kraft Entschluß* setzt.

In historischer Perspektive wesentlicher als dieser Unterschied scheint mir jedoch eine *Gemeinsamkeit* zu sein, die hier hervorgehoben werden soll: Auf die nach Kant beinahe ‚klassisch' gewordene Frage, ob die Prinzipien der Mechanik synthetische Sätze a priori oder empirische Sätze a posteriori seien, ist Jacobis (unausgesprochene) Antwort die gleiche wie die Poincarés, nämlich ein definitives *Weder-Noch.* Als Konventionen werden sie der Natur vom menschlichen Geist auferlegt, sind aber „nicht a priori darzuthun"[1152], sie sind jedoch auch nicht ‚aus den Erscheinungen deduziert' (Newton), d.h. sie sind durch die Erfahrung nicht eindeutig bestimmt. Sie stellen vielmehr eine *dritte* Klasse von Propositionen dar. Poincaré betont ihren empirischen Ursprung; für Jacobi handelt es sich um Sätze, die sich zunächst der freien und schöpferischen Kraft mathematischen Denkens verdanken. Aber *beide* sehen Konventionen nicht durch die Erfahrung bestimmt, noch durch Erfahrung oder Vernunft *begründet.* Hier liegt der ‚Schnittpunkt' der Auffassungen Jacobis und Poincarés: Mathematische Prinzipien können der Natur nicht auferlegt werden ohne einen methodisch zu reflektierenden *Entschluß*, denn wissenschaftliche Erfahrung unterliegt zwar immer solchen Prinzipien, aber die Prinzipien übersteigen immer auch die wissenschaftliche Erfahrung, in gewissem Sinne auch die wissenschaftliche Vernunft.

Die im folgenden dargestellte Kritik Jacobis an Lagrange hat wesentlich das Ziel, diese Beschränkung aufzuzeigen. Und da für Lagrange wissenschaftliche Vernunft wesentlich mathematische Vernunft ist, geht es Jacobi um einen ‚immanenten' Nachweis von *deren* Beschränktheit.

[1152] Jacobi 1996, S. 3.

VI.4 Beweise und Widerlegungen: Jacobis Kritik an Lagrange

Jacobis Kritik an Lagrange, die er erstmals in seinen Vorlesungen über *Analytische Mechanik* übt, ist der sichtbarste Ausdruck seines Bruchs mit der älteren Tradition der analytischen Mechanik.

Als Jacobi diese Vorlesungen begann, war er sich darüber im klaren, daß die behauptete Sicherheit, Evidenz und Allgemeinheit des Lagrangeschen Systems der *Méchanique Analitique* mit dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten steht und fällt und daß Lagranges späte Beweisversuche dazu dienten, diesbezügliche Ansprüche zu sichern, nachdem dieses Prinzip seine vermeintliche unmittelbare Evidenz verloren hatte. Seine Kritik an Lagrange setzt bei diesen Beweisen, d.h. an der ‚Spitze' des deduktiven Aufbaus der *Méchanique Analitique*, an.

Lagranges Philosophie der Mechanik ist, wie wir früher sahen, in gewisser Hinsicht *formalistisch* und *dogmatisch*. Lakatos hat seinen bekannten Angriff auf den Formalismus in der Philosophie der Mathematik, Poppers *Conjectures and Refutations* paraphrasierend, *Proofs and Refutations* genannt.[1153] Dieser Titel scheint mir auch geeignet, das Verhältnis von Lagranges Rechtfertigungsdenken und Jacobis Kritik daran zu bezeichnen: Es geht um *Beweise und Widerlegungen*[1154], und weil Lagrange ‚rein mathematisch' Beweise führen wollte, liefert Jacobi eben diese Widerlegungen.

VI.4.1 Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten nach Jacobi

Jacobi entlehnt Lagranges allgemeines Prinzip dem ersten Band der *zweiten* Auflage der *Méchanique Analitique* (1811)[1155] und interpretiert es als eine „symbolische Darstellung des Systems der Differentialgleichungen" eines freien mechanischen Systems.[1156] Wenn jeder der n Massenpunkte m einer Kraft mit den cartesischen Koordinaten X_i, Y_i und Z_i unterliegt, nimmt es diese Form an:[1157]

$$\sum_{i=1}^{n}\left[\left(X_i - m_i\frac{d^2x_i}{dt^2}\right)\delta x_i + \left(Y_i - m_i\frac{d^2y_i}{dt^2}\right)\delta y_i + \left(Z_i - m_i\frac{d^2z_i}{dt^2}\right)\delta z_i\right] = 0. \quad (1)$$

[1153] Vgl. Popper 1994/97 und Lakatos 1976.

[1154] Die folgenden Ausführungen stimmen inhaltlich im wesentlichen überein mit Pulte 1998, S. 164-178.

[1155] Lagrange 1811/15 I, S. 258; vgl. Kap. IV, Teil 5.2.

[1156] Vgl. Jacobi 1996, S. 6.

[1157] Vgl. ebd., S. 6.

Jacobi machte deutlich, daß *(1)* auch auf ein System unter Zwangsbedingungen, die durch m Gleichungen gegeben sind, die $3n$ Koordinaten für die Massenpunkte enthalten ($m < 3n$), Anwendung findet. In diesem Fall sind die $3n$ Zunahmen δx_i, δy_i, δz_i nicht länger „vollkommen unabhängige, sondern die virtuellen Variationen“[1158], d.h. Variationen, die mit diesen Einschränkungen vereinbar sind.

Im Falle des Gleichgewichts verschwindet das „gesamte Moment der bewegenden Kräfte“, und *(1)* impliziert, daß das verbleibende „gesamte Moment der anziehenden Kräfte“ X_i, Y_i und Z_i gleich Null ist:

$$\sum_{i=1}^{n}\left[X_i\delta x_i + Y_i\delta y_i + Z_i\delta z_i\right] = 0. \qquad (2)$$

Bei Gleichgewicht muß die Summe also verschwinden, und umgekehrt, wenn das gesamte Moment verschwindet, muß Gleichgewicht herrschen. Jacobi beschreibt dies als das „Fundamentalprincip der Statik“ oder „den berühmten analytischen Ausdruck, den Lagrange für das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten gegeben hat“[1159].

Lagranges ursprüngliche Formulierung im ersten Teil seiner *Méchanique Analitique* machte keinen Gebrauch von der später bei Jacobi aufgenommenen Cartesischen Darstellung *(2)*, sondern ging von den ungeteilten Kräften P, Q, R ..., die entlang der Geraden p, q, r ... auf einzelne Massenpunkte wirken, aus. Eine kleine Störung des Systems verursacht Veränderungen der Position der Massenpunkte, die als „Variation“ oder, weil sie als das „erste Moment“ der Bewegung angenommen werden, als die „virtuellen Geschwindigkeiten“ dieser Punkte bezeichnet werden.[1160] Ihre Projektionen auf die Geraden p, q, r ... seien dp, dq, dr ..., wobei entgegengesetzte Richtungen von P und dp durch ein Minuszeichen angezeigt werden. Dann ist das gesamte Moment der Kräfte oder, modern gesprochen, die ‚virtuelle Arbeit‘ des Systems $Pdp + Qdq + Rdr + ...$, und *(2)* nimmt die Lagrangesche Form an:[1161]

$$Pdp + Qdq + Rdr + ... = 0. \qquad (3)$$

eine Formel, die natürlich auch Jacobi als eine Reformulierung von *(1)* für den Fall des Gleichgewichts interpretiert. Er erkennt die „ungeheure Bedeutung dieser symbolischen Form“ *(1)* an und vertritt die Ansicht: „[...] die Entdeckung der Bedeutung gehört mit zu den größten Erfindungen des vorigen Jahrhunderts“.[1162] Auch akzeptiert er

[1158] Vgl. ebd., S. 8.
[1159] Ebd., S. 111.
[1160] Lagrange 1853, S. 111, S. 119 und 223.
[1161] Vgl. ebd., S. 225.
[1162] Jacobi 1996, S. 6.

den großen Wert des Lagrangeschen Prinzips für eine deduktive Organisation der Mechanik, aber er will ebenso zweifelsfrei zeigen, daß es als *Prinzip* im wörtlichen Sinne eingeführt werden muß: als *Anfang* oder als „Satz ohne Beweis"[1163]. Es gibt eben keinen vollständigen Beweis[1164], und alle Versuche in diese Richtung müssen verstanden werden als bloße „Zurückführungen auf einfachere Betrachtungen, das sind hernach *curae posteriores*"[1165]. Auch hier betont Jacobi, daß die ersten Anfänge der analytischen Mechanik „etwas Conventionelles"[1166] haben müssen. Der lohnendste Weg, dies zu zeigen, sei es, gerade die Versuche Lagranges — für Jacobi der herausragende Repräsentant der analytischen Mechanik[1167] — zurückzuweisen, die das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten als wohl begründet erweisen sollten. Jacobis Kritik bezieht sich auf beide Beweise Lagranges für *(3)*, aber nur im Zusammenhang mit dem zweiten diskutiert er die Folgen ihrer Unzulänglichkeiten für den Übergang von der Statik zur Dynamik, d.h. für die Ableitung der dynamischen Form *(1)* aus der statischen Form *(3)*.

VI.4.2 Lagranges erster Beweis

Lagranges erster Versuch basiert auf dem sogenannten „Prinzip der Flaschenzüge": Er führt — lediglich als Gedankenexperiment — eine Anzahl masse- und reibungsloser Rollen, ein ausdehnungsloses Seil und eine Masse mit Einheitsgewicht ein. Sein Leitgedanke ist es, die Kräfte P, Q, ..., die auf verschiedene Punkte des mechanischen Systems wirken, durch Paare von Rollen mit entsprechenden Windungszahlen m, n, ... darzustellen, wobei vorausgesetzt wird, daß die Spannung des Seils an allen Punkten gleich ist.[1168]

[1163] Ebd., S. 9.
[1164] Vgl. ebd., S. 9.
[1165] Ebd., S. 10, d.h. es handelt sich hier nach Jacobi um ‚nachträgliche Bemühungen'.
[1166] Ebd., S. 10.
[1167] Vgl. ebd., S. 29.
[1168] Für Lagranges ursprüngliche Diskussion s. Lagrange 1798 oder die 2. Auflage der *Méchanique Analitique* (Lagrange 1853/55 I, S. 23-25). Die folgende Abbildung sowie die im nächsten Abschnitt sind Jacobis *Analytischer Mechanik* (Jacobi 1996, S. 26 und 90) entnommen. Beide sind vom Herausgeber ergänzt und finden sich nicht in Jacobis ursprünglichen Vorlesungen (und natürlich auch nicht in Lagranges Mechanik). Die Bezeichnungen in den Abbildungen sind denen des Textes angeglichen.

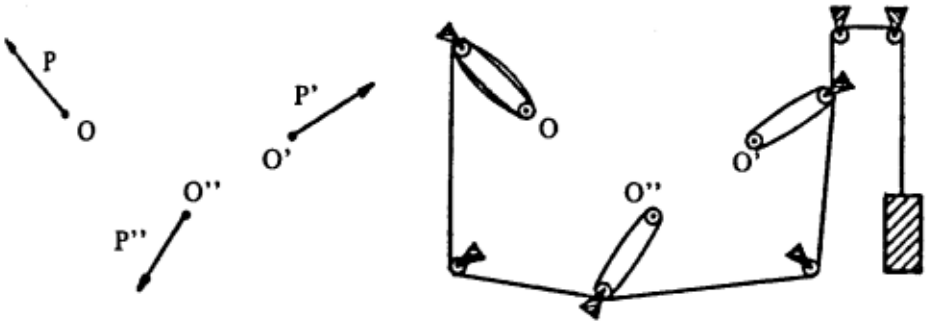

Abb. 2: Lagranges erster Beweis

Lagrange muß an dieser Stelle annehmen, daß die Proportionen *P, Q, ...* rational sind, so daß es immer möglich ist, ganze Zahlen *m, n, ...* zu finden, sofern diese ausreichend groß gewählt werden. Um der Einfachheit willen können wir die Größen der Kräfte *P, Q, ...* und die Windungszahlen gleichsetzen. Dies vorausgesetzt, kann der Ausdruck für das gesamte virtuelle Moment geometrisch recht einfach ausgedrückt werden:

$$Pdp + Qdq + ... = mdp + ndq + ... \quad . \qquad (4)$$

Wenn das System einer geringen Verschiebung unterliegt, ist *mdp* die Veränderung der Länge des Seils für das erste Paar Rollen, *ndq* für das zweite, ..., und die Summe auf der rechten Seite der Gleichung ist die *gesamte Veränderung* der Länge des Seils. Verschwindet die Summe, wird *(4)* den gewünschten „analytischen Ausdruck des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten"[1169] darstellen.

Lagrange berücksichtigt auch, daß der Fall, in dem *Pdp + Qdq + ...* negativ ist, ein Gleichgewicht beschreiben könnte, „weil es unmöglich ist, daß das Gewicht sich von selbst aufwärts bewegt"[1170]. In diesem Fall können jedoch die Verschiebungen *dp, dq, ...* durch *-dp, -dq, ...* ersetzt werden, und *(4)* wird positiv sein. Dies beweise, daß „die entgegengesetzte Verschiebung, die genausogut möglich ist, das Gewicht dazu veranlassen wird zu sinken und das Gleichgewicht zerstört"[1171].

Aber wann kann angenommen werden, daß die Summe der Gesamtlänge des Seils *mdp + ndq + ...* gleich Null ist? Lagrange hielt es für „offenbar [evident], daß — um das System im Gleichgewicht zu halten — es notwendig ist, daß das Gewicht nicht infolge einer willkürlichen infinitesimalen Verschiebung der Punkte des Systems sinken kann; da Gewicht immer die Neigung hat, nach unten zu sinken, wird es — sofern

[1169] Lagrange 1853/55 I, S. 25.
[1170] Ebd., S. 25.
[1171] Ebd., S. 24.

eine Verschiebung des Systems auftritt, die es zu sinken veranlaßt — dies notwendig tun und somit eben diese Verschiebung des Systems herbeiführen"[1172].

Jacobi, der diese Bemerkung Lagranges seinen Studenten vorträgt, konstatiert bei dem Wort „offenbar": „[...] das ist schon ein schlimmes Wort, wo das steht, kann man sicher sein, hier ist eine große Schwierigkeit, es ist dieß eine üble Angewohnheit der Mathematiker [...]".[1173] Mit anderen Worten: Wo Lagrange Evidenz und mathematische Exaktheit geltend macht, findet Jacobi ‚Evidenzdehnung' und Unexaktheit vor.

Zwei Schlüsse, auf denen Lagranges Gedanken beruhen, müssen unterschieden werden, um die Struktur von Jacobis Gegenargument zu verstehen. Es seien willkürliche infinitesimale Bewegungen auf ein mechanisches System angewandt. Dann sind nach Lagrange diese beiden Fälle möglich:

(L1a) Wenn keine Bewegung das Gewicht nach unten zu sinken veranlaßt, ist das System im Zustand des Gleichgewichts. In diesem Falle ist *(4)* gleich Null.

(L1b) Wenn es (mindestens) eine Bewegung gibt, die das Gewicht sinken läßt, ist das System nicht im Gleichgewicht. Das Gewicht wird notwendig ‚von selbst' herabsinken und eine Verschiebung des Systems erzeugen. In diesem Falle ist *(4)* nicht gleich Null.

VI.4.3 Jacobis erste Widerlegung

Jacobi zufolge sind sowohl *(L1a)* als auch *(L1b)* aus logischer und mathematischer Sicht problematisch. Um der Kürze willen werde ich seine detaillierte Diskussion in vier Punkten zusammenfassen:[1174]

(J1a) Schlußfolgerung *(L1a)* ist *wahrscheinlich* richtig, wenn sie auf den Fall eines stabilen Gleichgewichtes beschränkt wird (Diese Beschränkung ist jedoch nach der Argumentation in *(J1d)* gar nicht zulässig.). Aber selbst in diesem Falle kann die Schlußfolgerung *(L1a)* keine Gewißheit beanspruchen, da sie auf nichts als *empirischer* Evidenz beruht, insbesondere, weil sie aus der oberflächlichen Beobachtung folgt, daß ein Gewicht sich nur nach *unten* bewegen kann, sofern es sich nicht im Zustand des Gleichgewichts befindet.[1175] Schon das einfache Pendel zeigt jedoch, daß die Richtung

[1172] Ebd., S. 24.

[1173] Jacobi 1996, S. 29.

[1174] Vgl. ebd., S. 29-39.

[1175] René Dugas brachte mehr als ein Jahrhundert später in seinem Werk *A History of Mechanics* dasselbe Argument vor: „Wir stellen hier mit Jouguet fest, daß Lagranges Beweis auf physikalischen Tatsachen beruht — auf gewissen Prinzipien von Flaschenzügen und Seilen" (Dugas 1955, S. 336). Der Verweis auf Jouguet bezieht sich auf den zweiten Band *L'Organisation de la mécanique* (1909) von Émile Jouguets *Lectures de mécanique* (Jouguet 1908/09 II, S. 179). Jouguet war Dugas' Lehrer.

einer bewegenden Kraft nicht notwendig mit der der Bewegung selber identisch ist. Jacobi schließt: „[...] man muß von solchen probabeln Betrachtungen immer genau wissen, daß sie eben nicht mehr als probabel sind, um nicht einen Beweis damit angeführt zu haben zu vermeinen".[1176]

(J1b) Schlußfolgerung *(L1b)* ist definitiv falsch, weil sie unstabile und mittlere Gleichgewichte übersieht. Auch hier reicht es aus, das einfache Pendel, bei dem das Gewicht lotrecht über der Aufhängung angebracht ist, zu untersuchen. Dies zeigt, daß ein Zustand des Gleichgewichts möglich ist, der durch alle infinitesimalen Verschiebungen zerstört wird, die sich nicht in der Richtung der Verbindung befinden.[1177] Lagrange war also auf keine Weise berechtigt zu behaupten, daß das Gewicht *notwendig* herabsinken muß, weil *(L1b)* nichts als eine hinreichende Bedingung für ein stabiles Gleichgewicht ist. „Es ist höchst auffallend," sagt Jacobi, „ daß bei den so klaren und bekannten Fällen, wo offenbar das Gegentheil stattfindet, Lagrange diese Schlußweise hat gebrauchen können"[1178] — umso mehr, so ist hier hinzuzufügen, als Lagrange an einer späteren Stelle seiner *Méchanique Analitique* klar zwischen stabilem und instabilem Gleichgewicht unterscheidet.[1179] Der Fehler in *(L1b)* jedenfalls, so hebt Jacobi hervor, „zerstört ganz den Charakter des Beweises"[1180].

(J1c) Selbst wenn man die Ansicht von Jacobis Königsberger Kollegen und Freund F.W. Bessel teilt, daß instabile und mittlere Gleichgewichte in der Physik irrelevant sind, weil sie immer und unmittelbar von „herumschwirrenden Kräften" zerstört werden[1181], wäre es nicht zulässig, einen Beweis des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten auf ein stabiles Gleichgewicht zu beschränken: „[...] bei dem Übergange von Statik zu Dynamik und bei vielen andern Betrachtungen wird keineswegs vorausgesetzt, daß das Gleichgewicht ständig sei, und wenn die Sätze nicht unnatürlich beschränkt werden und ihren Werth verlieren sollen, darf man nicht absehen von dem instantanen Gleichgewicht".[1182]

(J1d) Jacobi stellt schließlich fest, daß es einen „sehr wichtigen Fall [gibt], auf den Lagranges Überlegungen überhaupt nicht angewandt werden können, nämlich wenn

[1176] Jacobi 1996, S. 32f.

[1177] Joseph Bertrand bezog sich einige Jahre später in einer Anmerkung zur dritten Auflage der *Méchanique Analitique* (1853) auf diesen Fehler: „Man hat mit gutem Grund auf diese Behauptung Lagranges mit dem Beispiel eines Schwerpunktes im Gleichgewicht auf dem höchsten Scheitelpunkt einer Kurve entgegnet [...]" (Lagrange 1853/55 I, S. 24). Hier dachte er wahrscheinlich an Dirichlets Schrift *Über die Stabilität des Gleichgewichts* (Dirichlet 1846), die er später erwähnt (Lagrange 1853/55 I, S. 71) und die er Lagranges Lehrbuch angefügt hat (ebd., S. 457-459). Ich werde am Ende dieses Abschnitts kurz auf sie eingehen.

[1178] Jacobi 1996, S. 31.

[1179] Vgl. Lagrange 1853/55 I, S. 70-76.

[1180] Jacobi 1996, S. 30.

[1181] Vgl. ebd., S. 32.

[1182] Ebd., S. 32. Dieser Punkt wird im nächsten Teil noch ausführlich diskutiert.

die Bedingungen des Systems nicht durch Gleichungen, sondern durch Ungleichungen dargestellt werden, und dieß ist nicht nur ein besonderer Fall, sondern es ist sogar die Regel"[1183]. Dieser Punkt bezieht sich sowohl auf Lagranges *Formulierung* als natürlich auch auf seinen *Beweis* des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten. Eine allgemeinere Formulierung des Prinzips in der Form

$$Pdp + Qdq + Rdr + \cdots \leq 0 \qquad (5)$$

erlaubt es, durch Ungleichungen ausgedrückte Einschränkungen zu berücksichtigen (z.B. die Bewegung eines Massenpunktes außerhalb einer Kugel). Ein Beweis für *(5)* müßte Lagranges früher dargestellte Ausschließung des negativen Gesamtmoments vermeiden, weil sein Argument, daß *dp*, *dq*, ... immer durch ihre Negativen ersetzt werden können, nicht länger gültig ist, wenn durch Ungleichungen gegebene Einschränkungen in Betracht gezogen werden. Fourier hatte zuerst Lagranges Axiom *(3)* zu der allgemeineren Form *(5)* erweitert und versuchte es auf Prinzipien der Hebelwirkung und der Zusammensetzung der Kräfte zu gründen.[1184] Da Jacobi in diesem Punkt explizit Fouriers *Mémoire sur la statique* und den sich daran anschließenden Schriften Gauß' und Ostrogradskys folgt[1185], besteht keine Notwendigkeit, sein Argument hier weiter zu verfolgen. Für eine Diskussion seiner *ursprünglichen* Kritik ist es ohne Bedeutung.

Sowohl *(J1c)* als auch *(J2c)* wenden sich gegen den Mangel an Allgemeinheit in Lagranges Axiom: *(J1c)* bezieht sich auf den Übergang von *(2)* bzw. *(3)* zu der dynamischen Form *(1)* und *(J1d)* auf den Übergang von *(2)* bzw. *(3)* zu der allgemeineren statischen Form *(5)*. Aber Jacobis hauptsächliches Anliegen ist hier eher *Intension* als *Extension*, wie sich in *(J1a)* und *(J1b)* zeigt: Diese Einwände zielen auf die vage Bedeutung von ‚Gleichgewicht' in Lagranges erstem Versuch. Hier fehlt nicht nur eine klare Unterscheidung zwischen stabilem Gleichgewicht und anderen Formen von

[1183] Ebd., S. 35.

[1184] Vgl. sein *Mémoire sur la statique* (Fourier 1798). Fourier definiert Momente mit umgekehrten Vorzeichen und gibt daher *(5)* mit ≥ anstatt ≤ wieder. Obwohl Jacobi an Fouriers Erweiterung *(5)* von Lagranges Prinzip interessiert war, hat er Fouriers ausführliche Versuche nicht mit genügender „Sorgfalt [analysiert], um einen klaren Beweis für ein Prinzip vorzulegen, der zur Begründung der Mechanik dient" (Jacobi 1996, S. 36). Der Grund für diese Unterlassung könnte wohl darin bestehen, daß der Kern der Jacobischen Kritik an Lagrange, nämlich dessen unangemessener Begriff des *Gleichgewichtes* (s.u.), von Fouriers Schrift nicht infrage gestellt wird. Genau das Gegenteil ist der Fall: Während er die Stabilität des Gleichgewichts diskutiert, beruft sich Fourier auf die „sehr elegante Analysis des berühmten Autors der *Méchanique Analitique*" (Fourier 1798, S. 47; vgl. Lagrange 1853/55 I, S. 60-76). Für gründliche Diskussionen des *Mémoire* Fouriers vgl. Bailhache 1975, S. 47-52; Costabel 1972; Dugas 1955, S. 361-366; Grattan-Guinness 1990I, S. 303-308; Lindt 1904, S. 166-169.

[1185] Vgl. Jacobi 1996, S. 38f.

Gleichgewicht, sondern auch eine klare Konzeption von Gleichgewicht überhaupt. Nach Jacobi kann Gleichgewicht lediglich als eine „mathematische Fiktion" angenommen werden, als etwas, das nicht in der Natur selber zu finden ist.[1186] Sinneserfahrung und mathematische Beweisführung zu vermischen, um zu einem klaren Verständnis dieses Begriffes zu gelangen, wie es Lagrange tat *(J1a)*, ist daher nicht erlaubt. Als ein *mathematischer* Begriff erfordert er eine geeignete mathematische Definition. In Jacobis eigenen Worten:[1187]

> Wenn wir uns nun auf diese probabeln Betrachtungen über das Steigen und Fallen gar nicht einlassen, wie diese denn nur Scheinbares haben, so werden wir sagen, daß Gleichgewicht stattfindet, wenn bei unendlich kleinen Verrückungen des Systems der materiellen Punkte die Ortsverrückung des Gewichts nur eine unendlich kleine Größe der 2ten Ordnung ist, so daß der unendlich kleine Theil der ersten Ordnung verschwindet: ob diese unendlich kleine Größe der 2ten Ordnung aber positiv oder negativ ist, ist einerlei, sie kann sowohl für alle Verrückungen positiv, als für alle negativ, oder auch für einige positiv und für andere negativ sein, und immer findet Gleichgewicht statt [...].

Jacobi macht nicht klar, wodurch er zu dieser *schwachen* Definition von *Gleichgewicht* inspiriert wurde. Es besteht allerdings kaum Zweifel, daß sie ihren Ursprung in der Rede „Über die Stabilität des Gleichgewichts" hat, die sein Berliner Kollege und Freund J.P.G. Lejeune Dirichlet im Januar 1846 vor der Preußischen Akademie der Wissenschaften hielt. Der Vortrag wurde im selben Jahr veröffentlicht, d.h. etwa ein Jahr, bevor Jacobi seine *Vorlesungen über Analytische Mechanik* hielt. Ohne auf Einzelheiten von Dirichlets Ausführungen einzugehen, drängt sich diese Hypothese von selbst auf:

Dirichlet zeigt *direkt*, daß das Maximum einer Funktion φ (in heutigen Begriffen: das Minimum der potentiellen Energie Π, wobei $\varphi = -2\Pi$) das stabile Gleichgewicht eines mechanischen Systems beschreibt. Andererseits lieferte Lagrange einen *indirekten* Nachweis mit demselben Ergebnis, der auf der Entwicklung von Π in eine Potenzreihe beruht. Er nahm an, daß es erlaubt sei, diese Entwicklung nach Termen zweiter Ordnung abzubrechen, und daß diese Terme im Falle eines Minimums von Π als Summe negativer Quadratzahlen dargestellt werden können. Damit konnte er im dritten Teil seiner *Méchanique Analitique* zeigen, daß ein Minimum von Π ein stabiles und ein Maximum ein instabiles Gleichgewicht des Systems liefert.[1188]

Dirichlet kritisierte Lagranges Annahme als offensichtlich unbegründet[1189], und Jacobi teilte seine Kritik. In diesem Zusammenhang ist es wichtig anzumerken, daß Lagrange seine Charakterisierung von stabilem und instabilem Gleichgewicht als „eine

[1186] Vgl. ebd., S. 56 und Pulte 1994, S. 51.
[1187] Jacobi 1996, S. 35.
[1188] Vgl. Lagrange 1853/55 I, S. 72-74.
[1189] Vgl. Dirichlet 1846, S. 6.

direkte Folge des Beweises für das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, den wir am Ende des ersten Teils gegeben haben"[1190], beschreibt. Jacobi schöpfte hier offensichtlich aufgrund von Dirichlets Vortrag Verdacht[1191] und richtete seine Aufmerksamkeit auf Lagranges angeblichen Beweis selbst. Die oben zitierte Jacobische Definition des Gleichgewichts berücksichtigt Dirichlets Kritik und läßt für Lagranges Versuch, einen Beweis für das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit mit Hilfe des Prinzips der Flaschenzüge zu liefern, keinen Platz. Für Jacobi kann dieser nicht länger als mathematischer Beweis zählen, sondern ist lediglich eine künstliche „Construction"[1192].

Wenn die Vermutung zutrifft, daß die Wurzeln von Jacobis erster Kritik in Dirichlets Vortrag liegen, dann würde diese offenkundige *Verschärfung mathematischer Strenge* gut illustrieren, was Jacobi am meisten an den Beiträgen seines Freundes zur Mathematik schätzt, nämlich dessen hohe Maßstäbe von Exaktheit und Genauigkeit. An Alexander von Humboldt schreibt Jacobi über Dirichlet: „Er allein, nicht ich, nicht Cauchy, nicht Gauß weiß, was ein vollkommen strenger mathematischer Beweis ist, sondern wir kennen es erst von ihm. Wenn Gauß sagt, er habe etwas *bewiesen*, ist es mir sehr wahrscheinlich, wenn Cauchy es sagt, ist eben so viel pro als contra zu wetten, wenn Dirichlet es sagt, ist es *gewiß* [...]".[1193]

VI.4.4 Lagranges zweiter Beweis

Einige Monate vor seinem Tod unternahm Lagrange einen weiteren Beweisversuch für das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten und gab damit auch einen letzten Beweis seines mechanischen Euklidianismus. Er findet sich in der zweiten Auflage seiner *Théorie des fonctions analytiques* von 1813.[1194]

Wieder beginnt Lagrange mit dem Prinzip der Flaschenzüge als Gedankenexperiment. Diesmal verwendet er die Flaschenzüge jedoch nicht als Ersatz für Kräfte, die von *außen* auf verschiedene Massen wirken, sondern sie repräsentieren die *inneren* Verbindungen oder Einschränkungen, denen die Massen unterliegen. Technisch ist Lagranges zweite Konstruktion wesentlich aufwendiger als die erste, und entsprechend verhält es sich mit Jacobis zweiter Widerlegung. Jetzt wird allerdings der Übergang

[1190] Lagrange 1853/55 I, S. 74.

[1191] Mit Recht, wie später auch von Joseph Bertrands Anmerkung zu Lagranges Argument in der dritten Auflage der *Méchanique Analitique* (1853) bestätigt wird. Für den Fall des Gleichgewichts hält Lagrange es für „bewiesen", daß die Kräfte *P, Q, R* als konstant angenommen werden können. Bertrand kritisiert diesen Schritt völlig zu Recht, weil er „im Gegenteil das Wesen der Funktion [*Π*] vollständig verändert" (Lagrange 1853/55 I, S. 75).

[1192] Jacobi 1996, S. 24.

[1193] Brief von Jacobi an A. von Humboldt vom 21. Dez. 1846 (Pieper 1987b, S. 99).

[1194] S. Lagrange 1813, S. 350-357 bzw. Lagrange 1847, S. 377-385.

von der Statik zur Dynamik, der bisher nebensächlich war, wichtig. Um nur die Leitideen herauszustellen, beschränke ich meine Analyse an dieser Stelle auf Lagranges Diskussion eines mechanischen Systems mit zwei Massen und nur einer einschränkenden Bedingung[1195], obwohl alle Überlegungen auch auf den allgemeinen Fall mit n Massen und m Einschränkungen ($m < 3n$) ausgeweitet werden können.[1196] Lagranges Beweis kann in drei Schritten rekonstruiert werden, von denen der zweite von besonderer Bedeutung für Jacobis Diskussion ist:

(L2a) Gegeben seien zwei ruhende Massen M und N mit den Koordinaten x_1, y_1, z_1 und x_2, y_2, z_2. Wenn diese Massen einer zeitunabhängigen Wechselwirkung oder Zwangsbedingung ausgesetzt sind, kann dies durch eine Funktion ausgedrückt werden:[1197]

$$u(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = 0. \qquad (6)$$

Nimmt man entweder N oder M als unbeweglich an, bestimmt (6) eine zweidimensionale Fläche für die verbleibende Masse N bzw. M. Lagrange will nun zeigen, daß die entsprechende Zwangskraft senkrecht zu dieser Fläche steht, d.h., daß die auf M und N wirkende Kraft auf folgende Weise ausgedrückt werden kann:

Kraft auf M:

$$\left(\lambda\frac{\partial u}{\partial x_1}, \lambda\frac{\partial u}{\partial y_1}, \lambda\frac{\partial u}{\partial z_1}\right);$$

(7)

Kraft auf N:

$$\left(\lambda\frac{\partial u}{\partial x_2}, \lambda\frac{\partial u}{\partial y_2}, \lambda\frac{\partial u}{\partial z_2}\right).$$

Der Lagrange-Multiplikator λ ist hier zunächst als ein *unbestimmter* Faktor aufzufassen.

Wir werden in *(L2c)* sehen, daß Lagrange die besondere mathematische Form *(7)* für seinen Beweis braucht. Hier ist ein allgemeinerer Aspekt von *(7)* zu betonen: Die Fähigkeit, die Zwangskraft vermöge *(7)* durch die Einschränkung *(6)* selber auszudrükken, ist von großer Wichtigkeit für Lagranges Ansatz, weil es eine *Lücke* zwischen der rein mathematischen Darstellung strenger, geometrisch gefaßter Zwangsbedingungen

[1195] Vgl. Lagrange 1847, S. 379-383.
[1196] S. ebd., S. 383-385.
[1197] Ebd., S. 382.

auf der einen Seite und physikalischen Wirkungen, die durch Kräftefunktionen (z.B. durch das Gravitationsgesetz) gegeben sind, auf der anderen Seite gibt. Gleichung *(7)* soll diese Lücke *überbrücken*, und zwar in dem Sinne, daß sie die Größe der Kräfte liefert, die mit bestimmten geometrischen Zwangsbedingungen korrespondieren, und auf diese Weise die Zwangskräfte mit äußeren physikalischen Kräften vergleichbar machen. Auf diesen wesentlichen Punkt werde ich später zurückkommen.

(L2b) Um die Darstellung der Zwangskräfte durch *(7)* möglich zu machen, nahm Lagrange an, daß Einschränkung *(6)* durch einen idealen Flaschenzug ersetzt werden kann, wobei das nicht ausdehnbare Seil am Punkt M befestigt, m mal um M und eine feststehende Rolle A gewickelt wird, dann zu einer weiteren feststehenden Rolle B geht, dann n mal um B und den zweiten Punkt N gewickelt und schließlich in N befestigt wird.

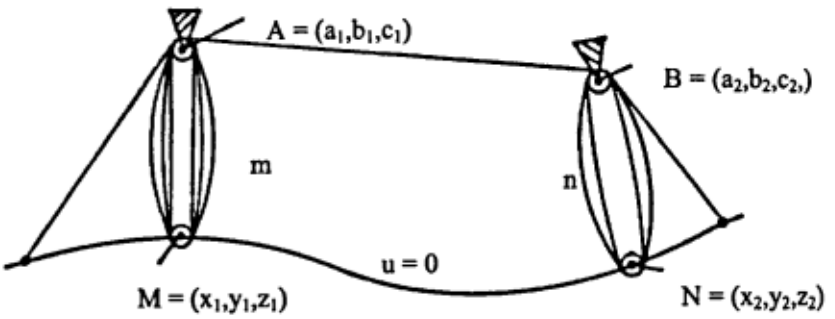

Abb. 3: Lagranges zweiter Beweis

Die Nicht-Ausdehnbarkeit des Seils kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:[1198]

$$f = m\overline{AM} + n\overline{BN} - d = 0, \qquad (8)$$

mit einer bestimmten Längenkonstante d. Die Funktion f nimmt dann die Form an

$$f = m\sqrt{(x_1-a_1)^2+(y_1-b_1)^2+(z_1-c_1)^2} + n\sqrt{(x_2-a_2)^2+(y_2-b_2)^2+(z_2-c_2)^2} - d \qquad (9)$$

[1198] S. Lagrange 1847, S. 382.

und hat alle Eigenschaften, die Lagrange für seine Zwecke braucht. Man kann leicht sehen, daß die Flaschenzugkräfte durch eine partielle Ableitung aus f ausgedrückt werden können, wie für u in *(7) angenommen*. Aber ist es legitim, die Zwangsfunktion u durch die Flaschenzugfunktion f zu ersetzen?

Die Funktion f enthält neun willkürliche Konstanten: die sechs Koordinaten der Punkte A und B, die Längenkonstante d und die zwei Windungszahlen m und n. Offensichtlich zwingt die besondere Form von f ihren Ableitungen diese zwei Bedingungen auf:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y_1}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial z_1}\right)^2=m^2;\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y_2}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial z_2}\right)^2=n^2. \quad (10)$$

Also bleiben sieben Konstanten. Um u für f einzusetzen, müssen die in Verbindung stehenden Flächen einander *berühren*. Diese geometrische Anforderung ist erfüllt, wenn die ersten partiellen Ableitungen von f und u identisch sind:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial f}{\partial x_1}=\frac{\partial u}{\partial x_1},\quad \frac{\partial f}{\partial y_1}=\frac{\partial u}{\partial y_1},\quad \frac{\partial f}{\partial z_1}=\frac{\partial u}{\partial z_1},\\ &\frac{\partial f}{\partial x_2}=\frac{\partial u}{\partial x_2},\quad \frac{\partial f}{\partial y_2}=\frac{\partial u}{\partial y_2},\quad \frac{\partial f}{\partial z_2}=\frac{\partial u}{\partial z_2}.\end{aligned} \quad (11)$$

Diese sechs „Bedingungen des Kontakts", wie Lagrange sie nennt[1199], können immer erfüllt werden, wenn man die sieben verschiedenen Konstanten geeignet anpaßt. Es ist daher zulässig, u durch f zu ersetzen. Die Flaschenzugkräfte erfüllen die Orthogonalitätsbedingung *(7)* dank der besonderen Form *(9)* der Funktion f. Folglich ist Bedingung *(7)* gültig für beliebige Funktionen u, die durch *(6)* gegeben sind. Der Koeffizient λ in *(7)* ist die verbleibende der neun unbestimmten Konstanten und kann physikalisch als die Spannung des Flaschenzugseils interpretiert werden.

(L2c) Im Falle des Gleichgewichts werden diese einschränkenden Kräfte für *jeden einzelnen* Massenpunkt durch freie Kräfte von außen ausgeglichen. Wir können daher in Übereinstimmung mit *(7)* jede Komponente der freien Kräfte durch die entsprechende partielle Ableitung der Funktion u ersetzen. Um das gesamte Moment des mechanischen Systems, das wir für unseren Ausdruck des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten *(2)* benötigen, zu bekommen, müssen wir die Produkte dieser partiellen Ablei-

[1199] Ebd., S. 382.

tungen und der willkürlichen Verschiebungen, ausgedrückt durch die δx_i..., aufsummieren. Das Ergebnis ist:

$$\sum_{i=1}^{2}\left(X_i\delta x_i + Y_i\delta y_i + Z_i\delta z_i\right) = \lambda\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x_i}\delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y_i}\delta y_i + \frac{\partial u}{\partial z_i}\delta z_i\right) = 0. \qquad (12)$$

Die letzte Gleichung ist gültig, weil die Verrückungen δx_i ,... kompatibel mit der Einschränkung *(6)* sein müssen, was zur Folge hat, daß die totale Ableitung von u verschwindet ($du = 0$).

Gleichung *(12)* stellt den analytischen Ausdruck für das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten *(2)* für zwei Massen und eine Zwangsbedingung dar. Sie zeigt auch, daß die Argumentation für eine beliebige Anzahl von Massenpunkten n und Zwangsbedingungen m ($u_1 = 0$, ..., $u_m = 0$) Gültigkeit hat, weil sie mit m Flaschenzügen (mit $du_1 = 0$, ..., $du_m = 0$) wiederholt werden kann und dasselbe Ergebnis *(2)* zeitigt. Lagrange beendet daher seinen zweiten Versuch zufrieden mit der Bemerkung, daß „das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten zu einer natürlichen Folge der Formeln wird, die die Kräfte durch die Bedingungsgleichungen ausdrücken"[1200].

VI.4.5 Jacobis zweite Widerlegung

In seiner historischen Analyse des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten von 1904 beschreibt Richard Lindt Lagranges zweiten Beweis noch als „*exakt* und *allgemein*"[1201]. Jacobi allerdings hätte beide Attribute zurückgewiesen: Seine Kritik bezieht sich hauptsächlich auf den zweiten Schritt *(L2b)*, d.h. auf die Ersetzung der Zwangsfunktion u durch die Flaschenzugfunktion f. Um zu zeigen, daß Lagrange einen Fehler begeht, konzentriert er sich auf den Punkt, den er als schwächsten in Lagranges gesamter Mechanik erachtet: [1202]

> Man macht es sich in der Regel etwas leicht, wenn man von der Statik zur Dynamik übergeht, und in der That, wenn man in der mécanique analytique liest, sollte man glauben, daß sich die Formeln der Bewegung aus denen des Gleichgewichts von selbst verstehen. Eigentlich läßt sich auf die Bewegung aber gar nicht schließen, wenn man die Gesetze nur für den Fall kennt, wo die Körper in Ruhe sind. Es sind hier gewisse probable Prinzipien, die von dem Einen ins Andere überführen, und es kommt wesentlich darauf an, daß man nur weiß, daß man die Sachen nicht mathematisch bewiesen hat, daß man hier Etwas annimmt.

[1200] Ebd., S. 385.
[1201] Lindt 1904, S. 163.
[1202] Jacobi 1996, S. 59.

Dieses Argument bezieht sich auf Lagranges Behauptung, einen *mathematischen* Beweis für dieses grundlegende *mechanische* Prinzip gegeben zu haben. Jacobi weist diese Behauptung aus mathematischen und wissenschaftstheoretischen Gründen zurück. Ich beschränke mich zunächst auf die mathematische Diskussion, die auf die Reichweite von Lagranges Methode der Multiplikatoren im Zusammenhang mit dem zweiten ‚Beweis' abhebt. Wie oben gezeigt (für $m = 1$), werden diese Multiplikatoren als unbestimmte Koeffizienten eingeführt, aber sie haben eine besondere *mechanische* Bedeutung: Sie drücken aus, wie die Zwangsbedingungen das System beeinflussen, oder, physikalischer formuliert, sie sind proportional zu der Kraft, die eine Zwangsbedingung ausübt. Wir können eine Zwangsbedingung $u = 0$ für eine Masse mit den Koordinaten (x, y, z) eliminieren, wenn wir eine Kraft

$$-\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad (13)$$

anbringen, in der das Minuszeichen anzeigt, daß diese Kraft eine der Zwangskraft *entgegengesetzte* Richtung hat. In algebraischen Begriffen heißt dies einfach, daß diese Kraft von beiden Seiten der Gleichung subtrahiert wird. „Es ist", sagt Jacobi, „das Wesen der [Lagrangeschen] analytischen Mechanik, daß einfache algebraische Operationen mechanischen Betrachtungen entsprechen. Diesem Ersetzen der Verbindungen durch Kräfte entspricht das algebraische Herüberschaffen von Termen auf die andere Seite der Gleichungen".[1203] Um diese Ersetzung durchzuführen, ist es offensichtlich erforderlich, die Lagrangeschen Multiplikatoren des Systems zu bestimmen. Jacobi ist hauptsächlich mit den Problemen befaßt, *wie* diese Bestimmung erfolgt, wenn man von der Statik zur Dynamik übergeht, und *ob* diese Vorgehensweise mit Lagranges zweitem Beweis in Einklang steht. Seiner ausladenden algebraischen Diskussion folgend, werde ich mich nun dem allgemeinen Fall eines Systems mit n Punkten und m Einschränkungen ($m < 3n$) zuwenden und zunächst einige Formeln zusammenstellen.[1204]

[1203] Ebd., S. 54.

[1204] Es ist wichtig, hierbei zu beachten, daß die Buchstaben a, b, c in den folgenden Bezeichnungen mit Jacobis drei Schritten *(J2a)*, *(J2b)*, *(J2c)*, die weiter unten beschrieben werden, korrespondieren. Gleiche Nummern beziehen sich auf die entsprechenden Formeln in den drei verschiedenen Schritten (daher erscheinen auch nicht alle Nummern in allen Schritten). Um der Kürze willen wird nun nicht mehr Lagranges und Jacobis Cartesische, sondern eine kanonische Form verwendet: Die Koordinaten der n Massenpunkte heißen $x_1, \ldots, x_{3n}$ mit den Massen $m_1, \ldots, m_{3n}$ (wobei $m_1 = m_2 = m_3$ etc.) und den Kräftekomponenten $X_1, \ldots, X_{3n}$. Die Indizes i und j gehen stets von 1 bis $3n$ und die Indizes k und l von 1 bis m ($m < 3n$). Um die Parallele zwischen Statik und Dynamik transparenter zu machen, werde ich das dynamische Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten weiter in der Form *(1)* verwenden, obwohl Lagrange die Beschleunigungskräfte und die äußeren Kräfte als Summe schrieb (vgl. Lagrange 1853/55 I, S. 274) und obwohl Jacobi

Die unabhängigen Zwangsbedingungen und ihre ersten beiden Ableitungen nach der Zeit, die später benötigt werden, sind gegeben durch[1205]

$$u_k = 0 \quad (1 \le k \le m), \tag{14a}$$

$$\frac{du_k}{dt} = \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \dot{x}_i, \tag{14b}$$

$$\frac{d^2 u_k}{dt^2} = \sum_{i,j=1}^{3n} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j} \dot{x}_i \dot{x}_j + \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \ddot{x}_i. \tag{14c}$$

Nach Lagrange können diese Zwangsbedingungen in das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten integriert werden (*(1)* und *(2)*), indem die Variationen δx_i, ... entsprechend *(14a)* eingeschränkt werden, aber auch, indem die entsprechenden Variationen — multipliziert mit den Lagrangeschen Multiplikatoren — zu dem gesamten Moment addiert werden.[1206] In diesem letzten Fall erhält die statische Form *(2)* des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten folgende Form:[1207]

$$\sum_{i=1}^{3n} X_i \delta x_i = \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \delta u_l. \tag{15a}$$

Im dynamischen Fall verändert sich *(1)* folgendermaßen:[1208]

$$\sum_{i=1}^{3n} \left(X_i - m_i \ddot{x} \right) \delta x_i = \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \delta u_l. \tag{15c}$$

Im Falle des Gleichgewichts liefert *(15a)* wiederum diese *3n* Gleichungen des Ruhezustands:[1209]

die Reihenfolge der Differentiale in *(1)* umkehrte (vgl. Jacobi 1996, S. 6). Eine willkommene Folge meiner Schreibweise ist, daß von Formel *(15a)* an alle zu den Einschränkungen gehörenden Terme auf der *rechten* Seite der Gleichungen auftauchen. Dies verändert natürlich keines von Jacobis Argumenten.

[1205] S. Jacobi 1996, S. 41 und Szabó 1979, S. 84f.

[1206] Vgl. Lagrange 1853/55 I, S. 79.

[1207] S. Jacobi 1996, S. 50.

[1208] S. ebd., S. 43, zu *(15b)* vgl. *(J2b)* unten.

[1209] Vgl. ebd., S. 54.

$$X_i = \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i}. \qquad (16a)$$

Mutatis mutandis führt *(15c)* zu diesen *3n* Gleichungen der Bewegung:[1210]

$$X_i - m_i \ddot{x} = \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i}. \qquad (16c)$$

Nach diesen Vorbereitungen wenden wir uns Jacobis eigentlicher Argumentation zu. Wie in Lagranges Diskussion ist es zweckmäßig, dabei drei Schritte zu unterscheiden:

(J2a) Wir betrachten zunächst den Fall des *Gleichgewichts*, d.h. das mechanische System unterliegt den gegebenen äußeren Kräften X_i und *m* gegebenen Zwangsbedingungen *(14a)* und ist im Ruhezustand; die Position der *n* Massenpunkte muß bestimmt werden.[1211] Dies stellt kein Problem für Lagranges Multiplikatormethode dar: *3n* + *m* Gleichungen *(16a)* und *(14a)* sind vorhanden, um die *m* Lagrangeschen Multiplikatoren λ_l und die *3n* Koordinaten der Massenpunkte zu bestimmen. Wenn diese *3n* +*m* Gleichungen einander nicht widersprechen, ist das Problem immer lösbar. Nachdem λ_l bestimmt ist, können wir das System als ein freies interpretieren, indem wir auf beiden Seiten von *(16a)* die Summe aller Kräfte der Zwangsbedingungen mit negativen Vorzeichen addieren:[1212]

$$X_i - \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i} = 0. \qquad (17a)$$

Insbesondere stellen wir fest, daß die Richtung der Zwangskräfte immer durch die Zwangsbedingung selber bestimmt ist (d.h. orthogonal zu der entsprechenden Fläche ist), während ihre Größen (Beträge der λ_l) von den Zwangsbedingungen und den äußeren Kräften abhängen.[1213]

Wie kann nun diese einfache Methode auf ein *dynamisches* System übertragen werden? Diese Frage steht im Mittelpunkt von Jacobis weiterer Diskussion.[1214] Wieder liefert hier das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeit *3n* Gleichungen, aber diese sind nun *Differential*gleichungen der Bewegung zweiter Ordnung *(16c)*. Wenn wir anneh-

[1210] S. ebd., S. 44; zu *(16b)* vgl. wiederum *(J2b)* unten.
[1211] Vgl. ebd., S. 48.
[1212] S. ebd., S. 54-56.
[1213] Vgl. ebd., S. 46.
[1214] S. ebd., S. 54-92.

men, daß das System *(16c)* lösbar ist und auch tatsächlich gelöst ist, verbleibt ein schwieriges Problem — zumindest wenn wir Lagranges Grundgedanken ernst nehmen, daß Zwangsbedingungen immer durch entsprechende Kräfte ersetzt werden können: Wir müssen die *6n* beliebigen Konstanten, die zur Lösung von *(16c)* gehören, in Übereinstimmung mit *(15)* bestimmen. In Jacobis Worten: „[...] wenn man Alles schon vollständig integrirt hat, muß man diese Aufgabe lösen".[1215] Physikalisch gesprochen geht es darum, die Ausgangspositionen und die Geschwindigkeiten der Massenpunkte in solcher Weise zu wählen, daß die Bewegung selbst mit den Zwangsbedingungen für alle späteren Zeiten übereinstimmt.

(J2b) Jacobi fügt nun ein *Intermezzo* ein, das als Schritt interpretiert werden kann, die Lücke zwischen *(15a)* und *(15c)* und ihren Lösungen *(16a)* und *(16c)* zu überbrükken. Was passiert, wenn ein plötzlicher Impuls mit endlicher Größe, unvereinbar mit den Zwangsbedingungen, auf das System im Ruhezustand einwirkt? Die wirkliche Bewegung der Massenpunkte muß natürlich entsprechend den Zwangsbedingungen modifiziert werden.[1216] Wenn a_i diese „materiell, mechanisch gegebenen" Impulse zu $t = 0$ sind und wenn $\dot{x}_i$ die entsprechenden Geschwindigkeiten, die die Massenpunkte des Systems tatsächlich annehmen, sind, ist ihr Verhältnis (analog zu *(15c)* und *(16c)*) durch die folgenden Gleichungen gegeben:[1217]

$$\sum_{i=1}^{3n}(X_i - m_i\dot{x}_i)\delta x_i = \sum_{l=1}^{m}\lambda_l \delta u_l, \qquad (15b)$$

$$a_i - m_i\dot{x}_i = \sum_{l=1}^{m}\lambda_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i}. \qquad (16b)$$

Gleichung *(16b)* zeigt, daß ein gegebener Impuls a_i in den Impuls $m_i\ \dot{x}_i$ zerlegt wird, der tatsächlich vom System angenommen wird, und den Impuls auf der rechten Seite, der von den Zwangsbedingungen aufgenommen wird.

Um die Lagrangeschen Multiplikatoren λ_l und folglich die wirklichen Impulse zu bestimmen, kann man die Geschwindigkeiten $\dot{x}_i$ in *(14b)* vermöge *(16b)* ersetzen. Das Ergebnis ist:[1218]

[1215] Ebd., S. 60.

[1216] Jacobi hat diesen Punkt bereits in seiner *Dynamik* von 1842/43 behandelt, aber er verwendete ihn nicht in seiner Diskussion des zweiten Lagrangeschen Beweises. S. Jacobi 1884, S. 54-56.

[1217] Vgl. Jacobi 1996, S. 61.

[1218] S. ebd., S. 63.

$$\sum_{i=1}^{3n}\frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{1}{m_i}\left(a_i-\sum_{l=1}^{m}\frac{\partial u_l}{\partial x_i}\right)=\sum_{i=1}^{3n}\frac{1}{m_i}a_i\frac{\partial u_k}{\partial x_i}-\sum_{l=1}^{m}\lambda_l\frac{1}{m_i}\frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{\partial u_l}{\partial x_i}=0$$

oder

$$b_k=\sum_{l=1}^{m}A_{kl}\lambda_k, \qquad (17b)$$

wobei

$$b_k:=\sum_{i=1}^{3n}\frac{1}{m_i}a_i\frac{\partial u_k}{\partial x_i}, \quad A_{kl}:=\sum_{i=1}^{3n}\frac{1}{m_i}\frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{\partial u_e}{\partial x_i} \qquad (18b)$$

Jacobi zeigte nun in einem detaillierten algebraischen Exkurs[1219], daß die Multiplikatoren λ_l *immer* durch *(17b)* bestimmt werden können, wenn und nur wenn die m Einschränkungen unabhängig sind:[1220]

$$\det(A_{kl})\neq 0. \qquad (19b)$$

Hier hängen die *Multiplikatoren* λ_l von den Zwangsbedingungen aufgrund der ersten partiellen Ableitungen in *(14b)* und von den Anfangsimpulsen a_i ab. Wenn die Multiplikatoren durch *(17b)* ermittelt sind, können die zu den Zwangsbedingungen (rechte Seite von *(16b)*) gehörenden Impulse ebenso bestimmt werden. In Analogie zu *(17a)* kann das mechanische System durch Subtraktion dieser Komponenten als ein freies behandelt werden:[1221]

$$a_i-m_i\dot{x}_i-\sum_{l=1}^{m}\lambda_l\frac{\partial u_l}{\partial x_i}=0. \qquad (20b)$$

Lagranges Idee, die *Zwangsbedingungen* eines mechanischen Systems vermittels seiner *Methode* der Multiplikatoren zu eliminieren, funktioniert also auch in diesem *Intermezzo*.[1222] Die beschriebene Vorgehensweise garantiert, daß die willkürlichen Konstanten

[1219] Vgl. ebd. S. 63-79.
[1220] Ebd., S. 79.
[1221] Ebd., S. 81.
[1222] Vgl. ebd., S. 82.

im System der Differentialgleichungen *(15c)* angemessen bestimmt werden können, und dies ist eine *conditio sine qua non* zur Bewältigung des dynamischen Problems selbst.

(J2c) Im Falle der *Dynamik* unterliegen die Massenpunkte nicht nur Zwangsbedingungen *(14a)*, sondern auch kontinuierlich wirkenden Kräften X_i gemäß *(15c)*. Es ist nun keineswegs offensichtlich und muß daher bewiesen werden, daß „die wirklich bewegenden Kräfte", d.h. die $m_i \ddot{x}_i$ in *(15c)*, „die Bedingungen des Systems nicht verletzen [dürfen]"[1223]. Die Vorgehensweise ist analog zu *(J2b)*, wobei *(15b)* und *(16b)* durch *(15c)* und *(16c)* ersetzt werden müssen. Da die Beschleunigungen in *(16c)* mit den Zwangsbedingungen übereinstimmen müssen, können wir die $\ddot{x}_i$ in *(14c)* mit Hilfe von *(16c)* ersetzen und bekommen:[1224]

$$\sum_{i,j=1}^{3n} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j} \dot{x}_i \dot{x}_j + \sum_{i=1}^{3n} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \left(X_i - \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \right)$$
$$= \sum_{i,j=1}^{3n} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j} \dot{x}_i \dot{x}_j + \sum_{i=1}^{3n} \frac{1}{m_i} X_i \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \sum_{l=1}^{m} \lambda_l \sum_{i=1}^{3n} \frac{1}{m_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_i} = 0.$$

oder

$$U_k + c_k = \sum_{l=1}^{m} A_{kl} \lambda_l. \qquad (17c)$$

Die A_{kl} sind immer noch dieselben wie in *(18b)*, aber U_k und c_k sind gegeben durch

$$U_k := \sum_{i,j=1}^{3n} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j} \dot{x}_i \dot{x}_j, \quad c_k := \sum_{i=1}^{3n} \frac{1}{m_i} X_i \frac{\partial u_k}{\partial x_i}. \qquad (18c)$$

Gleichung *(17c)* liefert wie *(17b)* ein System von Gleichungen zur Bestimmung der Multiplikatoren λ_l. Wieder ist ihre Bestimmung möglich, sofern die Bedingungen unabhängig sind, d.h., sofern *(19b)* erfüllt ist. Die neue Funktion U_k deutet jedoch auf einen wichtigen Unterschied zwischen *(17b)* und *(17c)* hin und dieser verändert, wie Jacobi sagt, den „ganzen Charakter" des Problems[1225].

[1223] Ebd., S. 83.
[1224] S. ebd., S. 85f.
[1225] Ebd., S. 84.

U_k ist eine homogene Funktion zweiter Ordnung der Geschwindigkeiten $\dot{x}_i$, und ihre Koeffizienten sind die zweiten Ableitungen der Bedingungsfunktionen *(14a)*. Folglich werden die Multiplikatoren λ_l von diesen *zweiten* Ableitungen abhängen, und sie werden ebenfalls homogene Funktionen der Geschwindigkeit sein. Aber Lagrange hat in seinem zweiten Beweis des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten lediglich Annäherungen *erster* Ordnung gefordert, als er die Bedingungsfunktionen u_i durch die Flaschenzugfunktionen f_i ersetzt hat. Es wurden ihren zweiten Ableitungen *keine* wie auch immer gearteten Bedingungen auferlegt:[1226]

Hierdurch entsteht ein Vorwurf, den man diesem Übergang von der Statik zur Dynamik machen kann. Es ist beim Princip der Statik gar nicht die Rede davon, daß die Punkte schon in Bewegung begriffen sind, und es muß eine eigene Untersuchung, ein eigenes Princip vorausgeschickt werden, darüber, wie die Geschwindigkeiten beschaffen sind, respective sich modifiziren werden. [...] Bei den Gleichungen, die wir jetzt gebildet haben, kommen die zweiten partiellen Differentialquotienten der Bedingungen u vor, aber bei den Betrachtungen, durch welche man diese Sätze zu beweisen sucht, und deren sich namentlich Lagrange in seiner théorie des fonctions bedient, wird ohne Weiteres den gegebenen Bedingungen ein anderes System [von] Bedingungen substituirt, welches weiter keiner Beschränkung unterworfen wird, als daß die neuen Bedingungen sowohl für den Ort, den die materiellen Punkte zu einer gewissen Zeit einnehmen, als auch in den ersten Differentialquotienten dieser Produkte mit den alten übereinstimmen [...].

Es ist sinnvoll, zwei Ebenen in Jacobis Analyse zu unterscheiden: eine technische und eine grundlegende. Auf der technischen Ebene kritisiert er Lagranges Ersetzung von Bedingungsfunktionen durch Flaschenzugfunktionen als ungerechtfertigt, weil die Kontaktbedingungen *(11)* für diesen Zweck zu schwach sind. Auf der grundlegenden Ebene zieht er jedoch Lagranges gesamte Idee in Zweifel, daß man durch die Verwendung der Methode der Multiplikatoren ein System unter Zwangsbedingungen wie ein freies System behandeln könne. Im dynamischen Fall gibt es kein Äquivalent zu den Formeln *(17a)* oder *(20b)*, es sei denn, wir *führen* eine solche Formel per Analogie als ein „neues Princip" in der Form von *(15c)* bzw. *(16c) ein.*[1227] Die Interpretation dieser Gleichungen mit bestimmten Multiplikatoren λ_l macht deutlich, warum dieses Prinzip wirklich neu ist und warum „etwas Conventionelles"[1228] beim Übergang von der Statik zur Dynamik angenommen werden muß: Gleichung *(16c)* bedeutet geometrisch, daß der Unterschied zwischen den äußeren Kräften X_i und den „wirklich bewegenden Kräften" $m_i \ddot{x}_i$ orthogonal zu den Zwangsbedingungen ist, so wie es die Kräfte X_i für ruhende Massenpunkte in *(16a)* sind: „Das ist aber ein Princip, von dem in der Statik nicht die Rede sein kann [...]".[1229] Wie gezeigt wurde, hängen die λ_l von den Geschwindig-

[1226] Ebd., S. 86.
[1227] Vgl. ebd., S. 87f.
[1228] Ebd., S. 10.
[1229] Ebd., S. 87.

keiten der bewegenden Körper ab, und es ist keineswegs evident, daß wir auch für den dynamischen Fall Orthogonalität annehmen sollten.[1230]

Jacobis Kritik bestätigt die physikalische Intuition: Während quasi-geometrische Zwangsbedingungen legitimerweise für Körper im Ruhezustand, die bestimmten Kräften unterliegen, verwendet werden können, führen sie zu Schwierigkeiten bei Körpern in Bewegung, die aufgrund ihrer Bewegung auf die physikalischen Systeme, die die Zwangsbedingungen erzeugen, *zurückwirken*. Jacobi faßt daher seine Kritik mit der Bemerkung zusammen, daß Lagrange in seiner Behandlung der dynamischen Probleme zwei *verschiedene* mechanische Bedingungen durcheinander gebracht hat — physikalische Kräfte, die von außen wirken, und mathematisch gegebene Bedingungen —, die in Wirklichkeit „etwas ganz Heterogenes"[1231] seien. Jacobis Argumentation selber *gründet* dabei aber zunächst keineswegs auf physikalischer Intuition, sondern auf seiner *mathematischen Analyse* von Bewegungen unter Zwangsbedingungen. Offensichtlich ging es ihm darum, Lagranges Konzeption der analytischen Mechanik mit den eigenen Waffen zu schlagen, d.h. mit *mathematischem Denken*. Er zeigt vom ‚Standpunkt der reinen Mathematik', daß dies bei Lagrange mit physikalischen Annahmen vermengt wird und daher das nicht leisten kann, was es leisten sollte — die Vermittlung ‚axiomatischer' Evidenz und Sicherheit.

[1230] Vgl. ebd., S. 88.
[1231] Ebd., S. 87.

VI.5 Zusammenfassung und Bewertung

Jacobis detaillierte Widerlegungen von Lagranges vermeintlichen Beweisen, wie ich sie im letzten Teil in komprimierter Form darzustellen versuchte, mögen auf den ersten Blick als ‚technische Fingerübungen' eines brillanten Mathematikers ohne grundsätzliche Bedeutung erscheinen. Aber das Gegenteil ist der Fall: Sie dienen der praktischen, analytisch-algebraischen Ausführung der Kritik am mechanischen Euklidianismus Lagranges, die sich *komplementär* zu Jacobis theoretischer, konventionaler Sicht auf die Mechanik verhält: Zwar kann der Euklidianismus als wissenschafts*theoretische* Position nicht widerlegt werden, denn es ist immer möglich, an der Hoffnung festzuhalten, die vermeintlich jeweils sicheren Axiome „aus einer tieferen Schicht evidenter Grundlagen ableiten zu können"[1232]. Für den Prozeß der Genese einer neuen, nichteuklidianistischen Auffassung ist es jedoch wichtig, daß die Begründungsdefizite des herrschenden ‚(Gummi-)Euklidianismus' aufgezeigt und dabei vorgenommenen ‚Evidenzdehnungen' offengelegt werden.

Eben dies leistet Jacobis Kritik an Lagranges Bemühungen, das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten zu beweisen. Jacobi spricht sich dabei nicht pauschal gegen jeden Versuch aus, ein solches Prinzip auf andere mathematische Gesetze der Mechanik zurückzuführen — so billigt er etwa einem Beweisversuch Poinsots durchaus das Verdienst zu, „das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten anschaulich zu machen"[1233]. Aber eine gewisse Anschaulichkeit gewährt nicht länger die mathematische Sicherheit, die Lagrange, de Prony, Fourier, A.-M. Ampère, A.A. Cournot und viele andere Mathematiker diesem Prinzip zubilligen wollten. Jacobi kennt diese Tradition des ‚Gummi-Euklidianismus', wie seine *Analytische Mechanik* zur Genüge zeigt, und es geht ihm darum, diese Tradition durch *mathematische* Widerlegungen angeblicher *mathematischer* Beweise zu beenden. Insbesondere zeigt er, daß die ‚Zurückführung' eines Bewegungsprinzips auf die Statik — wie wir sahen, in der rationalen Mechanik ein häufig praktiziertes Beweisverfahren[1234] — eine mathematisch unzulässige *Trivialisierung* darstellt.

Die Mathematik, in der Tradition der KMN ein Instrument im Dienste des Essentialismus, Prinzipiencertismus und der Wahrheitsvermittlung ‚nach unten'[1235], wird hier zu einem Instrument der *Kritik* an der KMN selbst: Sie wendet sich *gegen* den „Euklid-Mythos"[1236] innerhalb der Mechanik, der zu Lagranges Zeiten im wesentlichen nur

[1232] Lakatos 1982 II, S. 30.

[1233] Jacobi 1996, S. 93; vgl. S. 96, Anm. 151. S. hierzu auch Poinsot 1806, 1838 und 1846. Ausführlich wird Poinsots Mechanik dargestellt in Bailhache 1975.

[1234] Vgl. Kap. IV, Teil 2.6, insbes. die Auführungen zum Typus *(E2)*.

[1235] Vgl. die verschiedenen in Kap. II, Teil 2.1 aufgeführten ‚Funktionen der Mathematik'.

[1236] „Was ist der Euklid-Mythos? Das ist der Glaube, daß die Bücher des Euklid Wahrheiten über das Universum enthalten, die klar und unzweifelhaft sind. Von evidenten Wahrheiten aus-

mehr von der *Geschichte*, von dem *Glauben* daran, *die* mathematische Naturordnung bereits erfaßt zu haben, und vor allem von der formalen und deduktiven *Praxis* der Mechanik selbst getragen wurde: „[...] it took a long time for scientists to realize that the hypothetico-deductive inductive method of science was epistemologically different from the prima facie similar deductive method of mathematics; and that, in properly imitating the deductive form of Euclid's system, they were not *ipso facto* taking over his deductive method of proof".[1237] Der (späte) *Übergang* von Lagranges ‚Gummi-Euklidianismus' zu Jacobis ‚konventionaler' Auffassung der Mechanik bestätigt Braithwaites Worte für jene empirische Disziplin, die der Geometrie traditionell am nächsten stand und am stärksten vom Euklidianismus angezogen wurde. Auf drei Gesichtspunkte sei dabei abschließend hingewiesen:

Erstens ist der fragliche Übergang unabhängig von der Entwicklung der *Geometrie*. Er vollzieht sich innerhalb der *analytischen* Tradition, und Jacobis mathematische Kritik an Lagrange ist daher auch eine analytisch-algebraische. Es verhält sich also nicht so, daß eine rationale Mechanik, die auf der euklidischen Geometrie basiert und diese als ihr Wissenschaftsideal reklamiert, durch die von Gauß, Lobatschewski, den beiden Bolyais und anderen geführte Diskussion um nichteuklidische Geometrien betroffen und so gleichsam in den Sog einer ‚externen' Grundlagenkrise hineingezogen worden wäre[1238]. *Gemeinsam* sind Geometrie und Mechanik die Implikationen, die mit der Ausbildung reiner Mathematik einhergehen — aber es gibt hier weder einen zeitlichen noch einen systematischen Vorrang der Geometrie.

Zweitens ist dieser Übergang *erfahrungsunabhängig* in dem Sinne, daß keine empirischen Anomalien festzustellen sind, die erkennbaren Einfluß auf Jacobis neue Haltung zu den Prinzipien der Mechanik genommen hätten. Solche Anomalien existierten durchaus; hier allen voran sei die seit dem späten 18. Jahrhundert bekannte anomale Perihelbewegung des Merkur genannt.[1239] Aber diese wurde in ‚Kuhnscher Manier' archiviert und erlangte erst im Zusammenhang mit der ‚Einsteinschen Revolution' wissenschaftstheoretische Bedeutung. Auch werden zu Jacobis Lebzeiten in der Elektrodynamik Zweifel an der Gültigkeit der Newtonschen Axiome laut.[1240] Ein Einfluß

gehend, führt Euklid über strenge Beweise zu einem Wissen, das sicher, objektiv und ewig ist" (Davis/Hersh 1986, S. 340).

[1237] Braithwaite 1960, S. 353.

[1238] Jacobi hat zwar fast alle Gebiete der Mathematik seiner Zeit bearbeitet, aber weder in seinen veröffentlichten, noch in den erhaltenen unveröffentlichten Schriften und Briefen findet sich irgendein Hinweis, daß er mit der Entwicklung der nichteuklidischen Geometrie vertraut war oder gar hierüber gearbeitet hat.

[1239] Eine ausführliche Untersuchung von Leverrier bis Einstein gibt Roseveare 1982.

[1240] Genauer gesagt: am dritten Axiom (‚actio = reactio'). Neben J.-M. Ampère ist hier besonders der Mathematiker H.G. Grassmann zu nennen; vgl. Kaiser 1981, insbes. S. 25-60. Grassmann wäre ein interessanter Fall für eine Studie, die die hier vertretene Jacobi-Rekonstruktion ergänzen könnte, denn seine Mathematikauffassung ist derjenigen Jacobis ähnlich. Zu seinem

auf Jacobi ist jedoch weder nachweisbar noch plausibel, da die *Analytische Mechanik* sich von vornherein auf ‚ponderable Körper' beschränkt. Man könnte eher umgekehrt argumentieren, daß Jacobis *Analytische Mechanik* gerade in eine Zeit bester *empirischer* Bewährung der Mechanik fällt, denn die aufsehenerregende Entdeckung des Neptun[1241] im Jahre 1846 stellt sich ja als ein geradezu ‚klassischer' Erfolgsfall einer empirischen Theorie dar: Eine vermeintliche Abweichung (nämlich in der Bahnbewegung des Uranus) führt zu Leverriers und Adams' kühner Hypothese (von der Existenz eines neuen Planeten, dessen Daten relativ genau vorhergesagt werden) und wird durch Galles und d'Arrests tatsächliche Beobachtung dieses Planeten – erst später wurde er Neptun genannt – in einen spektakulären Erfolg der Theorie verwandelt.[1242] Laplace sah in einem vergleichbaren ‚Umschlag' einer vermeintlichen Anomalie in einen empirischen Erfolg ‚das sicherste Zeichen der Wahrheit' der Theorie[1243]. Bei Jacobi jedoch gibt es keine empirische Verifikation, und es sind auch keine negativen empirischen Instanzen, die seine konventionale Sicht mechanischer Prinzipien veranlassen. Ich interpretiere dies als Stützung der hier vertretenen These, daß die Auflösung des mechanischen Euklidianismus zunächst ‚von oben' erfolgt und erfolgen muß.[1244]

Drittens ist zu vergegenwärtigen, daß Jacobis *Analytische Mechanik* hier gleichsam als eine ‚Singularität' präsentiert wurde. Es wäre wünschenswert, in einer breiteren *synchronen* Analyse, die auf das zweite Viertel des 19. Jahrhunderts zu konzentrieren

Versuch, eine Alternative zum Ampèreschen Wechselwirkungsgesetz zu geben, bemerkt W. Kaiser: „Eng verbunden mit dieser Alternative ist die Diskussion der Newtonschen Physik, wobei eine gewisse Abnutzung ihrer beispielgebenden Stellung unverkennbar ist" (ebd., S. 60).

[1241] Vgl. Teil 3.2, Zit. 1126 und Anm. 1127. Jacobi legte dieser Entdeckung zunächst nur eine geringe, ‚kalkulatorische' Bedeutung bei. Auf eine entsprechende Anfrage A. von Humboldts schreibt er: „Also, das möchten Sie wissen, welche Gedankenentwicklung vorhergehen mußte, damit 1846 Leverrier den transuranischen Planeten ausrechnen konnte? Du lieber Gott! hier heißt es nicht, Gedanken tief, sondern Hand flink. Hunderttausend Logarithmen aufschlagen, ohne sich zu verrechnen. Da hat Gauß keinen so schlechten, rein mathematischen Satz publicirt, der nicht die hundertfache *Gedanken*entwicklung erforderte" (C.G.J. Jacobi an A. von Humboldt vom 26. Dez. 1846; Pieper 1987b, S. 104f.). Einige Jahre später sah Jacobi in Leverriers Fund jedoch „eine durch tiefe Gedanken und jahrelange Arbeit eroberte Entdeckung, um welche unsere Nachkommen unsere Zeit beneiden werden"; insbesondere könne von einem Zufallsfund keine Rede sein: „Denen, welche die Entdeckung für zufällig ausgeben, weil die Übereinstimmung nicht größer ist, als es die Natur der Sache verstattet, wäre der Rath zu geben, auch solche zufällige Entdeckungen zu machen" (ebd., S. 106, Anm. 4). Der oben angeführte Beleg (Zit. 1126) spricht dafür, daß Jacobi in Leverriers Entdeckung durchaus eine wichtige *Bewährung* der zeitgenössischen Mechanik erblickte.

[1242] Für Einzelheiten s. wiederum Grosser 1970.

[1243] Vgl. Lakatos 1982 I, S. 234 mit Bezug auf Laplace 1835; konkret geht es um seine Lösung für den Fortschritt des Mondapogäums als ‚Bewahrheitung' der Newtonschen Gravitationstheorie.

[1244] S. Kap. II, Teil 2.4.

wäre, weitere Belege für die Auflösung des mechanischen Euklidianismus aufzuweisen. Ein solches Unterfangen stößt jedoch schnell an seine Grenzen, weil die Beschränkung auf den deutschsprachigen Raum (bedingt durch die Konzeption reiner Mathematik) *und* auf mathematisch avancierte Beiträge zu den Prinzipien der Mechanik über *Gauß* und *Jacobi* tatsächlich kaum hinausführt. Bei einem *diachronen* Längsschnitt, wie er hier vorgenommen wird, ist es indes möglich nachzuweisen, daß die *Analytische Mechanik* keine ‚Singularität' darstellt, sondern einen ‚Wendepunkt': Sie hat, obwohl unveröffentlicht, in der weiteren Mechanikentwicklung ihre Spuren hinterlassen, *bevor* von ‚phänomenalistischer' Seite Ernst Mach und andere den mechanischen Euklidianismus *erkenntnistheoretisch* unterminierten. Ein entsprechender Nachweis soll im folgenden Kapitel erbracht werden — *vorab* mag dieser Nachweis bereits als ein weiterer Grund dafür genommen werden, daß Jacobis ‚konventionaler' Mechanik, die von der Wissenschafts- und Wissenschaftstheoriegeschichte bis heute bedauerlicherweise durchgängig unbeachtet blieb, in diesem Kapitel so breiter Raum gewährt wurde.

VII Die weitere Hypothesierung und Konventionalisierung der Mathematischen Naturphilosophie bei B. Riemann und C. Neumann

VII.1 Einleitung: Riemann, Neumann und der Einfluß Jacobis

Daß „die Wahrheiten der Mechanik den gleichen Grad der Gewißheit, wie das mathematische Wissen selbst, erreicht haben"[1245], ist noch 1852 nicht allein die Auffassung des Münchner Physikers Philipp von Jolly, dem späteren Lehrer Max Plancks[1246], sondern lediglich *ein* Ausdruck der nach wie vor zu konstatierenden Dominanz der KMN. Zu diesem Zeitpunkt ist Jacobi bereits gestorben, aber die von Jacobi geübte Kritik mechanischer Prinzipien ist jenseits des Kreises der Hörer der *Analytischen Mechanik* unbekannt. Zu diesen Hörern gehört unter anderen[1247] der Mathematiker Wilhelm Scheibner, der sich später in Leipzig habilitiert. In seiner Disputation am 13. Juni 1853 verteidigt er vor der Philosophischen Fakultät die These: „Die Principien, welche zu den Grundgleichungen der Mechanik führen, sind conventioneller Natur,

[1245] Jolly 1852, S. V. Im vollen Wortlaut heißt es in Jollys Einleitung zu seinem Werk *Die Principien der Mechanik gemeinfaßlich dargestellt*, einem Sonderabdruck aus der verbreiteten „Neuen Encyklopädie für Wissenschaften und Künste": „Gerade an der Schärfe, Bestimmtheit und Kürze, mit welcher die mathematische Zeichensprache zu solchen Ableitungen, solchen Deductionen, wie kein anderes Hülfsmittel geschickt ist, ist es gelegen, daß einerseits die Wahrheit der Mechanik den gleichen Grad der Gewißheit, wie das mathematische Wissen selbst, erreicht haben, und daß andererseits ihre Ausbildung gleichen Schritt hielt mit der raschen Ausbildung, welche seit dem sechzehnten Jahrhundert [...] die mathematischen Forschungen erfahren haben" (ebd., S. V.).

[1246] Vgl. Planck 1965, S. 1f. Jolly war es, der Planck im Jahre 1878 den (zu einiger Berühmtheit gelangten, weil von Planck selbst ad absurdum geführten) Ratschlag gab, von einem Studium der theoretischen Physik abzusehen, weil deren Grundlagenprobleme erschöpft seien; s. Heilbron 1986, S. 10.

[1247] Für eine Aufstellung der ermittelbaren Hörer s. Pulte 1996, S. XLIX.

namentlich kann das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten, sowie das nach d'Alembert benannte Princip nicht völlig erwiesen werden".[1248]

Die wissenschaftlich herausragende Gestalt unter den Hörern von Jacobis *Analytischer Mechanik* ist zweifelsohne Bernhard Riemann, der später zum einflußreichsten deutschen Mathematiker in der auf Jacobi und Dirichlet folgenden Generation aufsteigt. Er geht 1847 von Göttingen nach Berlin, um bei Dirichlet, Jacobi, Eisenstein und Steiner zu studieren. Seinem Vater schreibt er: „Als ich hier ankam, erfuhr ich zu meiner großen Freude, daß Jacobi, der im Catalog keine Vorlesung angezeigt hatte, sich besonnen habe und über Mechanik lesen wolle; ich wäre, wo möglich um ihn zu hören, noch eigens ein Semester hier geblieben und es konnte mir daher nichts angenehmeres begegnen als dies".[1249] Im Abgangszeugnis der Universität wird ihm denn auch später für die Teilnahme an den *Vorlesungen über analytische Mechanik* von Jacobi ein „sehr fleißig" bescheinigt.[1250] Carl Neumann hat nicht bei Jacobi studiert, obwohl dessen *Analytische Mechanik* auf *ihn* den wohl nachhaltigsten Einfluß ausgeübt hat. Er wurde im Königsberger mathematisch-physikalischem Seminar seines Vaters Franz Ernst Neumann, das Jacobi in jungen Jahren mitbegründet hatte, ausgebildet, kommt 1868 als Professor nach Leipzig und lernt dort Jacobis Anschauungen zu den Grundlagen der Mechanik kennen.[1251] Im folgenden Jahr hält er seine Leipziger Antrittsvorlesung *Ueber die Principien der Galilei-Newton'schen Theorie*, die einen entscheidenden Wendepunkt in der Grundlagendiskussion um die Newtonsche Mechanik markiert. Diese Vorlesung nimmt Jacobis Kritik auf und führt sie weiter.

Es wäre historisch naiv und wissenschaftstheoretisch anfechtbar, Riemanns und Neumanns Beiträge zur Auflösung der KMN gleichsam ‚monokausal' auf Jacobis *Analytische Mechanik* zurückführen zu wollen: Beide Mathematiker waren, wie sich zeigen wird, *eigenständige* Köpfe, und ihre Anschauungen zur mathematischen Naturphilosophie weisen *unterschiedliche* Einflüsse auf. Gleichwohl erscheint es mir legitim, sie in den Mittelpunkt dieses abschließenden Kapitels und dabei auch in die *Tradition Jacobis* zu stellen: Zum einen läßt sich an ihnen belegen, wie ein (durch Jacobi reprä-

[1248] Universitätsbibliothek Halle (Diss. Phil. Lip. 1840-1872; W. Scheibner). Wie der ‚späte' Jacobi, betont auch Scheibner, daß die Mathematik selbst zunächst *keinen* Realitätsbezug aufweist. In seiner unveröffentlichten Hallenser Dissertation *Über die Variabilität der Functionen* schreibt er (S. 1): „Im mathematischen Sinn ist Größe, was gemessen werden kann, der Name der Qualität bezeichnet hier die derselben theilhaftigen Dinge. Die mathematische Größe selbst geht ganz in dieser Definition auf, die Mathematik hat es eigentlich nicht mit den Dingen in der Wirklichkeit zu tun, sondern sie construiert sich ihre Objecte aus dieser einfachen Qualität der Größe selbst" (Universitätsarchiv Halle, Personalakte W. Scheibner). Scheibner gehört, nebenbei bemerkt, 1869 zu den ersten, die die Merkur-Anomalie durch eine ‚elektrodynamische Variation' des Newtonschen Gravitationsgesetzes zu beheben suchten; s. hierzu Roseveare 1982, S. 122.

[1249] B. Riemann an seinen Vater vom 29. Nov. 1847 (Neuenschwander 1981a, S. 95f.).

[1250] Vgl. Pulte 1996, S. LXIV.

[1251] Vgl. für historische Details ebd., S. LI und Teil 3.1.

sentierter) Wandel der *Mathematikauffassung* das weitere Verständnis mathematischer Naturgesetzlichkeit wesentlich prägt und eine *neue* wissenschaftstheoretische Grundlagenreflexion und -kritik erst ermöglicht. Zum anderen spielen beide eine objektive, historisch unstrittige Rolle in der weiteren, die letzten drei Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts bestimmenden Grundlagendiskussion der Mechanik und Geometrie, die mit Einstein endet. Diese ist von wissenschaftstheoriegeschichtlicher Seite gut dokumentiert und aufgearbeitet; es erscheint mir daher nicht erforderlich, sie über Neumanns Antrittsvorlesung hinaus im Detail bis zum Jahrhundertende zu verfolgen: Nicht das *Ende* dieser Grundlagendiskussion ist historisch aufklärungsbedürftig, sondern ihr *Anfang*.

VII.2 Riemanns neue Mathematische Naturphilosophie vor dem Hintergrund der Newtonschen und der analytischen Tradition

„Riemann's evolution was slow and his life short. What his work lacks in quantity is more than compensated for by its superb quality. One of the most profound and imaginative mathematicians of all time, he had a strong inclination to philosophy, indeed, was a great philosopher. Had he lived and worked longer, philosophers would acknowledge him as one of them".[1252] Hans Freudenthals Charakterisierung, insbesondere deren letzter ‚irrealer historischer Konditionalsatz', beleuchtet das Kardinalproblem jeder wissenschaftstheoretisch orientierten Riemann-Interpretation: Der historische Rang von B. Riemann (1826-1866)[1253] als Mathematiker ist unstrittig; seine philosophischen Interessen und Neigungen sind bekannt, aber seine diesbezüglichen Anschauungen haben keine detaillierte Ausformung erfahren, erst recht keine systematische und geschlossene Darstellung, die als verläßliche Basis einer wissenschaftstheoretischen Analyse dienen könnte. Aus dem Nachlaß wurden verschiedene ‚Fragmente philosophischen Inhalts' herausgegeben.[1254] Der unveröffentlichte Nachlaß ging durch ver-

[1252] Freudenthal 1975, S. 448.

[1253] Für biographische Informationen s. Dedekind 1876, Neuenschwander 1981a und 1988, Freudenthal 1975 und insbes. Laugwitz 1996. Eine detaillierte Riemann-Bibliographie, die sowohl Primärliteratur (zusammengestellt von W. Purkert) als auch Sekundärliteratur (zusammengestellt von E. Neuenschwander) umfaßt, findet sich in Riemann *Werke**, S. 869-910. Diese Sammlung enthält auch die von H. Weber und R. Dedekind herausgegebenen mathematischen Veröffentlichungen und Nachlaßstücke Riemanns in der 2. Auflage von 1892 (Riemann *Werke*), und zwar mit *doppelter* (fortlaufender wie auch unveränderter, von den *Werken* übernommener) Paginierung. Ich zitiere im folgenden nach der Paginierung der *Werke*.

[1254] Nämlich zur *Psychologie und Metaphysik* (Riemann *Werke*, S. 509-520), *Erkenntnistheoretisches* (ebd., S. 521-525), und verschiedene *Fragmente zur Naturphilosophie*: „Molecularmechanik" (ebd., S. 526-528), „Neue mathematische Principien der Naturphilosophie", von Riemann selbst mit „Gefunden am 1. März 1853" datiert (Riemann 1853a; ebd., S. 528-532) und

schiedene Hände, ist chaotisch und zerstreut[1255], enthält aber einige Hinweise zur mathematischen Naturphilosophie, auf die zurückzukommen sein wird. Besonders Riemanns berühmter Habilitationsvortrag *Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* (1854) hat nicht nur die weitere Entwicklung der Geometrie entscheidend beeinflußt, sondern auch zu unterschiedlichsten philosophischen Interpretationen Anlaß gegeben.[1256] Zweifellos hat die fehlende formale Ausführung der dort artikulierten mathematischen Ideen wie der ‚tentative', an entscheidenden Stellen nur *andeutende* Charakter des Vortrages mit dazu beigetragen, daß Riemann vielerorts als „deepest philosopher of geometry" gilt.[1257] Alles in allem muß festgestellt werden, daß der Philosoph Riemann eine Größe mit vielen Unbekannten ist — es nimmt daher auch kaum Wunder, daß er als handfester Materialist ebenso wie als Exponent des Deutschen Idealismus interpretiert wurde. Aber solche Konstruktionen sind von geringem Wert bei einem Denker, dem es vor allem darum zu tun ist, die Welt von der Mathematik und den Naturwissenschaften seiner Zeit her zu verstehen und Mathematik und Naturwissenschaften so voranzubringen, daß diese ein immer besseres Weltverständnis ermöglichen. Riemann ist, philosophisch betrachtet, ein Eklektizist und ein ausgesprochener Gegner philosophischer ‚Systeme', wie sie die deutsche Schulphilosophie seiner Zeit reichlich im Angebot hatte. Gerade daraus, daß er ganz unterschiedliche Ansätze zusammenzubringen sucht, resultiert seine philosophische Eigenart, die sich insbesondere in seinen Anschauungen zur Geometrie und mathematischen Naturphilosophie kundtut.

Der hier vertretenen Interpretation zufolge ist Riemanns Philosophie der Geometrie, die im Zentrum der meisten Riemann-Interpretationen steht, nicht zu trennen und in ihrem ‚physikalischen' Teil sogar systematisch *abhängig* von seiner mathematischen Naturphilosophie, obwohl es die unbefriedigende Quellenlage nicht zuläßt, eine solche Interpretation anders als ‚spekulativ' zu bezeichnen. Ich werde sie daher auch gesondert behandeln und nachstellen (Teil 2.4). Zunächst wird es zweckmäßig sein, Riemanns Anknüpfung an und Kritik der Newtonschen Mechanik zu analysieren (2.1). Die diesbezüglichen Anschauungen werden anschließend eingebettet in seine erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Ausführungen zu den Naturwissenschaften und zur Mathematik (2.2). Der folgende Teil wird der einzige im Rahmen dieser Untersuchung sein, der über die Mechanik ‚ponderabler' Körper hinausgeht: Er behandelt Riemanns Äthertheorie, die nach Speiser vermutlich den naturphilosophischen Hintergrund für

„Gravitation und Licht", das aus verschiedenen Gründen auf Ende 1853 datierbar ist (Riemann 1853b; ebd., S. 532-538, vgl. S. 508 und S. 547).

[1255] Für einen Überblick s. Neuenschwander 1988.

[1256] Riemann 1854a (veröffentlicht zuerst 1867); zur diesbezüglichen umfangreichen Riemann-Literatur von H. von Helmholtz über B. Erdmann bis zur Gegenwart sei auf die in Anm. 9 aufgeführte Bibliographie (bis 1990) verwiesen; ergänzend hierzu seien genannt Nowak 1989, Tazzioli 1993, Boi 1994 und 1995, Bottazzini 1994 und Bottazzini/Tazzioli 1995.

[1257] Kline 1972, S. 889; vgl. Mehrtens 1990, S. 54

seine Geometrie abgibt (2.3). Es ist zu beachten, daß die meisten Belege zu Riemanns Denken, die in den folgenden Teilen herangezogen werden, aus der Zeit von 1849 bis 1854 stammen, d.h. *vor* den *Hypothesen* liegen und daher auch Bestandteil einer ‚genetischen' Interpretation einiger Riemannscher Ausführungen in den *Hypothesen* sein dürfen (2.4).

VII.2.1 Trägheitsprinzip, Geometrie und Nahwirkung: Kritik der Newtonschen Mechanik

Riemanns philosophische Fragmente machen hinlänglich klar, daß er weder ein Anhänger der Kantischen Lehre, noch des recht naiven und philosophiefeindlichen Empirismus, der als Reaktion auf den Deutschen Idealismus (insbesondere Hegelscher Prägung) bei vielen Wissenschaftlern dominierte, noch der Systeme der idealistischen Naturphilosophie selber ist. Für die mathematische Naturphilosophie beschreibt er selbst die Situation in seinen *Vorlesungen über partielle Differentialgleichungen* von 1854/55 so:[1258]

> Eine wissenschaftliche Physik existirt bekanntlich erst seit der Erfindung der Differentialrechnung. Erst seitdem man gelernt hat, dem Lauf der Naturereignisse stetig zu folgen, sind die Versuche, den Zusammenhang der Erscheinungen in abstracten Begriffen nachzuconstruiren, von Erfolg gewesen. Hierzu gehört zweierlei: erstens einfache Grundbegriffe, mit denen man construirt, und zweitens eine Methode, um aus den einfachen Grundbegriffen dieser Construction, welche sich auf die Zeitpunkte und Raumpunkte beziehen, die Gesetze für endliche Zwischenzeiten und Abstände, welche allein der Beobachtung zugänglich sind (mit der Erfahrung verglichen werden können), abzuleiten. [...]
> In Bezug auf die Begriffe, welche man in der Physik der Naturerklärung zu Grunde legt, steht man also noch heute auf dem Standpunkte *Newton's*. Es ist seit *Newton* kein neuer Fortschritt gemacht; alle Versuche, über diese Grundbegriffe hinaus ins Innere der Natur zu dringen, sind bis jetzt missglückt; der Einfluss der späteren philosophischen Systeme, wo er sich in der physikalischen Literatur geltend gemacht, hat nur den Erfolg gehabt, die ursprüngliche Auffassung *Newton's* zu verunstalten und Inconsequenzen in dieselbe einzuführen.

Riemann artikuliert hier zunächst den Primat der Mathematik vor den Lehrmeinungen ‚philosophischer Systeme', wenn es darum geht, ‚ins Innere der Natur zu dringen'; zugleich bezieht er sich in einer Weise positiv wie auch kritisch auf Newtons mathematische Naturphilosophie, die es näher zu untersuchen gilt. In der Schulphilosophie sucht

[1258] Riemann 1882, S. 1f. Der Riemann-Schüler und Herausgeber Karl Hattendorff zog zwar verschiedene Vorlesungen und auch eigene Notizen für seine Edition heran (ebd., S. Vf.), bezieht sich jedoch bei der Einleitung, aus der hier zitiert wird, auf eine „Ausarbeitung von Riemann's eigener Hand" und bemerkt: „Die Einleitung ist wörtlich abgedruckt. Sie trägt im Manuscripte die Bezeichnung: Michaelis 54" (ebd., S. VI).

er lediglich Schützenhilfe für eine Position, die grundsätzlich *realistisch* und, wenngleich in kritischer Weise, *empiristisch* zu nennen ist. Diese Unterstützung findet er vor allem in den Werken J. F. Herbarts.[1259]

Durch Jacobi hat Riemann die analytische Tradition der Mechanik im Detail kennengelernt, und er macht in seinen Arbeiten zur mathematischen Physik von ihr ausführlichen Gebrauch.[1260] Wenn er sich dennoch in seinen Ausführungen zur Mechanik vor allem auf Newton, gelegentlich auch auf Galilei, bezieht, ist dies darauf zurückzuführen, daß es Riemann von Anfang an um die *begrifflichen Grundlagen* der Disziplin geht, deren Etablierung er beiden zurechnet[1261] und zu der nach seiner Ansicht – die die historische Entwicklung erheblich verkürzt[1262] — die analytische Tradition nichts beigetragen hat: Newtons ‚Atomismus der Zentralkräfte' mit den Grundbegriffen Trägheit, (Gravitations-) Kraft, anziehendes Zentrum, absoluter Raum und absolute Zeit

[1259] Für diesbezügliche Belege und Literatur s. Teil 2.2.

[1260] Besonders ist hier auf Riemanns Handhabung des Prinzips der virtuellen Geschwindigkeiten und seine ‚zeitfreie' Formulierung des Prinzips der kleinsten Wirkung im Anschluß an Jacobi hinzuweisen (s. Riemann *Werke*, S. 526-528; Nachlaß, insbes. M. 19, Bl. 155f., 170f.; M. 22, Bl. 1f., 49-51; M. 45, Bl. 1-3, 29f.). Riemanns Versuche, mit Hilfe des Potentialkonzepts und geeignet verallgemeinerten Variationsprinzipien der Mechanik zu einer allgemeinen Darstellung elektromagnetischer Wechselwirkungen zu gelangen (Riemann 1880, §§36-43 und 99; Riemann 1882, §§81-86), auf die hier nicht im Detail eingegangen werden kann, folgen in Zielsetzung und Methode ebenfalls Jacobi. Daß auch Dirichlet für Riemanns Arbeiten zur mathematischen Physik eine maßgebliche Rolle spielt, wird bereits vom Herausgeber beider Vorlesungen, Karl Hattendorff, unterstrichen (ebd., S. V bzw. S. VI).

[1261] Riemann 1853a, S. 528, Riemann 1854a, S. 286 und insbes. Riemann 1882, S. 1f.: „Den ersten Schritt in Bezug auf die Grundbegriffe that *Galilei*, als er die Gesetze des freien Falles der Körper aus der Einwirkung der Schwere in allen einzelnen Zeitpunkten construirte; er fand den Begriff der beschleunigenden Kraft, den Begriff einer einfachen Bewegungsursache. Diesem Schritt fügte *Newton* einen zweiten hinzu: er fand den Begriff eines anziehenden Zentrums, den Begriff einer einfachen Kraftursache. Mit diesen beiden Grundbegriffen, dem Begriff der beschleunigenden Kraft und dem Begriff eines anziehenden oder abstossenden Centrums construirt die Physik noch heute. Noch die heutige mathematische Speculation von *Laplace, Poisson, Cauchy* wird da, wo der Faden der Beobachtung sie zu leiten aufhört, allein bestimmt durch das Bestreben, die Erscheinungen auf diese beiden Grundbegriffe zurückzuführen".

[1262] Denn Konzeptionen wie die ‚vis viva' oder das Potential verdanken sich ja gerade der analytischen Tradition. Riemanns Suche nach *neuen* ‚Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie' (vgl. Teil 2.3) führt ihn zwar auf verallgemeinerte Variationsprinzipien der mathematischen Physik (vgl. Wise 1981, Kaiser 1981), aber er schöpft — obwohl er *nach* Helmholtz' *Über die Erhaltung der Kraft* schreibt — den Erhaltungsgedanken nicht aus, um mit Hilfe von Variationsprinzipien und Erhaltungsgrößen zu einer tatsächlich neuen und einheitlichen Darstellung der theoretischen Physik zu gelangen. Der Grund ist wohl darin zu suchen, daß er den Energieerhaltungssatz als empirisch noch nicht hinreichend bewährt ansieht. Vgl. hierzu Riemann *Werke*, S. 711, Pkt. 5: „Die Lehre von der Erhaltung der Kraft ist experimentell noch nicht genügend erwiesen".

charakterisieren nach Riemann noch den Stand der begrifflichen Entwicklung der Mechanik seiner Zeit.[1263] Es ist nun, wie bereits das obige Zitat andeutet, *nicht* seine Zielsetzung, gleichsam eine Kuhnsche ‚Grundlagenrevolution' zu initiieren, durch die dieser konzeptuelle Rahmen der Newtonschen Mechanik zerstört und durch einen neuen ersetzt wird, sondern es geht ihm um eine begriffliche *Erweiterung*, die es erlaubt, den empirischen Gehalt der Newtonschen Mechanik unter „*Neue* mathematische Principien der Naturphilosophie"[1264] zu bringen — und zwar unter Prinzipien, die *zugleich* solche Phänomenbereiche abdecken, über die die *alten*, Newtonschen Prinzipien keine Aussagen erlauben.

Bevor auf Riemanns Unternehmen näher eingegangen werden kann, ist es erforderlich, seine Kritik der Newtonschen Mechanik näher ins Auge zu fassen. Man kann hier zwei verschiedene Seiten einer Medaille[1265] unterscheiden: eine wissenschaftstheoretische, die auf den logischen Status und den Geltungsanspruch der Newtonschen Prinzipien abzielt, und eine naturphilosophische, die ihren naturgesetzlichen Charakter und ihren Erklärungsgehalt betrifft.

Riemanns *wissenschaftstheoretische* Kritik richtet sich schon früh gegen Newtons Anspruch, mit den *leges motus* zugleich *axiomata* der mathematischen Naturphilosophie formuliert zu haben. Diese Kritik dürfte durch Jacobi vermittelt sein und kann als eine Spezifizierung von Jacobis Anschauungen in Hinblick auf Newtons Bewegungsgesetze verstanden werden:[1266]

> Die Unterscheidung, welche Newton zwischen Bewegungsgesetzen oder Axiomen und Hypothesen macht, scheint mir nicht haltbar. Das Trägheitsgesetz ist die Hypothese: Wenn ein materieller Punkt allein in der Welt vorhanden wäre und sich im Raum mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegte, so würde er diese Geschwindigkeit beständig behalten.

Riemann bedient sich hier nicht des (glücklicheren) Konventionsbegriffs von Jacobi, sondern greift auf den traditionellen Hypothesenbegriff zurück. Aber er folgt dabei durchaus Jacobis Überlegungen: Unter einer Hypothese versteht Riemann „Alles zu

[1263] Vgl. das Zit. in Anm. 1261 oben sowie Riemann 1853a und 1853b, insbes. S. 532f. Die Erweiterung der Newtonschen anziehenden Gravitationskraft um andere anziehende und abstoßende Zentralkräfte (wie die Coulomb-Kräfte) stellt für Riemann keine wesentliche begriffliche Erweiterung dar, wie z.B. sein Fragment zur ‚Molecularmechanik' erkennen läßt (Riemann *Werke*, S. 526-528). Anders verhält es sich mit elektrodynamischen Wechselwirkungen, die dem Zentralkraft-Schema nicht folgen: Sie sind in einer Reform der mathematischen Naturphilosophie auf neue Weise zu erklären (vgl. Teil 2.3).

[1264] So der Titel von Riemann 1853a; s. hierzu näher Teil 2.3.

[1265] Vgl. die begriffsgeschichtlichen Bemerkungen zu ‚Mathematische Naturphilosophie' und ‚Wissenschaftstheorie' im Einleitungsteil I.

[1266] Riemann *Werke*, S. 525.

den Erscheinungen Hinzugedachte“[1267], und hierzu zählen, wie später deutlich werden wird, gerade auch die Sätze der Mathematik, sofern sie auf äußere Realität bezug nehmen, darunter auch Newtons *leges motus*: Sie sind *als mathematische Sätze* hypothetisch, d.h. sie lassen sich nicht aus den Erscheinungen ‚deduzieren', wie Newton behauptete[1268], sondern sind durch die Erscheinungen *unter*bestimmt. Später, in seinem Habilitationsvortrag, wird Riemann von den „geometrischen Sätzen“, die den *physikalischen* Raum unter allen „allgemeinen Grössenbegriffen“ der reinen Mathematik[1269]

[1267] Ebd., S. 525. In vollem Wortlaut: „Das Wort Hypothese hat jetzt eine etwas andere Bedeutung als bei *Newton*. Man pflegt jetzt unter Hypothese Alles zu den Erscheinungen Hinzugedachte zu verstehen. *Newton* war weit entfernt von dem ungereimten Gedanken, als könne die Erklärung der Erscheinungen durch Abstraction gewonnen werden“. Im Anschluß zitiert Riemann die berühmte Stellungnahme aus dem ‚Scholium generale' von Newtons *Principia*: „*Newton*: Et haec de deo; de quo utique ex phaenomenis disserere ad philosophiam experimentalem pertinet. Rationem vero harum Gravitatis proprietatum ex phaenomenis nondum potui deducere, et Hypotheses non fingo. Quicquid enim ex Phaenomenis non deducitur, Hypothesis vocanda est“ (Für eine *korrekte* Wiedergabe der Passage s. Newton 1972, S. 764). Riemann zieht hier die Worte „et haec de deo [...]“, mit denen Newton seine Ausführungen über Gott abschließt und deren Bedeutung für die Naturphilosophie er hervorhebt („[...] de quo utique ex phaenomenis differere, ad philosophiam naturalem pertinet“; ebd., S. 764) mit der berühmten Hypothesenpassage Newtons zusammen. Auch seine anschließende Notiz zu Laplace („*Laplace* auf *Napoleon's* Frage, weshalb in seiner Méc. cél. der Name Gottes nicht vorkomme: Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse“; Riemann *Werke*, S. 525) bringt Gott mit dem Hypothesenbegriff in Zusammenhang. Dies ist wohl so zu verstehen: Der *weite* Hypothesenbegriff, zu dem Riemann sich bekennt, und den er auch bei Laplace vorfindet, umfaßt ‚Alles zu den Erscheinungen Hinzugedachte', also auch die Annahme, es existiere ein Gott. Newton hingegen betrachtet Ausführungen über Gott als integralen Bestandteil seiner Naturphilosophie, und artikuliert zugleich sein ‚hypotheses non fingo'. Er hat also (nach Riemann) einen *engeren* Hypothesenbegriff, der es erlaubt, über Gott zu sprechen, ohne dem eigenen Hypothesenverdikt zu erliegen. Daß Newtons ‚fingo' lediglich auf die Eliminierung ‚schlechter' Hypothesen abzielen könnte (vgl. Kap. III, Teil 4.2), zieht Riemann offenkundig nicht in Betracht.

In die gleiche Richtung zielt auch Riemanns Bemerkung, Newton vertrete *keine* ‚Erklärung der Erscheinungen durch Abstraction': Riemanns Newton-Interpretation zufolge — jedenfalls, sofern sie ab Ende 1853 nachweisbar ist (vgl. unten) — war Newton selbst ein Anhänger der Nahwirkungstheorie der Gravitation (Riemann 1853b, S. 534, inbes. die dortige Anm.), d.h. Newton selbst ‚abstrahierte' Riemann zufolge nicht den Begriff einer anziehenden Gravitationskraft aus den Phänomenen, um diesen Begriff dann als zureichende Erklärung der Phänomene auszuweisen (für Riemann ein ‚ungereimter Gedanke'), sondern suchte nach einer weitergehenden Nahwirkungserklärung.

[1268] Vgl. Kap. III, Teil 4.2.

[1269] Vgl. Riemann 1854a, S. 272f. Riemann selbst gebraucht hier den Begriff der reinen Mathematik *nicht* — und zwar, wie wir sehen werden, aus erkenntnistheoretischen Gründen (vgl. Teil 2.2). Es scheint mir jedoch in *methodologischer Absicht* (vgl. wiederum Teil 2.2) statthaft, überall dort, wo Riemann von Untersuchungen des „allgemeinen Begriffs mehrfach ausgedehnter

charakterisieren, ganz ähnlich sagen, daß sie „nur aus der Erfahrung entnommen werden können"; er spricht dort von der „Aufgabe, die einfachsten Thatsachen aufzusuchen, aus denen sich die Massverhältnisse des Raumes bestimmen lassen — eine Aufgabe, die der Natur der Sache nach nicht völlig bestimmt ist; denn es lassen sich mehrere Systeme einfacher Thatsachen angeben [...]. Diese Thatsachen sind wie alle Thatsachen nicht nothwendig, sondern *nur von empirischer Gewissheit*, sie sind *Hypothesen* [...]".[1270]

Das ‚nur' der ‚empirischen Gewissheit' ist entscheidend, in der Mechanik wie in der Geometrie: Die Sätze der reinen Mathematik transzendieren die Erfahrung, und wo Erfahrung über die Anwendbarkeit von Mathematik entscheidet, kann weder mit mathematischer Sicherheit noch mit Eindeutigkeit gerechnet werden. Ich komme hierauf zurück.[1271]

Riemann unternimmt, anders als Jacobi, der die analytische Tradition und deren Beweispraxis genauer verfolgt hat, auch gar keine Anstrengungen mehr, vermeintlich ‚mathematische Beweise' mechanischer Prinzipien zurückzuweisen. Ebenso erscheinen ihm traditionelle metaphysische Beweise wie der des Trägheitsprinzips aus dem Satz des zureichenden Grundes verfehlt[1272] — genau wie Kants Unternehmen, die Newtonschen Prinzipien als synthetische Sätze a priori zu erweisen.[1273] Mit einem Wort: Riemann ist wie Jacobi ein Gegner und expliziter Kritiker des mechanischen Euklidianismus; der Glaube der KMN an einen ‚abwärtsgerichteten Wahrheitsfluß' im System ihrer Sätze erscheint ihm als ein überkommener *Irrglaube*.

In der umfangreichen Riemann-Literatur wird offenbar durchgehend übersehen, daß die Kritik des axiomatischen Status der Newtonschen Prinzipien dem Habilitationsvortrag zu den *Hypothesen* der Geometrie zeitlich *vorangeht*. Dieser Umstand erscheint jedoch durchaus beachtenswert: Riemann führt ja den Hypothesenbegriff später in die Geometrie ein, um zum Ausdruck zu bringen, daß die Euklidischen *Axiome* keineswegs

Grössen" (vgl. ebd., S. 271) redet, von ‚reiner Mathematik' und dort, wo es um die Applizierung dieser Untersuchungen auf den physikalischen Raum geht und somit von Riemann direkte Erfahrungsbezüge geltend gemacht werden, von ‚angewandter Mathematik' zu sprechen. Er selbst überschreibt ja den dritten Teil der *Hypothesen*, die der Struktur des physikalischen Raumes gelten, mit „Anwendung auf den Raum" (ebd., S. 283).

[1270] Ebd., S. 273 (meine Hervorhebungen).

[1271] Vgl. Teil 2.2.

[1272] „Dieses Bewegungsgesetz kann nicht aus dem Princip des zureichenden Grundes erklärt werden" (Riemann 1853b, S. 532, Anm.); zu Riemanns hier anschließender Bemerkung über das Trägheitsprinzip vgl. die Ausführungen zu seiner naturphilosophischen Newton-Kritik weiter unten.

[1273] In Kants Bestimmung der Kausalität als „einer [aus] aller Erfahrung vorausgehenden Beschaffenheit des erkennenden Subjects" stammenden „Regel der Zeitfolge" etwa sieht er den Versuch, „das Kind mit dem Bade auszuschütten" (Riemann *Werke*, S. 525); zu Riemanns (durch Herbart vermittelter) Kant-kritischer Position s. näher Teil 2.2.

als evidente und eindeutige Grundlage der *physikalischen Geometrie*[1274] akzeptiert werden müssen. So heißt es zu Beginn der *Hypothesen*: „Bekanntlich setzt die Geometrie sowohl den Begriff des Raumes, als die ersten Grundbegriffe für die Construktionen im Raum als etwas Gegebenes voraus. Sie giebt von ihnen nur Nominaldefinitionen, während die wesentlichen Bestimmungen in Form von Axiomen auftreten. Das Verhältniss dieser Voraussetzungen bleibt dabei im Dunkeln; man sieht weder ein, ob und in wie weit ihre Verbindung nothwendig, noch a priori, ob sie möglich ist".[1275]

Indem Riemann hier die *Notwendigkeit* der euklidischen Voraussetzungen einer Geometrie des physikalischen Raumes in Zweifel zieht, bringt er die Möglichkeit *anderer* Geometrien ins Spiel. Indem er zudem auch ihre *Möglichkeit* in Zweifel zieht, wirft er nicht nur die Frage nach der logischen *Widerspruchsfreiheit* dieser Voraussetzungen auf, sondern auch die Frage nach der *Anwendbarkeit* auf den physikalischen Raum, denn für eine *physikalische* Geometrie reicht formale Widerspruchsfreiheit nicht aus: Sie muß zudem ihre Anwendbarkeit auf den Raum unter Beweis stellen. Die physikalische Realisierung *geradliniger* Bewegung ‚ponderabler' Körper, wie sie Newtons Trägheitsgesetz aussagt, ist aber ein Teil der Frage, um die es hier geht, und es ist eben der Teil, der für Riemann *zuerst* zum Problem wird.

Dieser Punkt ist nicht nur historisch, sondern auch systematisch relevant: Riemanns empiristische Neigungen[1276] verpflichten ihn darauf, einen Begriff wie ‚Geradlinigkeit' in der physikalischen Geometrie durch Meßvorschriften an konkrete physikalische Prozesse zu binden. Seine *Hypothesierung* des Trägheitsprinzips aufgrund dessen kontrafaktischen Charakters[1277] besagt in diesem Kontext, daß die Bewegung ‚ponderabler' Körper hierfür *nicht* in Frage kommt.[1278]

Man kann hier Riemanns Standpunkt am prägnantesten charakterisieren, wenn man ihm dem Standpunkt Newtons gegenüberstellt: Für Newton konnte das Trägheitsprinzip zugleich ein empirisch verifiziertes Naturgesetz *und* ein mathematisches Axiom sein, weil für ihn die Euklidische Geometrie (und damit Euklidische Geradlinigkeit) die evidente und eindeutige Struktur des Raumes abgab. Riemann löst diesen einförmigen Zusammenhang gleichsam ‚von beiden Enden' her auf: Er *hypothesiert* das Trägheits-

[1274] Auch dieser Begriff kommt bei Riemann nicht vor (vgl. Anm. 25). Riemann meint jedoch immer den *physikalischen* Raum, wenn er schlechterdings vom ‚Raum' spricht, und er betreibt daher physikalische Geometrie, wenn er Eigenschaften, die dem ‚allgemeinen Begriff der mehrfach ausgedehnten Grösse' zukommen, mit Hilfe von Erfahrung so spezifizieren möchte, daß sie den physikalischen Raum charakterisieren.

[1275] Riemann 1854a, S. 272.

[1276] Hierzu näher Teil 2.2.

[1277] D.h., weil es von der Bedingung ausgeht, daß ein einzelner ‚materieller Punkt allein in der Welt vorhanden wäre'; vgl. Zit. 1266 oben.

[1278] Ebensowenig die Form eines (vermeintlich) starren Körpers oder die Ausbreitung des Lichts im Riemannschen Äther (vgl. Teil 2.3 und Teil 2.4, Zit. 1369).

prinzip von der empirischen Seite her, und zugleich eröffnet er von mathematischer Seite *andere* Optionen, d.h. er problematisiert die für Newton selbstverständliche *Eindeutigkeit*. Diese *zweite* Seite stelle ich in die Tradition der reinen Mathematik, und sie findet in Riemanns ‚allgemeinem Begriff der mehrfach ausgedehnten Grösse' ihren deutlichsten Ausdruck. Es wird zu klären sein, wie Riemann beide Seiten — Empirismus und neue Mathematikauffassung — in seiner mathematischen Naturphilosophie zusammenbringt.[1279] Wie bei Jacobi, sei auch hier auf einen Punkt besonders hingewiesen: Bei Riemann wird oft fraglos, aber eben auch *grundlos*, eine Kenntnis der Entwicklung der nichteuklidischen Geometrie, wie sie *später* bei Gauß, Lobatschewski und Bolyai für die Zeit *vor* Riemann im Einzelnen nachgewiesen wurde, vorausgesetzt. Doch weder Riemanns veröffentlichte Arbeiten noch seine unveröffentlichten Nachlaßfragmente decken eine solche Traditionsbildung ab: Sie weisen hin auf Riemanns Bekanntschaft mit Legendres Beweisversuchen zur euklidischen Geometrie[1280], lassen Vermutungen über seine Bekanntschaft mit Lobatschewskis ‚Géometrie imaginaire' zu[1281], aber sie liefern keinen einzigen schlüssigen Beleg dafür, daß Riemann Arbeiten zur nichteuklidischen Geometrie tatsächlich kannte — oder gar, daß seine *Hypothesen* von dieser Seite her inspiriert worden sein könnten.[1282] Wenn aber Riemanns Hypothesierung der physikalischen Geometrie *nicht* dort ihren Ausgang nimmt, hat eine genetische Rekonstruktion nach *anderen* Einflüssen zu fragen. Der hier vertretenen Interpretation zufolge sind diese in Riemanns frühen Untersuchungen zur mathematischen Naturphilosophie zu lokalisieren — namentlich in seinen Anschauungen zum Trägheitsprinzip und damit auch in seiner Verbindung zu Jacobi.[1283] Soviel zu Riemanns wissenschaftstheoretischer Newton-Kritik und ihren möglichen Implikationen.

Die *naturphilosophische* Seite dieser Kritik fällt zunächst unverhältnismäßig kurz aus, weil deren Implikationen später noch genauer zu untersuchen sein werden. Riemann studierte in Göttingen bei Wilhelm Weber Physik und trat nach seiner Rückkehr

[1279] Vgl. Teil 2.2.

[1280] S. Riemann 1854a, S. 272.

[1281] Vgl. hierzu Scholz 1982c, S. 220-221.

[1282] Riemann selbst beklagt ja, daß er außer einigen „Andeutungen" Gauß' zur *Differentialgeometrie* und „einigen philosophischen Untersuchungen *Herbart's*" durchaus keine Vorarbeiten benutzen konnte (Riemann 1854a, S. 273). Zur differentialgeometrischen Tradition, in der Riemann steht, vgl. Struik 1931, Reich 1973 und Portnoy 1982. Was die nichteuklidische Geometrie betrifft, stimme ich Detlef Laugwitz zu: „Hat *Riemann* zur Zeit seines Habilitationsvortrages von der nichteuklidischen Geometrie Kenntnis gehabt? Er erwähnt sie nicht, und das hätte er wohl wenigstens andeutungsweise getan, wenn er von den Interessen *Gaussens* an dieser Entwicklung gewusst hätte" (Laugwitz 1996, S. 24). Gauß hat bekanntlich Riemanns Habilitationsvortrag beigewohnt (und ausgewählt, vgl. Teil 2.4). Riemann hätte in der Tat kaum darauf verzichtet, eine Beeinflussung von dieser Seite deutlich zu machen — gleichgültig, ob sie von Gauß, Lobatschewski oder Bolyai ausgegangen wäre.

[1283] Vgl. Kap. VI, Teil 3.2, Zit. 1134.

aus Berlin noch vor seiner Promotion in Webers mathematisch-physikalisches Seminar ein[1284]. Mit theoretischen und experimentellen Problemen der damaligen Elektrodynamik war er durch Weber bestens vertraut.[1285]

Wie Faraday und Gauß, aber im Gegensatz zu Weber selbst, der später gelegentlich als der ‚Newton der Elektrodynamik' apostrophiert wurde, kommt Riemann dabei schon früh zu der Überzeugung, daß eine elektromagnetische Theorie eine *Nahwirkungstheorie* sein müsse. In mehreren Fragmenten unternimmt er denn auch den Versuch, eine *einheitliche Nahwirkungstheorie*, die sowohl elektromagnetische als auch elektrostatische Wechselwirkung sowie die Gravitationswechselwirkung und die Licht-[1286] und Wärmeausbreitung umfassen sollte, zu entwickeln.[1287]

Sofern bereits *hier* eine explizite Kritik von Riemann an Newton impliziert ist, muß diese mit einem ‚Zeitindex' versehen werden: Riemann geht in Übereinstimmung mit der zu seiner Zeit dominierenden Newton-Interpretation zunächst davon aus, daß Newton eine *Fernwirkungstheorie* der Gravitation vertritt. In dem Fragment „Neue mathematische Principien der Naturphilosophie", das er selbst mit dem Zusatz: „Gefunden am 1. März 1853" versieht[1288], formuliert er denn auch als Ziel, „jenseits der von *Galiläi* und *Newton* gelegten Grundlagen der Astronomie und Physik ins Innere der Natur zu dringen"[1289]; bereits das ‚jenseits' weist deutlich auf seine Distanzierung von der ‚alten' Mechanik hin. Gegen Ende des gleichen Jahres revidiert er jedoch — vermutlich unter dem Einfluß von David Brewsters Newton-Biographie[1290] — seine historische Einordnung Newtons und bemerkt: „Diese Erklärungsmethode durch Anziehungs- und Abstossungskräfte verdankt ihre allgemeine Anwendung in der Physik nicht einer unmittelbaren Evidenz (besonderen Vernunftgemässheit), noch, von Electricität und Schwere abgesehen, ihrer besonderen Leichtigkeit, sondern vielmehr dem Umstande, dass das *Newton*'sche Anziehungsgesetz gegen die Meinung des Entdeckers so lange für ein nicht weiter zu erklärendes gegolten hat".[1291] Er stellt sich jetzt mit der *Zielset-*

[1284] S. Dedekind 1876, S. 544f.

[1285] Zu Riemanns elektrodynamischen Arbeiten s. insbes. Lampariello 1957, Wise 1981 und Kaiser 1981.

[1286] Riemann schreibt *vor* Maxwell: Lichtausbreitung und Elektromagnetismus sind für ihn nicht von vornherein identisch.

[1287] Riemann 1853a und 1853b; vgl. hierzu Teil 2.3.

[1288] Riemann 1853a, S. 528 (Anm.).

[1289] Ebd., S. 528.

[1290] Brewster 1831; vgl. auch Dedekind 1876, S. 553.

[1291] Riemann 1853b, S. 534; zur Datierung vgl. Riemann *Werke*, S. 508 und Dedekind 1876, S. 547. In der Anmerkung zur zitierten Passage führt Riemann den berühmten dritten Brief an Bentley an, in dem sich Newton gegen eine Fernwirkungstheorie der Gravitation ausspricht. Noch Jahre später, nämlich 1857, bezieht sich Riemann positiv auf diesen Brief. Bei seinem ersten Biographen Richard Dedekind heißt es: „In dieser Zeit wandten sich seine Gedanken wieder der Naturphilosophie zu, und eines Abends [...] griff er zu Brewster's Life of Newton,

zung, eine Nahwirkungstheorie aller physikalischen Kräfte zu finden, in die *Tradition* Newtons, hält jedoch den von Newton entwickelten Begriffsrahmen für zu eng, um eine solche Nahwirkungstheorie entwickeln zu können.[1292] Sein kumulatives Verständnis von Wissenschaftsentwicklung[1293] impliziert dabei, daß die intendierte Ausweitung des Newtonschen Rahmens alle Resultate der ‚alten' Mechanik konserviert.

Riemanns Kritik an Fernwirkungstheorien jedweder Art beruht auf seinem *Kausalitätsbegriff*, und dieser Begriff ist es wohl auch, der nach seiner Auffassung Newton fehlte, um tatsächlich zu einer Nahwirkungserklärung der Gravitation zu gelangen: „Was ein Agens zu bewirken strebt, muss durch den Begriff des Agens bestimmt sein; seine Action kann von nichts Anderem als von seinem eigenen Wesen abhängen".[1294] Was hier auf den ersten Blick mit der Rede vom *Wesen* eines ‚Agens' als eine Rückkehr zum traditionellen Essentialismus erscheinen mag, erweist sich bei näherer Betrachtung als nicht sehr glückliche Ausformulierung eines durchaus *modernen* und ‚essentialismuskritischen' Gedankens: Riemann sieht das angeführte Postulat als erfüllt an, wenn das Agens „*sich selbst* zu erhalten oder herzustellen strebt"[1295]. Erhellender als dieser kryptische Permanenzgedanke[1296] ist zunächst die negative, ausgrenzende Bestimmung des Agens im Anschluß: Unter der Prämisse, daß die Wirkung jeder Ursache durch den Begriff der Ursache selbst und nichts anderes bestimmt sein muß, ist nämlich nach Riemann keine Wirkung („Action") denkbar, „wenn das Agens ein Ding, ein Seiendes ist, sondern nur, wenn es ein Zustand oder ein Verhältniss ist. Findet ein *Streben*, etwas zu erhalten oder herzustellen Statt, so müssen auch Abweichungen, und zwar in verschiedenen Graden, von diesem Etwas möglich sein; und es wird in der That, in sofern dieser Bestrebung andere Bestrebungen widerstreiten, nur möglichst nahe erhalten oder hergestellt werden. Es giebt aber keine Grade des Seins, eine gradweise Verschiedenheit ist nur von Zuständen oder Verhältnissen denkbar. Wenn also ein Agens *sich selbst* zu erhalten oder herzustellen strebt, so muss es ein Zustand oder ein Verhältniss sein"[1297]. Hier artikuliert Riemann den vielleicht weitreichendsten Gedanken seiner Naturphilosophie, hier wird auch der eigentliche Kern seiner naturphilosophischen Newton-Kritik sichtbar: Ursachen können nicht in isolierten physikalischen Entitäten (‚Dingen, Seienden') lokalisiert werden, sondern müssen *relational* aufgefaßt

und sprach lange mit Bewunderung über den Brief an Bentley, in welchem Newton selbst die Unmöglichkeit unmittelbarer Fernwirkung behauptet" (Dedekind 1876, S. 553).

[1292] Vgl. Zit. 1258 oben und die daran anschließenden Ausführungen.

[1293] Vgl. Teil 2.2.

[1294] Riemann *Werke*, S. 524.

[1295] Ebd., S. 524.

[1296] Riemann führt ihn in seiner Äthertheorie näher aus, wenn er dem Äther ein Bestreben, seinen Zustand unverändert zu erhalten, beimißt (s. Teil 2.3). Für mögliche Verbindungen dieses Gedankens wie Riemanns Kausalitätsverständnis überhaupt zur Philosophie Herbarts vgl. Scholz 1982a, S. 431f. und Wise 1981, S. 288f.

[1297] Ebd., S. 524.

werden, weil nur so mathematische Naturgesetze — um nichts anderes geht es, wenn von ‚gradweisen' Wirkungen und Wirkungsänderungen die Rede ist — begrifflich überhaupt *möglich* sind. Es geht Riemann also gerade *nicht* darum, physikalischen Entitäten in traditioneller Weise Wesenseigenschaften ‚anzuheften', die dann als zureichende Erklärungen von Prozessen gelten sollen, sondern darum, diese Prozesse als ‚innere Zustandsänderungen' aufzufassen. *Sie*, und nicht Entitäten wie Massen oder Ladungen *per se*, sind die „Realgründe von möglichst grösster Einfachheit", auf die nach Riemann jede wissenschaftliche Kausalerklärung aus sein muß.[1298] Fernwirkung ist danach schlechterdings *unbegreiflich*.

Um dies am ‚Newtonschen' Beispiel zu konkretisieren: Eine einzelne Masse übt *verschiedene* Gravitationswirkungen auf verschiedene andere Massen aus. Es kann nun nach Riemann nicht angehen, dieser Masse eine essentielle Eigenschaft namens ‚Gravitation' zuzuschreiben und diese zur Ursache der Anziehung zu erklären, sondern die *Beziehung* der Massen zueinander muß als Ursache betrachtet werden, weil nur dann die Anziehungswirkungen je nach Gegebenheiten (wie räumlicher Anordnung, Größe der beteiligten Massen) graduelle Unterschiede aufweisen und Gegenstand einer gesetzlichen Bestimmung werden können. Dieser Ansatz führt, konsequent weiterverfolgt, zu einer Ablehnung des Atomismus[1299] und zu einem *feldtheoretischen* Verständnis kausaler Wechselwirkung. Wir werden sehen, daß Riemanns Ausführungsversuche

[1298] Vgl. ebd., S. 524 (Anm.). Riemann versieht seine Bemerkungen zur Kausalität mit dem Hinweis: „Diese Sätze gelten nur, wenn einem einfachen Realgrund das Wirken zugeschrieben werden soll", und führt diesen Hinweis im Anschluß näher aus.

[1299] Riemann spricht von ‚Molecülen' und äußert sich nicht eindeutig über deren ontologischen Status, aber sein Unbehagen an diesen Entitäten der zeitgenössischen Physik ist mit Händen zu greifen: Im Fragment „Molecularmechanik" beispielsweise untersucht er zunächst traditionell „die freie Bewegung eines Systems materieller Punkte" unter Kräften, die „nur von Anziehungen und Abstossungen zwischen den Punkten herrühren" (Riemann *Werke*, S. 526 und S. 527), mit Mitteln der analytischen Mechanik, insbes. mit Gauß' Prinzip des kleinsten Zwanges (ebd., S. 527f.). Aber er schließt charakteristischerweise so: „Diese leztere Action lässt sich zerlegen [...] und dies würde zu den gewöhnlichen Erklärung der Bewegungsgesetze aus dem Gesetz der Trägheit und Anziehungen und Abstossungen zurückführen; sie lässt sich aber bei allen uns bekannten Naturkräften auch auf Kräfte, welche zwischen benachbarten Raumelementen thätig sind, zurückführen [...]" (ebd., S. 528). Die Zurückführung physikalischer Prozesse auf Zustandsänderungen benachbarter Raumelemente, bei der die Analysis gleichsam unbehelligt von materiellen Singularitäten fortschreitet, ist dabei sein *eigentliches* Anliegen. Auch wenn er in seinen Vorlesungen von „Elementargesetzen" in Form partieller Differentialgleichungen spricht (Riemann 1882, S. 2), konstatiert er eher mit Bedauern, daß dabei die Annahme materieller Teilchen in der Regel noch als physikalische Grundlage dient: „Man geht freilich in der Darstellung dieser Theorien meistens von der Annahme von Molekülen aus [...]" (ebd., S. 3). Gegenüber seinem Schüler E. Schering hat Riemann offenbar die Ansicht geäußert, daß die wirkenden Körper des Raumes als unendlich verdichtete Stellen eines Mediums, d.h. seines Äthers (vgl. Teil 2.3) aufzufassen seien (s. Laugwitz 1996, S. 278).

zu einer einheitlichen Nahwirkungstheorie in diese Richtung weisen, ohne allerdings tatsächlich zu einem modernen Feldbegriff zu gelangen[1300].

Hieraus erhellt nun, warum Riemann der begriffliche Rahmen der Newtonschen Mechanik für die von ihm beabsichtigte *weitere* Entwicklung der mathematischen Naturphilosophie nicht ausreichend erscheint: Newtons ‚Atomismus der Zentralkräfte' mit seinen Massenpunkten, die mit Trägheit und Kräften ausgestattet sind, liefert zwar eine *kausale* Theorie der Erklärung. Diese ist nicht *relational*, wie Riemann verlangt, sondern *absolut* — sie lokalisiert physikalische Veränderungen in einzelnen Massen, die isoliert und für sich bestehend als Ursachen angenommen werden.[1301]

Hiermit eng zusammen hängt ein anderer Punkt, der nur im Vorgriff auf die weitere Explikation von Riemanns mathematischer Naturphilosophie und Geometrie darzustellen ist: In dem Fragment „Gravitation und Licht" notiert Riemann verschiedene „Annahmen" der Newtonschen Mechanik; die erste lautet: „Es existiert ein unendlicher Raum mit den Eigenschaften, welche die Geometrie ihm beilegt, und ponderable Körper, welche in ihm ihren Ort nur stetig verändern"[1302]. Mit ‚Geometrie' ist hier natürlich die Euklidische Geometrie gemeint. Nehmen wir den Fall ungestörter Bewegung eines ‚ponderablen' Körpers, ist diese geradlinig im Euklidischen Sinne (und gleichförmig), bei Vorhandensein einer weiteren anziehenden Masse folgt sie dem Gravitationsgesetz und beschreibt — je nach Anfangsbedingungen — eine Ellipse, Hyperbel oder Parabel. Alle diese Bewegungen sind der Newtonschen Mechanik zufolge lokal darstellbar in dem Sinne, daß ihre Ortsveränderungen für unendlich kleine Zeitdifferenzen mathematisch ausgedrückt werden können. Gerade daher läßt ja auch Riemann die wissenschaftliche Physik mit Newton und — in diesem Kontext weniger begründet — mit Galilei beginnen.[1303]

In einem *anderen* Sinne aber sind Newtons Bewegungsgesetze und -bestimmungen *global* zu nennen: Euklids Axiome garantieren überall den gleichen mathematischen Raum — die ungestörte Trägheitsbewegung eines Körpers etwa vollzieht sich überall entlang der *gleichen* Geraden. Diese ‚Selbstverständlichkeit des Globalen' geht mit Riemanns relationaler Kausalauffassung verloren, denn was ‚Zustand' im Sinne seiner Kausalanalyse ist, hängt ab von der jeweiligen physikalischen Konfiguration. Auch von dieser kausalanalytischen Seite her verliert daher das Newtonsche Trägheitsprinzip seine Evidenz. In einer Anmerkung Riemanns zu diesem Prinzip heißt es: „Dass der

[1300] Vgl. Teil 2.3 und Teil 2.5.

[1301] Unter den Voraussetzungen der Newtonschen Mechanik führt Riemann auf: „4. In jedem ponderablen Punkt existirt eine der Grösse nach bestimmte Ursache (absolute Schwerkraft), vermöge welche in jedem Punkt des Raumes eine dem Quadrat der Entfernung von diesem ponderablen Punkte umgekehrt und seiner Schwerkraft direct proportionale beschleunigende Kraft stattfindet [...]" (Riemann 1854b, S. 533).

[1302] Riemann 1854b, S. 532.

[1303] Vgl. oben, Zit. 1251.

Körper seine Bewegung fortsetzt, muss eine Ursache haben, welche nur in dem inneren Zustand der Materie gesucht werden kann"[1304]. An anderer Stelle fordert er allgemein: „Der Grund der allgemeinen Bewegungsgesetze für Ponderabilien, welche sich im Eingange zu *Newton's* Principien zusammengestellt finden, liegt in dem inneren Zustande derselben"[1305]. Newtons Prinzipien werden für Riemann nicht einfach ungültig, aber sie werden zu lokalen Gesetzen in dem Sinne, daß sie in jedem Raum- und Zeitpunkt an den dortigen physikalischen Zustand gebunden sind und auch aus ihm erklärt werden müssen.[1306]

‚Zustand' ist bei Riemann ein *lokaler* Begriff — daß „die Welt aus ihrem Verhalten im Unendlichkleinen verstanden werden"[1307] muß, ist eben sein oberstes Postulat. Es gilt für die mathematische Naturphilosophie genauso wie für die Geometrie, und wir werden sehen, daß bei seinem kühnen Versuch einer begrifflichen Welterfassung aus dem Unendlichkleinen die Grenzen zwischen beiden Bereichen verschwimmen. Newtons Axiome, etwa sein Trägheitsprinzip, das für den Fall der Kräftefreiheit die Bewegung entlang *ein und derselben* Geraden aussagt, verlieren *auch* von dieser Seite her ihre Evidenz.

Drei allgemeinere Bemerkungen mögen diese Ausführungen zu Riemanns Newton-Kritik abschließen: *Erstens* zeigt sich, daß die hier als ‚wissenschaftstheoretische' und ‚naturphilosophische' Seiten dieser Kritik bezeichneten Argumentationen in der Tat nur zwei verschiedene Seiten der *gleichen* Medaille sind. *Zweitens* wird deutlich, daß in *Riemanns* Denken die Auflösung axiomatischen Denkens in der Mechanik und in der Geometrie des physikalischen Raumes systematisch nicht voneinander getrennt werden kann: Axiome sind zu verwerfen, weil hier wie dort *alle* Sätze die Erfahrung übersteigen und daher hypothetisch sind, aber auch, weil hier wie dort die Evidenzen einer ‚globalen' Anschauung, auf die die Axiome Euklids und Newtons setzen, verlorengehen, wenn tatsächlich die Welt aus dem Unendlichkleinen verstanden werden soll. Daß dabei die Kritik des mechanischen der des geometrischen Euklidianismus vorausgeht, sei hier nochmals unterstrichen. *Drittens* macht bereits die Auseinandersetzung mit Newtons Mechanik deutlich, daß Riemanns Mathematische Naturphilosophie über einen wesentlich *weiteren* begrifflichen Rahmen verfügt als Jacobis Mathematische Naturphilosophie. Hierzu trug vor allem bei, daß Riemann die Ansätze Faradays, Gauß' und anderer zu Nahwirkungstheorien der Elektrodynamik genau verfolgt hat, aber auch, daß er neuere Arbeiten von Fourier, Ampère, Poisson, Cauchy und anderen zur analytischen Behandlung der Wärmeausbreitung und zu Problemen der Konti-

[1304] Riemann 1854b, S. 532.

[1305] Riemann 1854a, S. 528.

[1306] Diese Erklärung leisten Riemanns Fragmente zur Naturphilosophie und Äthertheorie indes *nicht*: Die Einbettung der Newtonschen Mechanik in eine ‚höhere' Mechanik (Riemann-Nachlaß M. 16, Bl. 1-21, 31-36) bleibt unvollendet.

[1307] Weyl 1982, S. 115.

nuums- und Hydromechanik rezipierte.[1308] Es wäre jedoch verfehlt, darüber die bisher verfolgte ‚Auflösungslinie' des mechanischen Euklidianismus, nämlich die analytische Mechanik und vor allem ein neues Mathematikverständnis, aus dem Auge zu verlieren: Bereits in Lagranges Mechanik geht es ja, wenngleich mit konzeptuell viel bescheideneren Mitteln, um ein Verständnis der Natur aus der *Analysis*[1309] — ein Punkt, den Jacobi sehr genau gesehen und weitervermittelt hat.[1310] Wenn nun Riemann — philosophisch und physikalisch reflektierter als Lagrange — den Versuch unternimmt, die Welt aus dem Unendlichkleinen zu verstehen, bleibt auch hier zu fragen, wie weit Natur auf Analysis ‚reduziert' werden soll und wie die „Elementargesetze"[1311] der Nahwirkung, auf die er dabei abzielt — es kann sich ja bei ihnen nur um analytische Prinzipien handeln – mit Erfahrung begrifflich zusammengebracht werden. Diese Fragen zielen ab auf die Stellung, die die Mathematik bei Riemann innerhalb des Gesamts wissenschaftlicher Erkenntnis hat und werden daher dem folgenden Teil übergeben. Dabei wird sich zeigen, daß Riemanns empiristische Tendenzen *nicht* die These in Frage stellen, daß es ein (wenngleich modifiziertes) Verständnis *reiner Mathematik* ist, das bei ihm eine moderne, konsequent *hypothetisch-deduktive* Wissenschaftsauffassung erst ermöglicht.

VII.2.2 ‚An der Grenze des Vorstellbaren': Wissenschaftlicher Realismus, Mathematik und der Status der neuen Mathematischen Naturphilosophie

Zu den interessantesten unter Riemanns philosophischen Fragmenten zählt der „Versuch einer Lehre von den Grundbegriffen der Mathematik und Physik als Grundlage der Naturerklärung"[1312]. Wenn ich hier Riemanns erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Position als die eines ‚wissenschaftlichen Realismus' kennzeichne[1313],

[1308] Hierauf weist Laugwitz 1996, S. 253-257, zurecht hin; für Belege s. inbes. Riemann 1880 und 1882.

[1309] Vgl. Kap. IV, Teil 5, insbes. 5.2.

[1310] Vgl. Kap. VI, Teil 3.1, insbes. Zit. und Anm. 1117 und 1118.

[1311] Riemann 1882, S. 2.

[1312] Riemann *Werke*, S. 521-523.

[1313] Auf die beiden wichtigsten widersteitenden Aspekte seines Werkes sei hier ausdrücklich hingewiesen: In seinen Ausführungen „Zur Psychologie und Metaphysik" findet sich eine äußerst spekulative Theorie der „Geistesmassen" („Alles Denken ist hiernach Bildung neuer Geistesmassen"; Riemann *Werke*, S. 509), die Riemann mit der Entwicklung der organischen Natur und deren Entstehung „aus Unorganischem" in Verbindung bringt (ebd., S. 511-518, insbes. S. 514), wobei er sich explizit auf Fechner bezieht (ebd., S. 514f. und S. 517f.; hierzu auch Heidelberger 1993), was sich besonders in seinen Überlegungen zur Existenz einer „Erdseele" manifestiert (ebd., S. 517). In seinen Ansätzen zu einer Theorie des Äthers (Riemann 1853a, 1853b; vgl. Teil 2.3) setzt er das Eintreten der Geistes- bzw. „Vorstellungsmassen" in unsere „Seele" in

bietet dieses Fragment dafür die wichtigsten Anhaltspunkte: die angenäherte Wahrheit wissenschaftlicher Theorien, die immer bessere Wahrheitsapproximation im Laufe ihrer Entwicklung, der Anspruch auf ‚Realitätsabbildung' durch wissenschaftliche Theorien und Referenz zumindest ihrer zentralen Begriffe, empirischer Erfolg als Wahrheitsindikator — diese Gedanken lassen sich bereits dort finden.[1314] Das Fragment weist auch deutlich und explizit[1315] Riemanns insgesamt positive Herbart-Rezeption[1316] aus. Für die weitere Untersuchung scheint es mir ausreichend, drei Punkte hervorzuheben:

(1) Nach Riemann ist „Naturwissenschaft der Versuch, die Natur durch genaue Begriffe aufzufassen"[1317]. Er stimmt mit Herbart darin überein, daß alle diese Begriffe auf

Beziehung zu dem Eintreten des Äthers in die mit Masse behafteten Körper: „Beide Hypothesen lassen sich durch die Eine [sic] ersetzen, dass in allen ponderablen Atomen beständig Stoff aus der Körperwelt in die Geisteswelt eintritt. Die Ursache, weshalb der Stoff dort verschwindet, ist zu suchen in der unmittelbar vorher dort gebildeten Geistessubstanz, und die ponderablen Körper sind hiernach der Ort, wo die Geisteswelt in die Körperwelt eingreift" (Riemann 1853a, S. 529). Beide Texte mußten in einigen neueren Arbeiten dazu herhalten, Riemanns wissenschaftlichem und philosophischem Werk *insgesamt* ein wesentlich von Seiten der Deutschen Naturphilosophie geprägtes Denken unterzulegen. Mag in den aufgeführten Kontexten auch ein solcher Einfluß gegeben sein, was Riemanns bereits erwähnten Eklektizismus nur unterstreicht (s.o.), so ist eine solche Interpretation doch im wesentlichen verfehlt und wirft erheblich mehr Fragen auf, als sie beantworten kann. Insbesondere übersieht sie, daß Riemann *selbst* eine Grenze zwischen seinen metaphysisch-naturphilosophischen Spekulationen und seinen erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen sowie wissenschaftlichen Auffassungen zu ziehen sucht: Seine Ausführungen zur Erdseele schließt er ab mit dem Satz: „Soweit die geschichtliche Erinnerung der Menschheit reicht, sind alle Bewegungen der unorganischen Erdrinde wohl noch aus mechanischen Gesetzen zu erklären" (Riemann *Werke*, S. 518). In seiner Äthertheorie unterscheidet er die Untersuchung der „Gesetze der Stoffbewegungen, welche zur Erklärung der Erscheinungen angenommen werden müssen" von der Untersuchung der „Ursachen, aus welchen diese Bewegungen erklärt werden können" und bemerkt: „Das erste Geschäft ist ein mathematisches, das zweite ein metaphysisches" (Riemann 1853b, S. 534).

[1314] Vgl. etwa Putnams „Three Kinds of Scientific Realism" (Putnam 1982, S. 196). In Putnams Terminologie entspricht Riemanns Position am ehesten dem von ihm selbst favorisierten Typ 3 („Scientific Realism as Convergence"), wenngleich manche Ausführungen Riemanns sich auch mit Typ 1 („Scientific Realism as Materialism") und Typ 2 („Scientific Realism as Metaphysics") in Verbindung bringen lassen.

[1315] Riemann *Werke*, S. 522.

[1316] Riemann weist verschiedentlich auf seine Anleihen bei Herbart, aber auch auf Abgrenzungen zu Herbart hin (ebd., S. 507, 508, 509, 522), und schon sein erster Biograph Richard Dedekind vermutet, daß Herbart für Riemanns „erste Keime seiner naturphilosophischen Ideen" wichtig war (Dedekind 1876, S. 545). Erst Erhard Scholz hat anhand des Riemann-Nachlasses dessen Herbart-Studien im einzelnen aufgewiesen und analysiert; s. hierzu inbes. Scholz 1982a, 1982b und 1982c.

[1317] Riemann *Werke*, S. 521.

sinnlicher Wahrnehmung beruhen und durch Vorhersage bestätigt werden müssen. *Neue* Begriffe müssen geformt werden, wenn die vorhandenen nicht ausreichen, um Phänomene aus ihnen abzuleiten, wenn eine solche Ableitung als unwahrscheinlich gilt oder wenn eine neue, ‚unerwartete Wahrnehmung' eintritt. Die fortschreitende Begriffsbildung führt dabei zu einer immer größeren Wahrheitsannäherung: „Die Ergänzung oder Verbesserung des Begriffssystems bildet die ‚Erklärung' der unerwarteten Wahrnehmung. Durch diesen Process wird unsere Auffassung der Natur allmählich immer vollständiger und richtiger, geht aber zugleich immer mehr hinter die Oberfläche der Erscheinungen zurück".[1318]

(2) Riemann folgt Herbarts Kritik an Kant. Dies bedeutet insbesondere, daß die Begriffsentwicklung der Naturwissenschaften wie auch der Mathematik sich nicht gemäß vor aller Erfahrung bestehender und diese erst konstituierenden apriorischen Kategorien vollzieht, sondern *allein* aufgrund von Widersprüchen zwischen dem vorhandenen Begriffssystem und der Erfahrung: „Es ist nun von *Herbart* der Nachweis geliefert worden, dass auch die zur Weltauffassung dienenden Begriffe, deren Entstehung wir weder in der Geschichte, noch in unserer eigenen Entwicklung verfolgen können, sämmtlich, in soweit sie mehr sind als blosse Formen der Verbindung der einfachen sinnlichen Vorstellungen, aus dieser Quelle abgeleitet werden können und daher nicht (wie nach *Kant* die Kategorien) aus einer besonderen aller Erfahrung voraufgehenden Beschaffenheit der menschlichen Seele hergeleitet zu werden brauchen. Dieser Nachweis ihres Ursprungs in der Auffassung des durch die sinnliche Wahrnehmung Gegebenen ist für uns deshalb wichtig, *weil nur dadurch ihre Bedeutung in einer für die Naturwissenschaft genügenden Weise festgestellt werden kann* ...".[1319]

(3) Die Kritik des Apriorismus führt bei Herbart wie Riemann *nicht* zu einem naiven Empirismus: Für beide gibt es in den Wissenschaften keine ‚reine Erfahrung' als Basis, von der aus Theoriebildung betrieben werden kann. Neue Phänomene werden vielmehr immer auf dem Hintergrund eines vorhandenen Begriffsrahmens wahrgenommen und müssen in diesen Rahmen integriert werden. Herbart faßt diesen Gedanken prägnant so zusammen: „Wir sind in unsern Begriffen völlig eingeschlossen, und *gerade darum, weil* wir es sind, entscheiden Begriffe über die reale Natur der Dinge".[1320]

Von schulphilosophischer Seite hat Herbart zweifellos den größten Einfluß auf Riemanns Denken ausgeübt; gleichwohl ist er weit davon entfernt, Herbarts Lehre uneingeschränkt zu übernehmen. Insbesondere hat Riemann die Naturphilosophie Her-

[1318] Ebd., S. 521.

[1319] Ebd., S. 522. Kants Philosophie der Mathematik geriet ja generell in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts aufgrund der Grundlagenentwicklung der Geometrie immer mehr in die Kritik, nicht zuletzt aufgrund von Riemanns *Hypothesen*. Bei Riemann selbst verhält sich die Sache gewissermaßen umgekehrt: Die Zurückweisung der Kantischen Position geht seinen eigenen geometrischen Untersuchungen voran.

[1320] Herbart 1993, S. 232 (§136); vgl. hierzu auch Cassirer *Erkenntnisproblem* III, S. 379.

barts explizit, aber ohne nähere Begründung, zurückgewiesen[1321], obwohl sich auch hier gewisse inhaltliche Parallelen aufweisen lassen.[1322]

Eine plausible Erklärung hierfür dürfte sein, daß Riemann eine ganz andere Auffassung davon hat, welche Rolle die *Mathematik* in den Naturwissenschaften zu spielen habe: Der traditionellen, auch von Herbart geteilten Auffassung zufolge, hat die *Philosophie* die Aufgabe, wissenschaftliche Konzepte zu analysieren und zu zeigen, welche von ihnen einer mathematischen Behandlung unterworfen werden können. Die *Mathematik* bzw. mathematische Physik übernimmt diese Konzepte und wendet sie in den Naturwissenschaften an.[1323] Wir haben im letzten Kapitel gesehen, daß die Entwicklung reiner Mathematik dazu führte, daß Mathematiker wie Gauß, Crelle und Jacobi eine solche ‚Arbeitsteilung' ablehnen.[1324] Nicht anders verhält es sich mit Riemann, der als Mathematiker bereits in der neuen Tradition sozialisiert wird: Eine autonome Mathematik braucht auch ihm zufolge ihre Anwendungen nicht vor dem ‚Gerichtshof' der Philosophie zu rechtfertigen.[1325] Sie selbst ist *allgemeinste Begriffswissenschaft*, daher auch unabhängig von der Philosophie fähig, ihren Realitätsbezug zu erklären und zu

[1321] Vgl. Riemann *Werke*, S. 507f. Hervorzuheben ist diese Notiz: „Der Verfasser ist Herbartianer in Psychologie und Erkenntnisstheorie (Methodologie und Eidologie), Herbart's Naturphilosophie und den darauf bezüglichen metaphysischen Disciplinen (Ontologie und Synechologie) kann er meistens sich nicht anschließen" (ebd., S. 508). In heutigen Begriffen: Riemann bekennt sich zu Herbarts Erkenntnistheorie und ‚Erscheinungslehre' (Eidologie), aber er distanziert sich von Herbarts Naturphilosophie, seiner Ontologie und dessen Raum-, Zeit- und Größenlehre (Synechologie).

[1322] S. hierzu näher Scholz 1982 a und 1982c.

[1323] Herbart betont zwar immer wieder die Wichtigkeit der Mathematik für die Naturforschung — wie übrigens auch für seine Psychologie. Die Mathematik ist „Hilfsmittel" der Naturphilosophie und steht „zwischen Erfahrung und Metaphysik" in der „Mitte" (Herbart *Werke* I, S. 500 und S. 502), gewährt jedoch keinen privilegierten Zugang zur Natur, wie ihn etwa Kant für die reine Naturlehre postuliert. Bei Herbart haben die Begriffe der Naturlehre *und* der Mathematik ihre Grundlage in der Erfahrung und werden durch die Metaphysik bearbeitet, d.h. vor allem: von Widersprüchen befreit. Daß die ‚Materie der Erfahrung' auch bestimmte ‚gegebene Formen' wie Raum, Zeit und Größenverhältnisse hat und daher mathematisch gefaßt werden kann, zeigt ebenfalls erst die *Metaphysik*. Wenngleich in ständiger Bezugnahme auf die Wissenschaften, die zur Bearbeitung der Begriffe beitragen, ist es also die *Metaphysik*, die bei Herbart letztlich Mathematisierung des Naturgeschehens begründet. Soweit folgt auch Herbart ganz dem tradierten Selbstverständnis der Schulphilosophie.

[1324] Vgl. Kap. VI, Teil 2.

[1325] Erhard Scholz belegt im einzelnen, was man als *Substitution* von (Herbartscher) Philosophie durch (Riemannsche) Mathematikauffassung bezeichnen könnte: „Riemann's understanding of the task of mathematics shows a striking similarity to the aims of philosophy as understood by Herbart, and the latter's characterization of the relationship between science and philosophy resembles very much the relationship between natural science and mathematics as seen by Riemann„ (Scholz 1982a, S. 426; vgl. Scholz 1980, S. 96-98 und Scholz 1992, S. 31-33).

sichern. Hier dürfte der wichtigste Differenzpunkt zwischen Herbart und Riemann liegen.

Andererseits stehen Riemanns empiristische Tendenzen — auch wenn sie sich nur in einer recht allgemeinen und unspezifischen Rede von Begriffsbildungen durch Wahrnehmung und Beobachtung manifestieren — einer umstandslosen Einordnung in die Tradition reiner Mathematik, wie wir sie etwa bei Jacobi vorgefunden haben, entgegen: Wenn alle vorhandenen Begriffe auf Erfahrung beruhen und alle neuen Begriffe um der Erklärung neuartiger Wahrnehmung willen gebildet werden, kann es keine reine Mathematik im Sinne bloßer symbolischer Konstruktion nach Gesetzen des Denkens geben — Mathematik ist dann immer ‚empiriedurchtränkt' und *erkenntnistheoretisch* nicht von Naturwissenschaft abzugrenzen. Die Wahrheit aller ihrer Sätze, selbst etwa noch Riemanns abstrakteste Aussagen über Zetafunktion und Primzahlverteilung, das Abelsche Theorem oder Eigenschaften einer *n*-fach ausgedehnten Mannigfaltigkeit, hingen dann davon ab, ob sie irgendwie der Bezugnahme auf Erfahrung fähig sind — oder um Quines Antwort auf dieses Problem, das jeder Empirismus mit der Mathematik hat, zu zitieren: Alle ihre Sätze „gelten [...] somit als wahr oder falsch, wenn auch in unerforschlicher Weise".[1326]

Man muß feststellen, daß Riemann dieses Problem explizit nie formuliert hat. Dies ist umso verwunderlicher, als es sich ihm — vor dem ‚kontrastiven Hintergrund' seiner erkenntnistheoretischen Reflexionen einerseits und seiner praktischen Arbeiten zu den erfahrungsfernsten Bereichen der Mathematik seiner Zeit andererseits — hätte aufdrängen müssen. Meine These ist, daß Riemann die ‚Quinesche Konsequenz' vermeidet und zumindest Teilen der Mathematik eine *eigene*, erfahrungsunabhängige Wahrheit zuerkennt, die es gerechtfertigt erscheinen läßt, dort auch bei ihm von *reiner* Mathematik zu sprechen.[1327] Ich stelle zunächst Riemanns *explizite* Stellungnahmen zum

[1326] Quine 1995, S. 132; vgl. auch Quine 1991, S. 183-190.

[1327] Eine andere Auffassung vertritt hier Erhard Scholz, wenn er zu Riemann bemerkt: „Die relative Autonomie theoretisch-mathematischer Forschung gewann ihre Bedeutung in letzter Instanz dadurch, daß sie die Voraussetzungen für eine vorurteilsfreie, genauere und tiefere Naturerkenntnis schaffte. Potentiell praktisch nutzbares Naturwissen und theoretische Mathematik waren für ihn vielfältig ineinander verwoben und gingen unter aktiver Teilnahme des Mathematikers ineinander über. Insofern gab es für ihn keine Trennung von reiner und angewandter Mathematik" (Scholz 1980, S. 345). Ich stimme Herbert Mehrtens darin zu, daß dieses Nutzenargument Riemanns Mathematikverständnis im wesentlichen nicht trifft (Mehrtens 1990, S. 69-74), wenngleich mir die Begründung dieser Kritik zum Teil (etwa in der Bezugnahme auf Riemanns ‚Erdseele', ebd., S. 69f.; vgl. Anm. 1313 oben) an der Sache vorbeizugehen scheint. Unterstreichen möchte ich jedoch das Argument, das Mehrtens in Hinblick auf Riemanns allgemeinen Mannigfaltigkeitsbegriff gebraucht, das aber auch das Verständnis reiner Mathematik im allgemeinen (vgl. Kap. V, Teil 2.1) charakterisiert: „Die neue Sprache der Mathematik bedarf nicht der Vergewisserung auf ein äußeres Sein, weil sie sich in der steten Arbeit an sich selbst vergewissert" (Mehrtens 1990, S. 68).

Verhältnis von Mathematik und Naturwissenschaft vor, diskutiere dann deren Unzulänglichkeit vor dem Hintergrund seiner eigenen Erkenntnistheorie und gehe zuletzt auf seine ‚implizite' reine Mathematik und deren Verhältnis zur mathematischen Naturphilosophie ein.

Riemann vertritt, wie verschiedentlich bemerkt worden ist[1328], explizit lediglich eine *methodologische* Unterscheidung von Naturwissenschaft und Mathematik; er sieht, daß es ein *Anwendungsproblem* gibt, wenn beide zusammenkommen, und er sucht, deren jeweilige *Funktionen* im Erkenntnisprozeß zu separieren. Die genauere Analyse zeigt indes, daß es bei einer rein methodologischen Demarkation nicht bleibt. Eine wichtige Passage aus dem bereits oben zitierten Fragment sei hierzu ausführlicher wiedergegeben:[1329]

I. Wann ist unsere Auffassung der Welt wahr?
‚Wenn der Zusammenhang unserer Vorstellungen dem Zusammenhange der Dinge entspricht.'
Die Elemente unseres Bildes von der Welt sind von den entsprechenden Elementen des abgebildeten Realen gänzlich verschieden. Sie sind etwas in uns; die Elemente des Realen etwas ausser uns. Aber die Verbindung zwischen den Elementen im Bilde und im Abgebildeten müssen übereinstimmen, wenn das Bild wahr sein soll. Die Wahrheit des Bildes ist unabhängig von dem Grade der Feinheit des Bildes; sie hängt nicht davon ab, ob die Elemente des Bildes grössere oder kleinere Mengen des Realen repräsentiren. Aber die Verbindungen müssen einander entsprechen [...].
II. Woraus soll der Zusammenhang der Dinge gefunden werden?
‚Aus dem Zusammenhange der Erscheinungen.'
Die Vorstellungen von Sinnendingen in bestimmten räumlichen und zeitlichen Verhältnissen ist dasjenige, was beim absichtlichen Nachdenken über die Natur vorgefunden wird oder für dasselbe *gegeben* ist. Es ist jedoch bekanntlich die *Qualität* der Merkmale der Sinnendinge, Farbe, Klang, Ton, Geruch, Geschmack, Wärme oder Kälte, etwas lediglich unserer Empfindung entnommenes, ausser uns nicht Existirendes.
Dasjenige, woraus der Zusammenhang der Dinge erkannt werden muss, sind also *quantitative* Verhältnisse, die räumlichen und zeitlichen Verhältnisse der Sinnendinge und die Intensitätsverhältnisse der Merkmale und ihrer Qualitätsunterschiede.
Aus dem Nachdenken über den beobachteten Zusammenhang dieser Grössenverhältnisse muss sich die Erkenntnis des Zusammenhangs der Dinge ergeben.

Deutlicher als in jeder anderen überlieferten Stellungnahme Riemanns wird hier klar, warum Naturphilosophie für ihn nur *Mathematische* Naturphilosophie sein kann: Nicht die qualitativen Merkmale der Empfindungswelt korrespondieren mit der Realität, sondern nur *quantitative*. Die Mathematik hat es daher mit den entscheidenden,

[1328] Etwa in pointierter Form auch bei Herbert Mehrtens: „Die Grenze, die Riemann zog zwischen der Mathematik und der Physik, ist eine strikt methodische, deren Bedeutung er selbst am klarsten einschätzen konnte, da er ständig über diese Grenze wechselte" (ebd., S. 58) — Mehrtens' ‚strikt' wird sich allerdings als zu strikt erweisen.
[1329] Riemann *Werke*, S. 523.

‚realitätsvermittelnden' Begriffen zu tun. Eine Begründung für diesen *erkenntnistheoretischen* (und nicht methodologischen) Glaubenssatz bleibt Riemann schuldig. Einige Aufzeichnungen in seinem Nachlaß[1330] lassen die Vermutung zu, daß dieser Satz auf Studien von Lockes *Essay Concerning Human Understanding* zurückgehen könnte: Lockes Unterscheidung von primären und sekundären Qualitäten[1331], die in der Tradition des älteren Mechanismus zwar keine Begründung findet, aber von dorther einige Plausibilität beanspruchen kann, wird von Riemann so verlängert, daß ‚realitätsvermittelnde' Begriffe stets quantifizierbare Begriffe sind. Ohne Naturbeobachtung keine Naturerkenntnis, aber ohne Mathematik auch keine Naturwissenschaft, die den realen ‚Zusammenhang der Dinge' aufdecken könnte — so weit, so traditionell.

Riemann geht jedoch über die traditionelle und ‚statische' Sicht entscheidend hinaus, wenn er das Verhältnis von Mathematik und Naturwissenschaft im weiteren *methodologisch* genauer zu bestimmen sucht. Hier zeigt sich, daß es ihm nicht darum geht, im Prozeß der Naturerfassung die Mathematik mit der Aufgabe zu überheben, *abschließende* ‚Wesenserkenntnis' zu vermitteln, sondern daß es für ihn die Aufgabe der Mathematik ist, in diesem *fortschreitenden* Prozeß die Entwicklung neuer Begriffe und Begriffssysteme zu leisten und so der Naturwissenschaft *Alternativen* bereitzustellen, unter denen nur Messung und Experiment entscheiden können.

Riemanns allgemeiner Begriff der mehrfach ausgedehnten Größe bzw. *Mannigfaltigkeitsbegriff* liefert die beste Illustration für diese methodologische Unterscheidung. Der mathematische Begriff bietet der Physik eine Vielzahl von Optionen, von denen

[1330] Riemann Nachlaß, M. 18, Bl. 63, 67^{v}, 178; M. 27, Bl. 232. Bereits Hubert Laitko und Annette Vogt sprechen von „Relikte[n] der Doktrin von den primären und sekundären Qualitäten" bei Riemann (Laitko/Vogt 1977, S. 1355) — eine Vermutung, die durch die genannten Stellen erhärtet wird. Details der Riemannschen Locke-Rezeption müssen indes einer eigenen Untersuchung vorbehalten bleiben.

[1331] Vgl. insbes. Book II, Ch. VIII (Locke 1979, S. 134f.). Locke hat, trotz mancher Variationen in den verschiedenen Auflagen des *Essay*, eine recht bestimmte Auffassung davon, welche Qualitäten als ‚primär' zu gelten haben: Gestalt, Festigkeit, Ausdehnung, Bewegung oder Ruhe — allesamt *quantifizierbar* im Verständnis der damaligen Mechanik —, während Farbe, Töne, Geschmacksformen diese Eigenschaft nicht aufweisen. Riemann schließt sich nur hinsichtlich der ‚sekundären' Qualitäten an Locke an, wenn er ganz ähnlich von ‚Farbe, Klang, Ton, Geruch, Geschmack ...' sagt, daß sie ‚ausser uns nicht Existirendes' seien: Welche Qualitäten ‚primär' zu nennen wären, sagt er nicht — es können nicht die Lockeschen sein, die ja im wesentlichen der Newtonschen Mechanik entnommen sind, es können auch keine anderen sein, die (wie Locke sagt) ‚die Sinne stets in jedem Teilchen der Materie, das genügend groß ist, um wahrgenommen zu werden, auffinden', denn auf solche Qualitäten kommt es ja in Riemanns ‚Physik des Unendlichkleinen' gar nicht an. Dieser Gesichtspunkte wird sich in der weiteren Diskussion als wichtig erweisen.

die Erfahrung zu bestimmen hat, welche auf den physikalischen Raum zutrifft. In diesem Sinne bemerkt Riemann am Ende der *Hypothesen*:[1332]

> Die Entscheidung dieser Fragen kann nur gefunden werden, indem man von der bisherigen durch die Erfahrung bewährten Auffassung der Erscheinungen, wozu Newton den Grund gelegt, ausgeht und diese durch Thatsachen, die sich aus ihr nicht erklären lassen, getrieben allmählich umarbeitet; solche Untersuchungen, welche, wie die hier geführte, von allgemeinen Begriffen ausgehen, können nur dazu dienen, dass diese Arbeit nicht durch die Beschränktheit der Begriffe gehindert und der Fortschritt im Erkennen des Zusammenhangs der Dinge nicht durch überlieferte Vorurtheile gehemmt wird.
> Es führt dies hinüber in das Gebiet einer andern Wissenschaft, in das Gebiet der Physik, welches wohl die Natur der heutigen Veranlassung nicht zu betreten erlaubt.

Bei Riemann wird die Mathematik zur *allgemeinsten Begriffswissenschaft*[1333], und deren Allgemeinheit wird allein *methodologisch* — nämlich dadurch, daß ihre Begriffe *nicht* an Beobachtung und Messung gebunden sind — begründet. Ihre Beziehung zur Naturwissenschaft ist dabei zwangsläufig durch eine *einseitige* Abhängigkeit charakterisiert: Die Naturwissenschaft bedarf mathematischer Begriffsbildungen, wenn sie nicht in tradierten Erfahrungsbezügen und Denkgewohnheiten verharren will. Umgekehrt aber hängt die Möglichkeit mathematischer Begriffsbildung für Riemann ganz offensichtlich weder von den Ergebnissen der Naturwissenschaft noch von der Erfahrung im allgemeinen ab. Die ‚motorische' Funktion der Mathematik, die Riemann dieser im Prozeß einer immer verfeinerteren und ‚wahreren' Naturerfassung beilegt, ist aus seinen allgemeinen erkenntnistheoretischen Stellungnahmen kaum verstehbar und jedenfalls durch sie nicht begründet: *Genetisch* betrachtet, sollte ein allgemeiner *mathematischer* Begriff (wie z.B. der der n-dimensionalen Mannigfaltigkeit) seinem Entwicklungsschema zufolge[1334] stets unter dem ‚Druck' neuer Erfahrung gebildet werden; systematisch betrachtet, sollten Aussagen, in denen er vorkommt, nicht anders zu beurteilen sein als (andere) allgemeine empirische Aussagen.

Tatsächlich aber kann die Mathematik die von Riemann im obigen Zitat behaupteten Funktionen *so* nicht wahrnehmen, und tatsächlich hat er die interessantesten Teile seiner Mathematik *so* auch weder gebildet noch danach beurteilt. Sein Mannigfaltigkeitsbegriff etwa geht ja nicht auf einen irgendwie gearteten ‚Erfahrungsdruck' zurück.[1335]

[1332] Riemann 1854a, S. 318.

[1333] Dies scheint mir auch, vom Standpunkt der Philosophie der Mathematik betrachtet, der originellste und modernste Zug Riemanns zu sein.

[1334] Vgl. oben, Zit. 1318 und 1319.

[1335] Hier geht es mir allein um die Frage einer möglichen *Genese* im Sinne des von Riemann behaupteten Schemas der sukzessiven Begriffsentwicklung aufgrund ‚widerstreitender' Erfahrung. Eine andere Frage ist es, wie Riemann selbst seinen Mannigfaltigkeitsbegriff in den *Hypothesen* physikalisch interpretiert. Hier sind, wie später gezeigt werden soll (vgl. Teil 2.4), Riemanns vorgängige Arbeiten zur Physik (insbes. Äthertheorie) natürlich von Bedeutung.

Er nimmt vielmehr seinen Ausgang in Gauß' Differentialgeometrie der Flächen und wird durch kühne Abstraktionen (wie: Absehen von Gauß' konkreter Form der Metrik) und kühne Analogiebildungen (wie: Ausbildung der Differentialform der allgemeinen ebenen Mannigfaltigkeit als *positiv-definiter quadratischer* Form) ermöglicht[1336]. Riemanns wichtigste Begriffsbildung — und einer der weitreichendsten Begriffe der Mathematik überhaupt — folgt so in keiner nachvollziehbaren Weise seinem eigenen Entwicklungsschema der ‚Umbildung durch Erfahrung'. Der Mannigfaltigkeitsbegriff ist vielmehr ein Produkt „intellektueller Neugierde" und zunächst auch ein „uninterpretierter" Begriff[1337]. *Ich* rechne ihn daher zu einem Bereich *reiner* Mathematik[1338], dessen Trennung von angewandter Mathematik und Naturwissenschaft von Riemann selbst nur dunkel und andeutungsweise angesprochen wird[1339] — nach meiner Auffassung deshalb, weil diese Trennung mit seinem wissenschaftlichen Realismus schwer-

[1336] Für alle mathematischen und mathematikhistorischen Detailfragen in diesem Kontext sei verwiesen auf Scholz 1980, S. 24-99.

[1337] Im Sinne Quines. Dessen Auffassung zur Mathematisierung weist einige interessante Bezüge zu Riemann auf. Die nichteuklidischen (und später auch *n*-dimensionalen) Geometrien, die nach Quine am Anfang einer (insgesamt zu bedauernden) „Disinterpretation" einer an sich semantisch gehaltvollen Mathematik standen (Quine 1991, S. 183f.), werden durch Abstraktion, vor allem aber durch partielle Analogiebildung als uninterpretierte Systeme konstruiert: „Auf diese Weise entstanden die nichteuklidischen Geometrien und die *n*-dimensionale Geometrie. Eine derartige systematische Variation en gros ist das Geschäft der abstrakten Algebra. Einige der in dieser Weise erzeugten Systeme finden später nützliche Interpretationen, aber das ist nicht die treibende Kraft, sondern die intellektuelle Neugierde bezüglich der Strukturen selbst. Die Bedeutung der Rolle, die uninterpretierte Systeme in der modernen Mathematik spielen, läßt sich daher nicht bestreiten. Es ist mittlerweile der Schwanz, der mit dem Hund wackelt. Was ich jedoch bedaure [...], ist, daß man die Existenz — geschweige denn die philosophische Bedeutung — des alten Hündchens selbst nicht mehr anerkennt" (ebd., S. 186). Riemann hängt an dem ‚alten Hündchen' und sucht nach Kräften, es zu hegen und zu pflegen — insofern trifft ihn der Quinesche Vorwurf nicht. Dennoch ist es auch bei ihm längst ‚der Schwanz, der mit dem Hund wackelt': Eine Mathematik, die es mit dem ‚Zusammenhang der Begriffe' zu tun hat, dominiert eine Mathematik, der es (auch) noch um den ‚Zusammenhang der Erscheinungen' (vgl. Zit. 1329 oben) geht.

[1338] Vgl. Teil 2.1, Anm. 1269. Für Quine (vgl. Anm. 1337) ist ‚reine' und ‚uninterpretierte' Mathematik zu unterscheiden: „Arithmetik, Logik und Mengenlehre sind zwar rein mathematisch, doch mit Disinterpretation hat ihre Reinheit nichts zu tun; Reinheit heißt hier nichts weiter, als daß die Verfahren der Arithmetik, Logik und Mengenlehre formuliert werden, ohne Ausdrucksformen zu Hilfe zu nehmen, die außerhalb des arithmetischen bzw. logischen bzw. mengentheoretischen Teils unseres allgemeinen Wortschatzes liegen. Reinheit ist nicht dasselbe wie Uninterpretiertheit" (ebd., S. 185). Diese Unterscheidung erscheint mir *für Riemann* nicht sinnvoll.

[1339] Etwa in seiner Rede von der „Anwendung" des Mannigfaltigkeitsbegriffs auf den physikalischen Raum (Riemann 1854a, S. 283); auf eine andere Andeutung gehe ich gleich ein.

lich in Einklang zu bringen wäre. Riemann möchte den Zusammenhang von Mathematik und Erfahrung erhalten. Aber dies kann ihm mit den logischen Mitteln seiner Zeit nicht gelingen, und letztendlich gibt er diesen Zusammenhang auch auf: Er nimmt mathematische Wahrheit, offenbar sogar ‚notwendige' Wahrheit, die unabhängig von jeder Erfahrung ist, an; wir finden sie etwa dort, wo er Aussagen über den allgemeinen Mannigfaltigkeitsbegriff macht, bevor er diesen auf den physikalischen Raum ‚anwendet'.[1340] Dieses gewissermaßen ‚uneingestandene' Reich mathematischer Wahrheiten stützt sich auf allgemeinste mathematische Begriffe, deren Entstehung aus der Erfahrung (im Sinne von Riemanns Schema der Begriffsentwicklung) ebensowenig auszumachen ist[1341] wie ihre volle Interpretation oder gar eine irgendwie geartete ‚Verifikation' durch die Erfahrung: *reine Mathematik*. Man muß *dieses* Riemannsche Reich, so schwer es fällt, näher zu bestimmen suchen, weil letztlich nur so Klarheit darüber zu gewinnen ist, wie seine neue, jenseits der Newtonschen Mechanik angesiedelte, mathematische Naturphilosophie zu seinem ‚rein mathematischen' Wahrheitsbegriff steht, und ob sie an ihm teil hat. Wir werden sehen, daß dies *nicht* der Fall ist.

Unter Riemanns Aufzeichnungen „Zur Psychologie und Metaphysik"[1342] finden sich unter anderem verschiedene als „Antinomien" gekennzeichnete Gegensatzpaare; die beiden ersten sind hier von Interesse, denn sie enthalten unter „Thesis" und „Antithesis" folgende Eintragungen:

(1) „Endliches, Vorstellbares" bzw. „Unendliches, Begriffssysteme, die an der Grenze des Vorstellbaren liegen", sowie

(2) „Endliche Zeit- und Raumelemente" bzw. „Stetiges"[1343].

[1340] Vgl. Teil 2.1, Zit. 1270. Die dort implizit getroffene Unterscheidung von ‚nothwendiger' und ‚empirischer' Gewißheit ist signifikant für die Unterscheidung allgemeiner Sätze über Mannigfaltigkeiten und solcher Sätze, die sich auf den physikalischen Raum beziehen: Eine ‚rein mathematische' Aussage wie die, daß bei einer ebenen n-dimensionalen Mannigfaltigkeit durch Angabe des „Krümmungsmass[es] in jedem Punkte in n (n-1)/2 Flächenrichtungen" (Riemann 1854a, S. 279f.) die Metrik der Mannigfaltigkeit eindeutig bestimmt ist, ist eine *mathematisch* wahre, gewisse und notwendige Aussage — keine ‚Hypothese', der lediglich ‚empirische Gewißheit' zukommt.

[1341] Riemann selbst könnte dies meinen, wenn er seine Überlegungen zur „Umwandlung älterer Begriffssysteme" durch erfahrungserzeugte „Widersprüche und Unwahrscheinlichkeiten" (Riemann *Werke*, S. 521) mit der Bemerkung abschließt und einschränkt: „Die Bildung neuer Begriffe, *soweit* sie der Beobachtung zugänglich ist, geschieht also durch jenen Prozeß" (ebd., S. 522, meine Hervorhebung). Der Kontext deutet jedoch darauf hin, daß die ‚Beobachtungsklausel' eher auf eine Beschränkung unserer Möglichkeiten, Begriffsbildung als *historischen* Prozeß zu verfolgen, als auf unser Unvermögen, die Ausbildung mathematischer ‚Grenzbegriffe' (s.u.) zu verfolgen, hinweist.

[1342] Riemann *Werke*, S. 509-520.

[1343] Ebd., S. 518; vgl. hierzu auch die hilfreichen Ausführungen in Laugwitz 1996, S. 300f.

Da es Riemanns *umfassender* Ansatz ist, die Welt aus ihrem Verhalten im Unendlichkleinen zu verstehen[1344], sind von diesen beiden Antinomien des Unendlichen sowohl seine neue mathematische Naturphilosophie als auch seine (*hier* so genannte) reine Mathematik betroffen: Hier wie dort geht es Riemann um die größtmögliche, ‚an der Grenze des Vorstellbaren' liegende Ausweitung des wissenschaftlichen Begriffssystems — dies macht das Großartige, an entscheidenden Stellen aber eben auch Dunkle seines Denkens aus.[1345] Fallen beide Bereiche deshalb für Riemann zusammen — etwa in einem *erweiterten* Lagrangeschen Sinne[1346], wonach die Gesetze der Natur letztlich aus dem Studium des *mathematisch* Unendlichen gewonnen und begründet werden könnten?

Sie tun es *nicht*, und es kann daher mit Riemann keine — auf welche Nahwirkungsgesetze auch immer gegründete — Rückkehr zum axiomatischen Denken der KMN geben. Die Differenz beider Bereiche liegt dabei — metaphorisch gesprochen — nicht im ‚Aufstieg' vom Endlichen und Vorstellbaren zum Unendlichen (hier genauer: Unendlichkleinen), sondern im ‚Abstieg'. Betrachten wir dazu eine Bemerkung Riemanns, die den Antinomien nachgestellt und mit „Allgemeines Verhältniss der Begriffsysteme der Thesis und Antithesis" überschrieben ist.[1347] Er empfiehlt hier die mathematische Grenzwertmethode, „welche *Newton* zur Begründung der Infinitesimalrechnung anwandte"[1348], als Möglichkeit, das Verhältnis von Thesis und Antithesis allgemein zu fassen und so die Antithesis gleichsam begrifflich zu ‚approximieren':[1349]

> Die Begriffssysteme der Antithesis sind zwar durch negative Prädicate fest bestimmte Begriffe, aber nicht positiv vorstellbar.
> Eben deshalb, weil ein genaues und vollständiges Vorstellen dieser Begriffssysteme unmöglich ist, sind sie der directen Untersuchung und Bearbeitung durch unser Nachdenken unzugänglich. Sie können aber als an der Grenze des Vorstellbaren liegend betrachtet werden, d.h. man kann ein innerhalb des Vorstellbaren liegendes Begriffssystem bilden, welches durch blosse Aenderung der Grössenverhältnisse in das gegebene Begriffssystem übergeht. Von den Grössenverhältnissen abgesehen, bleibt das Begriffssystem bei dem Uebergang zur Grenze ungeändert. In dem Grenzfall selbst aber verlieren einige von den Correlativbegriffen des Systems ihre Vorstellbarkeit, und zwar solche, welche die Beziehung zwischen andern Begriffen vermitteln.

[1344] Vgl. Teil 2.1, Zit. 1307.

[1345] Detlef Laugwitz greift die Antinomien in seiner zusammenfassenden Bewertung des Riemannschen Werkes auf und formuliert, gleichsam als ‚regulatives Postulat' seiner Riemann-Interpretation: „*Riemanns Werk ist gekennzeichnet von dem Bestreben, den Polen der Antithesis möglichst nahe zu kommen*" (Laugwitz 1996, S. 319).

[1346] Vgl. Kap. IV, Teil 5.2.

[1347] Riemann *Werke*, S. 519.

[1348] Ebd., S. 519.

[1349] Ebd., S. 519f.

Die Schlußsätze belegen, wie Detlef Laugwitz klar herausgestellt hat, daß es bei Riemann kein ontologisches ‚Leibnizsches' Kontinuitätsprinzip gibt, wonach die „Regeln des Endlichen im Unendlichen Geltung behalten"[1350]. Riemanns Mathematikauffassung ist maßgeblich von dem Bemühen gekennzeichnet, das Unendliche *begrifflich* zu fassen, und wenn ich hier die Auffassung vertrete, daß es bei ihm ein eigenes Reich ‚rein' mathematischer Wahrheiten gibt, liefert dafür die hier von ihm konstatierte *Diskontinuität* zwischen Endlichem und Unendlichem die beste Begründung: *Riemanns reine Mathematik ist die Mathematik des Unendlichen*[1351].

In dieser reinen Mathematik kann z.B. eine unstetige Funktion als Grenzwert einer unendlichen Folge stetiger Funktionen auftreten.[1352] Ein solches ‚Monster' — aus der Perspektive einer Mathematik, die auf anschauliche Darstellung ihrer Objekte aus ist —, kann zwar im Sinne Riemanns nicht direkt untersucht werden, eröffnet aber der Mathematik ein ganzes Feld neuer, indirekter Untersuchungen. Auch Riemanns Begriff der *stetigen* Mannigfaltigkeit ist ein Grenzbegriff im obigen Sinne — und die allgemeine Theorie stetiger Mannigfaltigkeiten *profitiert* davon, daß nicht alle ‚Correlativbegriffe' diskreter (endlicher) Mannigfaltigkeiten auf sie übertragbar sind: So werden der Mathematik qualitativ neue Möglichkeiten eröffnet, so gewinnt sie die Autonomie von Erfahrung im weitesten Sinne, die die reine Tradition beansprucht und kennzeichnet.

Welche Implikationen haben Riemanns obige Ausführungen für seine neue mathematische Naturphilosophie, der es darum geht, ‚Grenzbegriffe' aus der Untersuchung endlicher physikalischer Objekte (‚ponderabler' Körper oder eines endlichen, äthererfüllten Raumes) zu gewinnen, um aus ihnen die Erscheinungen ‚im Großen' zu erklären? Grundsätzlich muß auch sie teilhaben an der Freiheit, der reinen Mathematik[1353],

[1350] S. Laugwitz 1996, S. 300f.

[1351] Daß es gerade hier ‚notwendige' Wahrheiten geben soll (vgl. Anm. 1340), stellt zweifellos ein (weiteres) Problem in Riemanns philosophischen Anschauungen dar, das hier nicht weiter zu diskutieren ist, weil Riemann seinen eigenen Notwendigkeitsbegriff nicht expliziert hat.

[1352] Ebd., S. 300; vgl. hierzu auch Volkert 1986, S. 104-106. Volkert spricht, auf Lakatos' Terminologie bezugnehmend, von einem anbrechenden „goldenen Zeitalter der Monster" (ebd., S. 99) in der Untersuchung von Funktionen.

[1353] Es gibt sogar, im Sinne der hier (für Riemann) getroffenen Bestimmung reiner Mathematik, keinen Grund, die *mathematische Entwicklung* von möglichen ‚Elementargesetzen' des Unendlichkleinen nicht der reinen Mathematik zuzurechnen: Für die Beurteilung der letztendlich gewonnenen Aussagen entscheidend kann ja nach Riemanns eigener Erkenntnistheorie nicht sein, in welchem ausgedehnten Kontinuum (einem Äther, einem festen Körper oder einem abstrahierten leeren Raum) die Bildung von ‚Grenzbegriffen' ihren Ausgang nimmt, sondern nur die Tatsache, *daß* die dort gewonnenen Begriffe in ‚Grenzbegriffe' überführt werden.

Es ist ja, nebenbei bemerkt, kein Zufall, daß sich im Anschluß an Riemann z.B. potentialtheoretische Untersuchungen über „Die Schwerkraft in mehrfach ausgedehnten Gaussischen und Riemannschen Räumen" (Schering 1873a) oder „Die Hamilton-Jacobische Theorie für Kräfte,

sie kann *daher* der Naturforschung auch immer nur *mathematische Hypothesen* anbieten, die an der Erfahrung, die notwendigerweise am Endlichen gebildet wird, geprüft werden müssen. Im Sinne Jacobis und der Tradition der reinen Mathematik hat sie teil an deren Autonomie und Kreativität, im Sinne der KMN jedoch ist sie *negativ* davon betroffen, daß ihre ‚Grössenverhältnisse' und ‚Correlativbegriffe' beim Übergang zu den Grenzbegriffen nicht erhalten bleiben: Selbst wenn man die Unterscheidung primärer und sekundärer Qualitäten, wie Riemann sie meiner Rekonstruktion zufolge im Anschluß an Locke trifft, *im Endlichen* (nach Riemann: für ‚ein innerhalb des Vorstellbaren liegendes Begriffssystem') als wohlbegründet anerkennen würde, gäbe es seinen eigenen Ausführungen zufolge keine Garantie dafür, daß diese Unterscheidung *im Unendlichkleinen* noch mit irgendetwas korrespondierte. Sie wird vielmehr dort, an der für seine mathematische Naturphilosophie *entscheidenden* Stelle, hinfällig — die Freiheit der mathematischen Konstruktion im Unendlichkleinen ist erkauft durch ihren ‚Realitätsverlust'. Eine prinzipiencertistische mathematische Physik als eine Art ‚erweiterte Analysis', wie sie Lagrange im Auge hatte, kann es daher für Riemann *grundsätzlich* nicht geben.[1354]

Insofern ist Riemann denn auch konsequent, wenn er in seinen Untersuchungen zur mathematischen Physik alle Versuche, mit Hilfe der Analysis zu Nahwirkungsgesetzen zu gelangen, als *hypothetisch*, in bestimmtem Sinne auch als *konventionell*[1355], versteht. Er spricht hier zwar von „Grundgesetzen" oder „Elementargesetzen"[1356], ohne aber damit noch in einem weiten, empirisch relevanten Sinne einen Anspruch auf Evidenz oder Sicherheit der fraglichen Prinzipien zu verbinden.

Deren mathematische Form ist eindeutig festgelegt: „Im allgemeinen [...] muss man, um aus den Elementargesetzen die Erscheinungen abzuleiten, den Fortschritt vom Unendlichkleinen zum Endlichen nach mehr als einer Dimension machen. Denn die Elementargesetze beziehen sich auf Raum- und Zeitpunkte, die Erscheinungen aber auf ausgedehnte Körper. Solche Aufgaben führen, allgemein zu reden — in besonderen Fällen kann sich allerdings das Problem vereinfachen —, auf partielle Differentialgleichungen".[1357] Mit der bloßen *Aufstellung* und Analyse solcher Gleichungen, die einer *rein* mathematischen Untersuchung ausreichen könnten, ist es indes im Rahmen der mathematischen Naturphilosophie nicht getan, denn „die Ableitung der Gesetze für ausgedehnte Körper und Zeiträume aus ihnen erfordert die Integration derselben. Es sind also Methoden nöthig, durch welche man aus den Gesetzen im Unendlichkleinen diese Gesetze im Endlichen ableitet, und zwar in aller Strenge ableitet, ohne sich Ver-

deren Maass von der Bewegung der Körper abhängt" (Schering 1873b) ergeben. Der Autor, Ernst Schering, war ein Schüler Riemanns.

[1354] Vgl. die Schlußbemerkungen zu Teil 2.1.

[1355] Vgl. hierzu auch Teil 2.4.

[1356] Vgl. etwa Riemann 1880, S. 2.

[1357] Ebd., S. 2.

nachlässigungen zu erlauben. Denn nur dann kann man sie an der Erfahrung prüfen"[1358]. Die ‚Elementargesetze' beziehen sich auf unendlich kleine Raum-Zeit-Elemente, die in keiner Weise der Erfahrung zugänglich sind. Aus ihnen sind daher erst durch ‚strenge' Deduktion empirisch überprüfbare Aussagen abzuleiten.

Wissenschaftstheoretisch betrachtet, *muß* daher geradezu Riemanns *neue* Mathematische Naturphilosophie aufgrund ihrer Voraussetzungen durch ein hypothetisch-deduktives Wissenschaftsverständnis gekennzeichnet sein, gehört also im Rahmen *dieser* Untersuchung einwandfrei auf die Seite der *Moderne*.[1359] Daß dabei ein (wenngleich ‚implizites') Verständnis reiner Mathematik eine wichtige Rolle spielt, habe ich in diesem Teil zu zeigen versucht. Betrachten wir nun — zumindest in einigen Ansätzen — auch die wissenschaftspraktische Seite dieses Unternehmens.

VII.2.3 ‚Höhere Mechanik', Äthertheorie und Einheit der Kräfte: Ansätze zur neuen Mathematischen Naturphilosophie

Ich habe bereits verschiedentlich darauf hingewiesen, daß wissenschaftstheoriegeschichtliche Untersuchungen, die den Theoriewandel der mathematischen Wissenschaften thematisieren, generell auf die Grundlagenentwicklung der Geometrie fixiert sind: Das Auftauchen nichteuklidischer Geometrien gilt ihnen als das entscheidende Ereignis, das das ‚Band von Mathematik und Erfahrung' zerreißt. Wir haben bei Jacobi und auch bei Riemann gesehen, daß diese These — ungeachtet ihrer Bedeutung für die *spätere*, die letzten drei Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts umfassende Entwicklung, die hier gar nicht bestritten werden soll — historisch und systematisch zu kurz greift. Dies ist auch der Grund, warum hier erneut Riemanns Ansätze zu einer neuen Mathematischen Naturphilosophie zur Sprache kommen sollen, *obwohl* ich mit den letzten beiden Teilen seinen Beitrag zur Kritik der KMN und einer wissenschaftstheoretischen Neuorientierung im Sinne einer hypothetisch-deduktiven Wissenschaftsauffassung als hin-

[1358] Ebd., S. 4.

[1359] Wie schwierig es ist, Riemanns Denken in einen historischen Rahmen zu stellen, mag dennoch deutlich geworden sein. Herbert Mehrtens, von einem anderen Interesse an der Mathematik des 19. Jahrhunderts geleitet, bemerkt hierzu: „Riemann spielt eine bemerkenswerte Rolle. Er ist eine Bezugsfigur für Physik wie Mathematik, für Moderne wie Gegenmoderne. Wenn ich ihn ebenso signifikant in diese Geschichte setze und von der ‚Riemannschen Trennung' schreibe, dann ist damit ein offenes Problem der Historiographie bezeichnet. Vielleicht ist es so schwierig, seiner Arbeit gerecht zu werden, weil er die paradigmatische Figur des Übergangs bietet. Alle Charakterisierungen, die man ihm geben möchte, scheinen zu treffen. So aber verfehlen die Klassifikationen seine Arbeiten und seine Wirkung. In seinen Texten sind weit mehr als die Möglichkeiten eröffnet, die sich später in der Praxis der Wissenschaft etablieren. Ich füge ihn hier vor allem in die rückblickend gesehene Fluchtlinie der Moderne. Ein genaueres Bild bedarf einer anderen Art, diese Geschichte zu schreiben" (Mehrtens 1990, S. 58).

länglich erwiesen betrachte. Es soll nun gezeigt werden, daß man Riemanns *Hypothesen* in einigen Teilen besser verstehen kann, wenn man sie nicht von der Entwicklung der Geometrie her, sondern vor dem Hintergrund des *vorgängigen* Wandels der Mathematischen Naturphilosophie betrachtet — eine Kritik der einseitigen ‚geometrischen Fixierung' ist also das eigentliche Anliegen der folgenden Ausführungen. Angeregt wurden sie durch einen älteren, offenbar weitgehend unbeachtet gebliebenen Aufsatz des Euler-Forschers Andreas Speiser über „Naturphilosophische Untersuchungen von Euler und Riemann"[1360].

Riemann formuliert bereits Ende 1850 ein Programm, das auf eine Erklärung aller physikalischen Kräfte durch einen raumerfüllenden Äther abzielt, in dem sich alle physikalischen Wirkungen mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten: „So z.B. lässt sich eine vollkommen in sich abgeschlossene mathematische Theorie zusammenstellen, welche von den für die einzelnen Punkte geltenden Elementargesetzen bis zu den Vorgängen in dem uns wirklich gegebenen continuirlich erfüllten Raume fortschreitet, ohne zu scheiden, ob es sich um die Schwerkraft, oder die Electricität, oder den Magnetismus, oder das Gleichgewicht der Wärme handelt".[1361] Im folgenden Jahr ist er parallel mit fast all den rein mathematischen Untersuchungen beschäftigt, die ihn später berühmt machen. Als seine „Hauptarbeit" aber bezeichnet er die Weiterführung seiner einheitlichen Äthertheorie — „eine neue Auffassung der bekannten Naturgesetze — Ausdruck derselben mittels anderer Grundbegriffe [...]. Ich wurde dazu hauptsächlich durch das Studium der Werke *Newton's, Euler's* und — andererseits — *Herbart's* geführt".[1362] Es ist dieses post-newtonsche Programm, das er in seinen Nachlaßaufzeichnungen und auch in späteren Vorlesungen zur mathematischen Physik gelegentlich als „höhere Mechanik" bezeichnet.[1363] Im folgenden sollen seine zwei wichtigsten Versuche in dieser Richtung dargestellt werden, nämlich die bereits erwähnten Fragmente *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie* und *Gravitation und Licht*, entstanden zu Beginn und am Ende des Jahres 1853.[1364]

[1360] Speiser 1927, insbes. S. 107f. und S. 111-113. Inzwischen hat die Beziehung von Naturphilosophie und Geometrie bei Riemann — leider meist ohne Nennung Speisers — starke Aufmerksamkeit erfahren, die sich in verschiedenen Aufsätzen dokumentiert (vgl. die oben in Anm. 1253 und 1256 aufgeführten Titel ab 1993). Die folgenden Ausführungen beziehen sich inhaltlich allein auf Riemanns Texte und Speisers Aufsatz.

[1361] Zit. nach Dedekind 1876, S. 545. Dedekind entnimmt das Zitat dem Aufsatz „Ueber Umfang, Anordnung und Methode des naturwissenschaftlichen Unterrichts auf Gymnasien", den Riemann im November 1850, also noch vor Abschluß seines Studiums, für sein pädagogisches Seminar verfaßt.

[1362] Riemann *Werke*, S. 507; zur Datierung dieser Notiz vgl. Dedekind 1876, S. 545.

[1363] Nachlaß Riemann M. 18, Bl. 1-21, 31-36 und Bl. 36-42 (zu Newton) sowie Bl. 100-104, 129; M. 27, Bl. 38^{r}, sowie M. 29b (Vorlesungsnachschrift von 1858/59; hierzu auch Riemann *Werke**, S. 861).

[1364] Riemann 1853a und 1853b; zur Datierung vgl. oben, Anm. 1254.

Riemanns Ausarbeitung einer vereinheitlichenden Äthertheorie wurde von Euler beeinflußt.[1365] Euler führte einen Äther mit sehr hoher Elastizität und hohem Druck, aber extrem geringer Dichte ein, um mit ihm die Gravitation, aber auch die elektrische und magnetische Wechselwirkung sowie die Lichtausbreitung physikalisch zu erklären. Die Newtonsche Gravitation etwa sollte darauf zurückgeführt werden, daß in die wägbaren Massen der Äther einströmt, woraus ein Druckgefälle in der Umgebung resultiert. Ein solcher Druckgradient, wenn er indirekt proportional zum Abstand wäre, könnte das Gravitationsgesetz erklären. Um das ‚metaphysische Monster' Fernwirkung zu vermeiden, war Euler bereit, zwei ernste und offenkundige Probleme seiner Äthertheorie als *ungelöst* in Kauf zu nehmen: Einmal die Frage nach dem Ursprung des Äthers und dem Verbleib, wenn er in die Massen einströmt; zum anderen die Frage danach, wie in einem offenen Universum der hohe Ätherdruck, den er für seine Theorie benötigte, aufrechtzuerhalten sei.[1366]

Riemann adoptiert den Eulerschen Äther etwa ein Jahrhundert später trotz dieser Probleme — offenbar weil er ihm als der erfolgversprechendste Ansatz für eine einheitliche Nahwirkungstheorie physikalischer Wechselwirkungen erscheint. In Übereinstimmung mit Euler nimmt er an, daß der Äther eine „incompressible homogene Flüssigkeit ohne Trägheit sei, und daß in jedes ponderable Atom in gleichen Zeiten stets gleiche, seiner Masse proportionale Mengen einströmen".[1367] Er geht jedoch insofern über Euler hinaus, als er nur Gravitation und Elektrizität durch den *Ätherdruck* erklären möchte, während er die elektromagnetische Wechselwirkung wie auch Licht- und Wärmeausbreitung auf *Ätherwellen* zurückführt. Ich stelle nur den *Beginn* seiner mathematischen Analyse vor, da dieser von Interesse für seine physikalische Geometrie ist:

Wir betrachten ein Teilchen O des sich bewegenden Äthers mit dem Volumen dV und den Koordinaten x, y, z zur Zeit t. Zu O gehört ein Linienelement ds, das gegeben wird durch

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \qquad (1)$$

Zu einer späteren Zeit t' hat sich das Teilchen von O zu O' bewegt und besitzt daher neue Koordinaten x', y' und z', die Funktionen der früheren Koordinaten sind. Das entsprechende Linienelement ist jetzt

[1365] Dessen Arbeiten zur Äthertheorie wurden erst durch eine in Brüssel veranstaltete Ausgabe im Jahre 1838 zugänglich und dürften hierdurch auch Riemann zur Kenntnis gelangt sein; für Details s. Speiser 1927, S. 106.

[1366] Vgl. hierzu auch Pulte 1989, S. 156f.

[1367] Riemann 1853a, S. 529.

$$ds'^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 \qquad (2)$$

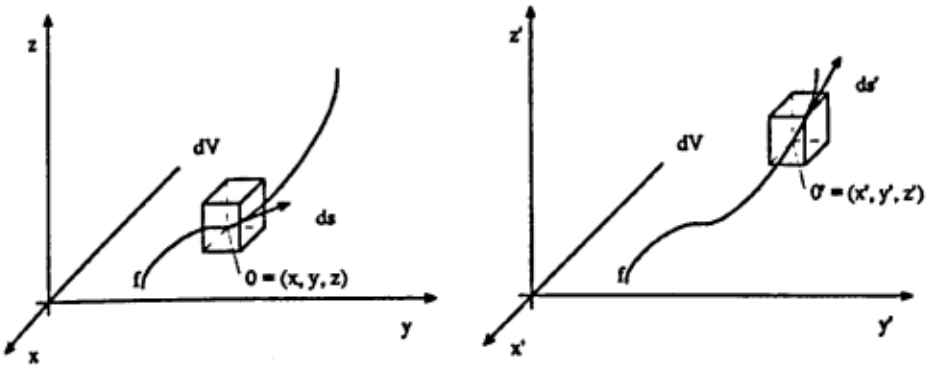

Abb. 4: Ätherbewegung und -deformation nach Riemann

Es gibt eine bestimmte lineare Transformation[1368] von den *dx, dy, dz* zu anderen Elementen ds_1, ds_2, ds_3, so daß

$$\text{I.} \qquad ds^2 = ds_1^2 + ds_2^2 + ds_3^2 \qquad (3)$$

und

$$\text{II.} \qquad ds'^2 = G_1^2 ds_1^2 + G_2^2 ds_2^2 + G_3^2 ds_3^2 \qquad (4)$$

mit den drei sogenannten „Hauptdilatationen"[1369]

$$L_1 = G_1 - 1, \quad L_2 = G_2 - 1, \quad L_3 = G_3 - 1. \qquad (5)$$

Diese Hauptdilatationen bringen die Dehnung (bei positiven Vorzeichen) oder Stauchung (bei negativen Vorzeichen) der Elemente ds_1, ds_2, ds_3, zum Ausdruck. Riemann geht davon aus, daß ein Teilchen des Äthers jeder Änderung von Form und Volumen Widerstand leistet und deshalb mit den benachbarten Ätherteilchen wechselwirkt. Die dabei auftretende Kraft wird stark mit der Zeit abnehmen, die vom Zeitpunkt der Formänderung verstreicht, so daß die Kräfte als *lineare* Funktionen der Dilatationen angesehen werden können. Sie zerfällt in einen Teil, der einer „Volumenänderung ohne Formänderung" widerstrebt, und einen Teil, der *nur* der Formänderung widerstrebt, und den

[1368] Ich gehe hier auf deren mathematische Bestimmung nicht näher ein; vgl. ebd., S. 530f.
[1369] Ebd., S. 530.

Riemann durch die Längenänderung der „physischen Linienelemente" darstellt, die bei O enden: „Man kann nun das Kraftmoment, welches die *Form* des unendlich kleinen Stofftheilchens in O zu verändern strebt, als resultirend betrachten aus Kräften, welche die Länge der in O endenden Linienelemente zu verändern streben. Man gelangt dann zu folgendem Wirkungsgesetz: Bezeichnet dV das Volumen eines unendlich kleinen Stofftheilchens O zur Zeit t, dV' das Volumen desselben Stofftheilchens zur Zeit t', so wird die aus der Verschiedenheit beider Stoffzustände herrührende Kraft, welche ds zu verlängern strebt, durch

$$a\frac{dV-dV'}{dV}+b\frac{ds-ds'}{ds} \qquad (6)$$

ausgedrückt. Der erste Theil dieses Ausdrucks rührt von der Kraft her, mit welcher ein Stofftheilchen einer Volumenänderung ohne Formänderung, der zweite von der Kraft, mit welcher ein physisches Linienelement einer Längenänderung widerstrebt".[1370]

Da beide Widerstände sich in der Zeit verschieden verhalten können, multipliziert Riemann sie mit jeweils verschiedenen zeitabhängigen Funktionen ψ und φ und erhält so die „Wirkungen sämmtlicher früheren Formen eines Stofftheilchens" durch Integration über die Zeit:[1371]

$$\int_{-\infty}^{t} a\frac{dV-dV'}{dV}\psi(t-t')dt'+\int_{-\infty}^{t} b\frac{ds-ds'}{ds}\varphi(t-t')dt' \qquad (7)$$

Riemann fragt: „Wie müssen nun die Functionen ψ und φ beschaffen sein, damit Gravitation, Licht und strahlende Wärme durch den Raumstoff vermittelt werden?"[1372] Aus einem Zusatz geht hervor, daß er — über diese Frage hinausgehend — auf den ersten Teil „Gravitation und die electrostatische Anziehung und Abstossung, auf den zweiten die Fortpflanzung des Lichts und der Wärme und die electrodynamische oder magnetische Anziehung und Abstossung" zurückführen möchte.[1373] Doch weder mit der Beantwortung der engeren Frage noch des weiteren Problems scheint er weitergekommen zu sein, denn hier bricht das Fragment ab.

In *Gravitation und Licht* geht Riemann einen anderen Weg; er will nun alle Wirkungen nur noch durch die *Bewegung* des Äthers erklären:[1374]

[1370] Ebd., S. 531
[1371] Ebd., S. 531f.
[1372] Ebd., S. 532.
[1373] Ebd., S. 532.
[1374] Riemann 1853b, S. 533.

Die nach Grösse und Richtung bestimmte Ursache (beschleunigende Schwerkraft) [...] suche ich in der Bewegungsform eines durch den ganzen unendlichen Raum stetig verbreiteten Stoffes, und zwar nehme ich an, dass die Richtung der Bewegung der Richtung der aus ihr zu erklärenden Kraft gleich, und ihre Geschwindigkeit der Grösse der Kraft proportional sei. Dieser Stoff kann also vorgestellt werden als ein physischer Raum, dessen Punkte sich in dem geometrischen bewegen.
Nach dieser Annahme müssen alle von ponderablen Körpern durch den leeren Raum auf ponderable Körper ausgeübte Wirkungen durch diesen Stoff fortgepflanzt werden. Es müssen also auch die Bewegungsformen, in denen das Licht und die Wärme besteht, welche die Himmelskörper einander zusenden, Bewegungsformen dieses Stoffes sein. Diese beiden Erscheinungen, Gravitation und Lichtbewegung durch den leeren Raum, aber sind die einzigen, welche bloss aus Bewegungen dieses Stoffes erklärt werden müssten. Ich nehme nun an, dass die wirkliche Bewegung des Stoffes im leeren Raum zusammengesetzt ist aus der Bewegung, welche zur Erklärung der Gravitation, und aus der, welche zur Erklärung des Lichtes angenommen werden muss.

Der neue methodische Ansatz wird hier deutlich: Riemann will jetzt die *Geschwindigkeits-* und nicht mehr die *Widerstands*verhältnisse im Äther zur Erklärung der verschiedenen Prozesse heranziehen. Die Geschwindigkeit $\underline{v}$ des Äthers in einem gegebenen Raum-Zeit-Punkt muß sich dann aus einem Anteil $\underline{u}$ für die Gravitation und einen Anteil $\underline{w}$ für die Lichtausbreitung zusammensetzen. Für die *Gravitation* nimmt er an, daß die Bewegungsrichtung des Äthers derjenigen der jeweils wirkenden Gravitationskraft entspricht und die Geschwindigkeit des Äthers proportional zur Größe dieser Kraft sei.[1375] Also ist das Geschwindigkeitsfeld des Äthers durch den Gradienten des Gravitationspotentials V gegeben:[1376]

$$\frac{dV}{dx} = \underline{u} \qquad (8)$$

Das Licht breitet sich, wie Riemann annimmt, als ebene Welle im Äther aus[1377], für deren Geschwindigkeit w gelangt er zu dieser Wellengleichung:[1378]

$$\frac{d^2w}{dt^2} = c^2 \Delta w \qquad (9)$$

Riemann untersucht im Anschluß mit Hilfe von (8) und (9) die Eigenschaften des resultierenden Geschwindigkeitsfeldes

[1375] S. ebd., 533.
[1376] Ebd., S. 535. Die Divergenz des Geschwindigkeitsfeldes $\underline{u}$ muß also verschwinden.
[1377] Ebd., S. 536.
[1378] Ebd., S. 537 (mit c als Ausbreitungsgeschwindigkeit).

$$\underline{v} = \underline{u} + \underline{w} \qquad (10)$$

Er stellt u.a. die „Gesetze der Stoffbewegung" für einen Raum ohne Massen auf und weist nach, daß die Dichte des Äthers konstant bleibt ($div\ \underline{v} = 0$). Schließlich formuliert er ein Variationsprinzip, aus dem sich das Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}$ ableiten läßt.[1379] Diese Untersuchungen zeigen ihm, daß seine Annahmen auf ein sich ‚vernünftig' verhaltendes Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}$ führen. Das Fragment *Gravitation und Licht* bricht an dieser Stelle ab.

In seinen späteren Vorlesungen ist Riemann wieder auf den Versuch zurückgekommen, auch elektrostatische und -dynamische Kräfte in seine Äthertheorie zu integrieren; dabei ging er von der Veränderlichkeit der Dichte des Äthers aus.[1380] Eine ‚einheitliche Theorie' nach seinen ursprünglichen Vorstellungen ergab sich daraus nicht; vermutlich war dies auch der Grund, warum er seine Ansätze zur Äthertheorie nie publik machte. Riemanns zweiter Zugang ist mathematisch elaborierter als der erste, nicht jedoch seine physikalischen Voraussetzungen: Es geht nicht mehr darum, die Kräfte durch den inneren *Zustand* eines „geometrically conceived ether"[1381] zu erklären, sondern durch dessen *Bewegung*. Damit stellt dieser Ansatz also einen Schritt zurück von einer eher feldtheoretischen Auffassung zum klassischen Konzept des mechanischen Äthers dar.

Dies braucht hier nicht weiter ausgeführt zu werden, denn es geht hier nicht um physikalische Probleme in Riemanns Fragmenten, sondern um die Bedeutung des Riemannschen Ätherkonzepts für seine Geometrie. Die Wichtigkeit des Ätherkonzepts für seine Naturphilosophie ist dabei vorab zu unterstreichen: Riemann übernimmt es von Euler, und wie bei Euler soll es der Erklärung *aller* vermeintlicher Fernwirkungen dienen. Er transformiert dabei den Eulerschen mechanischen Äther, der wie eine strömende Flüssigkeit wirkt, zu einem mehr feldartigen Äther, der alle Kräfte auf die Wirkungen benachbarter Ätherteilchen und deren inneren Zustand reduziert. Aber die mechanische Seite verschwindet nicht wirklich, sie *bleibt* erklärungsrelevant. Riemanns Äther ist daher, im doppelten Sinne, ein ‚fließendes Konzept'.[1382]

[1379] Vgl. ebd., S. 538.

[1380] Vgl. Riemann 1880, S. 330; s. hierzu auch Wise 1981, S. 290.

[1381] Wise 1981, S. 289.

[1382] Nämlich in physikalischer wie in historischer Hinsicht. Im zweiten Sinne führt Yehuda Elkana diese Bezeichnung für Helmholtz' Energiebegriff ein (Elkana 1970b). Riemanns wohl wichtigste Arbeit zur theoretischen Physik „Ein Beitrag zur Elektrodynamik" (Riemann 1858), in der die elektrodynamische Wechselwirkung mit Hilfe des ‚retadierten Potentials' behandelt wird, kommt hier nicht zur Sprache, weil sie zeitlich nach den *Hypothesen* liegt. Es sei jedoch auf folgenden Punkt hingewiesen, der für die hier vertretene Interpretation der *Hypothesen* wichtig wird: In Riemanns *Beitrag* kommt der Begriff des Äthers nicht explizit vor. Hieraus haben kühne Interpreten den Schluß gezogen, daß Riemann mit den *Hypothesen* zu einer ‚modernen', feldarti-

VII.2.4 Die physikalische Geometrie in Riemanns ‚Hypothesen': Eine spekulative Interpretation

Riemann hat sich nicht danach gedrängt, *Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*, vorzutragen: Er hatte für sein Habilitationskolloquium am 10. Juni 1854 drei Themen vorgeschlagen, und alleine Gauß' Neugierde ist es zu verdanken, daß *dieser* Vortrag dabei herauskam: „Die beiden ersten [Themen]", so schreibt Riemann, „hatte ich fertig und hoffte, dass man eins davon nehmen würde; Gauss aber hat das dritte gewählt, und so bin ich nun wieder etwas in der Klemme, da ich dies noch ausarbeiten muss".[1383] Später bemerkt er rückblickend über seine Arbeiten *vor* dem Habilitationsvortrag, „daß ich [...] mich wieder mit meiner Untersuchung über den Zusammenhang der physikalischen Grundgesetze beschäftigte und mich so darin vertiefte, dass ich, als mir das Thema zur Probevorlesung beim Colloquium gestellt war, nicht gleich wieder davon loskommen konnte".[1384] Riemann ist in der Zeit vor der Abfassung seines Habilitationsvortrags ganz offenkundig tief in seine Untersuchungen zur Äthertheorie verstrickt, denn die soll ja die vereinheitlichenden ‚physikalischen Grundgesetze' liefern, um die es ihm geht. Man kann daher Riemanns Überlegungen zur Äthertheorie, wie sie im letzten Teil vorgestellt wurden, als den physikalischen Hintergrund betrachten, vor dem man seine Ausführungen im dritten Teil der *Hypothesen*, die deren ‚Anwendung' auf den physikalischen Raum[1385] betreffen, lesen sollte.

Riemann geht in diesem Teil der Frage nach, inwiefern der physikalische Raum als Spezialfall des allgemeinen Mannigfaltigkeitsbegriffs aufgefaßt werden kann, den er in den beiden ersten Teilen ausgeführt hat. Es entspricht dabei ganz seiner früheren Verhältnisbestimmung von Mathematik und Naturwissenschaft[1386], daß er seinen Mannig-

gen Konzeption des physikalischen Raumes gekommen sei, wodurch dieser Begriff überflüssig wurde — insofern könnte man also den *Beitrag* als Stütze für eine ‚modernisierende' Interpretation (vgl. Teil 2.5) der *Hypothesen* heranziehen. Aber der Schluß ist falsch: Walter Kaiser hat gezeigt, daß im Entwurf des *Beitrags* tatsächlich von einem ‚Medium' die Rede ist, in dem sich Licht und elektrische Wirkungen fortpflanzen (Kaiser 1981, S. 151). Es mag sein, daß Riemanns Zurückhaltung gegenüber seinem physikalischen Lehrer Wilhelm Weber — einem Vertreter der Fernwirkungstheorie — dazu geführt hat, daß dieses ‚Medium' in der veröffentlichten Form nicht mehr vorkommt. Eine Interpretation der Riemannschen *Hypothesen* vom ‚Einsteinschen Standpunkt' kann jedenfalls aus dem *Beitrag* keine Unterstützung ableiten.

[1383] B. Riemann an Wilhelm Riemann vom 28. Dez. 1853 (Dedekind 1876, S. 547).

[1384] B. Riemann an Wilhelm Riemann vom 26. Juni 1854 (ebd., S. 547f.).

[1385] Ich weise nochmals darauf hin, daß Riemann mit ‚Raum' stets den physikalischen Raum meint, *in* dem wir und *über* den wir Erfahrungen machen, indem wir das Verhalten von Körpern beobachten und ausmessen. Riemann kann dieses Begriffsverständnis noch als selbstverständlich voraussetzen — die Konstruktion ‚rein mathematischer' Räume macht es jedoch bald zum Problem.

[1386] Vgl. Teil 2.2.

faltigkeitsbegriff sukzessive durch Einbeziehung empirischer Gegebenheiten einschränkt.[1387] Die Dreidimensionalität[1388], aber auch die *Unbegrenztheit* des Raumes erscheinen ihm durch die Erfahrung verbrieft:[1389]

> Die Unbegrenztheit des Raumes besitzt [...] eine grössere empirische Gewissheit, als irgend eine äussere Erfahrung. Hieraus folgt aber die Unendlichkeit keineswegs; vielmehr würde der Raum, wenn man Unabhängigkeit der Körper vom Ort voraussetzt, ihm also ein constantes Krümmungsmass zuschreibt, nothwendig endlich sein, so bald dieses Krümmungsmass einen noch so kleinen positiven Werth hätte.

Es könnte also sein, daß die (konstante) Raumkrümmung im Großen einen von Null verschiedenen Durchschnitt hat und der Raum deshalb *endlich* wäre. Dieser ‚Einsteinsche Funke' eines unbegrenzten, aber endlichen Raumes verglimmt jedoch gleich wieder, wenn Riemann direkt im Anschluß bemerkt: „Die Fragen über das Unmessbargrosse sind für die Naturerklärung müssige Fragen. Anders verhält es sich aber mit den Fragen über das Unmessbarkleine"; denn auf den Erscheinungen im Kleinen — so lautet Riemanns Begründung, deren Implikationen bereits ausführlich untersucht wurden[1390] — „beruht wesentlich die Erkenntnis ihres Causalzusammenhangs. [...] Die Fragen über die Massverhältnisse des Raumes im Unmessbarkleinen gehören also nicht zu den müssigen".[1391]

Worum geht es, wenn von der Metrik des (physikalischen) Raumes im ‚Unmessbarkleinen' die Rede ist? Wenn Riemann ein paar Monate früher vom Äther bemerkt: „Dieser Stoff kann vorgestellt werden als ein physischer Raum, dessen Punkte sich in dem geometrischen bewegen"[1392], mag es als spekulativ, aber nicht unbegründet erscheinen, hierin im Anschluß an Andreas Speiser[1393] implizite Aussagen über den Riemannschen *Äther* zu sehen: Die Analyse der ‚quasi-geometrischen' Struktur des Äthers, wie sie im letzten Teil skizziert wurde, wird ja von Riemann neben der Ätherbewegung als eine Möglichkeit erwogen, eine einheitliche Nahwirkungstheorie zu etablieren.

[1387] S. Riemann 1854a, S. 283f.
[1388] Vgl. ebd., S. 284.
[1389] Ebd., S. 285.
[1390] Vgl. nochmals Teil 2.2.
[1391] Ebd., S. 285.
[1392] Vgl. Teil 2.3, Zit. 1374. Riemann erwähnt das dort zitierte Fragment „Gravitation und Licht" in seinem Brief vom 28. Dez. 1853 (vgl. ebd., S. 579).
[1393] Speiser bemerkt mit Bezug auf Riemanns Untersuchung der ‚physischen Linienelemente' (vgl. Teil 2.3, Gl. *(1) - (7)*) in den *Neuen mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie*: „[...] es scheint mir nun sehr wahrscheinlich, daß hier der Ausgangspunkt für die Untersuchungen liegt, welche er ein Jahr später in seinem Habilitationsvortrag veröffentlicht hat" (Speiser 1927, S. 108).

Erproben wir diese Vermutung, indem wir sie auf einige recht kryptische Bemerkungen anwenden, mit denen Riemann seine *Hypothesen* weiterführt, und die zu der These Anlaß gegeben haben, Riemann nehme hier zentrale Gedanken Einsteins[1394] vorweg:

Seiner Äthertheorie zufolge ist es plausibel, daß man von den „Massverhältnissen im Grossen nicht auf die im Unendlichkleinen schliessen"[1395] kann — also insbesondere eine verschwindende Krümmung im Großen (d.h. in endlichen, der Messung zugänglichen Raumteilen) nicht den Schluß zuläßt, daß die Krümmung auch überall *lokal* verschwindet. Begibt man sich in Riemanns äthererfüllten Raum, wird klar, daß „der Begriff des festen Körpers und des Lichstrahls im Unendlichkleinen ihre Gültigkeit verlieren"[1396], weil die bei ihrer Anwendung *vorauszusetzende* Starrheit bzw. Geradlinigkeit Eigenschaften sind, die durch den Zustand des Äthers erst zu erklären wären. Und weiter: „[...] es ist also sehr wohl denkbar, dass die Massverhältnisse des Raumes im Unendlichkleinen den Voraussetzungen der Geometrie nicht gemäss sind, und dies würde man in der That annehmen müssen, sobald sich dadurch die Erscheinungen auf einfachere Weise erklären liessen"[1397]. Beziehen wir diese Bemerkung auf Riemanns Wirkungsgesetz des Äthers[1398] aus dem Fragment *Neue mathematische Principien der Naturphilosophie*, so besagt sie gerade, daß in die geometrische Bestimmung der (von *Riemann so* genannten) ‚physischen Linienelemente' ein nicht eliminierbares *konventionelles* Element eingeht. Es besteht darin, daß das Wirkungsgesetz zwar die Änderung des Linienelements enthält, aber durch das Linienelement natürlich nicht eindeutig bestimmt wird. Es sind viele *mathematische* Hypothesen über den geometrisch-physikalischen Ätherzustand im Unendlichkleinen möglich, die zu empirisch gleichwertigen Wirkungsgesetzen, ja sogar zu dem gleichen Wirkungsgesetz führen können. Die Trennung der ‚quasi-geometrischen' Bestimmung der Linienelemente des Äthers und anderer, ‚physikalischer' Äthereigenschaften (wie der Widerstandsänderungen mit der *Zeit*) ist also in gewissem Maße immer willkürlich: Die Erfahrung entscheidet nur über beide *gemeinsam*, und daher sind *Einfachheitsüberlegungen* bei der Festlegung der Maßbestimmungen ratsam.

Riemann zieht, wenn er nach dem „innern Grunde für die Massverhältnisse des Raumes"[1399] fragt, in Erwägung, der physikalische Raum (Äther) könne nicht eine kontinuierliche, sondern eine *diskrete* Mannigfaltigkeit bilden — bildlich gesprochen eine Art variable kristalline Anordnung, deren geometrische Struktur von vornherein feststünde. In diesem Fall wäre die Metrik bereits mit dem ‚Begriffe' der Mannigfaltig-

[1394] Vgl. hierzu Teil 2.5.
[1395] Riemann 1854a, S. 285.
[1396] Ebd., S. 285.
[1397] Ebd., S. 285.
[1398] Vgl. Teil 2.3, Gl. (7).
[1399] Ebd., S. 285

keit gegeben und also a priori bestimmt.[1400] Riemann schließt diese Möglichkeit nicht prinzipiell aus, hält sie jedoch nicht für physikalisch relevant; vielmehr denkt er an eine *kontinuierliche* Mannigfaltigkeit, deren Metrik nicht a priori festliegt, sondern durch die Erfahrung zu bestimmen ist:[1401]

> Die Frage über die Gültigkeit der Voraussetzungen der [Euklidischen] Geometrie im Unendlichkleinen hängt zusammen mit der Frage nach dem innern Grunde der Massverhältnisse des Raumes. Bei dieser Frage, welche wohl noch zur Lehre vom Raume gerechnet werden darf, kommt die obige Bemerkung zur Anwendung, dass bei einer discreten Mannigfaltigkeit das Princip der Massverhältnisse schon in dem Begriffe dieser Mannigfaltigkeit enthalten ist, bei einer stetigen aber anders woher hinzukommen muss. Es muss also entweder das dem Raume zu Grunde liegende Wirkliche eine discrete Mannigfaltigkeit bilden, oder der Grund der Massverhältnisse ausserhalb, in darauf wirkenden bindenden Kräften, gesucht werden.
> Die Entscheidung dieser Frage kann nur gefunden werden, indem man von der bisherigen durch die Erfahrung bewährten Auffassung der Erscheinungen, wozu *Newton* den Grund gelegt, ausgeht [...].
> Es führt dies hinüber in das Gebiet einer andern Wissenschaft, in das Gebiet der Physik, welches wohl die Natur der heutigen Veranlassung nicht zu betreten erlaubt.

Im Falle einer kontinuierlichen Mannigfaltigkeit ist die Frage nach den ‚bindenden Kräften' zu stellen. Es ist gerade *diese* Bemerkung Riemanns, die — für sich genommen — unklar erscheint und daher eine Vielzahl verschiedener Interpretationen provoziert hat. Wie könnten diese ‚bindenden Kräfte' aussehen, die die Metrik des physikalischen Raumes induzieren?

Nach der hier vertretenen Interpretation geht es dabei um die Frage, wie die *ponderablen* Körper die Struktur des Äthers bestimmen. Die Änderung der ‚physischen Linienelemente' der Ätherteilchen muß ja von der Anordnung und Verteilung der wägbaren Massen abhängen. Das Problem der ‚bindenden Kräfte' in Riemanns *Hypothesen* weist demnach auf ein ungelöstes Problem seiner Ätherheorie hin, nämlich auf die Frage, wie der quasi-geometrische Zustand des Äthers von den ‚ponderablen' Körpern bestimmt wird. Dieses Problem wiederum hängt eng mit der Frage zusammen, die Riemann als ein Teil nicht des ‚mathematischen', sondern des ‚metaphysischen Geschäfts'[1402] betrachtet und daher aus seinen mathematischen Untersuchungen ausgrenzt: der Frage nach den *Ursachen* der Ätherbewegung.

Wird der dritte Teil des Habilitationsvortrags so verstanden, lassen sich nicht nur die gerade erörterten dunklen Bemerkungen Riemanns genetisch — ohne teleologische Vorgriffe auf die spätere, ‚Einsteinsche' Entwicklung — aufklären, sondern es wird

[1400] Ebd., S. 286.

[1401] Ebd., S. 286. Der Schlußteil dieses Zitats wurde bereits früher (Teil 2.2, Zit. 1332) herangezogen. Daß Riemann mit ‚Geometrie' stets ‚Euklidische Geometrie' meint, wird bereits zu Beginn der *Hypothesen* deutlich (Riemann 1854a, S. 272).

[1402] S. Riemann 1853b, S. 534; vgl. Teil 2.2, Anm. und Zit. 1313.

auch ein historisches Rätsel aufgelöst, das zum Schluß erwähnt sei: Riemann hat den dritten Teil der *Hypothesen* mit der handschriftlichen Bemerkung versehen: „bedarf noch einer Umarbeitung und weiteren Ausführung".[1403] Aber in den folgenden 15 Jahren ist er nie hierauf zurückgekommen, obwohl mindestens einige seiner späteren Untersuchungen und auch Vorlesungen dazu einen geeigneten systematischen Anlaß geboten hätten. Der Grund dürfte darin liegen, daß Riemann zu keiner befriedigenden Äthertheorie im Sinne seiner *Neuen mathematischen Principien der Naturphilosophie* gelangte, d.h. zu keiner quasi-geometrisch konzipierten Theorie, die sich empirisch durch die Möglichkeit der Herleitung der verschiedenen Nahwirkungsgesetze aus dem inneren Zustand des Äthers hätte bewähren können.

VII.2.5 Zusammenfassung: Riemann als Vorläufer Einsteins?

Hermann Weyl spricht 1919 in der von ihm besorgten Neuausgabe der Riemannschen *Hypothesen* von der „besonderen Aktualität" der Riemannschen Geometrie:[1404]

[...] da durch sie das begriffliche Fundament für die allgemeine Relativitätstheorie gelegt wurde; so wenig auch deren Schöpfer Einstein unmittelbar und bewußt von Riemann beeinflußt wurde. Ja, die über das Mathematische hinausgehenden Ausführungen [...] weisen mit überraschender Deutlichkeit — man ist geradezu versucht, von Divination zu sprechen — in die Richtung solcher physikalischen Konsequenzen der Riemannschen Raumlehre, wie sie Einsteins Gravitationstheorie gezogen hat. Immerhin steht fest, daß von dieser Beziehung zur Gravitation Riemann nichts bekannt war; denn seine eigenen Versuche, ‚den Zusammenhang von Licht, Elektrizität und Magnetismus' zu ergründen, die zeitlich mit der Probevorlesung zusammenfallen, stehen sachlich in keiner Verbindung mit ihr.

Hier beginnt, was man die ‚Deifikation' Riemanns nennen könnte: Hermann Weyl spricht von Riemanns ‚Divination', Dirk J. Struik von einer „almost superhuman divination"[1405] und Max Jammer von einer „prophetischen Schau"[1406]; die Beispiele ließen

[1403] Ebd., S. 287, Anm.; diese Bemerkung bezieht sich auf §3 von Teil III, um den es hier gerade geht.

[1404] Weyl 1923, S. IV.

[1405] Struik 1931, S. 175. In vollem Wortlaut: „From Riemann to Einstein is but one step — a step however that had to wait sixty years. Riemann actually suggested, at the end of his paper, the possibility of determining the metric of space by the physical masses. This is the more striking as an example of almost superhuman divination, as Riemann's actual research in electricity and gravitation followed the classical lines of his day". Daß Riemanns physikalische Untersuchungen nicht ganz so ‚klassisch' sind, wie Struik meint, wurde in Teil 2.3 deutlich.

[1406] Jammer 1980, S. 178. Nachdem er diese ‚prophetische Schau' an Riemanns Ausführungen zum Zusammenhang von Maßverhältnissen und Kräften ‚belegt', fährt er fort: „Diese Worte waren ganz eindeutig eine Vorwegnahme gewisser zentraler Gedanken in Einsteins Gravitations-

sich vermehren. Ich werte solche Stellungnahmen weniger als adäquate Darstellung der Leistung Riemanns denn als Ausdruck einer *doppelten historiographischen Verengung*: Sie belegen zum einen, daß „die Versuchung, die Geschichte rückwärts zu schreiben, [...] allgegenwärtig und dauerhaft"[1407] ist. Zum anderen zeigen sie, daß eine auf die Geometrie fixierte Geschichtsbetrachtung, die naturphilosophische und physikalische Kontexte ausgrenzt, bei Riemann (und nicht nur dort) zu kurz greift: Schließt man hier, etwa mit Weyl, eine ‚sachliche Verbindung' von vornherein aus, muß die ‚Divination' des einsamen, der eigenen Zeit enthobenen mathematischen Genies als Surrogat eigentlicher historischer Erklärung herhalten.

Wie ist nun Riemann im Rahmen der hier vertretenen analytisch-genetischen Rekonstruktion zu der weiteren Entwicklung in Beziehung zu setzen? Wenn man Speisers ‚Ätherhypothese', zugrundelegt, wird man von einer ‚Antizipation' Einsteinscher Ideen bei Riemann gerade soweit sprechen dürfen, wie Riemanns Äther als ein *feldtheoretisches* Konzept verstanden werden kann — also nicht sehr weit, denn dieser Äther bleibt ja wesentlich *mechanisch* geprägt. Die *Neuen mathematischen Principien der Naturphilosophie* enthalten Ansätze zu einer feldtheoretischen Konzeption, die letztlich auf Riemanns Kausalverständnis[1408] zurückgehen, und die dortigen Ausführungen zur ‚quasi-geometrischen' Ätherstruktur sind auch am ehesten mit Riemanns *Hypothesen*

theorie, denen zufolge die metrische Struktur, die durch den Einstein'schen Tenor [sic! Mag Einstein auch ein beachtlicher ‚Tenor' gewesen sein, meint Jammer hier doch den Einsteinschen *Tensor*.] bestimmt ist, an jedem Punkt des Raum-Zeit-Kontinuums auf den Masse-Energie Tensor [...] bezogen ist vermöge der Feldgleichungen [...]. Riemanns Vorwegnahme einer solchen Abhängigkeit der Metrik von physikalischen Daten erscheint als die logische Lösung einer Schwierigkeit, zu der die Annahme von der variablen Krümmung des Raumes geführt hätte. [...] Riemanns Andeutungen wurden von der Majorität der zeitgenössischen Mathematiker und Physiker ignoriert. Man betrachtete seine Forschungen als zu spekulativ und theoretisch, als daß sie irgendwelche Bedeutung für den physikalischen Raum, für den Erfahrungsraum haben könnten" (ebd., S. 179f.).

[1407] Kuhn 1981, S. 149. Kuhn trifft diese Feststellung im Kontext seiner Ausführungen zur ‚Unsichtbarkeit der Revolutionen', die ja in seinen Augen eine *Unsichtbarmachung* durch die spätere, kumulative Geschichtsschreibung ist. Ein ‚Kuhnianer' möchte vielleicht auch Riemann in einen solchen Kontext stellen: Dessen ‚kühne Antizipationen' wären dann bloße *Konstrukte* der Geschichtsschreibung, gemacht, um eine Riemann-Einstein-Tradition zu suggerieren, die tatsächlich nicht existierte. Aber dies würde die Geschichte halbieren: Riemanns Äther, auf den sich meiner Rekonstruktion zufolge seine vieldiskutierte Bemerkung über die Metrik und Kräfte bezieht, ist ja ein ‚halb klassischer' (mechanischer) und ‚halb moderner' (feldtheoretisch konzipierter) Äther; die Verbindung Riemann-Einstein ist deshalb der Sache nach auch mehr als ein bloßes Geschichtskonstrukt (auch wenn, wie Weyl richtig feststellt, Einstein wohl nicht von Riemann direkt beeinflußt wurde). Weyl, Struik, Jammer und andere negieren bzw. ignorieren jedoch gerade die Bedeutung von Riemanns Äthertheorie, und *insofern* leisten sie durchaus ‚Verschleierungsarbeit' im Sinne Kuhns.

[1408] Vgl. die Diskussion in Teil 2.2.

in Verbindung zu bringen. Aber Riemann gibt ja, wie das Fragment *Gravitation und Licht* besonders deutlich macht, die alte Eulersche Vorstellung, daß der Äther (auch) über *Bewegung* auf Materie wirkt, nicht auf. Dies ist aber der *entscheidende* Unterschied zu einem Feldbegriff, wie er in der Allgemeinen Relativitätstheorie anzutreffen ist. Diese Theorie enthält ja nicht, wie manchmal zu lesen ist, ein ‚Verbot' des Ätherbegriffs, sondern dessen *feldtheoretische* Umdeutung. Daher heißt es bei Einstein auch: „Der Begriff der Bewegung darf nicht auf ihn [den Äther] angewendet werden".[1409]

Die Behandlung der Riemannschen Mathematischen Naturphilosophie hat weit über die Auflösungsanalyse axiomatischen Denkens in der Mechanik ‚ponderabler' Körper, die im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht, hinausgeführt. Diese Ausweitung wird in gewisser Weise notwendig, sobald der Entschluß getroffen ist, sich auf *Riemann* überhaupt einzulassen: In seinem Denken hängt Alles zusammen und gerät Alles in Bewegung; der ‚Motor' dieser Bewegung ist die Mathematik. Umso bemerkenswerter erscheint es, daß die Mathematische Naturphilosophie, *nicht die Geometrie*, am Anfang seiner Aufkündigung des Euklidianismus steht.

[1409] Einstein 1920, S. 15. Zuvor weist Einstein ausdrücklich darauf hin, daß der Begriff des Äthers durch die Relativitätstheorie einen „genauen Gehalt" bekommen habe, indem durch ihn der Raum „mit physikalischen Eigenschaften ausgestattet" werde (ebd., S. 14).

VII.3 Neumanns Kritik der ‚Principien der Galilei-Newton'schen Theorie'

Der Mathematiker Carl Neumann[1410] hält am 3. November 1869 in Leipzig seine Antrittsvorlesung *Ueber die Principien der Galilei-Newton'schen Theorie*, die mit guten Gründen als ‚der Anfang vom Ende' der klassischen Mechanik bezeichnet werden kann: Die dort von Neumann unter anderem aufgestellte Behauptung, die Mechanik müsse die Existenz eines ‚absolut starren Körpers' *Alpha* postulieren[1411], *wenn* sie an ihrer Raum-Zeit-Theorie und ihren Grundgesetzen festhalten wolle, löst eine Grundlagendiskussion aus, die bis zum Ende des Jahrhunderts und damit bis zur Ablösung der klassischen Mechanik durch Einsteins spezielle Relativitätstheorie (1905) andauert.

Der gängigen Geschichtsschreibung zufolge scheint Neumanns Körper Alpha ‚vom Himmel gefallen' zu sein.[1412] Es wird zunächst darum gehen, dieses Bild in einer genaueren historischen Betrachtung zu revidieren (3.1). Anschließend werde ich Neumanns wissenschaftstheoretische Anschauungen, wie sie sich in den *Principien* manifestieren, näher untersuchen (3.2) und deren Implikationen für die Mechanik darstellen (3.3). Es folgt eine Analyse der Beziehung von Trägheitsprinzip und absolutem Raum in den *Principien* (3.4). Zum Schluß soll Neumanns Beitrag in die Grundlagendiskussion des ausgehenden 19. Jahrhundert eingeordnet werden (3.5).

VII.3.1 Wendezeit und Neumanns Weg zum ‚Körper Alpha'

Der Zeitraum, in den Neumanns Antrittsvorlesung (1869) fällt, ist durch einen breiten und manifesten Wandel des Wissenschaftsverständnisses gekennzeichnet, der — *selbst* in Hinblick auf die traditionell certistischen und evidentialistischen *mathematischen* Wissenschaften — als Übergang von einem klassischem zu einem modernen

[1410] Für biographische Angaben s. Hölder 1925, Liebmann 1927 und Salié 1981. Die wichtigsten seiner zahlreichen Beiträge zur mathematischen Physik sind im Literaturverzeichnis aufgeführt; eine ausführlichere Bibliographie enthält Hölder 1925.

[1411] Vgl. Neumann 1870, S. 15.

[1412] So kommt etwa noch die *jüngste* Publikation zum Thema über vage (und in dieser Vagheit triviale) historische Feststellungen von der Art, daß die Frage: „Is motion absolute or relative?" mindestens bis auf Leibniz, Huygens und Newton zurückgeht, nicht hinaus; auch einige Allgemeinplätze zur Problematik ‚Erklärung vs. Beschreibung' bei Kirchhoff und Mach bringen keine historische Aufhellung (DiSalle 1993, S. 346f.). Auch in Standardwerken zur Geschichte des Raumbegriffs (vgl. etwa Gent 1926/30, Jammer 1980), der Philosophie der Geometrie (vgl. etwa Torretti 1978) oder der Mechanik (vgl. etwa Kuzcnecov 1970) taucht Neumanns Antrittsvorlesung als ein nicht weiter analysiertes ‚Datum' oder aber überhaupt nicht auf. Ältere, ‚näher' am Geschehen befindliche Untersuchungen (Klein 1872, Mach 1872 und 1933, Streintz 1883) gehen ausführlich auf die Vorlesung ein, tragen jedoch ebenfalls nichts zum Verständnis ihrer Vorgeschichte bei. Auf Mach, in dieser Sache ‚Partei', komme ich später zurück (s. Teil 3.5).

Wissenschaftsverständnis im Sinne Diemers gedeutet werden kann: In der Mechanik bleibt zwar die frühe Jacobische Kritik von 1847/48 weiterhin allgemein unbekannt, aber es gibt andere, sichtbarere Zeichen des Wandels: 1868 erscheinen Riemanns *Hypothesen* zur Geometrie[1413]; 1872 legt Felix Klein sein ‚Erlanger Programm' vor; 1876 werden Riemanns *Werke* veröffentlicht, die seine Fragmente zur Mathematischen Naturphilosophie enthalten[1414]; im gleichen Jahr erscheinen auch Kirchhoffs vielbeachtete *Vorlesungen über Mechanik*[1415].

Hier handelt es sich um einzelne Beiträge zu einer allgemeineren ‚Modernisierung', von der auf Seiten der empirischen Wissenschaften die *Mechanik* als Grundlage des traditionellen Mechanismus besonders betroffen ist. Ein Ernst Mach etwa, der noch 1863 „die ganze Physik [...] als angewandte Mechanik"[1416] begreift, sieht bereits 1872

[1413] Riemann 1854a.

[1414] Riemann *Werke*.

[1415] Vielbeachtet aufgrund der Forderung, Mechanik nicht länger als eine Wissenschaft aufzufassen, die durch Aufsuchung von Kräften Bewegungen *erklärt*, sondern lediglich *beschreibt*, um sie von der Unklarheit des Begriffs der ‚Ursache' zu befreien und „Dunkelheiten aus ihr zu entfernen": „Aus diesem Grunde stelle ich es als die Aufgabe der Mechanik hin, die in der Natur vor sich gehenden Bewegungen zu *beschreiben*, und zwar vollständig und auf die einfachste Weise zu beschreiben. Ich will damit sagen, dass es sich nur darum handeln soll, anzugeben, *welches* die Erscheinungen sind, die stattfinden, nicht aber darum, ihre *Ursachen* zu ermitteln. Wenn man hiervon ausgeht und die Vorstellungen von Raum, Zeit und Materie voraussetzt, so gelangt man durch rein mathematische Betrachtungen zu den allgemeinen Gleichungen der Mechanik" (Kirchhoff 1897, S. V). Zu den ‚Dunkelheiten', die Kirchhoff vermeiden möchte, gehört auch die Frage danach, ob mechanische Sätze wie das Trägheitsprinzip oder die Parallelogrammregel der Kräfte „als Resultate der Erfahrung, als Axiome oder als Sätze, die logisch bewiesen werden können und bewiesen werden müssen", anzusehen seien (ebd., S. V) — insofern ist *auch seiner* Mechanik eine Kritik des Prinzipiencertismus der KMN inhärent.

[1416] Mach 1863, S. 55. Er führt dies unter der Überschrift „Die Physik als angewandte Mechanik" folgendermaßen aus: „Die ganze Physik so weit wir es überhaupt zu einem eigentlichen Verständnisse der Erscheinungen gebracht haben, ist nichts weiter als angewandte Mechanik. Die vollständige Durchführung bleibt der Zukunft vorbehalten. Diese Anwendung der Mechanik basirt theils auf Thatsachen, theils auf Hypothesen. Wenn die Erfahrung lehrt, (und dies lehrt sie wirklich), dass zwei kleine Massentheilchen nach dem Newtonschen Gravitationsgesetze aufeinander wirken, so hat es nichts Hypothetisches mehr, wenn wir die Wirkung grösserer Massen aufeinander nach den Gesetzen der Mechanik finden, indem wir diese Massen uns in kleine Theilchen zerlegt denkend, die Kräfte derselben zu einer Resultirenden zusammensetzen. [...] Dagegen basiren wir auf Hypothesen, wenn wir die Erscheinungen der Wärme und des Lichtes auf Bewegungen der Atome und Molecüle (Atomgruppen) zurückführen [...]". Der *spätere* Mechanik- und Mechanismus-Kritiker Mach hätte den *ersten* Teil dieser Aussage wohl nicht mehr unterschrieben, weil dieser das Vorhandensein von nichthypothetischen ‚Grundtatsachen' impliziert, die in seinem Phänomenalismus ihre Evidenz verlieren. Bereits 1872 heißt es: „Es ist nun wieder nur eine ökonomische Frage einerseits und eine Frage des Geschmacks andererseits, bei welchen Unverständlichkeiten man stehen bleiben will. Man täuscht sich gewöhnlich darin, dass

in der Annahme, „dass die mechanischen Thatsachen verständlicher sind wie andere, dass sie die Grundlage für andere physikalische abgeben können [...], eine Täuschung“[1417]. Entwicklungen, wie sie sich bei Mach nachweisen lassen, sind symptomatisch für diese *Wendezeit* und werden von Wissenschaftler-Philosophen wie Mach, Helmholtz oder Boltzmann auch wahrgenommen und thematisiert. Helmholtz' wissenschaftliches und wissenschaftstheoretisches Werk ist hier besonders aufschlußreich: Während seine ‚frühen' Untersuchungen — insbesondere *Ueber die Erhaltung der Kraft*[1418] — noch als neukantianisch eingeordnet werden können, wird in den frühen 70er Jahren des 19. Jahrhunderts in seinen Arbeiten eine Hypothesierung und Konditionalisierung wissenschaftlicher Sätze sowie eine Relativierung ihrer Geltungsansprüche sichtbar, die mit einem Kantianismus — auch in der weitesten Bedeutung des Begriffs — nichts mehr zu tun hat und Helmholtz' Werk zu einem typischen Beispiel für den „Umschwung vom ‚klassischen Wissenschaftsbegriff' zum ‚modernen Wissenschaftsbegriff'“[1419] macht.

Auch die Auflösung des axiomatischen Denkens der KMN, um die es hier geht, wird von dieser *allgemeinen* ‚Dynamisierung' befördert. Bevor deshalb Neumanns ‚Weg zum Körper Alpha' dargestellt wird, ist es aus historiographischer Sicht ratsam, den Horizont möglicher Erklärungen für die bei Neumann anzutreffende weitere Hypothesierung und Konventionalisierung mechanischer Prinzipien ins Auge zu fassen. Ziehen wir dazu einen ‚Zeitzeugen' heran:

man meint, Unverständliches auf Verständliches zurückzuführen. Allein das Verstehn besteht eben im Zerlegen. Man führt ungewöhnliche Unverständlichkeiten auf gewöhnliche Unverständlichkeiten zurück“ (Mach 1872, S. 31). Und an anderer Stelle: „Nimmermehr ist eine Grundthatsache verständlicher als eine andere. Die Wahl der Grundthatsachen ist Sache der Bequemlichkeit, der Geschichte und der Gewohnheit“ (ebd., S. 33). Zu Machs Wissenschaftsbegriff vgl. König 1968b, Hiebert 1984 und Wolters 1986, 1987.

[1417] Mach 1872, S. 32.

[1418] Helmholtz 1889 (gehalten 1847).

[1419] König 1968b, S. 100; für Belege s. dort sowie Gregor Schiemanns *Wahrheitsgewissheitsverlust* (Schiemann 1997) — eine breit angelegte Studie zu Helmholtz' Wissenschaftstheorie und Naturphilosophie, die sich ebenfalls auf Diemers Unterscheidung von klassischem und modernem Wissenschaftsbegriff bezieht (vgl. ebd., S. 49-62). Nach Schiemann sind auch im Werk des ‚späten' Helmholtz noch Elemente eines klassischen Wissenschaftsverständnisses präsent: „Blickt man vom Ende der Rekonstruktion auf die seit 1871 gehaltenen Reden und verfassten Vorworte zurück, so gewinnt man den Eindruck, dass von der klassischen Wissenschaftsauffassung ein Ideal übrig geblieben ist, das zu schwach ist, um die Aufnahme moderner Elemente zu verhindern, aber immer noch wirksam genug, um Helmholtz von der vollständigen Übernahme einer modernen Wissenschaftsauffassung abzuhalten. Paradox formuliert könnte man von einer Modernisierung einer klassischen Wissenschaftsauffassung sprechen“ (ebd., S. 375).

Wilhelm Wundt veröffentlicht 1866 ein Buch mit dem Titel *Die physikalischen Axiome und ihre Beziehung zum Kausalprinzip*[1420], das man als Manifest des axiomatischen Denkens der KMN bezeichnen kann. Rückblickend bemerkt er im Jahre 1910, daß[1421]

> zwanzig Jahre später [...] die Situation bereits nicht unerheblich verändert [war]. Zwar galt die mechanische Naturauffassung oder, wie wir diese bestimmter definieren können, die Forderung, dass alle Naturerscheinungen in letzter Instanz auf die für die Mechanik der Massen geltenden Prinzipien zurückführbar sein müssten [...] im wesentlichen noch unbestritten. Aber der Begriff des ‚Axioms' war selbst auf mathematischem Gebiet von Zweifeln nicht unberührt geblieben. Noch weniger konnte er solchen auf physikalischem widerstehen. Was früher als Axiom gegolten, begann man als ‚Hypothese' zu bezeichnen, womit ausgedrückt war, dass auch ein anderes, möglicherweise von dem aufgestellten wesentlich abweichendes System von Voraussetzungen, sobald es nur dem Zweck einer Verknüpfung der zu beschreibenden Erscheinungen genüge, gewählt werden könne. Mit Vorliebe wurde daher nun auch nach dem von Kirchhoff in seiner ‚Mechanik' (1876) gegebenen klassischen Beispiel als Aufgabe der Physik und Mechanik nicht, wie bis dahin, die ‚Erklärung', sondern die ‚Beschreibung' der allgemeinsten Naturerscheinungen bezeichnet.
> Aber noch eine andere, wichtigere Veränderung war in jenen zwanzig Jahren eingetreten. Man hatte sich bemüht, die dereinst axiomatisch angenommenen Voraussetzungen, darunter allen voran das Galileische Beharrungsprinzip, in die in ihnen enthaltenen elementaren Raum- und Zeitfaktoren zu zerlegen. Unverkennbar hatten hier die Untersuchungen über die Euklidischen Axiome der Geometrie auf das Nachbargebiet herübergewirkt; und [...] so wurde hier die noch tiefer in die Überlieferung eingreifende Frage nahegelegt, ob nicht auf einer ganz anderen Grundlage als der bisherigen der Aufbau der exakten Naturlehre erfolgen könne.

Der Hinweis auf das ‚Galileische Beharrungsprinzip' weist gerade auf jene Diskussion hin, die — jedenfalls für die breitere wissenschaftliche Öffentlichkeit — durch Neumanns *Principien der Galilei-Newton'schen Theorie* von 1869 überhaupt erst eingeleitet wurde. Der wichtigste Grund, den Wundt dafür benennt, daß diesem Prinzip der Status eines Axioms streitig gemacht wurde, ist durch die historische Literatur kanonisiert worden: *(1)* die Grundlagenentwicklung der Geometrie. Ergänzend führt er

[1420] Wundt 1866; zur Kritik vgl. bereits Mach 1872, S. 18f. und S. 27-33.

[1421] Wundt 1910, S. 2. Das Zitat ist Wundts Buch *Die Prinzipien der Naturlehre. Ein Kapitel aus einer Philosophie der Naturwissenschaften* entnommen, bei dem es sich um die „zweite umgearbeitete Auflage" der älteren, eben zitierten Schrift *Die physikalischen Axiome und ihre Beziehung zum Kausalprinzip* (Wundt 1866), handelt. Den neuen Titel erklärt Wundt mit der „etwas veränderten Lage, die seit jener Zeit [1866] eingetreten" sei, aber in der analytischen Tradition längst bekannt war: „Diese veränderte Lage hat zugleich die Veränderung des Titels mit sich geführt, die mir im Hinblick auf die von so manchen Stellen umstrittene und in der Tat bestreitbare Bedeutung, die allmählich der Begriff des Axioms angenommen, erforderlich schien" (Wundt 1910, S. X) — Wundts ‚etwas' erscheint vor diesem Hintergrund noch *etwas* untertrieben.

in der weiteren Diskussion noch zwei ‚stützende' Erklärungen auf: *(2)* Der Aufstieg des *Energiebegriffs* trug nach seiner Auffassung dazu bei, „die mechanische Veranschaulichung entbehrlich zu machen und eventuell die Mechanik selbst auf eine neue Grundlage zu stellen"[1422]. Schließlich habe *(3)* die Entwicklung der *Elektrodynamik* zu einer Elektronentheorie geführt, die beanspruchte, die „Prinzipien der Mechanik" aus „fundamentaleren Voraussetzungen" ableiten zu können; Wundts Resümee lautet: „[...] von einer axiomatischen Geltung irgend welcher physikalischer Sätze konnte nicht mehr die Rede sein, sondern mindestens mit demselben Rechte wie in der Geometrie *konnten* die letzten, nicht weiter abzuleitenden Voraussetzungen nur noch als ‚Hypothesen' gelten, sei es, dass man diese Hypothesen als Verallgemeinerungen aus gewissen einfachen Tatsachen der Erfahrung ansah, oder dass man sie als willkürliche Konventionen der Physiker betrachtete [...]"[1423].

Deskriptiv und allgemein genommen, scheint mir Wundts Darstellung ‚vom Axiom zur Hypothese' zutreffend zu sein, *explanativ* genommen und auf Neumann bezogen jedoch in *allen* Punkten unzutreffend: *(1)* Die Entdeckung eines allgemeinen physikalischen Energieerhaltungssatzes durch J.R. Mayer, H. von Helmholtz und andere war eine den Mechanismus zwar verändernde, aber insgesamt *konsolidierende, keineswegs destruierende* Entdeckung, implizierte sie doch die Möglichkeit, durch Rückgriff auf ältere mechanische Konzeptionen (Potential, kinetische Energie bzw. *vis viva*) und Variationsprinzipien weiter eine einheitliche Physik unter ‚klassisch mechanischen' Prämissen betreiben zu können. Der dabei von Wundt konstatierte Anschauungsverlust benennt zwar ein wichtiges Problem der Mechanik, aber eben ein Problem, das in der analytischen Tradition bereits *ein Jahrhundert lang* bekannt war und daher Teil eines *früheren* Prozesses ist, um den es mir hier gerade geht. *(2)* Die Entwicklung der Elektrodynamik, namentlich die Ausbildung der von Wundt herangezogenen Elektronentheorie von L.V. Lorenz, verweist umgekehrt auf ein Problem, das für die *Prinzipiendiskussion* der Mechanik in den letzten zwei Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts fraglos große Bedeutung erlangte, um 1870 jedoch generell noch nicht als Bedrohung mechanischer ‚Axiome' gesehen wurde.[1424] Maxwells *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), der die Diskussion bald bestimmt, ist ja gerade der Versuch, auf der Grundlage Newtonscher *Axiome* mechanische ‚Modelle' elektrischer und magnetischer Erschei-

[1422] Ebd., S. 3.

[1423] Ebd., S. 3.

[1424] Vgl. hierzu Kaiser 1981, insbes. Kap. V. Kaiser zeigt, daß es in der Elektrodynamik — insbesondere bei Ampère und Grassmann — relativ früh zu einer Diskussion über Newtons drittes Axiom kam (ebd., S. 25 und S. 60). Im Falle Neumanns ist jedoch zu vergegenwärtigen, daß er, in der Tradition der Königsberger Schule stehend, für Wilhelm Webers Elektrodynamik Partei ergreift, die gerade auf dem Newtonschen Fernwirkungsstandpunkt beharrt (vgl. ebd., S. 13). Neumanns Unbehagen an der Elektrodynamik seiner Zeit (vgl. unten, insbes. Zit. und Anm. 1440) führt ihn jedenfalls *nicht* zu einer Kritik der Newtonschen Axiome.

nungen zu entwickeln; erst relativ spät wurden daher die ‚kontramechanischen' Implikationen seiner Theorie sichtbar. *(3)* Die Grundlagendiskussion der Geometrie wird für die Mechanik virulent nach der Veröffentlichung von Riemanns *Hypothesen* im Jahre 1868. Physiker wie Helmholtz *verteidigen* dabei zunächst den Wahrheits- und Gewißheitsanspruch der Mechanik und ihrer Prinzipien *gegen* die Hypothesierungstendenz. Dabei ist — auf Newton zurückverweisend[1425] — hervorzuheben, daß die Geometrie einem Helmholtz keineswegs als logisch unabhängige ‚Grundlage' der Mechanik gilt, sondern als Erfahrungswissenschaft *ihrerseits* von der Mechanik *abhängt.*[1426] Die Geometriediskussion wird — besonders unter der Fragestellung, inwieweit die Möglichkeit nichteuklidischer Geometrien Kants Philosophie der Mathematik unterminiert — ab Ende der 70er Jahre wissenschaftstheoretisch einflußreich[1427], auch für die Mechanik. Aber sie ist es (noch) nicht im Entstehungszeitraum der *Principien der Galilei-Newton'schen Theorie*. Neumann bezieht sich denn auch 1869 nur am Rande[1428] und in keiner Weise inhaltlich auf diese Diskussion; Riemanns *Hypothesen* kommen in seinem Vortrag nicht einmal vor.[1429]

Bei dem Versuch, die Entstehung der *Principien der Galilei-Newton'schen Theorie* adäquater zu rekonstruieren, als dies die Geschichtsschreiber bis heute getan haben, ist eine *andere* Antrittsvorlesung hilfreich. Neumann hält sie fast genau vier Jahre vor den Leipziger *Principien* in Tübingen, und ihr Thema ist *Der gegenwärtige Standpunct der mathematischen Physik*[1430]. Beide Vorlesungen stimmen in ihren ersten Teilen inhaltlich weitgehend überein, sind teilweise sogar textidentisch[1431]; diese Teile belegen auch, daß es Probleme der *mathematischen Physik* (und nicht deren Beziehung zur Geometrie) sind, die die Vorlesungen motiviert haben.

In der Tübinger Antrittsvorlesung versucht Neumann, „ein ungefähres Bild von demjenigen Zustande zu entwerfen, in welchem sich die physikalis[c]he Wissenschaft heutzutage befindet"[1432], wobei sein Hauptaugenmerk auf dem Gebiet liegt, „welches

[1425] Vgl. Kap. III, Teil 3.1, insbes. Anm. und Zit. 303.

[1426] Dies wird detailliert ausgeführt in Schiemann 1997, S. 219-234. Das Resümee dieser Untersuchung lautet: „Insgesamt gesehen ist Helmholtz' Begründung der Geometrie ein Kapitel aus der Siegesgeschichte des Mechanismus [...]" (ebd., S. 234).

[1427] Vgl. etwa Erdmann 1877, Krause 1878 und Schwertschlager 1883.

[1428] Vgl. Neumann 1870, S. 11; s. hierzu auch Teil 3.2, Anm. 1450.

[1429] Er gibt lediglich in der letzten seiner später hinzugefügten (vgl. Neumann 1870, S. 24, Anm. 2) *Anmerkungen* zu diesem Vortrag seine Zustimmung zu Riemanns Verhältnisbestimmung von Mathematik und Naturwissenschaft (vgl. Teil 2.3) zu erkennen (ebd., S. 32, Anm. 10).

[1430] Neumann 1865a; Neumann hält die Rede am 9. November 1865; während die *Principien* am 3. November 1869 gelesen werden.

[1431] Vgl. Neumann 1865a, S. 1-16, mit Neumann 1870, S. 1-11.

[1432] Neumann 1865a, S. 5.

von der *Elektricität* und dem *Magnetismus* handelt"[1433]. Die Mechanik fungiert hier als Modell physikalischer Theoriebildung: Sie ‚erklärt' zwar nicht insofern, als sie Unbekanntes auf Bekanntes zurückführt[1434], aber insofern, als sie eine große Zahl von Erscheinungen auf ‚Grundvorstellungen' zurückführt. Diese ‚Grundvorstellungen' sind im Falle der Mechanik „Trägheit" und „Anziehung", die auch als „Ursachen" angesprochen werden.[1435] Sie sind ihrerseits „nicht weiter erklärbar" und „völlig unbegreiflich", aber erscheinen — wohl aufgrund ihrer besonderen Einfachheit — nicht als weiter fraglich bzw. revisionsbedürftig oder auch nur -fähig.[1436]

Nach dem Vorbild der Mechanik soll nun auch die Physik *im allgemeinen* verfahren: Die Aufgabe des Physikers ist es nach Neumann, „alle Erscheinungen, die in der Natur vor sich gehen, auf möglichst wenige Grundvorstellungen, d. i. auf möglichst wenige *unbegreiflich* bleibende Dinge zurückzuführen"[1437]. ‚Vollkommenheit' einer Theorie, die Neumann in der Mechanik offenkundig als erreicht ansieht, zeigt sich in einem möglichst günstigen Verhältnis von ‚umfaßten' Erscheinungen zu nicht weiter ‚zurückgeführten' Grundvorstellungen.[1438]

Diese Forderung trägt Neumann im Anschluß *auch* an den Bereich der ‚Elektrizität und des Magnetismus' heran, und die Hauptthese seines ersten Vortrags besteht darin,

[1433] Ebd., S. 5; vgl. S. 18-32. Neumann nennt daneben „das Gebiet der *Licht-* und *Wärme*-Erscheinungen" (ebd., S. 5), sieht auf diesem Gebiet aber keine wirklichen Grundlagenprobleme für die künftige Forschung (vgl. ebd., S. 5-11 und S. 17f.). Demgegenüber bieten Elektrizität und Magnetismus „ein ganz anderes Bild" (ebd., S. 18).

[1434] „Man wird gewöhnlich sagen, der Physiker habe die Aufgabe, die Naturerscheinungen zu *erklären*. Doch bedarf dieser Ausspruch [...] doch wohl einer nähern Erörterung" (ebd., S. 12; vgl. S. 14-17).

[1435] Ebd., S. 12 und 13f.

[1436] Ebd., S. 14 bzw. 30f. Nachdem Neumann dort die Prinzipien der Mechanik, nämlich Anziehung und Trägheit, dargestellt hat, geht er zu Elektrizität und Magnetismus über und erklärt, „dass in diesem Gebiet von Erscheinungen selbst die *Principien* noch in Frage stehen" (ebd., S. 31).

[1437] Ebd., S. 17.

[1438] „Je *grösser* die Anzahl von Erscheinungen ist, welche von einer physikalischen Theorie umfasst werden, und je *kleiner* gleichzeitig die Anzahl der unerklärbaren Dinge ist, auf welche jene Erscheinungen zurückgeführt werden, umso vollkommener wird die Theorie zu nennen sein" (ebd., S. 17). Daß dieser einfachen Verhältnisbestimmung von ‚Zahl erklärter Naturtatsachen' und ‚Zahl unerklärter theoretischer Voraussetzungen' ein metaphysisches Einfachheitspostulat zugrunde liegt, wird später deutlich: „Die Natur selbst bedient sich *viel einfacherer* Mittel zur Hervorbringung jener Bewegungen" (ebd., S. 29). Neumann bezieht sich hier auf Maschinenmodelle der Planetenbewegung, die eben voraussetzungsreicher seien als eine Newtonsche Mechanik mit den Grundvorstellungen Anziehung und Trägheit. Analog wendet er sich gegen jeden „künstlich ausgedachten Apparat" zur Erklärung von Elektrizität und Magnetismus (ebd., S. 30) — eine Haltung, die er auch in den späteren Auseinandersetzungen zur Elektrodynamik beibehält (vgl. Jungnickel/McCormmach 1986 II, S. 228).

daß hier die Ausbildung einer ‚vollkommenen' Theorie noch längst nicht erreicht sei. Den Grund dafür sieht er aber nicht in mangelhaften empirischen Kenntnissen über die Phänomene der Elektrodynamik, sondern darin, „dass in diesem Gebiet von Erscheinungen selbst die *Principien* noch in Frage stehen"[1439]. Abhilfe kann daher nur von der weiteren Ausbildung der *mathematischen* Physik erhofft werden: „Wir stehen hier vor einem Räthsel, dessen Lösung bisher vergeblich versucht ist. Vielleicht wird es der Zukunft gelingen, den Schleier zu lüften. Möglich, dass es dazu nur *eines* glücklichen Gedankens bedarf. Aber es ist auch möglich, dass unsere Begriffe dazu noch nicht gehörig vorbereitet sind, dass nämlich das *mathematische Element* in unserem Verstande die dazu erforderliche Ausbildung noch nicht erlangt hat".[1440]

Halten wir zu der Tübinger Antrittsvorlesung fest: Sie stellt Grundlagenprobleme der Elektrodynamik in den Mittelpunkt, sie empfiehlt die Mechanik als Leitdisziplin physikalischer Forschung, und sie erklärt deren ‚Grundvorstellungen' (Trägheit und Gravitation) als ‚unbegreiflich'. Mit dem Essentialismus der älteren KMN hat Neumann offenbar bereits hier abgeschlossen, und deshalb artikuliert er — noch vor Kirchhoff — deutliche Kritik an einer mechanischen *Erklärung* aus irgendwie einsehbaren ‚Wesenseigenschaften' (erkennbaren ‚Kräften').[1441] Neumann läßt offen, in welchem

[1439] Ebd., S. 31.

[1440] Ebd., S. 31. Auch am Ende seines Vortrags macht Neumann deutlich, daß die ausstehende Theorie des Elektromagnetismus im wesentlichen von der *Mathematik* geleistet werden müsse: So wie es Newton und Leibniz durch die Schaffung der Analysis erst ermöglich hätten, die Gesetze und ‚Grundvorstellungen' der Mechanik aufzudecken, könnte es sich „vielleicht auch heutzutage mit der Theorie der Elektricität und des Magnetismus verhalten. — Es können möglicherweise uns diejenigen mathematischen Vorstellungen, diejenigen Vorstellungen über Raum und Zeit noch fehlen, welche nothwendig sind, um auf den *wahren einfachen* Grund jener Erscheinungen hinabzusteigen" (ebd., S. 32). Carl Neumanns Neffe Ernst Richard Neumann stellt den letzten Satz der ‚Einleitung' seiner 1922 veröffentlichten *Vorlesungen zur Einführung in die Relativitätstheorie* voran (Neumann 1922, S. 1), bezieht sich aber in seinem ‚Vorwort' — nach meiner Rekonstruktion *zurecht* — nur auf die spätere Leipziger Antrittsvorlesung: „ [... ich] bin damit bewußt dem Beispiele *Carl Neumanns* gefolgt, dem ich dieses Buch in Dankbarkeit und Ehrfurcht widme, als dem Manne, der durch seine meisterhafte Analyse der *Galilei-Newton*schen Theorie (1870) das Interesse für das Problem neu belebt hat, für das seiner Generation das Verständnis verloren zu gehen drohte, ein Problem, das dann später mit den Ausgangspunkt für die Relativitätstheorie gebildet hat" (ebd., S. VII). Die dunklen Schlußworte der älteren Tübinger Antrittsvorlesung mögen *retrospektiv* als hellsichtige Vorahnung der kommenden, Einsteinschen Entwicklung erscheinen. Tatsächlich aber fehlt ihnen die systematische Ausführung wie auch die historische Wirksamkeit, die erforderlich wären, um sie in *bestimmter* Weise mit der Relativitätstheorie in Verbindung bringen zu können.

[1441] Man kann hier auch eine Parallele zu Ernst Mach ziehen, der einige Jahre später bemerken wird, daß ‚erklären' nicht heiße, ‚Unverständliches auf Verständliches' zurückzuführen, sondern ‚ungewöhnliche Unverständlichkeiten auf gewöhnliche Unverständlichkeiten' (vgl. oben Anm. und Zit. 1416; Näheres zu Machs Erklärungsbegriff in König 1968b, S. 103f.). Die Parallele geht

Verhältnis Mechanik und Elektrodynamik nach seiner Auffassung einmal stehen werden, aber er äußert weder Zweifel an der Gültigkeit der Prinzipien der Mechanik in ihrem genuinen Anwendungsbereich (d.h. der Mechanik ‚ponderabler' Körper), noch sieht er eine Notwendigkeit, deren Voraussetzungen einer näheren Prüfung zu unterziehen. *Die mechanischen Prinzipien als ‚formal gewordene' Axiome bleiben insofern unangetastet.*

Die Tübinger Antrittsvorlesung insgesamt handelt gar nicht von den *Gesetzen*, mit denen die Mechanik und die Physik generell beginnen, sondern von den ‚Grundvorstellungen' (d.h. *Grundbegriffen*) der Mechanik bzw. Physik; sie behandelt auch nicht den logischen Aufbau der Theorien der mathematischen Physik, sondern gibt allgemeine Erörterungen zur ‚Vollkommenheit' der begrifflichen Grundlagen; schließlich wird zwar der Mathematik innerhalb der physikalischen Theoriebildung vage eine ‚begriffserweiternde' Funktion zugesprochen, aber es findet keine Diskussion der Frage statt, welche Implikationen der *mathematische* Charakter einer physikalischen Theorie für deren wissenschaftstheoretischen Status hat. Wie wir sehen werden, unterscheidet sich die Tübinger Antrittsvorlesung damit in *allen drei Punkten* signifikant von der späteren Leipziger Antrittsvorlesung.

Es fehlt also nicht, soviel kann vorweg gesagt werden, an starken Hinweisen darauf, daß zwischen diesen beiden relativ dicht beieinander liegenden Stationen in der akademischen Laufbahn Neumanns eine markante ‚Richtungsänderung' stattgefunden hat, die aufklärungsbedürftig ist. Aber die bisherige Geschichtsschreibung hat dieses Bedürfnis nicht gehabt, oder jedenfalls nicht in greifbare historische Forschung umgesetzt: Der ‚Körper Alpha' verdankt sich ihr zufolge wohl eines *spontanen* Entschlusses, die Voraussetzungen der Mechanik einer kritischen Prüfung zu unterziehen.

Aber *so* entsteht Grundlagenkritik an einer erfolgreichen wissenschaftlichen Theorie selten, vielleicht nie: Neumann kommt 1868 von Tübingen nach Leipzig. Dort wird er Kollege des Jacobi-Schülers Wilhelm Scheibner, und durch Scheibners eigene Nachschrift lernt er Jacobis *Vorlesungen über Analytische Mechanik* von 1847/48 ‚aus erster Hand' kennen[1442]. Im folgenden Jahr (1869) erscheint ein Aufsatz Neumanns über das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, in dem er Jacobis Kritik an Lagrange voll und ganz teilt und der ‚technischen' Seite dieser Kritik durch eine neue, potentialtheoretische Behandlung von Zwangsbedingungen Rechnung trägt[1443]. Aber auch Jacobis generelle Sicht auf die Grundlagen der Mechanik stößt bei Neumann auf großes Inter-

jedoch *nicht* so weit, daß Neumann in seiner Tübinger Vorlesung eine mechanik-kritische Haltung, wie Mach sie bereits 1872 propagiert, vertreten würde; sie behält vielmehr eine Vorbildfunktion für die mathematische Physik.

[1442] Vgl. hierzu Pulte 1996, S. LIf.

[1443] Neumann 1869b; vgl. auch Neumann 1879.

esse. Jacobis Berliner *Analytische Mechanik*, zu diesem Zeitpunkt immerhin bereits 20 Jahre alt, vergleicht er folgendermaßen mit der älteren Königsberger *Dynamik*:[1444]

> Während jene *Königsberger* Vorlesung fast ausschließlich nur die Darlegung und Vervollkommnung der in der Mechanik anzuwendenden *analytischen Methoden* zu ihrem Gegenstande hat, zeichnet sich die genannte *Berliner* Vorlesung aus durch eine Kritik der *Fundamente der Mechanik*, wie sie in solcher Schärfe wohl bis zum heutigen Tag noch niemals zur öffentlichen Aussprache gelangt sein dürfte.

Neumanns großes Interesse an Jacobis Kritik mechanischer Prinzipien wird nicht nur durch den angeführten Aufsatz *Ueber den Satz der virtuellen Verrückungen*, sondern auch durch eine längere Teilabschrift der *Analytischen Mechanik* dokumentiert, die sich in seinem Göttinger Nachlaß befindet und die fraglos *vor* jenem Aufsatz angefertigt worden sein muß[1445]. Ende des Jahres 1869 hält Neumann dann seine Leipziger Antrittsvorlesung *Ueber die Principien der Galilei-Newton'schen Theorie*. Jacobi wird hier namentlich nicht genannt[1446], aber die beiden folgenden Teile werden zeigen, daß die wichtigsten *neuen* wissenschaftstheoretischen Akzente von Neumanns Rezeption der Jacobischen *Analytischen Mechanik* herrühren dürften.

[1444] Neumann 1869b, S. 257 (Anm.).

[1445] Nachlaß Carl Neumann, Cod. Ms. 52; vgl. Abbildung 5 unten. Die Bezüge zwischen Neumanns dortigen Anstreichungen und Randbemerkungen zu seiner Arbeit *Ueber den Satz der virtuellen Verrückungen* (Neumann 1869b) stellen sicher, daß die Rezeption von Jacobis Kritik mechanischer Prinzipien in den gleichen Zeitraum fällt, d.h. vor der Leipziger Antrittsvorlesung liegt. S. hierzu insbes. Cod. Ms. 52 Bl. 3, 10, 11, 22, 23, 24, 64 und 75.

[1446] Ebensowenig wie Riemann, dessen Name nur in einer Anmerkung auftaucht (vgl. Anm. 1429). Unter den Zeitgenossen Neumanns wird nur Helmholtz überhaupt kurz erwähnt (Neumann 1870, S. 23); im Mittelpunkt stehen ‚Heroen' der älteren Wissenschaftsgeschichte wie Galilei, Newton und Leibniz.

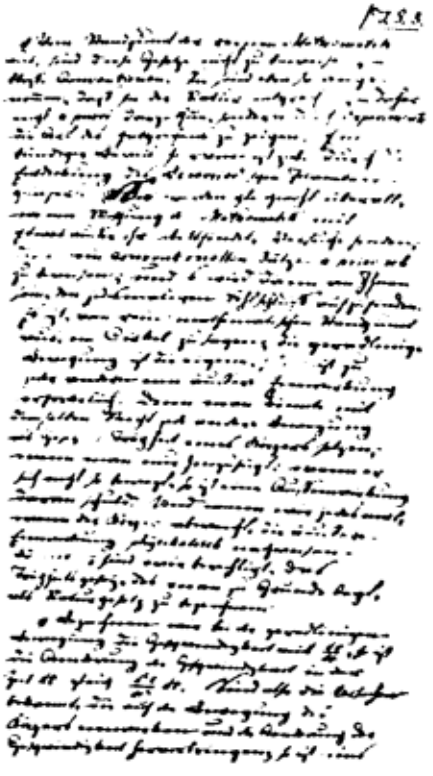

Abb. 5: Teilabschrift der Jacobischen Vorlesungen über analytische Mechanik von Carl Neumann (Nachlaß Carl Neumann, Cod. Ms. 52, Bl. 3)[1447]

[1447] Man beachte Neumanns Unterstreichungen: „Vom Standpunkt der reinen Mathematik aus sind diese Gesetze nicht zu beweisen, *bloße Conventionen*, sie sind aber so angenommen, daß sie der Natur entsprechen — daher nicht a priori darzuthun [...]. *Sie werden gleichwohl überall, wo eine Mischung der Mathematik mit Etwas außer ihr stattfindet, Versuche finden, diese rein conventionellen Sätze a priorisch zu beweisen, und es wird dann an Ihnen sein, den jedesmaligen Fehlschluß aufzufinden.* Es ist, vom rein mathematischen Standpunkt aus ein Cirkel zu sagen, die geradlinige Bewegung ist die eigene, folglich ist zu jeder andern eine äußere Hinzuwirkung erforderlich. Denn man könnte mit demselben Recht jede andere Bewegung als Gesetz der Trägheit eines Körpers setzen, wenn man nur hinzufügt: wenn er sich nicht so bewegt, so ist eine Außenwirkung daran Schuld [...]". Vgl. hierzu Jacobi 1996, S. 3.

VII.3.2 ‚Niemals wahr oder wahrscheinlich': Prinzipienfallibilismus der mathematischen Physik und Certismus der Mathematik

Wissenschaftstheoretisch fällt Neumanns Weiterführung der Position Jacobis deshalb besonders akzentuiert aus, weil er — anders als Riemann, der für Fragen der formalen Organisation wissenschaftlicher Theorien kein besonderes Interesse zeigt — Jacobis Prinzipienkritik mit einem strikt *deduktiven* Wissenschaftsverständnis verbindet: Die selbstgestellte Aufgabe, am Beispiel der theoretischen Mechanik die Prinzipien einer Theorie der mathematischen Physik „in sorgfältiger Weise zu durchdenken, und den Inhalt dieser Principien womöglich in solcher Form darzulegen, dass [der] Anforderung der Aequivalenz mit den betreffenden empirischen Thatsachen wirklich entsprochen werde", begründet er bereits im ‚Vorwort' der *Principien* damit, daß „das eigentliche Ziel der mathematischen Naturwissenschaft, wie allgemein anerkannt werden dürfte, darin besteht, möglichst wenige (übrigens nicht weiter erklärbare) Principien zu entdecken, aus denen die allgemeinen Gesetze der empirisch gegebenen Thatsachen mit mathematischer Nothwendigkeit emporsteigen [...]"[1448]. Die Mathematik sorgt nach Neumann für die *strenge logische Ableitung* von empirischen Gesetzen aus gewissen Prinzipien. In der Deduktion wird den Prinzipien weder empirisch *Relevantes* hinzugefügt (etwa durch Rand- bzw. Anfangsbedingungen), noch vermindert sie deren empirischen Gehalt. Daher spricht Neumann auch von einer ‚Aequivalenz' der ersten Prinzipien und den ‚empirischen Thatsachen'[1449]. Allein mit Blick auf den *deduktiven* Charakter der mathematischen Physik parallelisiert er auch beiläufig die Euklidische Geometrie mit der Newtonschen Mechanik.[1450]

[1448] Neumann 1870, S. 3.

[1449] Ebd., S. 3. Ziel der mathematischen Naturwissenschaften ist es, so setzt Neumann die bereits oben vorgestellte Bestimmung fort, „Principien zu entdecken, welche den empirischen Thatsachen *aequivalent* sind".

[1450] „Ebenso wie die Geometrische Wissenschaft, die Theorie der Dreiecke, der Kreise, der Kegelschnitte in streng mathematischer Weise emporgewachsen ist aus wenigen Grundsätzen, aus wenigen Axiomen, die ihrerseits nicht weiter erklärbar, nicht weiter demonstrabel sind; ebenso oder wenigstens ähnlich verhält es sich auch mit jener Theorie, welche *Newton* für die Bewegung der Himmelskörper aufgestellt hat. Sie kann Schritt vor Schritt in streng mathematischer Weise deducirt werden aus jenen beiden Grundvorstellungen der *Trägheit* und *Anziehung*, d.i. aus zwei Principien, die ihrerseits nicht weiter erklärlich sind" (ebd., S. 11). Hier handelt es sich um die *einzige* Bezugnahme Neumanns auf die Geometrie (vgl. Teil 3.1, insbes. Anm. 184). Man beachte dabei besonders Neumanns Vergleichspunkt: Es geht ihm hier um den streng deduktiven Charakter der Ableitungen in beiden Theorien. Es geht ihm aber nicht um den *Status* der Prinzipien in dem Sinne, daß fragwürdig gewordene geometrische Axiome auf die Fraglichkeit mechanischer Prinzipien hinweisen würde (d.h. um eine Hypothesierung im ‚Sog der Geometrie'). Man beachte auch: An der Spitze der Geometrie stehen ‚Axiome', an der Spitze der Mechanik stehen ‚Grundvorstellungen'.

Aber Neumann bestimmt, in Einklang mit Jacobi, sehr scharf, wo die Parallele von mathematischer Physik und ‚eigentlicher', *reiner* Mathematik endet — nämlich *vor* den Prinzipien der jeweiligen Theorien. Die mathematische Physik verfügt, anders als die Mathematik selber, über keine evidenten und sicheren, sondern nur über ‚unbegreifliche' und ‚hypothetische' Prinzipien:[1451]

> Denn wollten wir eine physikalische Theorie nicht von irgend welchen unbegreiflichen und hypothetischen Grundvorstellungen, sondern von Sätzen ausgehen lassen, die den Stempel *unumstösslicher Sicherheit* an sich tragen, die durch sich selber die Bürgschaft *unangreifbarer Wahrheit* bieten, so würden wir gezwungen sein, zu den Sätzen der Logik oder Mathematik unsere Zuflucht zu nehmen. Aus derartigen rein formalen Sätzen einer physikalischen Theorie deduciren zu wollen, würde aber ein Ding der Unmöglichkeit sein.

Mathematische und logische Sätze und Theorien sind zwar inhaltsleer, aber sicher und wahr; die mathematische Physik jedoch partizipiert hieran nurmehr *qua* ‚Ableitungssicherheit' und nicht mehr auf der Ebene der Prinzipien selber, wie es in der KMN der Fall ist[1452]. Ein *Certismus* bezüglich Mathematik und Logik und ein *Prinzipienfallibilismus* bezüglich der mathematischen Physik (und empirischen Theorien im allgemeinen) kennzeichnen Neumanns Wissenschaftstheorie in den *Principien der Galilei-Newton'schen Theorie*. In diesem wissenschaftstheoretischen *Dualismus* sehe ich den wichtigsten Unterschied zu der älteren Tübinger Vorlesung, und auch den wichtigsten Einfluß Jacobis — ein weiteres Resultat dafür, wie die Ausbildung reiner Mathematik zu einer Ausgrenzung der mathematischen Physik aus dem Reich sicherer mathematischer Erkenntnis führt.

Neumann geht in der weiteren Ausführung dieses Dualismus jedoch über Jacobi hinaus: Spricht dieser noch davon, daß Prinzipien durch die Erfahrung immerhin ‚probabel' gemacht werden können[1453], weist jener die Frage nach Wahrheit *und* Wahrscheinlichkeit als sinnlos zurück: In beinahe ‚Popperianischer' Weise[1454] heißt es nämlich bei Neumann, „dass bei jenen Principien oder Hypothesen von einer Richtigkeit oder Unrichtigkeit, von einer Wahrscheinlichkeit oder Unwahrscheinlichkeit gar nicht

[1451] Ebd., S. 12.

[1452] Vgl. Kap. II, Teil 2.1, insbes. *(b) Entdeckung und Begründung von Naturgesetzen als Prinzipien*, sowie *(c)* zur (erhalten gebliebenen) *Ableitungssicherheit*.

[1453] Vgl. Kap. VI, Teil 3.2, insbes. Zit. 1132.

[1454] Popper schreibt ganz ähnlich: „Unsere Wissenschaft ist kein System von gesicherten Sätzen [...]. Unsere Wissenschaft ist kein Wissen [epistēmē]: weder Wahrheit noch Wahrscheinlichkeit kann sie erreichen". (Popper 1982, S.223) Die Einschränkung ‚beinahe' ist dennoch angebracht: Neumann entwickelt keine Theorie der ‚Wahrheitsannäherung' und ‚Wahrheitsnähe', wie wir sie von Popper (vgl. etwa ebd., S. 428-433; Popper 1994/97 I S. 337-347) kennen. Vgl. aber auch unten, Anm. 1457.

die Rede sein kann".[1455] Da die mathematische Physik nach seinem Verständnis streng deduktiv verfährt und nur deduktive Schlüsse anerkennen darf, kann nicht *qua* Induktion Wahrheit oder Wahrscheinlichkeit ‚nach oben', zu den Prinzipien hin, gelangen.

[1455] Neumann 1870, S. 12. Neumann schließt sich mit dieser Formulierung (*zunächst* und *vermeintlich*) an Kopernikus an. Im Vortrag selbst zitiert er ohne Namensnennung eine Position, die „schon lange Zeit vor *Newton* und *Huygens*, mit vollem Recht gesagt" habe: „Non necesse est, hypotheses esse veras vel verosimiles; sufficit hoc unum, si calculum observationibus congruentem exhibeant" (ebd., S. 8f.). In einer später hinzugefügten Anmerkung geht er dem Ursprung des Zitates nach und stellt fest, daß es nicht von Copernicus stammt, sondern (mit Änderungen, vgl. ebd., S. 24) aus Osianders berühmten Vorwort zu dessen Hauptwerk *De revolutionibus* (H.G. Zekl übersetzt Osiander folgendermaßen: „Es ist nämlich gar nicht erforderlich, daß diese Voraussetzungen *wahr* [veras] sein müssen, nicht einmal daß sie *wahrscheinlich* [verisimilis] sind, sondern es reicht schon dies allein, wenn sie *eine* mit den *Beobachtungen zusammenstimmende Berechnung* darstellen [...]" (Copernicus 1990, S. 61; vgl. den Originaltext ebd., S. 60). Neumann wurde also (wie so viele) durch Osianders Vorwort zu der Auffassung verleitet, hier handle es sich um Copernicus' eigene Ansicht, vielleicht sogar um dessen authentische Stellungnahme zum Wahrheitsanspruch der neuen, heliozentrischen Theorie. Neumann verteidigt aber in seiner Anmerkung die Beibehaltung des Zitates so: „Obwohl ich nun in solcher Weise der Stütze einer so gewichtigen Autorität mich beraubt sah, so habe ich doch in meinem Vortrage an jenen Worten festgehalten. Und der Vortrag selbst mag zeigen, in welchem Sinne und aus welchen Gründen ich für dieselben einzutreten willens bin" (Neumann 1870, S. 25, Anm. 2).

Daß Popper in der *Logik der Forschung* eine ganz ähnliche, aber eben *nicht* identische Formulierung gebraucht wie Osiander bzw. Neumann (vgl. oben, Anm. 1454), ist in diesem Zusammenhang durchaus wichtig: In *Vermutungen und Widerlegungen I* zitiert Popper später Osianders Bemerkung als Ausdruck eines Theorieninstrumentalismus, den er im Anschluß ausführlich kritisiert (Popper 1994/97 I, S. 141-145 und 157-199, insbes. 142). Aber Popper übersetzt Osianders Ausdruck ‚verisimiles' mit „der Wahrheit ähnlich" und bemerkt hierzu: „Er sollte hier keinesfalls mit ‚wahrscheinlich' übersetzt werden; denn der ganze Punkt, um den es sich hier dreht, ist die Frage, ob das Kopernikanische System in seiner Struktur der Welt ähnlich ist oder nicht, das heißt, ob es der Wahrheit ähnelt, also wahrheitsähnlich ist. Die Frage von Graden der Gewißheit oder Wahrscheinlichkeit taucht dabei nicht auf" (ebd., S. 142, Anm. 3). Neumann übersetzt Osiander dagegen mit ‚wahrscheinlich'; in *seiner* Argumentation erhält dieses ‚wahrscheinlich' nun gerade die Bedeutung, daß aufgrund des strikt deduktiven Charakters von Erklärungen und Vorhersagen der mathematischen Physik im Falle der Bewährung keinerlei Abschätzungen über die *Gewißheit* der vorausgesetzten Prinzipien gewonnen werden können. M.a.W. scheint mir Neumanns Berufung auf Osianders ‚verisimiles' bzw. ‚wahrscheinlich' durchaus mit Poppers Wissenschaftstheorie vereinbar: Neumann bringt hier eben *nicht* den ‚starken' Instrumentalismus zum Ausdruck, den Popper bei Osiander verortet und der für wissenschaftliche Theorien nicht nur auf jeden Wahrheitsanspruch verzichtet, sondern auch darauf, daß diese Theorien ‚der Struktur der Welt ähnlich' sind.

Auf die Prinzipien einer empirischen Theorie wird daher das „Wort *wahrscheinlich*, und ebenso das Wort *wahr*" nur noch „als ein Epitheton ornans" anzuwenden sein:[1456]

> Damit aber werden wir doch immer nur behaupten wollen, dass jene Principien bis zum heutigen Tag sich am Besten bewährt haben; nicht aber, dass sie für alle Ewigkeit feststehen; und noch viel weniger, dass sie (gleich einem Satz der Logik oder Mathematik) durch sich selber die Bürgschaft unangreifbarer Festigkeit, die Bürgschaft unumstösslicher Wahrheit darbieten.
> Im *strengen* Sinne genommen, werden die Principien, die Ausgangspunkte einer physikalischen Theorie *niemals* als wahr oder wahrscheinlich bezeichnet werden dürfen; — sondern sie werden (mit Bezug auf unser Denkvermögen, mit Bezug auf unsern menschlichen Verstand) immer als etwas *Willkührliches* und *Unbegreifliches* zu bezeichnen sein.

An Neumanns Begriff der ‚Bewährung' ließe sich eine weitere Parallele zu Popper, insbesondere zu dessen „Positiver Theorie der Bewährung", aufzeigen[1457]. So reizvoll es wäre, diese Parallele zur *neueren* Wissenschaftstheorie auszuziehen, erscheint es hier doch wichtiger, die *Herkunft* des Neumannschen Prinzipienfallibilismus noch einmal genauer in den Blick zu nehmen:

Wie Riemann, übernimmt auch Neumann Jacobis Konventionsbegriff *nicht* und spricht statt dessen — und weniger glücklich — von „willkührlichen Hypothesen"[1458] oder „*willkührlich* zu wählende[n] Principien"[1459]. Während in der älteren Tübinger Vorlesung zwar vom ‚Unbegreiflichen' der ersten mechanischen ‚Grundvorstellungen' die Rede ist, aber nirgendwo von deren Veränderbarkeit bzw. der Möglichkeit *alternativer* Prinzipienbildungen über den gleichen Erfahrungsbereich, kommt mit Neumanns

[1456] Ebd., S. 13. Neumanns an dieses Zitat sich anschließende Leibniz-Interpretation kann ich *nicht* teilen, ist hier aber auch nicht weiter von Bedeutung.

[1457] Vgl. Popper 1982, S. 211-214. Dort heißt es u.a.: „Die Bewährung ist keine Hypothese, sondern aus (der Theorie und) den anerkannten Basissätzen ableitbar: sie stellt fest, daß diese der Theorie nicht widersprechen — und zwar unter Berücksichtigung des Prüfbarkeitsgrades der Theorie, sowie der Strenge der Prüfungen, denen diese (bis zu einem bestimmten Zeitpunkt) unterworfen wurde" (ebd., S. 211). An anderer Stelle der *Logik der Forschung* schreibt Popper: „Hier sieht man sehr deutlich den Gegensatz zwischen Wahrheit und Bewährung. [...] wir können von einem Satz niemals sagen, er sei als solcher schlechthin ‚bewährt' [in jenem absoluten Sinn, in dem wir vielleicht sagen könnten, daß er *wahr* ist], sondern wir können immer nur sagen, er sei bewährt in *bezug* auf ein bestimmtes, bis zu einem bestimmten Zeitpunkt anerkanntes System von Basissätzen. Die ‚Bewährung, die eine Theorie bis gestern gefunden hat'. Wir müssen gewissermaßen jedem Bewährungsurteil einen [zeitlichen] Index anhängen, der das vorgegebene System von Basissätzen kennzeichnet, auf das sich die Bewährung bezieht" (ebd., S. 220f.). — Bewährung nicht als ‚Beurteilung', sondern als (fortgesetzte) logische Widerspruchsfreiheit zwischen Theorie und Basissätzen (bei Neumann: ‚Erscheinungen'), die mit einem ‚Zeitindex' zu versehen ist: dies kann man, wie bereits das obige Zitat erkennen läßt, schon in Neumanns *Principien* finden.

[1458] Ebd., S. 12.

[1459] Ebd., S. 13; vgl. auch Teil 3.3, Anm. 1467.

Jacobi-Rezeption, daneben vielleicht auch mit seiner Riemann-Rezeption, das „Willkührliche" und „Bewegliche"[1460] der Prinzipien ins Spiel, die auch ein letztes Residuum[1461] des traditionellen axiomatischen Denkens bei Neumann (wie zuvor bei Jacobi) destruiert: die *Eindeutigkeit* der Prinzipienbildung oder — wie Neumann in kritischer Distanz zum frühen Helmholtz[1462] bemerkt — deren ‚objective Wirklichkeit':[1463]

> Objective Wirklichkeit [...] würde [...] den Grundlinien eines solchen Bildes, den Principien einer solchen Theorie immer erst dann beizumessen sein, wenn wir nachweisen könnten, dass *diese* Principien die *einzig möglichen* sind, dass neben *dieser* Theorie keine *zweite* denkbar ist, welche den Erscheinungen entspricht. Dass einer derartigen Anforderung zu genügen, ausserhalb der menschlichen Fähigkeit liegt, bedarf wohl keiner Erläuterung.

Der ‚Erläuterung' bedarf Neumanns Aufkündigung der Eindeutigkeit wissenschaftlicher Prinzipien- und Theoriebildung — einem konstitutiven Element der klassischen Wissenschaftsauffassung — jedoch einmal mehr aus *historiographischen* Gründen: Neumann argumentiert nämlich weder von der Möglichkeit alternativer *Geometrien* her, noch nimmt er die ‚bottom up-Perspektive' des Machschen Phänomenalismus ein — *beide* Standarderklärungen der bisherigen Geschichtsschreibung gehen (auch) bei ihm fehl. Es ist vielmehr die Jacobische ‚top down-Perspektive' des mathematischen Physikers, die die Eindeutigkeit und Objektivität der Prinzipien- und Theoriebildung der mathematischen Physik zum Problem macht. Die Mathematik führt nicht nur *keine*

[1460] Ebd., S. 23. In einer Anmerkung zum Begriff ‚Bewegliches' verweist Neumann auf verschiedene Beispiele aus der mathematischen Physik sowie auf Riemanns *Hypothesen* (ebd., S. 31f.), wobei nicht klar ist, ob Neumann die *Hypothesen* zum Zeitpunkt seiner Antrittsvorlesung kannte, da die Anmerkungen später hinzugefügt wurden (vgl. Teil 3.1, Anm. 1429). Eine solche Uneindeutigkeit besteht jedoch, wie oben begründet wurde, *nicht* hinsichtlich seiner Kenntnis der *Analytischen Mechanik* von Jacobi.

[1461] Daß bereits in der Tübinger Antrittsvorlesung Neumanns von einem ‚fundamentalistischem' oder ‚essentialistischem' Zug keine Rede mehr sein kann, wurde bereits dargelegt (vgl. Teil 3.1). Vom ‚AFE-Charakter' der KMN stand somit ‚nur' noch die Idee einer formal gewordenen Axiomatisierung zur Disposition. Das ‚nur' indes ist *nur* mit Vorsicht zu genießen, denn das traditionelle axiomatische Denken impliziert auch *Eindeutigkeit* der wissenschaftlichen Theoriebildung — eine Voraussetzung, die Neumann in den *Principien* (s.u.) — nicht jedoch früher — ausdrücklich aufgibt.

[1462] Neumann bezieht sich hier auf Helmholtz' frühen Vortrag *Ueber die Erhaltung der Kraft* (1847), in dem Helmholtz die ‚Vollendung' der Naturwissenschaft durch Aufweisung aller einfachen Kräfte (und damit deren Gesetze) und den Nachweis, daß *andere* Erklärungen der Erscheinungen auszuschließen seien, charakterisiert — ‚es würde derselben alsdann auch eine objective Wahrheit zuzuschreiben sein' (vgl. Neumann 1870, S. 31, Anm. 9). Neumann schlägt vor, ‚einfache Kräfte' durch ‚deutlich angebbare Principien' zu ersetzen — was aber nichts daran ändert, daß ihm Helmholtz' Ideal der ‚objektiv wirklichen' Naturwissenschaft unerreichbar erscheint.

[1463] Neumann 1870, S. 23.

materiale Wahrheit ‚von oben' in das wissenschaftliche System ein, wie es die ältere KMN wollte, sie eröffnet zudem ganz *verschiedene* Möglichkeiten, deduktive wissenschaftliche Systeme über den *gleichen* Erfahrungsbereich zu errichten. Die Mathematik selber zeigt nach Neumann auf, „wie ausserordentlich gross der Spielraum ist für die willkührlich zu wählenden Principien"[1464]; es zeigt sich, „dass das Gebiet abstracter Untersuchungen, welches sich hier dem Mathematiker bietet, ein unendliches ist"[1465].

Neumanns Prin*cipien der Galilei-Newton'schen Theorie* artikulieren deutlicher als jede andere Quelle der zweiten Jahrhunderthälfte die Auflösung der KMN ‚von oben', um die es in dieser Untersuchung geht, und sie liefern zugleich einen wichtigen Beleg für den bisher ‚verborgenen' Einfluß Jacobis. Die Mathematik, in der KMN der eigentliche Garant wissenschaftlicher Objektivität, ist zu reich an Möglichkeiten und zu unabhängig von Erfahrung, um nur einen ‚Spiegel' der physikalischen Realität abzugeben. Das „*Wesen der mathematisch-physikalischen Theorien überhaupt*" ist daher nach Neumann dadurch gekennzeichnet, „dass diese Theorien angesehen werden müssen als subjective, aus uns selber entsprungene Gestaltungen, welche (von willkührlich zu wählenden Principien aus, in streng mathematischer Weise entwickelt) ein möglich treues Bild der Erscheinungen zu liefern bestimmt sind".[1466]

VII.3.3 Prinzipienprüfung und der neue wissenschaftstheoretische Status der Mechanik

Neumanns Prinzipienfallibilismus impliziert trotz dieses ‚subjektiven' und ‚willkührlichen'[1467] Elements *keinen* starken Theorieninstrumentalismus, wie Popper ihn bei Osiander und anderen kritisiert[1468]: Wären für ihn Theorien bloße Instrumente der Beschreibung und Vorhersage, die im Falle des Versagens nach Belieben auf ‚unterer Ebene' modifiziert oder aber in ihrem Geltungsbereich eingeschränkt werden könnten, spielten die *Prinzipien* mathematisch-physikalischer Theorien gar keine Rolle — die Rede von einem ‚Prinzipienfallibilismus' hätte dann, strenggenommen, gar keinen

[1464] Ebd., S. 31, Anm. 10.
[1465] Ebd., S. 32, Anm. 10.
[1466] Ebd., S. 22.
[1467] Daß ‚willkührlich' bei Neumann nicht soviel wie ‚beliebig' heißt, sondern lediglich die Möglichkeit (und Notwendigkeit) einer *Wahlentscheidung* impliziert, die gewissen Kriterien unterliegt, wird die weitere Diskussion zeigen. Daß gerade dieses Element bei Neumann in der Leipziger Antrittsvorlesung überhaupt erst ins Spiel kommt und diese von der älteren Tübinger Antrittsvorlesung unterscheidet, wird meines Wissens von *allen* Neumann-Interpreten übersehen; s. etwa zuletzt DiSalle 1993, insbes. S. 347.
[1468] Vgl. oben Teil 3.2, Anm. 1454 und 1455.

Sinn.[1469] Gerade in Neumanns ‚Anforderung der Aequivalenz' zwischen ‚Principien' und ‚empirischen Thatsachen'[1470] zeigt sich jedoch, daß für ihn die Prinzipien nicht beliebiges Rohmaterial einer ‚Deduktionsmaschine' (genannt Theorie) sind, deren ‚Endprodukte' (empirisch prüfbare Sätze) *allein* zählen. Sie ist vielmehr so zu verstehen, daß wir uns zwar ‚weder der Wahrheit noch Wahrscheinlichkeit' noch der Eindeutigkeit dieser Prinzipien vergewissern können, aber daß die Prinzipien die Struktur der *gesamten* Theorie bestimmen, und die gesamte Theorie etwas über den fraglichen Realitätsbereich aussagt. Die Prinzipien *erklären* die Phänomene dieses Bereichs also *nicht* aus letzten erkennbaren oder gar bekannten ‚Wesenheiten' — hier ist wiederum eine Gemeinsamkeit mit Popper zu konstatieren[1471] —, sondern sie erklären in dem Sinne, daß sie einen logischen Zusammenhang zwischen den ‚niederstufigeren', empirisch bewährbaren und bewährten Gesetzen herstellen, der nicht mehr verändert werden kann, *ohne* die ganze Theorie aufzugeben: Prinzipienfalsifikationen sind daher Theoriefalsifikationen. Neumann spricht später für den Fall, daß die Prinzipien eines gewissen Phänomenbereichs bereits aufgestellt wurden und die Theorie daher eine gewisse Abgeschlossenheit erreicht hat, auch von einer „*construirenden* Wissenschaft" und stellt sie der rein „*descriptiven* Wissenschaft" gegenüber[1472]; erstere weist einige Gemeinsamkeiten mit Einsteins „Prinziptheorien" auf.[1473]

[1469] Popper selbst bemerkt ja zurecht: „Instrumente — und sogar Theorien, *insofern sie Instrumente (etwa der Voraussage) sind* — können [...] nicht widerlegt werden. Die instrumentalistische Interpretation ist daher nicht in der Lage, ernsthafte Prüfungen, die ja Widerlegungsversuche sind, zu erklären [...]" (Popper 1994/97 I, S. 164f.).

[1470] Vgl. Neumann 1870, S. 3.

[1471] Dem Instrumentalismus und Essentialismus stellt Popper seine eigene, ‚dritte Ansicht' folgendermaßen gegenüber: „Einer der wichtigsten Punkte dieser dritten Ansicht ist der, daß die Wissenschaft nach *wahren* Theorien strebt, obwohl wir nie sicher sein können, daß eine bestimmte Theorie wahr ist, und daß die Wissenschaft Fortschritte machen *kann* (und sie als solche erkennt), indem sie Theorien erfindet, die im Vergleich mit früheren als bessere Annäherungen an die Wahrheit beschrieben werden können. Wir können also zugeben, ohne dadurch Essentialisten zu werden, daß wir in der Wissenschaft immer versuchen, das *Bekannte durch das Unbekannte zu erklären*; das Beobachtete (und Beobachtbare) durch das Unbeobachtete (und vielleicht Unbeobachtbare)" (Popper 1994/97 I, S. 255). Neumanns Prinzipien- und Theorieverständnis deckt sich vollkommen mit dieser Aussage.

[1472] „Die Frage, ob die theoretische Physik eine *descriptive* (*beschreibende*) oder aber eine *erklärende* Wissenschaft sei, dürfte kaum einen Sinn haben, weil das Wort ‚erklären' gar zu unbestimmt, gar zu vieler Auslegungen fähig ist. Ein wenig anders wird sich die Sache gestalten, wenn man dieses Wort durch ‚construiren' ersetzt, nämlich die Frage aufwirft, ob die theoretische Physik eine *descriptive*, oder eine *construirende* Wissenschaft sei. Hierauf ist zu antworten, dass die am meisten hervorragenden Werke der theoretischen Physik [...] einen entschieden *constructiven* Charakter besitzen, indem der jedesmaligen Betrachtung eine geringe Anzahl einfacher und deutlich ausgesprochener Prämissen zu Grunde liegt, von denen aus die Erscheinungen des betreffenden Gebietes mit mathematischer Consequenz construirt, oder wenigstens

Vor diesem Hintergrund wird klar, daß Neumanns Rede von ‚willkührlichen' Prinzipien nur auf deren prinzipielle *Veränderbarkeit* und *Revidierbarkeit* abzielt, aber keineswegs eine beliebige, methodisch ungeregelte Prinzipienproliferation meint. Seine wichtigste methodologische Direktive der kritischen Prüfung lautet daher auch, daß wir bei *jeder* Theorie, „so hoch und vollendet [sie] auch dastehen mag", immer gezwungen sind[1474],

von ihren Principien uns aufs Genaueste Rechenschaft abzulegen. Immer werden wir im Auge behalten müssen, dass diese Principien etwas *Willkührliches*, und folglich etwas *Bewegliches* sind; damit wir wo möglich in jedem Augenblick übersehen können, welche Wirkung eine *Aenderung* dieser Principien auf die ganze Gestaltung der Theorie ausüben würde; und zur rechten Zeit eine solche Aenderung eintreten zu lassen im Stande sind; damit wir (mit einem Wort) die Theorie vor einer *Versteinerung*, vor einer *Erstarrung* zu bewahren im Stande sind, welche *nur verderblich*, für den Fortschritt der Wissenschaft *nur hinderlich* sein kann.

Diese ‚anti-dogmatische' Zielsetzung will Neumann in seiner Antrittsvorlesung für die *Mechanik* einlösen[1475], denn diese Disziplin unterliegt ohne Einschränkung dem Prinzipienfallibilismus, den er für die Theorien der mathematischen Physik *allgemein* formuliert — sie ist ja sogar der hier vertretenen Rekonstruktion der Vorgeschichte der Neumannschen *Principien* zufolge der eigentliche *Ausgangspunkt* für diesen Prinzipienfallibilismus. Gegenüber der älteren Antrittsvorlesung fällt denn auch auf, daß der Mechanik nun keine wissenschaftstheoretische ‚Vorbildfunktion' aufgrund einer (früher als fraglos *unterstellten*) Geltung ihrer Prinzipien mehr zukommt[1476], sondern daß sie zu *einer* mathematisch-physikalischen ‚Prinzipientheorie' *unter anderen* wird. Die kritische Prüfung der Geltungsvoraussetzungen ihrer Prinzipien macht Neumann zum *Hauptanliegen* seiner Leipziger Antrittsvorlesung. Er beschränkt sich dabei im wesent-

zu construiren versucht werden" (Neumann 1896, S. III). Deskriptive, i.a. von Systemen von Differentialgleichungen ausgehende Theorien sieht Neumann als *Vorbereitungen* konstruktiver Theorien, so daß „zwischen constructiven und descriptiven Arbeiten wohl kein *principieller*, sondern immer nur ein *temporärer* Gegensatz zu finden sein [dürfte]. Die *constructiven* Werke repräsentiren etwas Fertiges oder wenigstens scheinbar Fertiges [...]" (ebd., S. IV). Zur konstruktiven Wissenschaft zählt Neumann auch die Mechanik Galileis und Newtons (ebd., S. III).

[1473] Obwohl Einstein die „Prinziptheorien" wiederum „konstruktiven Theorien" (allerdings in anderer Bedeutung, als diese bei Neumann begegnen) gegenüberstellt; vgl. Einstein 1974, S. 174f.

[1474] Neumann 1870, S. 23.

[1475] Im Vorwort bemerkt Neumann, nachdem er die ‚Anforderung der Aequivalenz' von Prinzipien und empirischen Tatsachen formuliert hat: „In der vorliegenden Exposition ist Derartiges versucht worden mit Bezug auf die Principien der theoretischen Mechanik" (ebd., S. 3).

[1476] Vgl. Teil 3.1, insbes. Anm. und Zit. 1436.

lichen[1477] auf das Trägheitsprinzip, von dem er feststellt, daß es in der üblichen Darstellung „als *Grundstein* eines wissenschaftlichen Gebäudes, als *Ausgangspunct* mathematischer Deductionen unmöglich stehen bleiben" könne[1478].

VII.3.4 Hypothesierung, Konditionalisierung und Konventionalisierung des Trägheitsprinzips: Neumanns Körper ‚Alpha' und der absolute Raum

In Newtons *Principia* wird das Trägheitsprinzip sozusagen *mathematisch erzwungen*: Geradlinigkeit und Gleichförmigkeit gewinnen ihre Bedeutung durch die (euklidische) Geradlinigkeit eines mathematischen, absoluten Raumes und die Gleichförmigkeit einer mathematischen, absoluten Zeit.[1479] Aber bereits Jacobi weist in seiner *Analytischen Mechanik* darauf hin, daß es grundsätzlich möglich sei, das Newtonsche Trägheitsprinzip durch ein *anderes* mathematisches Bewegungsgesetz zu ersetzen, das dann die Ungestörtheit bzw. Kräftefreiheit eines Körpers festlegen würde.[1480] Das Trägheitsprinzip wird bei ihm zu einer *Konvention*, die auch anders hätte ausfallen können: Die analytische Tradition bindet sich nicht an eine Euklidische Raumanschauung, und reiner Mathematik erscheint die *Bevorzugung* von *mathematischen* Eigenschaften wie ‚Geradlinigkeit' oder ‚Gleichförmigkeit' (Proportionalität) erst Recht nicht mehr plausibel.

Es ist wichtig festzustellen, daß die Aufgabe, die Neumann sich in seiner Leipziger Antrittsvorlesung stellt, vor diesem Hintergrund sinnvoll und auch notwendig wird. *Weil* die Mathematik (mittlerweile) ‚semantisch entladen' ist, verlieren Ausdrücke wie ‚Geradlinigkeit' oder ‚Gleichförmigkeit' ihre Bedeutung — das Trägheitsprinzip in seiner gängigen Formulierung[1481] erscheint daher Neumann „vollständig *unverständlich*"[1482]. Die Bedeutung dieser Ausdrücke kann nicht mehr die Mathematik, sondern nur noch die *Erfahrung* vermitteln. *Weil* die Mathematik (zudem) unterschiedliche logisch mögliche Trägheitsprinzipien bereit hält, *muß* die *Erfahrung* auch für entsprechende Bedeutungsfestlegungen sorgen, wenn die Forderung eingelöst werden soll, daß die Prinzipien einer Theorie in möglichst präziser, überprüfbarer Form formuliert sein

[1477] Vgl. aber auch Neumann 1870, S. 20-22 zum Gravitationsgesetz. Neumann verzichtet auf eine ausführlichere Behandlung, „um der Exposition denjenigen einheitlichen Charakter bewahren zu können, welcher bei einer öffentlichenVorlesung geboten war" (ebd., S. 4).

[1478] Ebd., S. 14.

[1479] Vgl. Kap. III, Teil 3.

[1480] Vgl. Kap. VI, Teil 3.2, insbes. Zit. 1134.

[1481] „Ein in Bewegung gesetzter materieller Punkt läuft, falls keine fremde Ursache auf ihn einwirkt, falls er vollständig sich selber überlassen ist, in *gerader Linie* fort, und legt in gleichen Zeiten *gleiche Wegabschnitte* zurück" (Neumann 1870, S. 14). Neumann schreibt das Gesetz in *dieser* Formulierung irrtümlich bereits Galilei zu.

[1482] Neumann 1870, S. 14.

müssen. Es kommt also gleichsam darauf an, das Trägheitsprinzip aus dem mathematischem ‚Himmel'[1483] auf die physikalische ‚Erde' zu holen. Neumann geht diese Aufgabe in drei Schritten an. Sie sollen zunächst nur beschrieben und im Anschluß einer Bewertung und Kritik unterzogen werden.

(1) Eigenschaften wie ‚Geradlinigkeit' und ‚Gleichförmigkeit' können der Bewegung von Körpern nur dann sinnvoll zugeschrieben werden, wenn *ein* System als „Basis unserer Beurtheilung" vorausgesetzt wird; Neumann spricht von einem „specielle[n] Körper im Weltall [...] als Basis unserer Beurtheilung [...] und zwar ein *absolut starrer* Körper, ein Körper, dessen Figur und Dimensionen für alle Zeiten unveränderlich sind"[1484]. Die *Existenz* eines solchen „Körpers *Alpha*" bezeichnet er als sein „*erstes Princip*"[1485]; es soll im folgenden T_A genannt werden. Von Bewegung spricht Neumann fortan nur noch mit Bezug auf den ‚Körper Alpha', d.h. unter der Voraussetzung der Gültigkeit von T_A.

(2) Unter Voraussetzung von T_A erhält das Prädikat ‚Geradlinigkeit' eine *bestimmte* Bedeutung. Die Feststellung der Geradlinigkeit in Bezug auf Alpha ist Neumanns „*zweites Princip*"[1486]; es wird im folgenden als T_G bezeichnet. Da Alpha als ausgedehnter, starrer Körper eingeführt ist, kann er als Koordinatensystem herangezogen werden, um die Geradlinigkeit der Bewegung irgendeines zweiten Körpers zu messen.

(3) Mit dem Begriff der ‚Gleichförmigkeit' einer Bewegung kommt die Voraussetzung eines konstanten *Zeitmaßes* ins Spiel. Neumann weist darauf hin, daß diese chronometrische Voraussetzung in physikalischen Prozessen — etwa bei der Erdumdrehung — nicht gegeben sei. Um den „irrationalen Begriff der gleich grossen Zeit"[1487] zu vermeiden, schlägt er vor, auf das Trägheitsprinzip *selber* zurückzugehen. Sein „*drittes Princip*" (es heiße T_C) versteht er daher als ein „Residuum" eines folgendermaßen ‚zeitfrei' formulierten Trägheitsprinzips: „*Zwei* materielle Punkte, von denen jeder sich selbst überlassen ist, bewegen sich in solcher Weise fort, dass gleiche Wegabschnitte des einen immer mit gleichen Wegabschnitten des andern correspondiren"[1488]. Neumann führt weiter aus, daß dieses Prinzip eine Definition von Zeitgleichheit (ich nenne sie D_C) beinhalte: Gleiche Zeitintervalle liegen dann vor, wenn ein freier Körper gleiche Wegstrecken zurückgelegt hat.[1489]

[1483] Neumann spricht wörtlich davon, dieser Satz trete uns „als ein Satz ohne Inhalt, als ein in der Luft schwebender Satz" entgegen (ebd., S. 15).

[1484] Ebd., S. 15.

[1485] Ebd., S. 15.

[1486] Ebd., S. 16: Das „zweite Princip" besteht darin, „dass ein sich selbst überlassener materieller Punkt in gerader Linie fortschreitet, also in einer Bahn dahingeht, die geradlinig ist in Bezug auf jenen Körper Alpha".

[1487] Neumann 1870, S. 18.

[1488] Ebd., S. 18.

[1489] „In Uebereinstimmung mit dem Geiste *Galilei's* und *Newton's* [...] können wir nämlich jetzt (nachdem das dritte Princip in der angegebenen Weise festgestellt ist) *gleiche Zeitintervalle*

Ich diskutiere Neumanns drei Prinzipien, die *zusammengenommen* den empirisch *prüfbaren* Gehalt des Trägheitsprinzips ausmachen sollen, in umgekehrter Reihenfolge. Neumanns Zeitgleichheitsdefinition D_C unter Verwendung von T_C wurde als zirkulär kritisiert, weil es vom Vorhandensein eines Inertialsystems Gebrauch mache, das doch durch das Trägheitsprinzip erst eingeführt werde.[1490] Aber dieser Vorwurf trifft nicht zu, denn T_C ist keine einfache Wiederholung der ursprünglichen, ‚Newtonschen' Formulierung, sondern ist eine Aussage über die Bewegung *zweier* Punkte. Ludwig Lange, der *durch Neumanns Antrittsvorlesung*[1491] zu einer eigenen logischen Analyse des Trägheitsprinzips angeregt wurde, die Neumanns Argumentation weiterführt, beschreibt die Beziehung von T_C und D_C sehr treffend:[1492]

> Wenn man sagt, ein bestimmtes Zeitintervall sei *n*-mal größer als ein anderes, so bedeutet dies nach *Neumann* nichts Anderes, als dass irgend ein sich selbst überlassener Punkt in seiner geradlinigen Bahn während des ersten Zeitintervalls einen *n*-mal so großen Weg zurücklegt, als während des zweiten. Und wenn das Beharrungsgesetz in seiner gewöhnlichen Fassung behauptet, dass beliebig viele sich selbst überlassene Punkte in ihren geradlinigen Bahnen gleichförmig fortschreiten, d.h. während gleicher Zeiten gleiche Wege durchmessen, so sind hier unter gleichen Zeiten solche zu verstehen, worin *einer* von jenen Punkten gleiche Wege zurücklegt. Für diesen Punkt ist also jene Behauptung des Gesetzes bloße Sache der *Convention*, und erst nachdem diese Convention angenommen ist, für die übrigen Punkte *Forschungsergebniss*. Das Bewundernswerthe am zeitlichen Theile des Beharrungsgesetzes liegt einzig darin, dass gleichen Wegen *eines* sich selbst überlassenen Punktes gleiche Wege *jedes anderen* zeitlich correspondiren.

Neumanns und Langes Botschaft ist klar: Der Begriff der ‚Gleichförmigkeit' ist — unabhängig von allen Festlegungen über die Starrheit von Maßstäben zur Längenmessung[1493] — bereits aus chronometrischen Gründen *ohne* konventionelle Setzungen nicht zu haben, wenn er eine empirisch prüfbare Eigenschaft der Bewegung bezeichnen soll.

als diejenigen definiren, innerhalb welcher ein sich selbst überlassener Punkt gleiche Wegabschnitte zurücklegt" (ebd., S. 18).

[1490] So bemerkt etwa Roberto Torretti mit Blick auf Neumanns oben (Anm. 245) zitierten Satz: „Such equal distances must of course be measured with respect to an inertial system, so that Neumann's construction appears to be circular" (Torretti 1978, S. 324). Diesen Zirkel sieht Torretti erst durch Ludwig Langes Definition des Inertialsystems behoben (ebd., S. 324f.). Aber Lange selbst hat Neumanns Argumentation genauer analysiert und gewürdigt (vgl. Zitat. 1492).

[1491] Vgl. etwa Lange 1885a, S. 333. Lange erwähnt neben Neumanns *Principien* auch Mach, dessen Diskussion des Trägheitsprinzips später liegt (vgl. Teil 3.5). In Bezug auf die *Zeitmessung* ist Langes Anerkennung und Adaption des Neumannschen Standpunktes unmißverständlich: „*C. Neumann* hat nun zuerst mit Nachdruck auf gewisse Schwierigkeiten hingewiesen, welche sich der einwurfsfreien Definition des wissenschaftlichen Zeitmaßes entgegenstellen" (Lange 1886, S. 133).

[1492] Lange 1886, S. 134f.

[1493] Näheres hierzu in Grünbaum 1968 und 1973.

Dem ist, soweit es um die chronometrischen Teile T_C und D_C der Neumannschen Analyse geht, Nichts hinzuzufügen.

Das geometrische Prinzip T_G erscheint unproblematisch unter der starken Voraussetzung der Existenz eines ausgedehnten und starren Körpers Alpha. Diese Voraussetzung kann abgeschwächt werden[1494], und der originellste Teil von Langes späterer logischer Analyse des Trägheitsprinzips besteht darin, Neumanns ‚konventionalistisches' Element bei der Zeitbestimmung von der Chronometrie auch auf die Geometrie zu übertragen.[1495]

Es bleibt die zentrale Frage nach T_A, und damit nach dem ontologischen und erkenntnistheoretischen Status des Körpers Alpha. Neumann ist oft dahingehend interpretiert und auch dafür kritisiert worden, daß er Alpha als einen uns zwar unbekannten, aber *physisch realen* Körper eingeführt habe. Lange etwa spricht davon, Neumann habe Newtons absoluten Raum „gewissermaßen materialisiert, m.a.W. an Materie des Weltraumes in *hypothetischer* Weise angeknüpft"[1496] — es wäre demnach gleichsam Newtons metaphysisches ‚Gespenst'[1497] in ein physisches ‚Ungeheuer' verwandelt worden, von dem behauptet wird, daß es möglicherweise irgendwann einmal durch die Erfahrung aufgewiesen werden könne. Mach kritisiert denn auch, mit Neumanns „hypothetischem Körper" Alpha „bliebe alles beim Alten. Das Trägheitsgesetz würde scheinbar einen schärferen Ausdruck erhalten, ohne sich in der Praxis anders zu gestalten"[1498].

[1494] Vgl. Hanson 1965a, S. 14f.

[1495] Lange weist auf diese ‚Neumannsche Wurzel' seiner geometrischen Analyse ausdrücklich hin: „Es ist offenbar nichts als ein eigenthümlicher *Eliminationsprocess*, wodurch *Neumann* die unbegreifliche absolute Zeit aus dem Ausspruche des Trägheitsgesetzes entfernt hat. Es fragt sich nun, ob sich nicht durch ein analoges Verfahren auch der absolute Raum eliminiren lässt" (Lange 1885a, S. 336). Seine Methode besteht darin, entsprechend zu Neumanns Zeitmeßverfahren (von Lange als „Inertialzeitscala" bezeichnet) ein Meßverfahren für die räumliche Bewegung („Inertialsystem") einzuführen, indem er drei freie („sich selbst überlassene") bewegte Punkte ein Koordinatensystem aufspannen läßt, wobei die Bewegungsrichtungen dieser Punkte nicht kolinear sein dürfen (vgl. unten, Anm. und Zit. 275). Lange faßt so zusammen: „Es folgt hieraus, dass das Gesetz von der unveränderlichen Bewegungsrichtung sich selbst überlassener Punkte eine *blosse Convention* ist für drei solche Punkte, das es ein bemerkenswerthes Resultat der Forschung nur insofern enthält, als es für mehr als drei, für beliebig viele Punkte mit Bezug auf ein und dasselbe System gilt. Die *physikalische* Bedingung des Unbeeinflußtseins hat eben den einen sehr merkwürdigen *kinematischen* Erfolg, dass es für *beliebig viele* ihr unterworfene Punkte ein Coordinatensystem giebt, worin sie sämmtlich geradlinig bewegt sind" (ebd., S. 337; vgl. die analoge chronologische Darstellung oben, Zit. 249). Lange nennt das auf Zeit und Raum angewandte Verfahren der *Elimination* das „Princip der particularen Determination" (ebd., S. 338, Anm. 2; vgl. auch Lange 1886, S. 136).

[1496] Lange 1886, S. 111f.

[1497] Lange spricht von einem „Gespensterraume" (ebd., S. 127).

[1498] Mach 1872, S. 48 (Anm. 1).

Doch *diese* Kritik muß aus verschiedenen Gründen in der Hauptsache als *verfehlt* bezeichnet werden[1499], und Neumann hat sie in einigen späteren Veröffentlichungen mit Recht zurückgewiesen.[1500] Zunächst ist festzustellen, daß Neumann zwar bezüglich Alpha die *Frage* aufwirft, „ob jener Körper denn eine wirkliche, concrete Existenz besitze, gleich der Erde, der Sonne und den übrigen Himmelskörpern"[1501], aber diese Frage wird von ihm keineswegs im Sinne einer ‚Materialisierung' entschieden: Er verweist darauf, daß dessen „Existenz mit demselben Recht, mit derselben Sicherheit behauptet werden kann, wie etwa die Existenz des Licht-Aethers oder die des elektrischen Fluidums"[1502]. Es geht aber bei solchen Existenzzuschreibungen, wie die weitere Diskussion deutlich macht, *nicht* um eine ‚direkte' oder ‚indirekte' Ausweisbarkeit der fraglichen Entitäten durch Sinneswahrnehmung , sondern um deren Unverzichtbarkeit für wissenschaftliche Erklärung: Der Körper Alpha ist für Neumann ein unverzichtbarer *theoretischer Begriff*. Er stellt einen Vergleich von Alpha mit einer „intermediären Variablen" der Mathematik an, der dies gut illustriert: So wie jene eingeführt wird, damit „der Zusammenhang zwischen diesen Variablen in übersichtlicher Weise zur Anschauung gebracht werden" könne, *indem* geklärt wird, in welchem Zusammenhang „jede der gegebenen Variablen zu dieser intermediären Größe steht", in „solcher Weise werden die einzelnen Phänomene mit einander verbunden, indem jedes derselben in Verbindung gesetzt wird mit jenem Centralpunkt"[1503]. Es ist diese *theoretische* Funktion von Alpha, um die es Neumann geht. Sein ontologischer Status ist sekundär, wobei Neumann audrücklich darauf hinweist, daß er an ein Koordinatensystem und *nicht* an einen materiellen Körper denkt.[1504]

[1499] In diesem Punkt stimme ich — trotz mancher Interpretationsdifferenzen (vgl. Teil 3.1, Anm. 192 und Teil 3.3, Anm. 223) — mit Robert DiSalle überein (s. DiSalle 1993, S. 349).

[1500] Vgl. Neumann 1887, 1904, 1910a und 1910b. Die Rede von einem *‚starren Körper* Alpha' erklärt Neumann später so: „Das Achsensystem Alpha ist von mir in meiner Antrittsvorlesung kurzweg als ein *starrer Körper Alpha* bezeichnet worden, was leider zu Mißverständnissen Veranlassung gegeben hat. Wenn ich damals einer solchen Ausdrucksweise mich bediente, so geschah das namentlich mit Rücksicht auf meine damaligen Zuhörer, unter denen verhältnismäßig nur *wenige* Mathematiker sich befanden" (Neumann 1904, S. 255). Zuvor heißt es: *„Wo befindet sich nun aber das System Alpha? Welche Mittel haben wir zu seiner näheren Bestimmung?* Es liegt in der Natur der Dinge, daß man diese Frage nur mit Hilfe der Theorie, und auch in der Theorie nur *a posteriori* zu beantworten vermag" (ebd., S. 253).

[1501] Neumann 1870, S. 20f.

[1502] Ebd., S. 21. Beiläufig sei (in Anknüpfung an die Teile 3.2 und 3.3) darauf hingewiesen, daß auch *diese* Parallele zeigt, daß Neumann in den *Principien* den Status der Mechanik an den anderer Bereiche der mathematischen Physik adaptiert.

[1503] Ebd., S. 21.

[1504] Neumann hat es für unnötig befunden, dies besonders zu betonen, und er hat damit zu den Fehlinterpretationen Langes, Machs und anderer beigetragen. Lediglich in einer *Anmerkung* zu seinem Vortrag bemerkt er: „Es bedarf wohl kaum der Bemerkung, dass unter dem starren Kör-

Bleibt damit aber nicht doch, *abgesehen* von Newtons ontologischer Fixierung des mathematischen absoluten Raumes[1505] ‚alles beim Alten' (Mach)? Dies ist *nicht* der Fall, und zwar in einer wesentlichen Hinsicht. Neumann macht nämlich klar, daß dem „Körper Alpha eine gewisse *Unbestimmtheit*" anhaftet: „Denn ohne Beeinträchtigung der *Galilei-Newton'schen Theorie* kann derselbe ersetzt werden durch irgend einen *andern* Körper Alpha, falls nur diesem letztern eine progressive Bewegung zuerkannt wird, die mit Bezug auf den erstern *geradlinig* und *von constanter Geschwindigkeit* ist".[1506] Neumann formuliert hier, wenn auch in seiner gelegentlich mißverständlichen ‚Alpha-Sprache', die *dynamische Äquivalenz aller Inertialsysteme*, und es ist wiederum seine ‚top down'-Perspektive, die dies möglich macht: Die *Prinzipien* der Theorie enthalten die Möglichkeit äquivalenter Bezugssysteme, sie *definieren* die *Klasse aller Inertialsysteme* als den eigentlichen Raum der Mechanik. ‚Absolute Ruhe' oder ‚absolute Translation' im Sinne Newtons werden für Neumann *sinnlose* Begriffe — die mathematische Theorie enthält sie nicht, und sie bedarf ihrer auch nicht zur Erklärung der Erscheinungen.

Gegenüber Newton findet hier eine *Inversion* der Perspektive statt: Erhalten bei ihm die kinematischen Grundbegriffe ihre Bedeutung gleichsam durch die ‚euklidische *Ebene*', der gewisse ontologische Annahmen über Bewegung und Kräfte unterlegt sind[1507], erhalten sie bei Neumann ihre Bedeutung tatsächlich von der Erfahrung — einer Erfahrung aber, die von den ‚*Gipfeln* der Theorie' (den Prinzipien der Mechanik) aus gemacht wird. Von *diesem* Standpunkt aus sind ‚absolute Ruhe' und ‚absolute (translatorische) Bewegung' sinnlose Begriffe.

Drei allgemeinere Bemerkungen sollen die Untersuchung von Neumanns *Principien* abschließen. *Erstens* ist darauf hinzuweisen, daß Neumanns Relativierung des absoluten Raumes über die Feststellung der dynamischen Äquivalenz von Inertialsystemen *nicht* hinausgeht: „[...] die Substitution eines Körpers Alpha, der in Bezug auf den ersten Körper Alpha eine Bewegung *anderer* [als geradlinig-gleichförmiger] Art, z.B.

per Alpha ein System starr verbundener *Punkte* zu verstehen ist, und dass die Anzahl dieser Punkte mindestens gleich *drei* sein muss. Ebenso gut könnte der Körper Alpha natürlich aufgefasst werden als ein System starr mit einander verbundener *gerader* Linien, deren Anzahl mindestens gleich *zwei* sein müsste. Dass diese Punkte oder Linien *materiell* sind, ist durchaus unnöthig" (ebd., S. 26, Anm. 6). Die Idee, ein bevorzugtes *empirisches* Bezugssystem ausweisen zu können (etwa die „*Hauptträgheitsachsen des Weltalls*") erscheint ihm kaum realisierbar und vor allem *wissenschaftstheoretisch* fraglich: Die Behauptung eines solchen Systems würde „so gut wie ohne Inhalt sein, insofern keine Möglichkeit vorhanden sein dürfte, sie durch empirische Daten sei es zu befestigen, sei es zu erschüttern". Weder Bewährung noch Falsifikation der Theorie würden durch ein ‚empirisch bevorzugtes' System verändert, und *daher* ist ihm der Versuch, ein solches System zu finden, müßig.

[1505] Vgl. Kap. III, Teil 3.

[1506] Neumann 1870, S. 22; vgl. hierzu auch DiSalle 1993, S. 349.

[1507] S. zur Präzisierung Kap. III, insbes. Teil 3.2.

eine *rotirende* Bewegung besitzt, würde *völlig unzulässig* sein".[1508] Ein ‚Machsches Prinzip'[1509], wie Schlick, Einstein und andere es *später* nannten[1510], das aber bei Mach selbst nur in vagen und mehrdeutigen Formulierungen auszumachen ist[1511], kann man in Neumanns *Principien* nicht finden; es wird geradezu ausgeschlossen.[1512]

Zweitens ist festzustellen, daß Neumanns Beschränkung auf eine isolierte Analyse des Trägheitsprinzips es mit sich bringt, daß weder diese Analyse noch deren Weiter-

[1508] Neumann 1870, S. 22.

[1509] Darunter wird heute gewöhnlich die Aussage verstanden, daß es sich bei der Trägheit nicht um eine absolute Eigenschaft einer Masse handelt, sondern um eine Eigenschaft, die von den umgebenden anderen Massen und deren Verteilung abhängt (vgl. etwa Wolters 1987 und die verschiedenen Beiträge in Barbour 1995); auch die Tatsache, daß ein deformierbarer Körper sich bei Rotation durch Trägheitskräfte verformt, hängt demnach von der Existenz anderer Massen ab, in Bezug auf die die Rotation stattfindet.

[1510] Für Belege vgl. Norton 1995.

[1511] John Norton bemerkt zu seiner diesbezüglichen Analyse der Schriften Machs: „Mach's own writings that pertain to the principle were vague and ambiguous, bordering on the contradictory. The principle is never clearly stated, but at best obliquely suggested, and it remains unclear whether Mach endorsed the suggestion or condemned it as unscientific" (ebd. 1995, S. 10).

[1512] Neumann fügt in einer Anmerkung (zum obigen Zitat 1508) eine Betrachtung an, die zeigen soll, „wie unerträglich die Widersprüche sind, welche sich einstellen, sobald man die Bewegung [hier: der Rotation!] nicht als etwas Absolutes, sondern nur als etwas Relatives auffasst. Nehmen wir an, dass unter den Sternen sich einer befinde, der aus *flüssiger* Materie besteht, und der — ebenso etwa wie unsere Erdkugel — in rotirender Bewegung begriffen ist um eine durch seinen Mittelpunkt gehende Axe. In Folge einer solchen Bewegung, infolge der durch sie entstehenden Centrifugalkräfte wird alsdann jener Stern die Form eines abgeplatteten Ellipsoids besitzen. *Welche Form wird — fragen wir nun — der Stern annehmen, falls plötzlich alle übrigen Himmelskörper vernichtet (in Nichts verwandelt) würden?* Jene Centrifugalkräfte hängen nur ab von dem Zustande des Sternes selber; sie sind völlig unabhängig von den übrigen Himmelskörpern. Folglich werden — so lautet unsere Antwort, jene Centrifugalkräfte und die durch sie bedingte ellipsoidische Gestalt ungeändert *fortbestehen*, völlig gleichgültig ob die übrigen Himmelskörper fortexistiren oder plötzlich verschwunden sind" (ebd., S. 27; Anm. 8). Mach hat bekanntlich in seiner *Mechanik* genau diesen Schluß bestritten. (Mach 1933, S. 222). Mach geht hier also über Neumanns *Principien* klar hinaus. Es wäre aber zu prüfen, ob nicht die *Principien* Mach zu seinem Prinzip *angeregt* haben könnten. Mach bemerkt nämlich bereits 1872 in seiner Diskussion der Antrittsvorlesung Neumanns: „Denken wir uns aber die Erde ruhend und die übrigen Himmelskörper um sie gedreht, so gibt es keine Abplattung der Erde, keinen Foucault'schen Versuch u.s.w. Wenigstens nach unserer gewöhnlichen Auffassung des Trägheitsgesetzes ist es so. Nun kann man die Schwierigkeiten in zweierlei Weise auflösen. Entweder alle Bewegung ist eine absolute, oder unser Trägheitsgesetz ist fehlerhaft ausgedrückt. *Neumann* zieht die erstere Annahme vor, ich die zweite" (Mach 1872; S. 48, Anm. 1). Meines Wissens handelt es sich hier (immerhin) um die früheste Stellungnahme Machs, die in Richtung des später nach ihm benannten Prinzips weist.

führung durch Lange jenen Zirkel tatsächlich auflöst, auf den bereits Jacobi[1513] hingewiesen hatte und der später auch für Poincarés Verständnis mechanischer Prinzipien als Konventionen[1514] wichtig werden sollte: Das Trägheitsprinzip *definiert*, wann Kräftefreiheit vorliegt, und wenn man bereit ist, komplizierte Kraftgesetze in Kauf zu nehmen, kann man durchaus andere, weder geradlinige noch gleichförmige Bewegungen an seine Stelle setzen. Neumann und Lange sehen von diesem ‚*dynamisch*-definitorischen' Teil des Trägheitsprinzips ab und geben keine Antwort auf die Frage, wie denn *unabhängig* von diesem Prinzip eine Kräftemessung aussehen könnte. Hierauf macht zurecht Gottlob Frege in seinem einzigen Beitrag zur Theorie der empirischen Wissenschaften[1515] aufmerksam. Dieser Beitrag ist deshalb interessant, weil er sowohl bei Newton als auch bei Lange[1516] das — der KMN eigene[1517] — ‚Prinzip der logischen Isolierung von Prinzipien' aus logischen Gründen kritisiert: „Dieser Mangel rührt in beiden Fällen von der Vereinzelung der Hypothesen her. Nur das Ganze der dynamischen Grundgesetze kann als Hypothese mit der Erfahrung verglichen und durch sie bestätigt werden".[1518]

Drittens aber, und dies ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchung der wichtigste Punkt, weist Neumanns Analyse eine Hypothesierung, Konditionalisierung und Konventionalisierung des Trägheitsprinzips auf, die es weit von dem Anspruch entfernt, ein evidentes und sicheres Naturgesetz (oder gar Axiom) zu sein: Ein vermeintlich einfaches und ‚natürliches' Gesetz wird durch Neumanns Analyse in drei sogenannte Prinzipien T_A, T_G, und T_C sowie eine Definition D_C zerlegt, und die weitere logische Analyse des Trägheitsprinzips durch Lange, Streintz, Frege und andere weist auf *zusätzlich* zu beachtende Geltungsbedingungen und zu treffende Konventionen hin. Die Geschichte der Mechanik (und der mathematischen Wissenschaften allgemein) kennt viele andere Beispiele eines solchen Prozesses der sukzessiven *Enttrivialisierung der Erkenntnis*, aber wohl nur wenige, die so sinnfällig sind.[1519]

[1513] Vgl. Kap. VI, Teil 3.2, Zit. 1126.

[1514] Vgl. Poincaré 1897, 1914a und 1914b; hierzu auch Kap. VI, Teil 3.3 und Diederich 1974a.

[1515] Es handelt sich hier um Freges Rezension von Langes Buch *Die geschichtliche Entwicklung des Bewegungsgesetzes und ihr voraussichtliches Endergebnis* (Lange 1886); ihr Titel ist: *Das Trägheitsgesetz* (Frege 1891).

[1516] Und damit implizit auch bei Neumann, auf den Lange sich bezieht.

[1517] Vgl. Kap. II, Teil 2.2.

[1518] Frege 1891, S. 116. Frege kritisiert außerdem, daß Lange die Voraussetzung der „Unveränderlichkeit eines Maßstabes" nicht zur Sprache bringe (ebd., S. 117). *Auch* diese Kritik trifft auf Neumann zu (vgl. oben, Anm. 1493).

[1519] Man vergleiche etwa Newtons knappe Formulierung seines ‚Axioms und Bewegungsgesetzes' (Kap. II, Teil 2.1, „Lex I") mit derjenigen, die Lange unter der Überschrift „Beharrungsgesetz" vorschlägt:

„ *Definition I:* ‚Inertialsystem' heißt ein Coordinatensystem von der Beschaffenheit, dass mit Bezug darauf die in einem Punkte zusammenlaufenden stetig beschriebenen Bahnen *dreier*

Dabei ist wichtig zu beachten, daß dieser Prozeß hier *nicht* als ein euklidianistisches bzw. ‚gummi-euklidianistisches' Manöver der *Prinzipiensicherung* zu begreifen ist, das in anderen Fällen „auf den höheren Ebenen deduktiver Strukturen zu immer theoretischeren Begriffen und immer unwahrscheinlicheren Aussagen geführt hat und nicht zu immer trivialeren Begriffen und Aussagen"[1520]. Neumanns Ziel ist nicht Prinzipiensicherung, sondern kritische *Prinzipienprüfung*: Es geht ihm darum, das Trägheitsprinzip als *Hypothese*[1521] in eine solche Form zu bringen, daß es überhaupt einer *empirischen Prüfung fähig wird* und ggf. einer *Revision* unterzogen werden kann. Neumann selbst hat diese Zielsetzung *teilweise* eingelöst, und er hat weitere erfolgreiche Bestrebungen in dieser Richtung initiiert. Es sind die theoretische Einsicht in die Notwendigkeit kritischer Prinzipienprüfung *und* die fruchtbaren Ansätze zu einer praktischen Umsetzung dieser Einsicht, die seine Leipziger Antrittsvorlesung zu einer wichtigen Station *moderner* Mathematischer Naturphilosophie macht. Mit den *Principien* wird die Mechanik (auch) im Bewußtsein der *scientific community* zu einer Theorie, deren Grundlagen fraglich und veränderlich sind. Und dies war vor allem Neumanns Zielsetzung: „die Theorie vor einer *Versteinerung*, vor einer *Erstarrung* zu bewahren"[1522].

VII.3.5 Zusammenfassung: Neumann als Vorläufer Machs und Poppers

Ernst Mach veröffentlicht 1872 in seinem Vortrag über *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* erstmals seine eigene Kritik des Trägheitsprinzips, von dem er prägnant bemerkt, daß es seit Newton „die Würde und Unantast-

gleichzeitig von demselben Raumpunkte projecirter und sofort sich selbst überlassener Punkte (die aber nicht in einer Geraden liegen sollen) sämmtlich *geradlinig* sind.

Theorem I: In Bezug auf ein Inertialsystenm ist auch die Bahn eines *jeden vierten* sich selbst überlassenen Punktes *geradlinig*.

Definition II: ‚Inertialzeitscala' heißt eine solche Zeitscala, in Bezug auf welche irgend ein sich selbst überlassener Punkt in seiner Inertialbahn *gleichförmig* bewegt ist.

Theorem II: Rücksichtlich einer Inertialzeitscala ist auch *jeder andere* sich selbst überlassene Punkt in einer Inertialbahn gleichförmig bewegt" (Lange 1886, S. 140f.).

In dieser Ausführung des einstigen ‚Axioms' durch Lange ist, wohlgemerkt, weder das Problem der Kräftefreiheit (Beziehung zum zweiten Bewegungsgesetz) noch die Starrheit von Maßstäben bei der Längenbestimmung angesprochen.

[1520] Lakatos 1982 II, S. 6.

[1521] ‚Prinzip' und ‚Hypothese' werden bei Neumann ganz allgemein zu *Synoymen*. So heißt es etwa: „Bis zu welcher Höhe und Vollendung unsere physikalischen Theorien im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende auch emporsteigen mögen, immer werden diese Theorien von Principien, von Hypothesen ausgehen müssen, die (an und für sich betrachtet) als *unbegreiflich*, als *willkührlich* zu bezeichnen sind" (Neumann 1870, S. 12).

[1522] Vgl. Teil 3.3, Zit. 1475.

barkeit eines päbstlichen [sic!] Ausspruchs" gehabt habe[1523]. Dabei kommt Mach mit Blick auf Neumanns *Principien* nicht um die Feststellung umhin, „in dieser wichtigen Sache die Priorität verloren zu haben"; andererseits habe ihn „dies haarscharfe Zusammentreffen mit einem so namhaften Mathematiker sehr gefreut und [...] für die Begriffsstützigkeit, welche mir die Physiker bei mündlicher Besprechung dieses Gegenstandes fast ohne alle Ausnahme entgegenbrachten, reichlich entschädigt"[1524].

Machs späterer philosophischer Einfluß und die breite Wirkung seiner Schriften haben dann maßgeblich dazu beigetragen, daß Neumanns Vorläuferschaft heute kaum mehr zur Kenntnis genommen wird: Mach galt und gilt — bei allen Brechungen, die diese Geschichte aufweist[1525] — als einer der geistigen Ahnherren der Einsteinschen Relativitätstheorie, und in der *rückwärtigen* Verlängerung lag es wohl nahe, ihn auch zum *ersten* ernsthaften Kritiker der ‚Newtonschen' Grundlagen der Mechanik zu machen.

Doch eine solche Art der Retrospektion ist, wie wir gesehen haben, nicht angebracht; sie birgt zudem die Gefahr, die Perspektive auf die *weitere* Entwicklung zu verstellen, um die es hier geht. Ohne Machs wichtige Beiträge zu der um 1870 einsetzenden ‚öffentlichen' Grundlagendiskussion der Mechanik, die bereits außerhalb des Rahmens dieser Untersuchung liegt, in Abrede stellen zu wollen, ist nämlich darauf hinzuweisen, daß die *hier* untersuchte ‚Auflösungslinie' der KMN auch in den folgenden Jahrzehnten präsent und einflußreich bleibt: Durch Neumanns *Principien* wurden die Untersuchungen seines Schülers Heinrich Streintz[1526], Ludwig Langes[1527], Wilhelm Schells[1528], Hugo Seeligers[1529] (der in der Frühgeschichte der Relativitätstheorie eine

[1523] Mach 1872, S. 47 (Anm. 1). Mach weist darauf hin, daß er seine Kritik bereits seit mehreren Jahren in öffentlichen Vorlesungen vertreten, aber nicht publiziert habe.

[1524] Ebd., S. 47 (Anm. 1).

[1525] Vgl. hierzu detailliert Wolters 1987.

[1526] Vgl. Streintz 1883, insbes. S. VI, 3-8 und 81-90.

[1527] S. Lange 1885a, 1885b, 1885c, 1886 und 1902.

[1528] S. Schell 1870; dieses Buch bezieht sich auch auf Jacobis Mechanik.

[1529] Vgl. Seeliger 1906; zu dessen Beziehung zu Neumann s. auch Liebmann 1927, S. 176. Seeliger schreibt rückblickend: „Die Geschichte der Versuche sich mit den Newtonschen Fiktionen in der einen oder anderen Weise abzufinden, ist äußerst interessant [...]. Danach hat es seit Newton bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts zwar nicht an Versuchen zur Klarlegung gefehlt, aber es waren doch nur wenige Mathematiker und Physiker, die sich in dieser Richtung betätigt haben. Allgemeineres Interesse haben die sich hier darbietenden Fragen nicht gefunden und eine wirkliche Aufklärung ist tatsächlich nach keiner Richtung hin erfolgt. Eine Wendung wurde erst duch eine kleine Schrift von Carl Neumann hervorgerufen, die auf die Notwendigkeit einer strengeren Fssung der mechanischen Grundsätze aufmerksam machte" (Seeliger 1906, S. 87). Gemeint sind Neumanns *Principien*, bezüglich historischer Untersuchungen verweist Seeliger auf Streintz 1883 und Lange 1886.

gewisse Rolle spielt[1530]) und anderer zum Trägheitsprinzip und zur Unterscheidung absoluter und relativer Bewegung angeregt. Man kann diese Linie einem „Ideenstrang" zurechnen, der „von großer heuristischer Bedeutung bei Einsteins Entwicklung [... war]"[1531]. Diese Entwicklung kann und muß hier indes nicht weiter verfolgt werden.

Neumann kann in zweifacher Hinsicht als Vorläufer Machs gelten: Einmal bezüglich seiner Analyse des Trägheitsprinzips, die diesem den Status eines sicheren und evidenten Axioms — eines ‚päpstlichen Ausspruchs', wie Mach es nannte — nahm; zum anderen und allgemeiner, indem er vor und unabhängig von Mach die grundsätzliche Fehlbarkeit und Revidierbarkeit der Mechanik sah und ins öffentliche Bewußtsein hob. Ich habe in der Analyse seiner Wissenschaftstheorie der mathematischen Physik besonders Neumanns akzentuierten *Prinzipienfallibilismus* herausgestellt, und bezüglich dieses wissenschaftstheoretisch reflektierten Prinzipienfallibilismus kann er durchaus *auch* als ein Vorläufer Poppers angesehen werden.[1532]

[1530] Vgl. hierzu Hentschel 1990, S. 14 und 160.

[1531] Ebd., S. 5; Hentschel geht es dabei um Entwicklungen hin zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

[1532] Vgl. Teil 3.2 und 3.3. Popper wiederum verweist auf „Berkeley as Precursor of Mach„ (Popper 1953 bzw. 1994/97 I, Kap. VI). Berkeley aber war, wie Popper selbst erkennen läßt, ein ‚halbierter' Mach, d.h. er stand mit einem Bein auf dem Boden des klassischen, mit einem Bein auf dem Boden des modernen Wissenschaftsbegriffs (vgl. Popper 1994/97 I, S. 255).

VIII Schluß: Die Evolution vor Einstein

Norwood R. Hanson bezeichnete das Trägheitsprinzip als „A Philosopher's Door into Natural Philosophy"[1533]. Mit der Diskussion dieses Prinzips bei Newton selbst wurde die Prinzipienanalyse, soweit sie im Rahmen dieser Untersuchung *detailliert* zu leisten war, aufgenommen (Kap. III.3), mit der Diskussion ‚dieses' Prinzips bei Neumann wurde sie abgeschlossen (Kap. VII.4). Aber ‚Eingangstür' und ‚Ausgangstür' sind, wissenschaftstheoretisch betrachtet, *nicht* identisch. Ein Prinzip, das über fast zwei Jahrhunderte als *gesichertes* mathematisches Naturgesetz galt, wird fraglich: Es wird von einem *Axiom* zu einer *Hypothese* bzw. zu einer *Konvention*.

Die ‚Tür' hat Stellvertreterfunktion, sie repräsentiert das ganze ‚Haus': Ich habe zu zeigen versucht, daß die Entwicklung der rationalen Mechanik von Newton zu Neumann durch einen grundlegenden *wissenschaftstheoretischen* Wandel gekennzeichnet ist, der sich als Ersetzung eines *klassischen* durch einen *modernen* Wissenschaftsbegriff beschreiben läßt (Kap. II). *Systematisch* war dazu unter anderem eine *empiristische*, ‚Baconsche' Erweiterung der Bestimmung des klassischen Wissenschaftsbegriffs vorzunehmen, wie ihn Alwin Diemer — vor allem in Bezug auf die rationalistische Tradition — eingeführt hat (Kap. II.1). Für eine formale, deduktiv organisierte Theorie wie die Mechanik ist es sekundär, ob ihre ersten Sätze durch Intuition hier oder sichere Beobachtung und unfehlbare Induktion dort gewonnen werden, wenn eine hinreichend entwickelte Mathematik ihren ‚AFE-Charakter' stützt: Die *Mathematik* ‚macht' *auch* die Theorie des älteren Empirismus *klassisch* im hier spezifizierten Sinn. In Anlehnung an Lakatos habe ich dabei das Wissenschaftsideal der KMN als *mechanischen Euklidianismus* gekennzeichnet, weil es dem Vorbild der Euklidischen Geometrie folgt (Kap. II.2). Aus dessen wissenschaftstheoretischer Analyse ergab sich die Zielsetzung der Untersuchung: Analyse der Auflösung der KMN ‚von oben', d.h. von seiten der mechanischen Axiome her (Kap. II.3).

Aus dem in Kap. I abgesteckten systematischen Rahmen *und* dem historischen Material resultiert ein Bild *Newtons* (Kap. III), das vermutlich Widerspruch herausfordern wird: Newton gilt ja in der Geschichte der Wissenschaften und Wissenschaftstheorie bis heute in aller Regel als ‚*modern*-empiristischer' Neuerer, vielfach sogar als *der* eigentliche Begründer moderner Wissenschaft überhaupt. Aber in axiomatischer Hin-

[1533] Vgl. den Titel von Hanson 1965a.

sicht, die mir *entscheidend* für ein wissenschaftstheoretisches Verständnis der KMN zu sein scheint, kommt ihm diese Rolle *nicht* zu. Insbesondere steht nach meiner Rekonstruktion Newtons empiristische Methodologie, die immer wieder als *Credo* eines hypothetisch-deduktiven Wissenschaftsverständnisses ausgegeben wurde und wird, im Dienste eines durchaus *klassischen* Prinzipiencertismus (Kap. III.4).

Der Versuch, das *Zeitalter der* Aufklärung — ein ganzes Jahrhundert intensivster Bemühungen, die Grundlagen der Mechanik von ganz unterschiedlichen naturphilosophischen Voraussetzungen her zu klären — in strukturierter und überschaubarer Form darzustellen (Kap. IV), fügt sich ebenfalls nicht in das gängige Geschichtsbild ein. Es ist eben *nicht* der kritische und zuweilen skeptische Geist der Aufklärung, der hier in der Mathematischen Naturphilosophie den Ton angibt, sondern generell ein eher *unkritisches* und *dogmatisches* Wissenschaftsverständnis: Auf die mathematischen Wissenschaften im allgemeinen und die rationale Mechanik im besonderen werden Gewißheitsansprüche und Fortschrittserwartungen projiziert, die traditionell an die Metaphysik und Theologie gerichtet wurden, von dieser Seite aber nicht mehr erfüllbar erscheinen – die Wissenschaftsgläubigkeit der Aufklärung ist eben *auch* ein ‚säkulares Surrogat'. Ich habe versucht zu zeigen, daß und warum man hier im Rahmen der KMN von der eigentlichen ‚Hochzeit' eines *mechanischen Euklidianismus* sprechen kann, und auch, warum die Rede von einer (nur) ‚Newtonschen' Mechanik der theoretischen Entwicklung in keiner Weise Rechnung trägt. Die Integration *verschiedener* naturphilosophischer Programme durch eine deduktive Praxis der rationalen Mechanik führt zu einer enormen *Theoretisierung* und *Formalisierung* empirischen Wissens. Sie nährt, zusammen mit niemals zuvor gekannten empirischen Erfolgen, die Scheinsicherheit, es bei der Mechanik mit einer Wissenschaft zu tun zu haben, die beides liefert: abschließende Erkenntnis der Realität wie *auch* mathematische Sicherheit und Evidenz dieser Erkenntnis. Besonders die Ausbildung analytischer Prinzipien und Methoden trägt zur ‚semantischen Entladung' mathematischer Begriffe in der Mechanik bei. Die allgegenwärtigen Bemühungen, die Prinzipien der Mechanik noch durch *Beweise* zu sichern, sind dabei Ausdruck des nach wie vor dominierenden *Rechtfertigungsdenkens*. Daß die Theoretisierung der Mechanik mit einer rasch voranschreitenden ‚Entmetaphysierung' einhergeht, zeigte ein Vergleich der beiden wichtigsten Vertreter der Disziplin, Euler und Lagrange, besonders deutlich (Kap. IV.3 und IV.5). Daß dabei gerade die Ausbildung der *analytischen* Mechanik *im Dienste* des Euklidianismus erfolgt, aber auch — in einem *ersten*, gleichsam ‚unbewußten' *Schritt (!)* — dessen innere Auflösung befördert (Kap. IV.4), scheint in der Geschichtsschreibung bis heute nicht wahrgenommen worden zu sein und hat zu manchen Fehlrekonstruktionen Anlaß gegeben (Kap. IV.6). Kants Versuch, den mechanischen Euklidianismus der KMN durch eine ‚synthetische' Grundlegung zu retten, erweist sich — bei aller philosophischer Originalität — als unzureichend und ist als gescheitert anzusehen (Kap. IV.7). Am Ende des 18. Jahrhunderts steht die KMN daher vor dem Dilemma, zwar einerseits über eine umfassende

‚analytische' Systembildung zu verfügen, der es aber an den verlangten *evidenten* Prinzipien fehlt, andererseits über eine philosophisch achtbare ‚synthetische' Grundlegung, die nicht ausreicht, den faktisch bereits vorliegenden Bestand mechanischen Wissens tatsächlich zu *begründen*.

Von hier aus stellen die beiden folgenden Kapitel ‚Gabelungen' dar, die sich aus diesem Dilemma der KMN an der Jahrhundertwende ergeben: Zunächst wird in Kap. V untersucht, wie sich ausgehend von der analytischen Tradition und einer traditionellen metaphysichen Begründungsform — der Teleologie — bei Kant und Fries eine Transformation des *Systembegriffs* vollzieht, der ein konstitutives Element der klassischen Wissenschaftsauffassung darstellt. Dabei zeigt sich nicht nur eine Auflösung des Zusammenhangs von System- und Gesetzesnotwendigkeit (Kap. V.3), sondern auch eine Trennung von System- und Theoriebegriff sowie eine ‚Heurisierung' der Systemidee bei Fries, die durchaus *modern* zu nennen ist, ohne daß sie (bisher) von der Wissenschaftstheorie hinlänglich beachtet und für die Analyse aktueller Probleme fruchtbar gemacht worden wäre (Kap. V.4).

Sowohl Kap. VI als auch Kap VII untersuchen die Auflösung des axiomatischen Denkens der KMN ‚von oben'. Jacobis Anschauungen zu den Grundlagen der Mechanik, die von der bisherigen Geschichtsschreibung völlig ignoriert wurden, zeigen deutlich, daß diese Auflösung durch eine *Ausgrenzung* der Mechanik aus dem Bereich ‚eigentlicher' Mathematik unter der sich in Deutschland neu bildenden Konzeption einer *reinen Mathematik* herbeigeführt wird (Kap. VI.1). Jacobi markiert deshalb einen Wendepunkt, weil er scharf zwischen mathematischem und empirischem Wahrheitsanspruch unterscheidet und so zu einer grundsätzlichen Kritik am vorherrschenden axiomatischen Denken der KMN gelangt (Kap. VI.2). Hierin sehe ich einen entscheidenden *weiteren Schritt (2)* auf dem Weg von einer *klassischen* zu einer *modernen* Mathematischen Naturphilosophie. Seine konventionale Sicht mechanischer Prinzipien (Kap. VI.3) ist ebenso *modern* zu nennen wie die Offenlegung der Scheinevidenzen und -sicherheiten des schon vom ‚späten' Lagrange praktizierten, im frühen 19. Jahrhundert weit verbreiteten ‚Gummi-Euklidianismus' (Kap. VI.4). Die Mechanik verliert hier ersichtlich die primär ‚mathematisch induzierte' Sicherheit und Evidenz ihrer Prinzipien.

Im letzten Kapitel stelle ich Riemann und Neumann in die Tradition Jacobis (Kap. VII.2 und VII.3) — zum einen, weil beide unmittelbar von dessen *Analytischer Mechanik* beeinflußt wurden, zum anderen, weil beide vom Standpunkt einer gewandelten *Mathematikauffassung*, wie er sich bei Jacobi besonders deutlich manifestiert, die Mechanik (und mathematische Physik generell) als Wissenschaft begreifen, die von seiten der Mathematik *hypothetische* Gesetzes- und Theoretisierungsvorschläge empfängt, über die *nur* die Erfahrung entscheiden kann. Während Jacobis Kritik aus der analytischen Tradition hervorgeht und sich vorwiegend auch auf diese Tradition (verkörpert durch Lagrange) bezieht, wird hier in einem *letzten Schritt (3)* hin zu einer modernen

Mathematischen Naturphilosophie die Hypothesierung auch der synthetischen ‚Newtonschen' Prinzipien ausgeweitet; sie resultiert in der Suche nach ‚*Neuen* mathematischen Principien der Naturphilosophie' (Riemann) bzw. in der weiteren Konditionalisierung und Konventionalisierung der ‚Newtonschen' Prinzipien (Neumann). Bei beiden Mathematikern ist ein *Prinzipienfallibilismus* anzutreffen, der eine *moderne* Mathematische Naturphilosophie (im Unterschied zu *klassischer*) zuallererst kennzeichnet.

Um die so zusammengefaßte Rekonstruktion noch einmal ‚zuzuspitzen': Unter der Prämisse des herrschenden mechanischen Euklidianismus wird eine deduktive Organisation des durch *verschiedene* naturphilosophische Programme hervorgebrachten mechanischen Wissens *erzwungen*, wobei die Einheit der Theorie erkauft wird durch *Prinzipienformalisierung (1)*. Die Ausbildung reiner Mathematik führt dann zu einer Ausgrenzung der formal gewordenen Mechanik aus dem ‚Reich mathematischer Wahrheit' und insbesondere zu einer Kritik des axiomatischen Denkens der KMN *(2)*. Die nicht mehr *mathematisch* wahren, sondern nurmehr *empirisch* bewährbaren Grundlagen der ‚Newtonschen' Mathematischen Naturphilosophie erfahren eine (weitere) Hypothesierung und Konventionalisierung und unterliegen einem konsequenten Prinzipienfallibilismus *(3)*.

Ein Teil dieses Prozesses ist auf *innere* Entwicklungsprobleme der rationalen Mechanik unter den Prämissen eines euklidianistischen Wissenschaftsideals und eines enormen Wissenswachstums zurückzuführen; ein anderer, entscheidenderer Teil ist dies jedoch *nicht*: Die Ausbildung ‚reiner' Mathematik ist nicht *mathematikintern* (und natürlich in keiner Weise *mechanikintern*) zu begreifen, sondern verdankt sich recht unterschiedlichen philosophischen, bildungstheoretischen und disziplinären Einflüssen (Kap. VI.1). Insofern dieses neue Mathematikverständnis eine *zentrale* Rolle in dem hier untersuchten Wissenschaftswandel spielt, kann also von einer ‚internen' Rekonstruktion nicht die Rede sein. Daß die wissenschaftstheoriegeschichtliche Entwicklung der Mechanik *nie* unter der Perspektive eines Wandels der Mathematikauffassung analysiert wurde, ist auf ein ‚modernistisches' Verständnis von Mechanik zurückzuführen: Sie gilt als *physikalische* Disziplin, die sich der Mathematik nur als eines formalen Ausdrucksmittels bedient.

Aber *in ihrer Geschichte ist* die Mechanik eben vor allem eine *mathematische Disziplin mit empirischem Anspruch*, und erst im 19. Jahrhunderts setzt eine — der Geometrieentwicklung vergleichbare — Spaltung in einen *formalmathematischen Kalkül* und eine *physikalische Mechanik* ein[1534]. Hertz' *Bildtheorie*[1535], auf die sich später ja

[1534] Eine Weiterführung dieser Untersuchung würde zeigen, daß sich diese Spaltung im späteren 19. Jahrhundert in zahlreichen Darstellungen der Mechanik manifestiert; ein interessantes Beispiel in dieser Hinsicht liefert Wilhelm Schells *Theorie der Bewegung und der Kräfte* (Schell 1870).

[1535] Vgl. Hertz 1894, insbes. S. 1-49; hierzu auch Breunig 1988 und Reden 1988.

auch Wittgenstein bezieht[1536], wäre ohne eine solche vorgängige Entwicklung in Geometrie *und* Mechanik ebensowenig möglich wie der Theoriebegriff des späteren logischen Empirismus[1537] oder auch Einsteins Bestimmung des Verhältnisses von Mathematik und Erfahrung[1538].

Wenn die hier vorgeschlagene wissenschaftstheoriegeschichtliche Rekonstruktion der Mathematischen Naturphilosophie in ihren Hauptzügen zutrifft, sind bisherige Rekonstruktionen in wichtigen Teilen revisions- bzw. ergänzungsbedürftig. Ich weise hier besonders darauf hin, daß der wissenschaftstheoretische Wandel, der hier konstatiert wurde, der ‚Krise des Mechanismus', die in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts v.a. aufgrund der Entwicklungen in der Thermodynamik und Elektrodynamik zu beobachten ist, *vorausgeht* und von ihr in weiten Teilen *unabhängig* verläuft[1539].

Abschließend sei auf einige allgemeinere Implikationen der vorgenommenen Rekonstruktion hingewiesen:

Wissenschaftstheoriegeschichtlich steht die vorliegende Untersuchung in krassem Widerspruch zu der geläufigen Auffassung, die hypothetisch-deduktive Methode sei ‚der Kern neuzeitlicher Wissenschaft'[1540]: Die Mechanik, und damit die zweifellos wissenschaftstheoretisch einflußreichste unter den empirischen Wissenschaften, deckt eine solche Behauptung nicht ab. Sie weist vielmehr darauf hin, daß sich erst *innerhalb* der Neuzeit eine Wissenschaftsauffassung durchsetzt, die hier als *modern* bezeichnet wird und die ein konsequent hypothetisch-deduktives Denken impliziert. Diese Untersuchung unterstützt, genauer gesagt, die von Alwin Diemer und Gert König vertretene These, daß es im wesentlichen erst *das 19. Jahrhundert* ist, in dem ein modern zu nennender Wissenschaftsbegriff sich etablieren konnte[1541].

In *historiographischer* Absicht ist herauszustellen, warum in dieser Untersuchung durchweg die ‚mathematische Seite' des Gegenstandes betont wurde: Dies geschah einerseits, um die zu Beginn *systematisch* begründete Entscheidung, die Auflösung des axiomatischen Denkens ‚von oben' zu analysieren, einlösen zu können. Andererseits diente die Konzentration auf die mathematische Seite der Entwicklung der Beseitigung eines blinden Flecks der Geschichtsschreibung: Die empirische Seite ist ja bevorzugter Gegenstand der Physikgeschichte, während nur wenige Mathematikhistoriker sehen, daß die Mechanik *auch* ihr Untersuchungsgegenstand ist bzw. sein sollte; hinzu tritt, daß Wissenschaftsgeschichte allgemein sich in der Regel nur wenig für wissenschafts-

[1536] S. Wittgenstein 1969, S. 104-111; vgl. hierzu näher Barker 1980, Wallner 1982, Majer 1985 und Wilson 1989.

[1537] Vgl. etwa die ‚Carnapsche Spaltung' (Kap. I, Teil 2.4, Anm. 151); für einen Überblick zum Theoriebegriff des logischen Empirismus und Literatur s. König/Pulte 1998.

[1538] Vgl. Einstein 1974, S. 119f.

[1539] Vgl. hierzu auch Kap. II, Teil 3.3, Anm. 240.

[1540] Vgl. Kap. II, Teil 2.3, Zit. 117.

[1541] Vgl. Diemer/König 1991 sowie die Ausführungen in Kap. II, Teil 1.

theoretischen Wandel interessiert. Auf der anderen Seite unterzieht sich *Philosophische Wissenschaftshistorie*[1542] und Wissenschaftstheoriegeschichte im engeren Sinne selten der Mühe, komplexe formale Gebilde, wie etwa die analytische Mechanik, auf relevante *metatheoretische* Veränderungen hin zu untersuchen.

Ein weiterer *historiographischer* Gesichtspunkt tritt erst mit dem *Ergebnis* dieser Untersuchung deutlich hervor: Die analysierte Grundlagenentwicklung der rationalen Mechanik zeigt einige Parallelen zur Entwicklung der *Geometrie*, auf die verschiedentlich hingewiesen wurde, wobei die beiden letzten Kapitel deutlich gemacht haben, daß erstere in keinem nachweisbaren Zusammenhang zu letzterer steht. Im Falle Riemanns hat offenbar die Mathematische Naturphilosophie Einfluß auf die Geometrie genommen, nicht umgekehrt. Zudem läßt sich von Newton bis Helmholtz vielfach belegen, daß ein ‚Begründungsprimat' der Geometrie für die Mechanik keineswegs als selbstverständlich angesehen werden kann. Daß die Grundlagenentwicklung der Geometrie im Zentrum des wissenschaftstheoriegeschichtlichen Interesses steht, sofern dieses sich auf das 19. Jahrhundert richtet, wurde und wird aber gerade mit einem solchen ‚Primat' begründet — verbunden mit dem historischen Argument, daß die Geometrieentwicklung auf andere mathematische Disziplinen ‚ausstrahlte'. Bezogen auf den *Untersuchungszeitraum* erscheinen jedoch *beide* Gründe für einen solchen historiographischen ‚Geozentrismus' fraglich, und diese Untersuchung mag dazu anregen, *auch* dem wissenschaftstheoretischen Wandel innerhalb der *mathematischen Physik* generell mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Die Entstehung des Konventionalismus etwa kann eine ‚geozentrische' Geschichtsschreibung nicht allein erklären.[1543]

Zuletzt sei an den größeren historischen und wissenschaftstheoretischen Rahmen erinnert, in den diese Untersuchung von vornherein gestellt wurde und von dem aus sie auch nur verstanden werden kann: Die Hypothesierung und Konventionalisierung einstiger mechanischer ‚Axiome' sowie die Relativierung diesbezüglicher Geltungsansprüche wurde nicht *per se* als ‚Fortschrittsprozeß' hin zu einer modernen Wissenschaftsauffassung rekonstruiert, sondern als ein *Entdogmatisierungsprozeß*, der weitere wissenschaftliche Entwicklung ermöglicht: An den ‚Newtonschen' Bewegungsgesetzen hängt die Raum-Zeit-Theorie der klassischen Physik, und solange sie als sakrosankt galten, konnte es keine Entwicklung über deren Rahmen hinaus geben. Dem *Grundlagenstreit* — wie er an der Wende zum 20. Jahrhundert in der Physik festzustellen ist — geht die *Grundlagenkrise* voran[1544], eine *Grundlagenkrise* aber — so möchte ich Christian Thiel ergänzen — kann erst einsetzen, wenn ein Bewußtsein für die *Revidierbarkeit der Grundlagen* entstanden ist, wenn die ‚Versteinerung' und ‚Erstarrung' (C. Neumann) der Theorie erkannt ist und als Problem wahrgenommen wird.

[1542] Vgl. den Titel von Charpa 1995.
[1543] Vgl. hierzu auch Pulte 2000a.
[1544] Im Sinne von Christian Thiel; vgl. hierzu Thiel 1972, insbes. S. 6-10.

Eben dieser Punkt ist mit dem *Ende* des Untersuchungszeitraums dieser Schrift erreicht: Die Ausgrenzung der mechanischen Prinzipien aus dem ‚Reich mathematischer Wahrheit' macht den Prinzipienfallibilismus eines Riemann oder Neumann erst möglich. In diesem Sinne kann man auch von einer *wissenschaftstheoretischen* ‚Evolution vor Einstein' sprechen, die der wissenschaftlichen Revolution Einsteins vorangehen *mußte*. Und wenn die These zutrifft, daß Poppers Wissenschaftstheorie eine philosophische *Konsequenz* dieser Revolution darstellt[1545], steht *auch sie* in einem langen historischen Prozeß, in dem die Mechanik — Wissenschafts*ideal* aller einflußreichen Wissenschaftstheorien der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts — sich ihrerseits erst von ihrem ursprünglichen euklidischen Ideal emanzipieren mußte. Eduard von Hartmann kann 1902 schon mit einer gewissen Distanz diagnostizieren: „Die Hypotheseophobie ist eine solche Kinderkrankheit der Physik, wie der Glaube an absolute Gewissheit ihrer Lehren"[1546]. Die hier sich artikulierende Grundhaltung ist selbst Resultat einer Entwicklung, die hier für den Bereich der Mathematischen Naturphilosophie aufgeklärt werden sollte. Ernst Machs Worte erscheinen denn auch nicht nur geeignet, den *historischen* Charakter von *Wissenschaft* zum Ausdruck zu bringen, sondern auch, die *historische* Situiertheit jeder philosophischen Bemühung, Wissenschaft und menschliches Tun überhaupt zu begreifen, im Bewußtsein zu halten: „Lassen wir die leitende Hand der Geschichte nicht los. Die Geschichte hat alles gemacht, die Geschichte kann alles ändern."[1547]

[1545] So argumentiert vielfach Lakatos, z.B.: „[...] zu der entscheidenden [philosophischen] Problemverschiebung kam es erst, nachdem die Einsteinsche Theorie die Newtonsche faktisch überrundet hatte: Jetzt galt es, den Erfolg nicht der siegreichen, sondern der besiegten Newtonschen Theorie zu erklären, und auch ihre Niederlage. Popper sah das Problem als erster auf diese Art; und damit leitete er eine neue Epoche der Philosophie ein" (Lakatos 1982 I, S. 237).

[1546] Hartmann 1902, S. 226.

[1547] Mach 1872, S. 3.

Quellen

A. Verzeichnis der Archivalien und Handschriften

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Archiv:
Nachlaß C.G.J. Jacobi, Gr. III (Vorlesungsmitschriften):
- Ms. 5a: Vorlesungen über Variationsrechnung. Ausgearbeitet von J.G. Rosenhain (Königsberg, WS 1837/38).
- Ms. A 8a: Transformation und Integration der Grundgleichungen der Dynamik. Ausgearbeitet von J.G. Rosenhain (Königsberg, WS 1837/38).
- Ms. A 8b: Abschrift von Ms. 8a [von fremder Hand].
- Ms. B 22: Vorlesungen über analytische Mechanik. Ausgearbeitet von W. Scheibner (Berlin, WS 1847/48) [Abschrift, vermutlich angefertigt von F.K.A. Magener].
- Ms. B 40: Dynamik. Ausgearbeitet von C.W. Borchardt (Königsberg, WS 1842/43) [geführt als: „Vorlesung über Mechanik", o.D.].

Berlin, Humboldt-Universität (Bibliothek des Mathematischen Instituts):
- Sign. Ls Wj 44: F. Joachimsthal: Analytische Mechanik, nach den Vorlesungen vom WS 1848/49 von O. Hermes [Beigebunden: C.G.J. Jacobi, Analytische Mechanik, 1847/48. Ausarbeitung von F. Joachimsthal].

Bochum, Ruhr-Universität (Bibliothek des Mathematischen Instituts):
- Sign. 30966: C.G.J. Jacobi, Vorlesungen über analytische Mechanik. Ausgearbeitet von W. Scheibner (Berlin, WS 1847/48).

Cambridge, University Library (Manuscripts):
Newton Papers:
- Add Ms. 3970 f.479: Draft for the ‚Queries'

Cambridge, Trinity College (Manuscripts):
Whewell Papers:
- R.6.11: Notebook on Mechanics
- R.6.14: History of Mechanics
- Add. Mss. a.205[12-15]: Letters from W.R. Hamilton

Göttingen, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek (Handschriftenabteilung):
Nachlaß C. Neumann:

- Ms. 52: Auszüge von Carl Neumann über eine Vorlesung über Mechanik von Jacobi aus dem WS 1847/48 (in Berlin), wörtlich nach einer Ausarbeitung von Wilh. Scheibner, später Prof. in Leipzig.

Nachlaß B. Riemann:

- M. 19, M. 22, M. 45: Varia, Präparationen zu Vorlesungen; Vorlesungsmanuskripte.

Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität, UB (Archiv):

- Diss. Phil. Lip. 1840-1872: Personalakte Wilhelm Scheibner

B. Abkürzungsverzeichnis

AGWG: Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen.
AHES: Archive for History of Exact Science.
AIHS: Archives Internationales d'Histoire des Sciences.
AP: Annalen der Physik.
AS: Annals of Science.
BGWL: Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig; Mathematisch-Physische Classe.
BJHS: British Journal for the History of Science.
BJPS: British Journal for the Philosophy of Science.
BSPS: Boston Studies in the Philosophy of Science.
BWG: Berichte zur Wissenschaftsgeschichte.
CASP: (Novi) Commentarii academiae scientiarum imperalis petropolitanae.
DSB: Dictionary of Scientific Biography.
EDRS: Encyclopédie ou *Dictionnaire* Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers. Mis en ordre et publié par Denis Diderot et quant à la partie mathématique par Jean le Rond d'Alembert. 17 Bde., 4 Suppl.-Bde., 12 Tfl.-Bde., 2 Tab.-Bde., Paris 1751-1780.
EMWA: Encyklopädie der *mathematischen* Wissenschaften mit Einschluß ihrer Anwendung. Hg. im Auftrag der Akademien der Wissenschaften zu Göttingen, Leipzig, München und Wien. 23 Bde., Leipzig 1898-1935.
EPW: Mittelstraß, Jürgen, Hg.: Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. 4 Bde., Bde. 1,2: Mannheim [u.a.] 1980/*84* (Korr. Nachdruck Stuttgart [u.a.] 1995/96); Bde. 3,4: Stuttgart [u.a.] 1995/96.
GWP: Volpi, Franco, Hg.: Großes Werklexikon der Philosophie. Stuttgart 1999.
HASB: Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles-lettres de Berlin.
HM: Historia Mathematica.
HS: Historia Scientiarum.
HSPS: Historical Studies in the Physical Sciences.
HWP: Ritter, Joachim/Gründer, Karlfried/Gabriel, Gottfried Hgg.: Historisches Wörterbuch der Philosophie. 12 Bde. (A-V), Basel 1971-2004
JDMV: Jahresberichte der Deutschen Mathematikervereinigung.
JEP: Journal de l'École Polytechnique.
JHI: Journal of the History of Ideas.
JMPA: (Liouvilles) Journal de mathématiques pures et appliquées.
JRAM: (Crelles bzw. Borchardts) Journal für reine und angewandte Mathematik.

MASB: (Nouveaux) Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-lettres de Berlin.
MASP: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris.
NGWG: Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse.
NJALZ: Neue Jenaische Allgemeine Literatur-Zeitung.
NTM: Schriftenreihe für Geschichte der Naturwissenschaften, Technik und Medizin.
OKEW: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften.
PTRS: Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
RHSA: Revue d'Histoire des Sciences et de leurs Applications.
SHPS: Studies in History and Philosophy of Science.
SPAW: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie zu Berlin.
ZAWT: Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie (Journal for General Philosophy of Science).

C. Literaturverzeichnis

Das folgende Literaturverzeichnis enthält alle Titel, auf die in der vorliegenden Untersuchung explizit Bezug genommen wird, ferner aber auch historische Quellen, die der Weiterführung dieser Untersuchung bis zum Ende des 19. Jahrhunderts (vgl. Kap. I, Teil 3.3, Anm. 240) dienen.

Die *Titel* des Literaturverzeichnisses sind in der Regel in der Form: Autoren- bzw. Herausgebername (Jahr) aufgeführt. Bei Werkausgaben u.ä. ist das Erscheinungsjahr bzw. der Erscheinungszeitraum jedoch nachgestellt. Die vorangestellte Jahreszahl gibt in der Regel ebenfalls das (bzw. die) Publikationsjahr(e) an, bei Beiträgen jedoch, die in Akademieorganen (wie etwa *HASB* oder *MASP*) erschienen, bezeichnet diese Zahl grundsätzlich das Jahr, *für* das der entsprechende Band bestimmt war; das Veröffentlichungsjahr ist dann am Ende angefügt. Bei mehreren Veröffentlichungen eines Autors bzw. Herausgebers pro Jahr ist die Anordnung, soweit rekonstruierbar, eine chronologische. Briefausgaben sind gewöhnlich unter den Herausgebernamen aufgeführt (z.B. der Briefwechsel C.G.J. Jacobi - M.H. Jacobi unter Ahrens 1907b); nur vereinzelt (etwa dann, wenn eine Ausgabe von diversen Herausgebern besorg wurde) werden solche Ausgaben unter dem Namen des Hauptkorrespondenten geführt (etwa: Newton *Correspondance*). Ist einem Titel am Ende ein anderer Erscheinungsort (z.B. eine Werkausgabe) hinzugefügt, so wird er nach dem letztgenannten Erscheinungsort zitiert.

In den *Anmerkungen* wird auf die Titel durch Angabe des Autor- bzw. Herausgebernamens und der entsprechenden Jahreszahl oder (bei Werkausgaben u.ä.) mit Kurztitel verwiesen. Häufiger zitierte Werkausgaben werden mit Kürzeln (*AA*, *WW* etc.) aufgeführt; diese sind im Literaturverzeichnis den genauen bibliographischen Angaben in eckigen Klammern nachgestellt.

Adickes, Erich (1897): „Lose Blätter aus Kants Nachlaß", in: *Kant-Studien* 1, 232-263.

Adickes, Erich (1920): *Kants Opus postumum*. Berlin.

Adickes, Erich (1922): „Zur Lehre von der Wärme von Fr. Bacon bis Kant", in: *Kant-Studien* 27, 328-368.

Adickes, Erich (1924/25): *Kant als Naturforscher*. 2 Bde., Berlin.

Adler, Carl G. (1980): „Why is Mechanics Based on Acceleration?", in: *Philosophy of Science* 47, 146-152.

Adler, Friedrich (1918): *Ernst Machs Überwindung des mechanischen Materialismus*. Wien.

Agassi, Joseph (1969): „Sir John Herschel's Philosophy of Success", in: *HSPS* 1, 1-36.

Ahrens, Wilhelm (1906/07): „Ein Beitrag zur Biographie C.G.J. Jacobis", in: *Bibliotheca Mathematica* 7, 157-192.

Ahrens, Wilhelm (1907a): *C.G.J. Jacobi als Politiker. Ein Beitrag zu seiner Biographie*. Leipzig.

Ahrens, Wilhelm, Hg. (1907b): *Briefwechsel zwischen C.G.J. Jacobi und M.H. Jacobi*. Leipzig.

Ahrens, Wilhelm/Stäckel, Paul, Hgg. (1908): *Der Briefwechsel zwischen C.G.J. Jacobi und P.H. von Fuss über die Herausgabe der Werke Eulers*. Leipzig.

Albert, Hans, Hg. (1964): *Theorie und Realität. Ausgewählte Aufsätze zur Wissenschaftslehre der Sozialwissenschaften*. Tübingen.
Albert, Hans (1987): *Kritik der reinen Erkenntnislehre: Das Erkenntnisproblem in realistischer Perspektive*. Tübingen.
Albert, Hans (1991): *Traktat über kritische Vernunft*. 5. Aufl., Tübingen ([1]1968).
Amir Arjomand, Kamran (1990): *Entdeckung und Rechtfertigung in der Wissenschaftsphilosophie des 19. Jahrhunderts unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung in Deutschland von ca. 1800-1875*. Frankfurt a.M.
Ampère, André M. (1806): „Démonstration générale du principe des virtesse virtuelles", in: *JEP* (1)6, cah. 13, 247-269.
Ampère, André M. (1824): *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience*. Paris.
Annalen der Physik (1874): *Jubelband*. Leipzig.
Apelt, Ernst Friedrich (1849): *Johann Keppler's astronomische Weltansicht*. Leipzig.
Apelt, Ernst Friedrich (1854): *Die Theorie der Induktion*. Leipzig.
Appell, Paul (1893/96): *Traité de mécanique rationelle*. 2 vols., Paris.
Archibald, Thomas (1986): „Carl Neumann versus Rudolf Clausius on the Propagation of Electrodynamic Potentials", in: *American Journal of Physics* 54, 786-790.
Aristoteles: *Werke in deutscher Übersetzung*. Hg. von E. Grumach/H. Flashar. [Bisher] 14 Bde., Berlin 1956ff.
Aristoteles: *Philosophische Schriften in sechs Bänden*. Übers. von E. Rolfes/H. Seidl/H.G. Zekl. 6 Bde., Hamburg 1995.
Aristoteles (1881): *Mechanische Probleme* (*Quaestiones Mechanicae*). Übers. von F.T. Poselber; mit einem Vorwort von M. Rühlmann. Hannover.
Aristoteles (1957): *Kleine Schriften zur Physik und Metaphysik*. Hg. von P. Gohlke (Die Lehrschriften, 15.). Paderborn.
Armstrong, David Malet (1983): *What Is a Law of Nature?* Cambridge [u.a.].
Aspray, William/Kitcher, Philip, eds. (1988): *History and Philosophy of Modern Mathematics* (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, 11.). Minneapolis.
Bacharach, Max (1883): *Abriss der Geschichte der Potentialtheorie*. Göttingen.
Bachelard, Suzanne (1958): *La conscience de rationalité. Étude phénoménologique sur la physique mathématique*. Paris.
Bacon, Francis (1830): *Neues Organon der Wissenschaft*. Übers. und hg. von A.T. Brück. Leipzig, repr. Darmstadt 1981 (*Novum organum renovatum*. London 1620).
Bacon, Francis (1990): *Neues Organon. Lateinisch-deutsch*. Übers. von R. Hoffmann; hg. von W. Krohn. 2 Bde., Hamburg 1990 (*Novum organum renovatum*. London 1620).
Bailhache, Patrice (1975): „Introduction et commentaire", in: Poinsot 1975, 1-199.
Baker, John T. (1930): *An Historical and Critical Examination of English Space and Time Theories*. New York.
Balzer, Wolfgang (1978): „Die epistemologische Rolle des zweiten Newtonschen Axioms", in: *Philosophia Naturalis* 17(1), 131-149.
Barbour, Julian B. (1989): *Absolute or Relative Motion? A Study from a Machian Point of View of the Discovery and the Structure of Dynamical Theories*. Cambridge.
Barbour, Julian B./Pfister, Herbert, eds. (1995): *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity* (Einstein Studies, 6.). Boston [u.a.].

Barker, Peter (1980): „Hertz and Wittgenstein", in: *SHPS* 11, 243-256.
Baron, W., Hg. (1967): *Beiträge zur Methodik der Wisenschaftsgeschichte* (Beiträge zur Geschichte der Wissenschaft und Technik, 9.). Wiesbaden 1967.
Barros, Filho W. (1994): *La Mécanique de Lagrange. Principes et méthodes.* Paris.
Bauch, Bruno (1912): „Immanuel Kant und sein Verhältnis zur Naturwissenschaft", in: *Kant-Studien* 17, 9-27.
Bauch, Bruno (1924): *Das Naturgesetz. Ein Beitrag zur Philosophie der exakten Wissenschaften.* Leipzig [u.a.].
Baumann, Julius (1868/69): *Die Lehren von Zeit, Raum und Mathematik.* 2 Bde., Berlin.
Baumgartner, Hans M. (1974): Art. „Wissenschaft", in: Krings/Baumgartner/Wild 1973/74 VI, 1740-1764.
Bechler, Zev, ed. (1982): *Contemporary Newtonian Research.* Dordrecht [u.a.].
Becker, M. (1964): *The Principles and Applications of Variational Methods.* Cambridge.
Becker, Oskar (1959): *Größe und Grenze der mathematischen Denkweise.* Freiburg i.Br. [u.a.].
Becker, Oskar (1964): *Grundlagen der Mathematik in geschichtlicher Entwicklung.* 2. Aufl., Freiburg [u.a.] (repr. Frankfurt a.M. 1975).
Bellone, Enrico (1980): *A World on Paper: Studies on the Second Scientific Revolution.* Cambridge, Mass. [u.a.].
Benvenuto, Edoardo (1991): *An Introduction to the History of Structural Mechanics.* 2 vols., Berlin [u.a.].
Berka, Karel (1963): „Aristoteles und die axiomatische Methode", in: *Das Altertum* 9, 200-205.
Berka, Karel (1983): „Zur Aristotelischen Lehre vom deduktiven Aufbau der Wissenschaft", in: Irmscher/Müller 1983, 76-81.
Berkson, William (1974): *Fields of Force: The Development of a World View from Faraday to Einstein.* New York.
Bernays, Paul (1976): *Abhandlungen zur Philosophie der Mathematik.* Darmstadt.
Bernoulli, Daniel: *Werke.* Hg. von D. Speiser. [Bisher] 2 Bde., (1 und 3), Basel [u.a.] 1982/1987.
Bernoulli, Daniel (1726): „Exam n principiorum mechanicae, et demonstrationes geometricae de compositione et evolutione virium", in: *CASP* 1728, 126-142 [*Werke* 3, 119-135].
Bernoulli, Daniel (1745): „Nouveau Probleme de Mécanique", in: *MASB* 1746, 54-70 [*Werke* 3, 179-196].
Bernoulli, Daniel (1748): „Remarques sur le Principe de la Conservation des Forces vives pris dans un sens général", in: *MASB* 1750 4, 356-364 [*Werke* 3, 197-206].
Bertauld, Pierre-Auguste (1899): *Positivisme et philosophie scientifique.* Paris.
Bessel, Friedrich W. (1848): *Populäre Vorlesungen über wissenschaftliche Gegenstände.* Hamburg.
Bessel, Friedrich W. (1875/76): *Gesammelte Abhandlungen.* Hg. von R. Engelmann. 3 Bde., Leipzig.
Biermann, Kurt-R., Hg. (1977): *Briefwechsel zwischen Alexander von Humboldt und Carl Friedrich Gauß.* Berlin.
Biermann, Kurt-R. (1983): „C.F. Gauß als Mathematik- und Astronomiehistoriker", in: *HM* 10, 422-434.
Biermann, Kurt-R. (1988): *Die Mathematik und ihre Dozenten an der Berliner Universität, 1810-1920.* 2. Aufl., Berlin ([1]1973).
Bigelow, John/Pargetter, Robert (1990): *Science and Necessity.* Cambridge [u.a.].

Blackmore, John T. (1972): *Ernst Mach. His Work, Life and Influence.* Berkeley [u.a.].
Blackmore, John T./Hentschel, Klaus, Hgg. (1985): *Ernst Mach als Außenseiter. Machs Briefwechsel über Philosophie und Relativitätstheorie mit Persönlichkeiten seiner Zeit.* Wien.
Blackmore, John T. (1987): „Ludwig Boltzmann as a Major Source of 20th Century Philosophy", in: P. Weingartner/G. Schurz, Hgg.: *Logik, Wissenschaftstheorie und Erkenntnistheorie: Akten des 11. Internationalen Wittgenstein Symposiums.* Wien.
Blackmore, John T., ed. (1992): *Ernst Mach - A Deeper Look.* Dordrecht [u.a.].
Blackwell, R.J. (1966): „Descartes' Laws of Motion", in: *Isis* 57, 220-234.
Blake, Ralph M. (1966): „Isaac Newton and the Hypothetico-Deductive Method", in: Madden 1966, 119-143.
Blay, Michel (1992): *La Naissance de la Mécanique analytique. La science du mouvement au tournant des XVIIe et XVIIIe siècles.* Paris.
Bloch, Léon (1908): *La Philosophie de Newton.* Paris.
Blühdorn, J./Ritter, J., Hgg. (1971): *Postivismus im 19. Jahrhundert. Beiträge zu seiner geschichtlichen und systematischen Bedeutung.* Frankfurt a.M.
Blumtritt, Oskar (1986): *Zur Genese der elektromagnetischen Feldtheorie: Eine wissenschaftshistorische Studie zur Entstehung der Maxwellschen Gleichungen.* Hildesheim.
Bochner, Salomon (1966): *The Role of Mathematics in the Rise of Science.* Princeton.
Boeckh, August (1853): „Über die Wissenschaft, insbesondere ihr Verhältnis zum Practischen und Positiven. Festrede gehalten auf der Universität zu Berlin am 15. Oktober 1853", in: Ders.: *Gesammelte kleine Schriften,* Bd. 2. Leipzig, 81-98.
Böhme, Gernot (1977): „Die kognitive Ausdifferenzierung der Naturwissenschaft - Newtons mathematische Naturphilosophie", in: G. Böhme/W. Krohn, Hgg.: *Experimentelle Philosophie.* Frankfurt a.M., 237-263.
Böhme, Gernot (1980): *Alternativen der Wissenschaft.* Frankfurt a.M.
Böhme, Gernot (1986): *Philosophieren mit Kant. Zur Rekonstruktion der Kantischen Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie.* Frankfurt a.M.
Böhme, Gernot, Hg. (1989): *Klassiker der Naturphilosophie, von den Vorsokratikern bis zur Kopenhagener Schule.* München.
Böhme, Gernot (1993): *Am Ende des Baconschen Zeitalters. Studien zur Wissenschaftsentwicklung.* Frankfurt a.M.
Boi, Luciano/Flament, Dominique/Salanskis, Jean-Michel, eds. (1992): *1830-1930: A Century of Geometry: Epistemology, History and Mathematics.* Berlin.
Boi, Luciano (1994): „Die Beziehungen zwischen Raum, Kontinuum und Materie im Denken Riemanns; die Äthervorstellung und die Einheit der Physik. Das Entstehen einer neuen Naturphilosophie", in: *Philosophia Naturalis* 31, 171-216.
Boi, Luciano (1995): „Le Concept de Variété et la Nouvelle Géométrie de l'espace dans la Pensée de Bernhard Riemann", in: *AIHS* 45, 82-128.
Boltzmann, Ludwig: *Wissenschaftliche Abhandlungen.* Hg. von F. Hasenöhrl. 3 Bde., Leipzig 1909 (repr. New York 1968).
Boltzmann, Ludwig (1866): „Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie", in: *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Klasse IIa* 53, 155ff. [*WA* I, 9-33].

Boltzmann, Ludwig (1871a): „Zur Priorität der Auffindung der Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und dem Prinzip der kleinsten Wirkung", in: *AP* 143, 211-230.

Boltzmann, Ludwig (1871b): „Analytischer Beweis des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft", in: *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Klasse IIa* 63, 712ff.

Boltzmann, Ludwig (1896): „Ein Wort der Mathematik an die Energetik", in: *AP* 57, 39-71.

Boltzmann, Ludwig (1897/1904): *Vorlesungen über die Prinzipien der Mechanik*. 2 Bde., Leipzig (repr. Darmstadt 1974).

Boltzmann, Ludwig (1900): „Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik", in: *JDMV* 8, 71ff.

Boltzmann, Ludwig (1903): *Über die Prinzipien der Mechanik. Zwei akademische Antrittsreden*. Wien.

Boltzmann, Ludwig (1905): *Populäre Schriften*. Leipzig.

Bolzano, Bernhard (1837): *Wissenschaftslehre*. 4 Bde. Sulzbach (repr. Aalen 1970).

Bolzano, Bernhard (1842): *Versuch einer objectiven Begründung der Lehre von der Zusammensetzung der Kräfte*. Prag.

Bonsiepen, Wolgang (1990): „Hegels Theorie des qualitativen Quantitätsverhältnisses", in: König 1990, 100-129.

Bonsiepen, Wolfgang (1997): *Die Begründung einer Naturphilosophie bei Kant, Schelling, Fries und Hegel. Mathematische versus spekulative Naturphilosophie* (Philosophische Abhandlungen, 70.). Frankfurt a.M.

Booss, Bernhelm/Niss, Morgens, eds. (1979): *Mathematics and the Real World*. Basel.

Borchardt, Wilhelm, Hg. (1875): „Correspondance mathématique entre Legendre et Jacobi", in: *JRAM* 80, 205-279.

Bork, Alfred M. (1964): „The Fourth Dimension in Nineteenth Century Physics", in: *Isis* 55, 326-338.

Bos, Henk J.M. (1980): „Mathematics and Rational Mechanics", in: Rousseau/Porter 1980, 327-355.

Bottazini, Umberto (1994): „Geometry and ‚Metaphysics of Space'", in: S. Poggi/M. Bossi, eds.: *Romanticism in Science. Science in Europe, 1790-1840* (BSPS, 152). Dordrecht [u.a.], 15-27.

Bottazini, Umberto/Tazzioli, Rossana (1995): „*Naturphilosophie* and Its Role in Riemann's Mathematics", in: *Revue d'histoire des mathématiques* 1, 3-38.

Boutroux, Émile (1911): *Die Kontingenz der Naturgesetze*. Aus dem Franz. von J. Benrubi. Jena (*De la contingence des lois de la nature*. Paris 1874).

Boutroux, Pierre (1927): *Das Wissenschaftsideal der Mathematiker*. Leipzig (*L'idéal scientifique des mathématiciens dans l'antiquité et dans les temps modernes*. Paris 1920).

Braithwaite, Robert B. (1960): *Scientific Explanation. A Study of the Function of Theory, Probability and Law in Science*. New York [u.a.] ([1]1953).

Brandes, Heinrich W. (1817): *Lehrbuch der Gesetze des Gleichgewichts in der Bewegung fester und flüssiger Körper*. 2 Theile. Leipzig.

Breger, Herbert (1982): *Die Natur als arbeitende Maschine. Zur Entstehung des Energiebegriffs in der Physik 1840-1850*. Frankfurt a.M.

Breger, Herbert (1991): „Der mechanistische Denkstil in der Mathematik des 17. Jahrhunderts", in: Hecht 1991, 15-46.

Breger, Herbert (1999): „Über den von Samuel König veröffentlichten Brief zum Prinzip der kleinsten Wirkung", in: Hecht 1999, 383-381.
Breunig, Hans P. (1988): *Zur Hertzschen Mechanik: Ursprung ihrer Grundkonzepte und deren Bedeutung für die Entwicklung der Physik*. Frankfurt a.M. (Diss.).
Brewster, David (1831): *The Life of Sir Isaac Newton*. London.
Brittan, Gordon G. (1978): *Kant's Philosophy of Science*. Princeton.
Brunschvicg, Léon (1912): *Les étapes de la philosophie mathématique*. Paris.
Brush, Stephen G. (1977): *The Temperature of History: Phases of Science and Culture in the 19th Century*. New York.
Buchdahl, Gerd (1951): „Science and Logic: Some Thoughts on Newton's Second Law of Motion in Classical Mechanics", in: *BJPS* 2, 217-235.
Buchdahl, Gerd (1969): *Metaphysics and the Philosophy of Science*. Oxford.
Buchdahl, Gerd (1970): „Gravity and Intellegibility: Newton to Kant", in: R.E. Butts/J.W. Davis 1970, 74-102.
Buchdahl, Gerd (1986): „Kant's ‚Special Metaphysics' and the Metaphysical Foundations of Science", in: Butts 1986, 127-161.
Buchdahl, Gerd (1992): *Kant and the Dynamics of Reason. Essays on the Structure of Kant's Philosophy*. Oxford [u.a.].
Budde, Amil A. (1890/91): *Allgemeine Mechanik der Punkte und der starren Systeme. Ein Lehrbuch für Hochschulen*. 2 Bde., Berlin.
Bunge, Mario (1957): „Lagrangian Formulation and Mechanical Interpretation", in: *American Journal of Physics* 25, 211-218.
Bunge, Mario (1959): *Causality. The Place of the Causal Principle in Modern Science*. Cambridge (Mass.).
Burtt, Edwin A. (1932): *The Metaphysical Foundations of Modern Science*. London ([1]1924).
Butts, Robert E. (1965): „Necessary Truth in Whewell's Theory of Science", in: *American Philosophical Quarterly* 2, 1-21.
Butts, Robert E., ed. (1968): *William Whewell's Theory of Scientific Method*. Pittsburgh.
Butts, Robert E./Davis, John W., eds. (1970): *The Methodological Heritage of Newton*. Oxford.
Butts, Robert E., ed. (1986): *Kant's Philosophy of Physical Science: Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft 1786-1986*. Dordrecht [u.a.].
Butzer, Paul L. (1987): „Dirichlet and His Role in the Founding of Mathematical Physics", in: *AIHS* 37, 49-82.
Cahan, David, ed. (1993): *Hermann von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century Science*. Berkeley [u.a.].
Calinger, Ronald S. (1969): „The Newtonian-Wolffian Controversy", in: *JHI* 30, 319-330.
Calinger, Ronald S. (1979): „Kant and Newtonian Science: The Pre-Critical Period", in: *Isis* 70, 349-362.
Campbell, Norman R. (1957): *Foundations of Science. The Philosophy of Theory and Experiment*. New York.
Caneva, Kenneth L. (1975): *Conceptual and Generational Change in German Physics. The Case of Electricity, 1800-1846*. Princeton University (PhD).
Cannon, Walter F. (1961): „John Herschel and the Idea of Science", in: *JHI* 22, 215-239.
Cantor, Geoffrey.N./Hodge, M.J.S., eds. (1981): *Conceptions of Ether*. Cambridge.

Cantor, Moritz (1900-08): *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*. 4 Bde., Leipzig (repr. New York [u.a.] 1965).

Carnap, Rudolf (1961): *Der logische Aufbau der Welt - Scheinprobleme in der Philosophie* [Ausgabe in einem Band]. 2. Aufl., Hamburg ([1]1928).

Carnap, Rudolf (1969): *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Aus dem Engl. von W. Hoering. München; repr. Frankfurt a.M. [u.a.] 1986. (*Philosophical Foundations of Physics*. New York 1966).

Carnap, Rudolf (1973): *Grundlagen der Logik und Mathematik*. Übers. und hg. von W. Hoering. Darmstadt (*Foundations of Logic and Mathematics*. Chicago 1967; [1]1937).

Carnot, Lazare (1805): *Grundsätze der Mechanik vom Gleichgewicht und der Bewegung*. Deutsch hg. von Chr. Samuel Weiss. Leipzig (*Principes foudamentaux de l'équilibre et du mouvement*. Paris 1803).

Carrier, Martin (1986): „Wissenschaftsgeschichte, rationale Rekonstruktion und die Begründung von Methodologien", in: *ZAWT* 17, 201-228.

Carroll, John W. (1994): *Laws of Nature*. Cambridge [u.a.].

Cartwright, Nancy (1983): *How the Laws of Physics Lie*. Oxford [u.a.].

Cassirer, Ernst: *Das Erkenntnisproblem in Philosophie und Wissenschaft der modernen Zeit*. 4 Bde.; 3. Aufl. (Bde. 1, 2), Berlin 1922 bzw. 2. Aufl. (Bde. 3, 4) Berlin 1923/Stuttgart 1957; repr. Darmstadt 1994.

Cassirer, Ernst (1937): „Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik. Historische und systematische Studien zum Kausalproblem", in: *Göteborgs Högskolas Arsskrift* 42 [Cassirer 1994, 129-376].

Cassirer, Ernst (1969): *Philosophie und exakte Wissenschaft. Kleine Schriften*. Eing. und erl. von W. Krampf. Frankfurt a.M.

Cayley, Arthur (1857): „Report on Recent Progress in Theoretical Dynamics", in: *Reports of the British Association for the Advancement of Science*. London, 1-42.

Cayley, Arthur (1862): „Report on the Progress of the Solution of Certain Special Problems of Dynamics", in: *Reports of the British Association for the Advancement of Science*. London, 184-252.

Challis, James (1863): „On Newton's Foundation of All Philosophy", in: *Philosophical Magazine* (4)26, 280-292.

Chandler, P. (1975): „Clairaut's Critique of Newtonian Attraction: Some Insights into His Philosophy of Science", in: *Annals of Science* 32, 369-378.

Charlton, Donald G. (1959): *Positivist Thought in France during the Second Empire, 1852-1870*. Oxford.

Charpa, Ulrich (1987): „John F.W. Herschels Methodologie der Erfahrungswissenschaft", in: *Philosophia Naturalis* 24, 121-148

Charpa, Ulrich (1988a): „Methodologie der Verzeitlichung - Schleiden, Whewell und das entwicklungsgeschichtliche Projekt", in: *Philosophia Naturalis* 25, 75-109.

Charpa, Ulrich (1988b): „Wissenschaftlicher Fortschritt", in: *Philosophische Rundschau* 35, 117-131.

Charpa, Ulrich (1995): *Philosophische Wissenschaftshistorie. Grundsatzfragen/Verlaufsmodelle*. Braunschweig [u.a.].

Clagett, Marshall (1959): *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. Madison.

Classen, Johannes (1898): *Die Prinzipien der Mechanik bei Boltzmann und Hertz*. Hamburg.

Classen, Johannes (1908): *Vorlesungen über moderne Naturphilosophen.* Hamburg.
Clausius, Rudolf J.E. (1859): *Die Potentialfunktion und das Potential. Ein Beitrag zur mathematischen Physik.* Leipzig.
Clausius, Rudolf J.E. (1868): „Ueber die von Gauss angeregte neue Auffassung der elektrodynamischen Erscheinungen", in: *AP* 135, 606-621.
Clausius, Rudolf J.E. (1871): „Ueber die Zurückführung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf allgemeine mechanische Prinzipien (aus den Schriften der Niederrhein. Gesellsch. für Natur- und Heilkunde vom Hrn. Verf. übersandt)", in: *AP* 142, 433-461.
Clebsch, Alfred (1862): *Theorie der Elasticität fester Körper.* Leipzig.
Clifford, William K. (1878): *Elements of Dynamics.* 2 vols., London.
Clifford, William K. (1885): *The Common Sense of the Exact Sciences.* Ed K. Pearson. London.
Cohen, I. Bernard (1958): „Versions of Isaac Newton's First Published Paper", in: *AIHS* 11, 357-375.
Cohen, I. Bernard (1962): „The First English Version of Newton's ‚Hypothesis non fingo'", in: *Isis* 53, 379-388.
Cohen, I. Bernard (1966): *Franklin and Newton. An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof.* Cambridge (Mass.).
Cohen, I. Bernard (1967): „Dynamics: The Key to the ‚New Science' of the Seventeenth Century", in: *Acta historiae rerum naturalium necnon technicarum* 3, 79-114.
Cohen, I. Bernard (1971): *Introduction to Newton's Principia.* London.
Cohen, I. Bernard (1980): *The Newtonian Revolution.* Cambridge [u.a.].
Cohen, I. Bernard, ed. (1981): *The Conservation of Energy and the Principle of Least Action.* Main St. Salem (N.Y.).
Cohen, I. Bernard (1982): „The Principia, Universal Gravitation, and the ‚Newtonian Style', in Relation to the Newtonian Revolution in Science: Notes on the Occasion of the Anniversary of Newton's Death", in: Bechler 1982, 21-108.
Cohen, I. Bernard (1993): „The ‚Principia', the Newtonian Style, and the Newtonian Revolution in Science", in: Theerman/Seeff 1993, 61-104.
Cohen, I. Bernard (1994): *Revolutionen in der Naturwissenschaft.* Aus dem Engl. von W. Kutschmann. Frankfurt a.M. (*Revolution in Science.* Cambridge, Mass. [u.a.] 1985).
Cohen, Robert S./Seeger, Raymond J., eds. (1970): *Ernst Mach, Physicist and Philosopher* (BSPS, 6.). New York.
Colodny, Robert G., ed. (1965): *Beyond the Edge of Certainty. Essays in Contemporary Science and Philosophy.* Englewood Cliffs (N.Y.).
Comte, Auguste (1907): *Cours de philosophie positive. Tome Premier: Les Préliminaires généraux et la philosophie mathématique.* 5e Édition, identique à la première. Paris ([1]1830).
Comte, Auguste (1975): *Philosophie première. Cours de Philosophie Positive, Leçons 1 à 45.* Présentation et notes par M. Serret/F. Dagognet/A. Sinaceur. Paris ([1]1830).
Comte, Auguste (1979): *Rede über den Geist des Positivismus.* Übers., eingel. und hg. von I. Fetscher (*Discours sur l'Esprit Positif.* Paris 1844). 3. Aufl., Hamburg (Philosophische Bibliothek, 244.) ([1]1915).
Copernicus, Nicolaus (1990): *Das neue Weltbild. Drei Texte: Commentariolus, Brief gegen Werner, De revolutionibus I.* Übers. und hg. von H.G. Zekl. (Philosophische Bibliothek, 500.). Hamburg.

Coriolis, G. (1846): *Lehrbuch der Mechanik der festen Körper und die Berechnung des Effectes der Maschinen*. Deutsch hg. von C.H. Schnuse. Braunschweig (*Traité de la mécanique des corps solides et du calcul de l'effet des machines*. 2eme éd., Paris 1844).

Cornford, Francis Macdonald (1931): *The Laws of Motion in Ancient Thought*. Cambridge.

Costabel, Pierre (1972): „Fourier et le principe des vitesses virtuelles", in: *Sciences* 3, 235-238.

Cournot, Antoine A. (1851): *Essai sur les fondaments de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*. 2 vols., Paris.

Cournot, Antoine A. (1861): *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*. 2 vols., Paris; Nouvelle Éd. publiée avec un avertissement par Lucien Lévy-Bruhl. Paris 1911.

Cournot, Antoine A. (1827): „Extension du principe des vitesses virtuelles au cas où les conditions des liaisons du système sont exprimées par inégalités", in: *Bulletin universel des sciences et de l'industrie (sciences mathématiques, physiques, chimiques)* 8, 165-170.

Crelle, August L. (1845): *Enzyklopädische Darstellung der Theorien der Zahlen und einiger anderer damit in Verbindung stehender analytischer Gegenstände*. Bd. 1, Berlin.

Crowe, Michael J. (1967): *A History of Vector Analysis: The Evolution of the Idea of a Vectorial System*. Notre Dame (repr. New York 1985).

Culmann, Carl (1870): *Über das Parallelogramm und über die Zusammensetzung der Kräfte*. Berlin.

Cunningham, Andrew/Jardine, Nicholas, eds. (1990): *Romanticism and the Sciences*. Cambridge.

Cunningham, Andrew (1991): „How the *Principia* Got Its Name; Or, Taking Natural Philosophy Seriously", in: *HS* 29, 377-392.

Cyganova, N.J.A. (1983/84): „Die Entwicklung des Prinzips des kleinsten Zwanges in den Arbeiten deutscher Forscher des 19. Jahrhunderts". 2 Teile, in: *NTM* 20, 25-38 und 21, 79-90.

D'Abro, A. (1939): *Decline of Mechanism in Modern Physics*. New York.

D'Alembert, Jean le Rond (1743): *Traité de dynamique, dans lequel les loix de l'équilibre et du mouvement des corps sont réduites au plus petit nombre possible, et démontrées d'une manière nouvelle, où l'on donne un Principe général pour trouver le Mouvement de plusieurs Corps qui agissent les uns sur les autres, d'une maniére quelconque*. Paris (repr. Brüssel 1967).

D'Alembert, Jean le Rond (1751): Article „Causes finales", in: *EDRS* 2, 789-790.

D'Alembert, Jean le Rond (1754): Article „Cosmologie", in: *EDRS* 4, 294-297.

D'Alembert, Jean le Rond (1755): Article „Dynamique", in: *EDRS* 5, 174-176.

D'Alembert, Jean le Rond (1758): *Traité de dynamique [...]*. Paris (repr. 1921, [1]1743).

D'Alembert, Jean le Rond (1899): *Abhandlung über Dynamik*. Übers. und hg. von A. Korn (OKEW, 106.). Leipzig.

D'Alembert, Jean le Rond (1975): *Discours Préliminaire de l'Encyclopédie (1751)*. Zweisprachige Ausgabe, übers. von A. Heins; neu hg. von E. Köhler. Hamburg ([1]1955).

Danto, Arthur C. (1980): *Analytische Philosophie der Geschichte*. Aus dem Engl. von J. Behrens. Frankfurt a.M. (*Analytical Philosophy of History*. Cambridge 1965).

D'Arcy, Chevalier Patrick (1747): „Problème de dynamique", in: *MASP* 1752, 344-361.

D'Arcy, Chevalier Patrick (1749): „Réfléxions sur le principe de la moindre action de Mr. de Maupertuis", in: *MASP* 1753, 531-538.

D'Arcy, Chevalier Patrick (1752): „Réplique à un Mémoire de Mr. de Maupertuis sur le principe de la moindre action, inséré dans les Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin de l'année 1752", in: *MASP* 1756, 503-519.

Daston, Lorraine J. (1988): „Fitting Numbers to the World: The Case of Probability Theory", in: Aspray/Kitcher 1988, 221-237.

Daub, Edward (1969): „Probability and Thermodynamics: The Reduction of the Second Law", in: *Isis* 68, 318-330.

Daub, Edward (1970): „Maxwell's Demon", in: *SHPS* 1, 213-227.

Dauben, Joseph W. (1981b): „Mathematics in Germany and France in the Early 19th Century: Transmission and Transformation", in: Jahnke/Otte 1981, 371-399.

Davis, Philip J./Hersh, Reuben (1986): *Erfahrung Mathematik.* Aus dem Amerik. von J. Zehnder. Basel (*The Mathematical Experience.* Boston 1981).

Dedekind, Richard (1876): „Bernhard Riemann's Lebenslauf", in: Riemann *Werke*, 539-558.

DeGandt, François (1994): „D'Alembert et la chaîne des sciences", in: *Revue de Synthèse* IV(1-2), 39-53.

DeGandt, François (1995): *Force and Geometry in Newton's Principia.* Princeton.

DeGandt, François (1999): „1744: Maupertuis et D'Alembert entre Mécanique et Métaphysique", in: Hecht 1999, 277-291

DeGandt, François (2001): „The Status of Physical Science in D'Alembert's Philosophy", in: Lefèvre 2001, 47-60.

Delaunay, Charles E. (1868): *Lehrbuch der analytischen Mechanik.* Aus dem Franz. von G. Krebs. 4. Aufl., Wiesbaden (*Traité de mécanique rationelle.* Paris 1857).

Descartes, René: *Œuvres.* Éds. C. Adam/P. Tannery. 13 vols., Paris 1897-1913 (Nouvelle présentation, en co-édition avec le Centre National de la Recherche Scientifique. Paris 1964-1974).

Descartes, René (1923): *Geometrie.* 2. Aufl., Leipzig, repr. Darmstadt 1981 (*Géometrie.* Leyden 1637).

Descartes, René (1955): *Die Prinzipien der Philosophie.* Übers. und erl. von A. Buchenau (Philosophische Bibliothek, 28.). Hamburg (*Principia philosophiae.* Amsterdam 1644).

Descartes, René (1962): *Regeln zur Leitung des Geistes - Die Erforschung der Wahrheit durch das natürliche Licht.* Übers. und hg. von A. Buchenau (Philosophische Bibliothek, 26b). Hamburg.

Detel, Wolfgang (1993): *Einleitung und Anmerkungen zu Aristoteles' Analytica Posteriora.* 2 Bde., Berlin 1993 [Aristoteles *Werke*, Bd. 3 II (1), 101-438 und Bd. 3 II(2)].

Dhombres, Jean (1986a): „Un style axiomatique dans l'écriture de la physique mathématique au XVIIIe siècle: Danciel Bernoulli et la composition des forces", in: *Science et Techniques en Perspective* 11/12, 1-38.

Dhombres, Jean/Radelet-DeGrave, Patricia (1991): „Contingence et nécessité en mécanique. Étude de deux textes inédits de Jean d'Alembert", in: *Physis* 28, 35-114.

Diderot, Denis (1984): *Philosophische Schriften*, Bd. 1. Hg. von T.M. Lücke. Berlin.

Diederich, Werner (1974a): *Konventionalität in der Physik: Wissenschaftstheoretische Untersuchungen zum Konventionalismus* (Erfahrung und Denken, 42.). Berlin.

Diederich, Werner, Hg. (1974b): *Theorien der Wissenschaftsgeschichte. Beiträge zur diachronen Wissenschaftstheorie.* Frankfurt a.M.

Diemer, Alwin (1964): *Was heißt Wissenschaft?* Meisenheim a.G.

Diemer, Alwin, Hg. (1968a): *Beiträge zur Entwicklung der Wissenschaftstheorie im 19. Jahrhundert* (Studien zur Wissenschaftstheorie, 1.). Meisenheim a.G.

Diemer, Alwin (1968b): „Die Begründung des Wissenschaftscharakters der Wissenschaft im 19. Jahrhundert - Die Wissenschaftstheorie zwischen klassischer und moderner Wissenschaftskonzeption", in: Diemer 1968a, 3-62.

Diemer, Alwin (1968c): „Die Differenzierung der Wissenschaften in die Natur- und Geisteswissenschaften und die Begründung der Geisteswissenschaften als Wissenschaft", in: Diemer 1968a, 174-223.

Diemer, Alwin, Hg. (1968d): *System und Klassifikation in Wissenschaft und Dokumentation* (Studien zur Wissenschaftstheorie, 2.). Meisenheim a.G.

Diemer, Alwin, Hg. (1970a): *Der Wissenschaftsbegriff: Historische und systematische Untersuchungen* (Studien zur Wissenschaftstheorie, 4.). Meisenheim a.G.

Diemer, Alwin (1970b): „Der Wissenschaftsbegriff in historischem und systematischem Zusammenhang", in: Diemer 1970a, 3-20.

Diemer, Alwin (1970c): *Was heißt Philosophie?* Düsseldorf.

Diemer, Alwin (1970d): „Zur Grundlegung eines allgemeinen Wissenschaftsbegriffs", in *ZAWT* 1, 209-227.

Diemer, Alwin (1975): „Der Wissenschaftsbegriff in den Natur- und in den Geisteswissenschaften", in: *Studia Leibnitiana*, Sonderheft 5, 1-16.

Diemer, Alwin, Hg. (1977). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen und die Geschichte der Wissenschaften* (Studien zur Wissenschaftstheorie, 10.). Meisenheim a.G.

Diemer, Alwin/König, Gert (1991): „Was ist Wissenschaft?", in: A. Hermann/Ch. Schönbeck, Hgg.: *Technik und Wissenschaft* (Technik und Kultur, 3.). Düsseldorf, 3-28.

Dienger, Joseph (1864): „Das Prinzip der kleinsten Wirkung", in: *Archiv der Mathematik und Physik* 41, 194-198.

Dierse, Ulrich (1977): *Enzyklopädie. Zur Geschichte eines philosophischen und wissenschaftlichen Begriffs* (Archiv für Begriffsgeschichte, Supplementheft 2.). Bonn.

Dierse, Ulrich (1986): „Der Newton der Geschichte", in: *Archiv für Begriffsgeschichte* 30, 158-182.

Dijksterhuis, Eduard J. (1956): *Die Mechanisierung des Weltbildes.* Aus dem Niederl. von H. Habicht. Berlin (*De Mechanisering van het Wereldbeeld.* Amsterdam 1950).

Dilworth, Craig (1989): „On the Nature of Scientific Laws and Theories", in: *ZAWT* 20, 1-17.

Dingler, Hugo (1913): *Die Grundlagen der Naturphilosophie.* Leipzig (repr. Darmstadt 1967).

Dingler, Hugo (1923a): *Die Grundlagen der Physik. Synthetische Prinzipien der mathematischen Naturphilosophie.* 2. Aufl., Berlin ([1]1919).

Dingler, Hugo (1923b): *Das Problem des absoluten Raumes. In historisch-kritischer Behandlung.* Leipzig.

Dingler, Hugo (1926): *Der Zusammenbruch der Wissenschaft und der Primat der Philosophie.* München.

Dingler, Hugo (1932): *Geschichte der Naturphilosophie.* Berlin (repr. Darmstadt 1967).

Dirichlet, Johann Peter G.L.: *Werke.* Hg. von L. Kronecker, fortges. von L. Fuchs. 2 Bde., Berlin 1889/1897.

Dirichlet, Johann Peter G.L. (1846): „Über die Stabilität des Gleichgewichts", in: *JRAM* 32, 85-88 [*Werke* 2, 5-8].

Dirichlet, Johann Peter G.L. (1852): „Gedächtnisrede auf Carl Gustav Jacob Jacobi", in: *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 225-252 [Jacobi *Werke* 1, 1-28].

Dirksen, Enne-Heeren (1844): „Über die Prinzipien der rationellen Mechanik", in: *Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. Berlin, 214-233.

DiSalle, Robert J. (1990): „Conventionalism and the Origins of the Inertial Frame Concept", in: *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2, 139-147.

DiSalle, Robert J. (1992): „Einstein, Newton and the Empirical Foundations of Spacetime Geometry", in: *International Studies in the Philosophy of Science* 6, 181-189.

DiSalle, Robert J. (1993): „Carl Gottfried Neumann", in: *Science in Context* 6, 345-353.

Doetsch, G. (1922): „Der Sinn der angewandten Mathematik", in: *JDMV* 31, 222-233.

Dolby, R.G.A. (1966): „A Note on Dijksterhuis' Criticism of Newton's Axiomatization of Mechanics", in: *Isis* 57, 108-115.

Donovan, Arthur/Laudan, Larry/Laudan, Rachel, eds. (1988): *Scrutinizing Science. Empirical Studies of the Scientific Change*. Dordrecht [u.a.].

Donagan, Alan (1976): „Neue Überlegungen zur Popper-Hempel-Theorie", in: H.M. Baumgartner/J. Rüsen, Hgg.: *Seminar: Geschichte und Theorie. Grundzüge einer Historik*. Frankfurt a.M., 173-208.

Drake, Stillmann (1978): *Galileo at Work. His Scientific Biography*. Chicago [u.a.].

Drieschner, Michael (2002): *Moderne Naturphilosophie. Eine Einführung*. Paderborn.

Drobisch, Moritz W. (1842): *Empirische Psychologie nach naturwissenschaftlicher Methode*. Leipzig.

Dubislav, Walter (1929): *Zur Methodenlehre des Kritizismus*. Langensalza.

Dubislav, Walter (1932): *Die Philosophie der Mathematik in der Gegenwart*. Berlin.

Dubislav, Walter (1933): *Naturphilosophie*. Berlin.

Du Bois-Reymond, Emil (1903): *Über die Grenzen des Naturerkennens. Vortrag gehalten in der zweiten allgemeinen Sitzung der 45. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Leipzig am 14. Aug. 1872*. 9. Aufl., Leipzig (repr. Darmstadt 1961; [1]1872).

Du Bois-Reymond, Emil (1974): *Vorträge über Philosophie und Gesellschaft*. Berlin.

Du Bois-Reymond, Paul (1890): *Über die Grundlagen der Erkenntnis in den exacten Wissenschaften*. Tübingen (repr. Darmstadt 1966).

Ducasse, Curt J. (1966): „William Whewell's Philosophy of Scientific Discovery", in: Madden 1966, 183-217.

Dühring, Eugen (1877): *Kritische Geschichte der allgemeinen Principien der Mechanik*. 2. Aufl., Leipzig ([1]1873).

Dühring, Eugen (1878): *Logik und Wissenschaftstheorie*. Leipzig.

Düsing, Klaus (1968): *Die Teleologie in Kants Weltbegriff* (Kant-Studien Ergänzungshefte, Bd. 96.). Bonn.

Dugac, Pierre (1990): „La théorie des fonctiones analytiques de Lagrange et la notion d'infini", in: König 1990, S. 34-46.

Dugas, René (1941): „Sur la pensée dynamique d'Hamilton; origines optiques et prolongements modernes", in: *Revue Scientifique* 79, 15-23.

Dugas, René (1955): *A History of Mechanics*. Neuchâtel [u.a.] (repr. New York 1988).

Duhamel, Jean-Marie-Constant (1858): *Lehrbuch der analytischen Mechanik*. Aus dem Franz. von O. Schlömilch. 2 Bde., Leipzig (*Cours de mécanique de l'Ecole Polytechnique*. 2 vols., Paris 1845/46).

Duhem, Pierre (1908a): *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Aus dem Franz. von F. Adler. Leipzig; repr. Hamburg 1978 (*La Théorie Physique, son Objet et sa Structure*. Paris 1906).

Duhem, Pierre (1908b): *Sozein ta phainómena*. Paris.

Duhem, Pierre (1980): *The Evolution of Mechanics*. (*Mechanics: Genesis and Methods, 1.*). Ed. by G. AE. Oravas. Alphen an den Rijn [u.a.] (*L'Évolution de la mécanique*. Paris 1903).

Dundon, Stanislaus J. (1972): *Philosophical Resistance to Newtonianism on the Continent*. St. John's University (PhD).

Dyck, Martin (1960): *Novalis and Mathematics*. Chapell Hill.

Dyck, Walther von (1897): *Über die wechselseitigen Beziehungen zwischen der reinen und angewandten Mathematik*. München.

Earman, John/Friedman, Michael (1973): „The Meaning and Status of Newton's Law of Inertia and the Nature of Gravitational Forces", in: *Philosophy of Science* 40, 329-359.

Earman, John (1989): *World Enough and Spacetime*. Cambridge, Mass.

Eccarius, Wolfgang (1977): „Zur Gründungsgeschichte des Journals für reine und angewandte Mathematik", in: *NTM* 14(2), 8-28.

Einstein, Albert (1920): *Aether und Relativitätstheorie*. Berlin.

Einstein, Albert (1974): *Mein Weltbild*. Hg. von C. Seelig. 3. Aufl., Frankfurt a.M. [u.a.] ([1]1934).

Einstein, Albert (1984): *Aus meinen späten Jahren*. 2. Aufl., Frankfurt a.M. [u.a.] (Out of my Later Years. New York 1950). ([1]1952).

Elkana, Yehuda (1970b): „The Conservation of Energy: A Case of Simultaneous Discovery?", in: *AIHS* 23, 31-60.

Elkana, Yehuda (1971): „Newtonism in the 18th Century", in: *BJPS* 22, 297-306.

Elkana, Yehuda (1974a): *The Discovery of Conservation of Energy*. Cambridge.

Elkana, Yehuda (1974b): „Scientific and Metaphysical Problems: Euler and Kant", in: *BSPS* 14, 277-305.

Elkana, Yehuda (1993): *The Scientific Revolution as a Revolution in Reflectivity*. Oxford.

Ellis, Brian (1962): „Newton's Concept of Motive Force", in *JHI* 23, 273-278.

Ellis, Brian (1965): „The Origin and Natur of Newton's Laws of Motion", in: Colodny 1965, 29-68.

Ellis, Brian (1976): „The Existence of Forces", in: *SHPS* 7, 171-185.

Elsenhans, Theodor (1906): *Fries und Kant: Ein Beitrag zur Geschichte und zur systematischen Grundlegung der Erkenntnistheorie*. 2 Teile, Gießen.

Emerson, William (1754): *Principles of Mechanics*. London.

Emerson, William (1770): *A Short Comment on Sir Isaac Newton's Principia*. London.

Emerson, William (1773): *Principles of Mechanics*. 3rd ed., London ([1]1754).

Emerson, William (1800): *Principles of Mechanics*. 5th ed., London ([1]1754).

Encyclopaedia Britannica. 3 vols., Edinburgh 1768-71.

Ende, Helga (1973): *Der Konstruktionsbegriff im Umkreis des Deutschen Idealismus*. Meisenheim.

Engels, Eve-Marie (1982): *Die Teleologie des Lebendigen. Eine historisch-systematische Untersuchung* (Erfahrung und Denken, Bd. 63.). Berlin.

Engels, Eve-Marie (1989): *Erkenntnis als Anpassung? Eine Studie zur Evolutionären Erkenntnistheorie*. Frankfurt a.M.

Engels, Eve-Marie, Hg. (1995): *Die Rezeption von Evolutionstheorien im 19. Jahrhundert.* Frankfurt a.M.

Engfer, Hans-Jürgen (1981): „Über die Unabdingbarkeit teleologischen Denkens. Zum Stellenwert der reflektierenden Urteilskraft in Kants kritischer Philosophie", in: Poser 1981a, 119-160.

Erdmann, Benno (1877): *Die Axiome der Geometrie: eine philosophische Untersuchung der Riemann-Helmholtzschen Raumtheorie.* Hamburg.

Euklid (1973): *Die Elemente. Buch I-XIII.* Leipzig 1933-1937 (repr. in einem Bd., Darmstadt).

Euler, Leonhard: *Opera omnia sub speciis societatis scientiarum naturalium helveticae.* [Bisher] 73 Bde. in 4 Serien. Leipzig bzw. (ab 1952) Zürich [u.a.] 1911-1986.

Euler, Leonhard (1736): *Mechanica sive motus scientia analytice exposita.* 2 Bde., Petersburg [*Opera omnia* (2) 1 und 2].

Euler, Leonhard (1744): *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sens accepti.* Lausanne [u.a.] [*Opera omnia* (1)24].

Euler, Leonhard (1745): „De la force de percussion et de sa véritable mesure", in: *HASB* 1746, 1, 28-32.

Euler, Leonhard (1746): *Gedancken von den Elementen der Cörper, in welchem das Lehr-Gebäude von den einfachen Dingen und Monaden geprüfet, und das wahre Wesen der Cörper entdecket wird.* Berlin [*Opera omnia* (3)2, 349-366].

Euler, Leonhard (1746-51): *Opuscula varii argumenti.* 3 Bde., Berlin.

Euler, Leonhard (1748a): „Réflexions sur quelques loix générales de la nature qui se trouvent dans les actiones des forces", in: *HASB* 1750, 4, 189-216 [*Opera omnia* (2)5, 38-63].

Euler, Leonhard (1748b): „Réflexions sur l'espace et le temps", in: *HASB* 1750, 4, 324-333 [*Opera omnia* (3)2, 376-383].

Euler, Leonhard (1750a): „Découverte d'un nouveau principe de mécanique", in: *HASB* 1752, 6, 185-217 [*Opera omnia* (2)5, 81-108].

Euler, Leonhard (1750b): „Recherches sur l'origine des forces", in: *HASB* 1752, 6, 419-447 [*Opera omnia* (2)5, 109-131].

Euler, Leonhard (1751a): „Harmonie entre les principes générales de repos et de mouvement de M. de Maupertuis", in: *HASB* 1753, 7, 169-198 [*Opera omnia* (2)5, 152-176].

Euler, Leonhard (1751b): „Sur le principe de la moindre action", in: *HASB* 1753, 7, 199-218 [*Opera omnia* (2)5, 179-193].

Euler, Leonhard (1751c): „Essay d'une démonstration métaphysique du principe général de l'équilibre", in: *HASB* 1753, 7, 246-254 [*Opera omnia* (2)5, 250-256].

Euler, Leonhard (1755): *Anleitung zur Naturlehre, worin die Gründe zur Erklärung aller in der Natur sich ereignenden Begebenheiten und Veränderungen festgesetzt werden* [*Opera omnia* (3)1, 16-178].

Euler, Leonhard (1758): „Recherches sur la connoissance mécanique des corps", in: *HASB* 1765, 14, 131-153 [*Opera omnia* (2)8, 178-199].

Euler, Leonhard (1765): *Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum ex primis nostrae cognitionis principiis stabilita et ad omnes qui in huiusmodi corpora cadere possunt accommodata.* Rostock [u.a.] [*Opera omnia* (2), 3 und 4].

Euler, Leonhard (1768-72): *Lettres à une Princesse d'Allemagne sur divers Sujets de Physique et de Philosophie.* 3 Bde., Petersburg [*Opera omnia* (3)11 und 12].

Euler, Leonhard (1848/50): *Mechanik oder analytische Darstellung der Wissenschaft von der Bewegung*. Übers. und hg. von J.P. Wolfers. 2 Bde., Greifswald (*Mechanica sive motus scientia analytice exposita*. 2 Bde., Petersburg 1736).

Euler, Leonhard (1849): *Opera minora collecta*. Hg. von P. Henricus/N. Fuss. 2 Bde., St. Petersburg.

Euler, Leonhard (1853): *Mechanik. Dritter Theil: Theorie der Bewegung fester und starrer Körper*. Übers. und hg. von J.P. Wolfers. Greifswald (*Theoria motus*. Rostock [u.a.] 1765).

Euler, Leonhard (1942): *Vom Nutzen der höhern Mathematik*, in: *Opera omnia* (3)2, 408-415.

Euler, Leonhard (1986): *Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie*. Neu hg. von A. Speiser. Braunschweig (*Lettres à une Princesse d'Allemagne*. 3 Bde., Petersburg 1768-1772).

Falkenburg, Brigitte, Hg. (1994): *Naturalismus in der Philosophie der Mathematik?* Hamburg.

Fechner, Gustav Th. (1864): *Die physikalische und philosophische Atomenlehre*. 2. Aufl., Leipzig.

Fehér, Martha (1982): „Galileo and the Demonstrative Ideal of Science", in: *SHPS* 13, 87-110.

Fellmann, Emil A. (1989): „Newtons ‚Principia' und die zeitgenösssischen Mathematiker auf dem Kontinent", in: Hutter 1989, 75-98.

Fellmann, Ferdinand (1973): „Das Ende des Laplaceschen Dämons", in: R. Koselleck/W.-D. Stempel, Hgg.: *Geschichte - Ereignis und Erzählung*. München, 115-139.

Fellmann, Ferdinand (1974): „Wissenschaft als Beschreibung", in: *Archiv für Begriffsgeschichte* 18, 227-261.

Fermat, Pierre de: *Œuvres* . Ed. P. Tannery/Ch. Henry. 4 vols., Paris 1891-1912; Suppl.vol. ed. C. de Waard. Paris 1922.

Feyerabend, Paul K. (1978): *Der wissenschaftstheoretische Realismus und die Autorität der Wissenschaften*. Braunschweig [u.a.].

Feyerabend, Paul K. (1981): *Probleme des Empirismus: Schriften zur Theorie der Erklärung, der Quantentheorie und der Wissenschaftsgeschichte*. Braunschweig [u.a.].

Feyerabend, Paul K. (1986): *Wider den Methodenzwang. Skizze einer anarchistischen Erkenntnistheorie*. Übers. von H. Vetter. Frankfurt a.M. (*Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. London 1975).

Feynman, Richard P. (1965): *The Character of Physical Law*. London [u.a.] (repr. 1992).

Fischer, Ernst G. (1806): *Physique mécanique*. Trad. de l'allemand avec des notes de M. Biot. Paris (*Lehrbuch der mechanischen Naturlehre*. Berlin [u.a.] 1805).

Fischer, Ernst G. (1826): *Lehrbuch der mechanischen Naturlehre*. 3. Aufl.; 2 Theile, Berlin [u.a.] ([1]1805).

Fischer, H.-P. (1985): „Kant an Euler", in: *Kant-Studien* 76(2), 214-218.

Fischer, Johann C. (1797): *Anfangsgründe der Physik in ihrem mathematischen und chemischen Theile nach den neuesten Entdeckungen*. Jena.

Fischer, Johann C. (1801-08): *Geschichte der Physik seit der Wiederherstellung der Künste und Wissenschaften bis auf die neuesten Zeiten*. 8 Bde., Göttingen.

Fleckenstein, Joachim O. (1950): „Cartesische Erkenntnistheorie und mathematische Physik des 17. Jahrhunderts", in: *Gesnerus* 7, 120-139.

Flügge, Siegfried, Hg. (1960/65): *Handbuch der Physik*. Bd. III. Teil 1 und 3. Berlin.

Flügel, Otto (1865): *Der Materialismus vom Standpunkt der atomistisch-mechanischen Naturforschung beleuchtet*. Leipzig.

Föppl, August (1902): *Die Mechanik im 19. Jahrhundert. Akademischer Festvortrag*. München.
Föppl, August (1904): „Über absolute und relative Bewegung", in: *Sizungsberichte der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Math.-phys. Klasse* 34, 383-395.
Föppl, August (1925): *Vorlesungen über technische Mechanik*, Bd. 1: Einführung in die Mechanik. 8. Aufl., Leipzig [u.a.] ([1]1898).
Fourier, Jean B.J.: *Œuvres*. Ed. G. Darboux. 2 vols., Paris 1888/90.
Fourier, Jean B.J. (1798): „Mémoire sur la statique, contenant la démonstration du principe des vitesse virtuelles, et la théorie des momens", in: *JEP* (1)2, cah. 5, 20-60.
Fourier, Jean B.J. (1884): *Analytische Theorie der Wärme*. Deutsche Ausgabe von B. Weinstein. Berlin (*Théorie analytique de la chaleur*. Paris 1822).
Fowler, William A. (1962): *The Development of Scientific Method*. London.
Fox, Robert (1974): „The Rise and Fall of Laplacian Physics", in: *HSPS* 4, 89-136.
Francoeur, Louis-Benjamin (1804): *Traité élémentaire de mécanique*. Paris.
Frank, Philipp (1988): *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*. Hg. von A.J. Kox. Frankfurt a.M. ([1]1932).
Fraser, Craig G. (1983): „J.L. Lagrange's Early Contributions to the Principles and Methods of Mechanics", in: *AHES* 28, 152-191.
Fraser, Craig G. (1985): „D'Alembert's Principle: The Original Formulation and Application in Jean d'Alembert's ‚Traité de Dynamique'", in: *Centaurus* 28, 145-159.
Fraser, Craig G. (1990): „Lagrange's Analytical Mathematics, its Cartesian Origins and Reception in Comte's Positive Philosophy", in: *SHPS* 21, 243-256.
Fraser, Craig G. (1997): *Calculus and Analytical Mechanics in the Age of Enligthenment*. Aldershot [u.a.].
Frege, Gottlob (1891): „Über das Trägheitsgesetz", in: *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik* 98, 145-161.
Frege Gottlob (1969): *Nachgelassene Schriften*. Hg. von H. Hermes/F. Kambartel/F. Kaulbach. Hamburg.
Frei, Günther (1989): „Heinrich Weber and the Emergence of Class Field Theory", in: Rowe/McClearly 1989 I, 425-450.
Freudenthal, Hans (1960): „Die Grundlagen der Geometrie um die Wende des 19. Jahrhunderts", in: *Mathematisch-physikalische Semesterberichte* 7, 2-25.
Freudenthal, Hans (1962): „The Main Trends in the Foundations of Geometry in the 19th Century", in: *Logic, Methodology and Philosophy of Science. Proceedings of the 1960 International Congress*. Stanford, 613-621.
Freudenthal, Hans (1975): „Riemann, Georg Friedrich Bernhard", in: *DSB* XI, 447-456.
Frey, Gerhard (1967): *Die Mathematisierung unserer Welt*. Stuttgart [u.a.].
Frey, Gerhard (1976): Art. „Konventionalismus", in: *HWP* 4, 1078-1080.
Friedländer, Benedict/Friedländer Immanuel (1896): *Absolute oder relative Bewegung?* Berlin.
Friedman, Michael (1983): *Foundations of Spacetime Theories*. Princeton.
Friedman, Michael (1992): *Kant and the Exact Sciences*. Cambridge, Mass. [u.a.].
Friedman, Robert M. (1977): „The Creation of a New Science: Joseph Fourier's Analytical Theory of Heat", in: *HSPS*, 8, 73-99.
Fries, Jakob F.: *Sämtliche Schriften*. Nach den Ausgaben letzter Hand zusammengestellt, eingeleitet und mit einem Fries-Lexikon versehen von G. König/L. Geldsetzer. [Bisher] Bde. 1-25, 27, Aalen 1967ff. [*WW*].

Fries, Jakob F. (1802): „Versuch einer neuen Darstellung der Theorien des Lichts und der Wärme", in: *Archiv für theoretische Chemie* 2(4), 25-96 [*WW* 17, 145-220].

Fries, Jakob F. (1803): *Reinhold, Fichte und Schelling*. Leipzig [*WW* 24, 33-476].

Fries, Jakob F. (1804): *System der Philosophie als evidente Wissenschaft aufgestellt*. Leipzig [*WW* 3, 7-410].

Fries, Jakob F. (1805): *Wissen, Glaube und Ahndung*. Jena [*WW* 3, 413-755].

Fries, Jakob F. (1807): „Atomistik und Dynamik", in: C. Daub/F. Creuzer, Hgg.: Studien 3(1), 201-235 [*WW* 17, 221-257].

Fries, Jakob F. (1810): „[Rezension:] L.N.M. Carnot, Grundsatz der Mechanik vom Gleichgewicht und der Bewegung [...]. Aus dem Franz. hg. C.S. Weiß. 1805", in: *Heidelberger Jahrbücher der Literatur* (4)3(1), 22-27 [*WW* 25, 476-482].

Fries, Jakob F. (1813): *Entwurf des Systems der theoretischen Physik. Zum Gebrauch bei seinen Vorlesungen*. Heidelberg [*WW* 14, 257-400].

Fries, Jakob F. (1822): *Die mathematische Naturphilosophie nach philosophischer Methode bearbeitet. Ein Versuch*. Heidelberg [*WW* 13].

Fries, Jakob F. (1824): *System der Metaphysik. Ein Handbuch für Lehrer und zum Selbstgebrauch*. Heidelberg [*WW* 8S, 1-536].

Fries, Jakob F. (1826a): *Lehrbuch der Naturlehre. Zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen. Teil 1(1): Experimentalphysik*. Jena [*WW* 15].

Fries, Jakob F. (1826b): *Grundriß der Logik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch für Schulen und Universitäten*. 3. Aufl., Heidelberg ([1]1811) [*WW* 7, 29-152].

Fries, Jakob F. (1828/31/31): *Neue oder anthropologische Kritik der Vernunft*. 3 Bde., 2. Aufl., Heidelberg ([1]1807) [*WW* 4, 31-479; 5; 6].

Fries, Jakob F. (1829): „Pohls Naturphilosophie gegen Newton„, in: J.F. Fries/W. Schröter/H. Schmid, Hgg.: *Für Theologie und Philosophie. Eine Oppositionsschrift*. Jena, 2(2), 144-145 [*WW* 25, 562-563].

Fries, Jakob F. (1832): *Handbuch der Religionsphilosophie und philosophischen Aesthetik*. Heidelberg [*WW* 12, 1-291].

Fries, Jakob F. (1837): *System der Logik. Ein Handbuch für Lehrer und zum Selbstgebrauch*. 3. Aufl., Heidelberg ([1]1811) [*WW* 7].

Fries, Jakob F. (1837/40): *Die Geschichte der Philosophie dargestellt nach den Fortschritten ihrer wissenschaftlichen Entwickelung*. 2 Bde., Halle [*WW* 18; 19].

Fries, Jakob F. (1842): „[Rezension:] Julius Schaller, Geschichte der Naturphilosophie von Baco von Verulam bis auf unsere Zeit. Erster Theil, 1841", in: *NJALZ* 1(8-10), 35-41 [*WW* 25, 705-720].

Fritz, Kurt von (1971): *Grundprobleme der Geschichte der antiken Wissenschaft*. Berlin/ [u.a.].

Fuhrmann, A. (1879/82): *Aufgaben aus der analytischen Mechanik*. 2 Teile in 1 Band gebunden. 2. Aufl., Leipzig.

Fuss, Paul H. (1843): *Correspondance mathématique et physique de quelques célèbres géomètres du XVIIIème siècle, précédée d'une notice sur les travaux de Léonard Euler, tant imprimés qu'inédites et publiée sous les auspices de l'Académie Impériale des Sciences de Saint-Pétersbourg*. 2 vols., Petersburg (repr. New York [u.a.] 1968].

Gabbey, Alan (1971): „Force and Inertia in 17th-Century Dynamics", in: *SHPS* 2, 1-67.

Gabbey, Alan (1980): „Force and Inertia in the Seventeenth Century: Descartes and Newton", in: Gaukroger 1980, 230-320.

Gabbey, Alan (1992): „Newton's *Mathematical Principles of Philosophy*: a Treatise on 'Mechanics'?", in: Harman/Shapiro 1992, 305-322.
Galilei, Galileo: *Le Opere. Edizione Nazionale*. Ed. A. Favaro. 20 Bde., Florenz 1890-1909.
Galilei, Galileo (1891): *Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische*. Übers. und erl. von E. Strauss. Leipzig; repr. Darmstadt 1982 (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, Tolemaico, e Copernicano*. Fiorenza 1632).
Galilei, Galileo (1960): *On Motion and Mechanics*. Ed. by S. Drake/I.E. Drabkin. Madison.
Galilei, Galileo (1973): *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*. Hg. von A. von Oettingen. Leipzig 1890/1891/1904 (OKEW, 11., 25., 24.); repr. [in einem Band] Darmstadt (*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nove scienze attinenti all mecanica ed i movimente locali*. Leiden 1638).
Gårding, Lars (1979): „The Dirichlet Problem", in: *Mathematical Intelligencer* 2, 43-53.
Gaukroger, Stephen, ed. (1980): *Descartes: Philosophy, Mathematics and Physics*. Brighton.
Gauß, Carl F.: *Werke*. Hg. von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. 12 Bde., Göttingen (Bde. 1-6); Leipzig (Bde. 7-10); Berlin (Bde. 11-12) 1863-1929.
Gauß, Carl F. (1809): *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis*. Hamburg [*Werke* 7].
Gauß, Carl F. (1829): „Über ein neues allgemeines Grundgesetz der Mechanik", in: *JRAM* 4, 232-235 [*Werke* 5, 25-28].
Gauß, Carl F. (1981): *Mathematisches Tagebuch, 1796-1814*. Hg. von H. Wußing (OKEW, 256.). 3. Aufl., Leipzig ([1]1979).
Gehler, Johann S.T., Hg. (1790-98): *Physikalisches Wörterbuch oder Versuch einer Erklärung der vornehmsten Begriffe und Kunstwörter der Naturlehre*. 2. Aufl., 4 Bde. und 1 Suppl.bd., Leipzig.
Gensler, Friedrich (1840): *Beiträge zur Einleitung in die Newton'sche oder mathematische Naturphilosophie*. Bern.
Gent, Werner (1926-30): *Die Raum-Zeit-Philosophie des 19. Jahrhunderts. Historische, kritische und analytische Untersuchungen*. 2 Bde., Bonn.
Georges, Ernst (1909): *Die Zusammensetzung der Kräfte*. Halle. (Diss.)
Geppert, Harald (1903): „Über Gauss' Arbeiten zur Mechanik und Potentialtheorie", in: Gauß *Werke* 10(2), 1-60.
Giedymin, Jerzy (1977): „On the Origin and Significance of Poincaré's Conventionalism", in: *SHPS* 8, 271-301.
Giedymin, Jerzy (1991): „Geometrical and Physical Conventionalism of Henri Poincaré in Epistemological Formulation", in: *SHPS* 22, 1-22.
Giere, Ronald N. (1988): *Explaining Science. A Cognitive Approach*. Chicago [u.a.] (repr. 1990).
Giesel, F. (1875): *Geschichte der Variationsrechnung*. Torgau.
Gillispie, Charles C. (1966): *The Edge of Objectivity. An Essay in the History of Scientific Ideas*. 3. ed., Princeton [u.a.] ([1]1960).
Gillispie, Charles C. (1971): *Lazare Carnot Savant*. Princeton.
Gillispie, Charles C., ed.: *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols., New York 1970-80 [DSB].
Gloy, Karen (1976): *Die Kantische Theorie der Naturwissenschaft*. Berlin.

Goldstein, Herbert (1976): *Klassische Mechanik*. Übers. von G. Gliemann. 6. Aufl., Wiesbaden. (*Classical Mechanics*. Cambridge, Mass. 1950).

Goldstine, Herbert H. (1980): *A History of the Calculus of Variations from the 17th through the 19th Century* (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences, 5.). New York [u.a.].

Gosztonyi, Alexander (1976): *Der Raum: Geschichte seiner Probleme in Philosophie und Wissenschaft*. 2 Bde., Freiburg.

Grabiner, Judith V. (1981): „Changing Attitudes toward Mathematical Rigor: Lagrange and Analysis in the 18th and 19th Centuries", in: Jahnke/Otte 1981, 311-330.

Grabiner, Judith V. (1990): *The Calculus as Algebra: J.C. Lagrange, 1736-1813*. New York.

Grassmann, Hermann: *Gesammelte Mathematische und Physikalische Werke*. Hg. von F. Engel. 2 Bde., Leipzig 1894/1902.

Grassmann, Hermann (1877): „Zur Elektrodynamic", in: *JRAM* 83, 57-64.

Grattan-Guinness, Ivor/Ravetz, John R. (1972): *Joseph Fourier 1768-1830. A Survey of his Life and Work*. Cambridge, Mass.

Grattan-Guinness, Ivor (1981a): „Recent Researches in French Mathematical Physics of the Early 19th Century", in: *AS* 38, 663-690.

Grattan-Guinness, Ivor (1981b): „Mathematical Physics in France, 1800-1835", in: Jahnke/Otte 1981, 349-370.

Grattan-Guinness, Ivor (1990): *Convolutions in French Mathematics, 1800-1840. From the Calculus and Mechanics to Mathematical Analysis and Mathematical Physics*. 3 vols., Basel [u.a.].

Graves, Robert P. (1882-91): *Life of Sir William Rowan Hamilton*. 3 Bde., Dublin.

Gray, Jeremy/Tilling, Laura (1978): „Johann Heinrich Lambert, Mathematician and Scientist, 1728-1777", in: *HM* 5, 13-41.

Gray, Jeremy (1979): „Non-Euclidian Geometry - A Re-Interpretation", in: *HM* 6, 236-258.

Gray, Jeremy (1989): *Ideas of Space: Euclidian, Non-Euclidian, Relativistic*. Oxford (^{1}1979).

Greenberg, Marvin J. (1974): *Euclidian and Non-Euclidian Geometries: Development and History*. San Francisco.

Greffe, Jean-Louis/Heinzmann, Gerhard/Lorenz, Kuno, eds. (1996): *Henri Poincaré: Science et Philosophie*. Berlin.

Gregory, Frederick (1983a): „Neo-Kantian Foundations of Geometry in the German Romantic Period", in: *HM* 10, 184-201.

Gregory, Frederick (1983b): „Die Kritik von J.F. Fries an Schellings Naturphilosophie", in: *Sudhoffs Archiv* 6, 153-156.

Gregory, Frederick (1989): „Kant's Influence on Natural Scientists in the German Romantic Period", in: R.P.W. Visser/H.J.M. Bos/L.C. Palm/ H.A.M. Snelders, eds.: *New Trends in the History of Science*. Amsterdam [u.a.], 53-66.

Gregory, Frederick (1994): „‚Nature is an Organized Whole': J. F. Fries's Reformulation of Kant's Philosophy of Organism", in: *Romanticism in Science. Science in Europe, 1790-1840*. Ed. by S. Poggi/M. Bossi (BSPS, vol. 152.). Dordrech [u.a.], 91-101.

Gren, Friedrich A.C: (1797): *Grundriß der Naturlehre*. Halle.

Grigor'ian A.T./Polak, L.S. (1964): „Die Grundideen der Mechanik von Heinrich Hertz", in: *NTM* (Beiheft), 89-101.

Grigor'ian, A.T. (1965): „On the Development of Variational Principles of Mechanics", in: *AIHS* 18, 23-35.

Grigor'ian, A.T. (1977): „Die Forschungen auf dem Gebiet der Geschichte der Mechanik der UdSSR", in: *Janus* 64, 147-157.

Grigor'ian, A.T./Fradlin, B.N. (1979): „Über die Entwicklung der Mechanik nichtholonomer Systeme in den Arbeiten deutscher Wissenschaftler", in: *NTM* 16(1), 43-48.

Grigor'ian, A.T./Filtova, L.A. (1983): „Sowjetische Beiträge zur Geschichte der klassischen Mechanik", in: *AIHS* 33, 118-125.

Grosholz, Emily (1991): *Cartesian Method and the Problem of Reduction*. Oxford.

Grosser, Morton (1970): *Entdeckung des Planeten Neptun*. Aus dem Amerik. von J.P. Kaufmann. Frankfurt a.M. (*The Discovery of Neptune*. Cambridge, Mass. 1962).

Grünbaum, Adolf (1968): *Geometry and Chronometry in Philosophical Perspective*. Minneapolis [u.a.].

Grünbaum, Adolf (1973): *Philosophical Problems of Space and Time*. 2nd ed., Dordrecht [u.a.] ([1]1963).

Grunert, Johann A. (1826): *Statik fester Körper*. Halle.

Guerlac, Henry (1981): *Newton on the Continent*. Ithaca [u.a.].

Haas, Arthur E. (1909): *Die Entwicklungsgeschichte des Satzes von der Erhaltung der Kraft*. Wien.

Haas, Arthur E. (1914): *Die Grundgleichungen der Mechanik, dargestellt auf Grund der geschichtlichen Entwicklung. (Vorlesungen zur Einführung in die theoretische Physik, SS 1914, Leipzig)*. Leipzig.

Hacking, Ian (1979): „Imre Lakatos's Philosophy of Science", in: *BJPS* 30, 381-402.

Hahn, Robert (1992): *Kant's Newtonian Revolution in Philosophy*. Carbondale [u.a.].

Hall, Alfred Rupert (1981): *From Galileo to Newton*. New York ([1]1963).

Hall, Marie Boas, ed. (1970): *Nature and Nature's Laws: Documents of the Scientific Revolution*. New York.

Haller, Rudolf/Stadler, Friedrich, Hgg. (1980): *Ernst Mach: Werk und Wirkung*. Wien.

Hamel, Georg (1904): „Die Lagrange-Euler'schen Gleichungen in der Mechanik", in: *Zeitschrift für Physik und Mathematik* 50, 1-57.

Hamel, Georg (1921): *Mechanik*. Leipzig.

Hamel, Georg (1949): *Theoretische Mechanik*. Berlin.

Hamilton, William R.: *The Mathematical Papers*. 3 vols., Cambridge 1930/1940/1967; Bd. 1: *Geometrical Optics*. Ed. by A.W. Conway/J.L. Synge. Bd. 2: *Dynamics*. Ed. by A.W. Conway/A.J. McConnell. Bd. 3: *Algebra*. Ed. by. H. Halberstam/R.E. Ingram.

Hamilton, William R. (1834a): „On a General Method in Dynamics, by which the Study of Motions of All Free Systems of Attracity or Repelling Points Is Reduced to the Search and Differentiation of One Central Relation, or Characteristic Function", in: *PTRS* 2, 257-308 [*Papers* II, 103-161].

Hamilton, William R. (1834b): „On the Application to Dynamics of a General Mathematical Method Previously Applied to Optics", in: *British Association Reports*, 513-518 [*Papers* II, 212-216].

Hamilton, William R. (1835): „Second Essay on a General Method in Dynamics", in: *PTRS* 1, 95-144 [*Papers* II, 162-211].

Hankins, Thomas L. (1967): „The Reception of Newton's Second Law of Motion in the Eighteenth Century", in: *AIHS* 20, 43-65.
Hankins, Thomas L. (1970): *Jean d'Alembert: Science and the Enlightenment*. Oxford.
Hankins, Thomas L. (1972): „William Rowan Hamilton", in: *DSB* 6, 85-93.
Hankins, Thomas L. (1980): *Sir William Rowan Hamilton*. Baltimore [u.a.].
Hankins, Thomas L. (1985): *Science and the Enlightenment*. Cambridge.
Hanson, Norwood R. (1958): *Patterns of Discovery*. Cambridge (repr. 1965).
Hanson, Norwood R. (1962): „Leverrier: The Zenith and Nadir of Newtonian Mechanics", in: *Isis* 53, 359-378.
Hanson, Norwood R. (1965a): „Newton's First Law: A Philosopher's Door into Natural Philosophy", in: Colodny 1965, 6-28.
Hanson, Norwood R. (1965b): „A Response to Ellis's Conception of Newton's First Law", in: Colodny 1965, 69-74.
Harman, Peter M. (1982a): *Energy, Forces and Matter*. Cambridge.
Harman, Peter M. (1982b): *Metaphysics and Natural Philosophy. The Problem of Substance in Classical Physics*. Sussex (N.J.).
Harman, Peter M./Shapiro Alan E., eds. (1992): *The Investigation of Difficult Things. Essays on Newton and the Histoy of the Exact Sciences*. Cambridge [u.a.].
Harms, Friedrich (1879): *Die Philosophie seit Kant*. 2. Aufl., Berlin.
Harnack, Adolf (1900): *Geschichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*. 3 Bde., Berlin.
Harrison, Peter (1995): „Newtonian Science, Miracles, and the Laws of Nature", in: *JHI* 56, 531-553.
Hartmann, Eduard von (1902): *Die Weltanschauung der modernen Physik*. Leipzig.
Hatfield, Gary (1990): *The Natural and the Normative: Theories of Spatial Perception from Kant to Helmholtz*. Cambridge (Mass.).
Hausdorff, Felix (1904): „Das Raumproblem", in: *Annalen der Naturphilosophie* 3, 1-23.
Hecht, Daniel F. (1843): *Erste Grundlage der mechanischen Wissenschaften*. 2. Aufl., Freyberg [u.a.] ([1]1819).
Hecht, Daniel F. (1843): *Erste Gründe der mechanischen Wissenschaften*. 2. Aufl., Freiberg.
Hecht, Hartmut (1993): „Gibt es denn eine andere Logik in London als in Hannover? Newtons physikalische Theorie im Bild der Leibnizschen Dynamik", in: *Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung* 7, 15-32.
Hecht, Harmut, Hg. (1999): *Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Eine Bilanz nach 300 Jahren* (Schriftenreihe des Frankreich-Zentrums der Technischen Universität Berlin, 3.). Berlin.
Hegel, Georg F.W.: *Theorie-Werkausgabe. Auf der Grundlage der Werke von 1832-1845 neu edierte Ausgabe*. 20 Bde., Frankfurt a.M. 1969-1979.
Hegel, Georg F.W. (1956): *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften im Grundrisse*. 3. Aufl., Stuttgart [*Theorie-Werkausgabe* 8, 9, 10].
Heidelberger, Michael (1983): „Wandlungstypen in den Baconschen Wissenschaften im Deutschland des frühen 19. Jahrhunderts", in: *Philosophia Naturalis* 20, 112-126.
Heidelberger, Michael (1993): *Die innere Seite der Natur. Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung*. Frankfurt a.M.
Heilbron, John L. (1986): *The Dilemmas of an Upright Man. Max Planck as a Spokesman for German Science*. Berkeley [u.a.].

Heller, Bruno (1970): *Grundbegriffe der Physik im Wandel der Zeit.* Braunschweig.
Helm, Georg (1878): „Zu Riemann's Gravitationstheorie", in: *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 23, 261-263.
Helm, Georg (1898): *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung.* Leipzig.
Helm, Georg (1904): *Die Theorien der Elektrodynamik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung.* Leipzig.
Helmholtz, Herman von: *Wissenschaftliche Abhandlungen.* 3 Bde., Leipzig 1882/83/95.
Helmholtz, Herman von: *Vorträge und Reden.* 5. Aufl., 2 Bde., Braunschweig 1903 ([1]1884).
Helmholtz, Herman von (1884): „Studien zur Statik monocyklischer Systeme", in: *SPAW*, 159-177, 311-318 und 755-759 [*Abhandlungen* 3, 119-202].
Helmholtz, Herman von (1886): „Über die physikalische Bedeutung des Princips der kleinsten Wirkung", in: *JRAM* 100, 137-166 und 213-222 [*Abhandlungen* 2, 203-248].
Helmholtz, Herman von (1889): *Ueber die Erhaltung der Kraft* (OKEW, 1.). Leipzig.
Helmholtz, Herman von (1911): *Vorlesungen über die Dynamik discreter Massenpunkte.* 2. Aufl., Leipzig ([1]1889).
Helmholtz, Herman von (1966): *H. von Helmholtz über sich selbst.* Hg. von D. Goetz. Leipzig.
Hempel, Carl G. (1942): „The Function of General Laws in History", in: *The Journal of Philosophy* 39, 35-48.
Henke, Ernst L.T. (1937): *Jakob Friedrich Fries. Aus seinem handschriftlichen Nachlaß dargestellt.* 2. Aufl., Berlin ([1]1867).
Hennemann, Gerhard (1959): *Naturphilosophie im 19. Jahrhundert.* Freiburg.
Hennemann, Gerhard (1975): *Grundzüge einer Geschichte der Naturphilosophie und ihrer Hauptprobleme* (Erfahrung und Denken, 44.). Berlin.
Hentschel, Klaus (1990): *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins.* Basel [u.a.].
Herbart, Johann F.: *Sämtliche Werke in chronologischer Reihenfolge.* Hgg. von K. Kehrbach/O. Flügel/T. Fritzsch. 19 Bde., Langensalza 1887-1892 (repr. Aalen 1964).
Herbart, Johann F. (1993): *Lehrbuch zur Einleitung in die Philosophie.* Hg. von W. Henckmann. Textkrit. rev. Ausg. der 4. Aufl., Hamburg ([1]1813).
Herivel, John W. (1966/67): „Aspects of French Theoretical Physics in the Nineteenth Century", in: *BJHS* 3, 109-132.
Hermann, Armin/Kaiser, Walther (1971): „Der Positivismus in der Physik des 18. und 19. Jahrhunderts", in: *Rete* 1, 135-144.
Hermann, Jakob (1716): *Phoronomia, sive de viribus et motibus corporum solidorum et fluidorum libri duo.* 2 Bde., Amsterdam.
Herrmann, Kay (2000): *Mathematische Naturphilosophie in der Grundlagendiskussion. Eine Studie über das Verhältnis von Jakob Friedrich Fries' kritischer Philosophie zu Naturwissenschaften und Mathematik.*
Herschel, John F.W. (1830): *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy.* London (repr. New York 1966).
Hertling, Georg Freiherr von (1875): *Ueber die Grenzen der mechanischen Naturerklärung. Zur Widerlegung der materialistischen Weltansicht.* Bonn.
Hertz, Heinrich: *Gesammelte Werke.* Hg. von P. Lenard. 3 Bde., Leipzig 1894/1895/1910.

Hertz, Heinrich (1884): „Ueber die Beziehung zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik", in: *AP* (2)23, 84-103 [*Werke* I, 295-314].

Hertz, Heinrich (1894): *Die Prinzipien der Mechanik im neuen Zusammenhang dargestellt.* Leipzig; repr. Darmstadt 1963 [*Werke* III].

Hertz, Heinrich (1927): *Erinnerungen, Briefe, Tagebücher.* Zusammengestellt von J. Hertz. Leipzig.

Hesse, Mary B. (1955): „Action at a Distance in Classical Physics", in: *Isis* 46, 337-353.

Hesse, Mary B. (1962): *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics.* New York.

Hiebert, Erwin N. (1962): *Historical Roots of the Principle of Conservation of Energy.* Madison.

Hiebert, Erwin N. (1970): „Mach's Philosophical Use of the History of Science", in: Stuewer 1970, 184-213.

Hiebert, Erwin N. (1981): „Boltzmann's Conception of Theory Construction: The Promotion of Pluralism, Provisionalism, and Pragmatic Realism", in: J. Hintikka/D. Gmender/E. Agazzi, eds.: *Probabalistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science* (Synthese Library, 146.). Dordrecht [u.a.], 175-198.

Hiebert, Erwin N. (1984): „The Influence of Mach's Thought on Science", in: *Philosophia Naturalis* 21, 598-615.

Hilbert, David (1899): *Grundlagen der Geometrie.* Leipzig.

Hilbert, David (1918): „Axiomatisches Denken", in: *Mathematische Annalen* 78, 405-415.

Hilbert, David (1991): *Natur und mathematisches Erkennen. Vorlesungen, gehalten 1919-1920 in Göttingen.* Hg. von D.E. Rowe. Basel [u.a.].

Hinneberg, Paul, Hg. (1914): *Naturphilosophie* (Die Kultur der Gegenwart, Teil 3, 7. Abt., 1. Bd.). Red. C. Stumpf. Leipzig.

Hirn, G.A. (1885): „La notion de force dans la science moderne", in: *Revue scientifique* 36(3), 129ff.

Höfler, Alois, Hg. (1899): *Vorreden und Einleitungen zu klassischen Werken der Mechanik.* Leipzig.

Höfler, Alois (1900): *Studien zur gegenwärtigen Philosophie der mathematischen Mechanik.* Leipzig.

Höfler, Alois (1909): „Aus der Friesschen und der Cohenschen Schule", in: *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht* 22, 46-50.

Hölder, Otto (1896): „Über die Principien von Hamilton und Maupertuis", in: *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse*, 122-127.

Hölder, Otto (1924): *Die mathematische Methode.* Berlin.

Hölder, Otto (1925): „Carl Neumann", in: *Berichte über die Verhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (Mathematisch-physische Klasse)* 77, 154-180.

Hönigswald, Richard (1912): „Zur Wissenschaftstheorie und -systematik", in: *Kant-Studien* 17, 28-84.

Hoffmann, L., Hg. (1858-67): *Mathematisches Wörterbuch. Alphabetische Zusammenstellung sämmtlicher in die mathematischen Wissenschaften gehörender Gegenstände.* 7 Bde., Berlin.

Hogrebe, Wolfram (1996): *Ahnung und Erkenntnis. Brouillon zu einer Theorie des natürlichen Erkennens.* Frankfurt a.M..

Hogrebe, Wolfram/Herrmann, Kay, Hgg. (1999): *Jakob Friedrich Fries - Philosoph, Naturwissenschaftler und Mathematiker: Verhandlungen des Symposions „Probleme und Perspektiven von Jakob Friedrich Fries' Erkenntnislehre und Naturphilosophie" vom 9.-11. Oktober 1997 an der Friedrich-Schiller-Universität Jena.* Frankfurt a.M. [u.a.].

Holzmüller, Gustav (1889): *Das Potential und seine Anwendung.* Leipzig.

Home, Roderick W. (1979): „Out of a Newtonian Straightjacket: Alternative Approaches to Eighteenth-Century Physical Science", in: R.F. Brissenden/J.C. Eade, eds.: *Studies in the Eighteenth Century.* Canberra, 235-249.

Home, Roderick W., ed. (1984): *The History of Classical Physics. A Selected, Annoted Bibliography, with the Assistence of Mark J. Gittins* (Bibliographies of the History of Science and Technology, 8.). New York.

Hooykaas, Reijer (1963): *Das Verhältnis von Physik und Mechanik in historischer Hinsicht.* Wiesbaden.

Hooykaas, Reijer (1980): „Von der ‚Physica' zur Physik", in: R. Schmitz/F. Krafft, Hgg.: *Humanismus und Naturwissenschaft.* Boppard am Rhein, 9-38.

Hoppe, Edmund (1901): *Zur Geschichte der Fernwirkungslehre.* Hamburg.

Hoppe, Edmund (1904): *Die Philosophie Leonhard Eulers.* Gotha.

Hoppe, Edmund (1926): *Geschichte der Physik.* Braunschweig (repr. New York 1965).

Hoppe, Hansgeorg (1969): *Kants Theorie der Physik. Eine Untersuchung über das Opus postumum von Kant.* Frankfurt a.M.

Horstmann, Axel (1992): *Antike Theoria und moderne Wissenschaft. August Boeckhs Konzeption der Philologie.* Frankfurt a.M. [u.a.].

Horstmann, Rolf P./Petry Michael J., Hgg. (1986): *Hegels Philosophie der Natur. Beziehungen zwischen empirischer und spekulativer Naturerkenntnis* (Veröffentlichungen der Internationalen Hegel-Vereinigung, 15.). Stuttgart.

Howson, Colin, Ed. (1976): *Method and Appraisal in the Physical Sciences. The Critical Background to Modern Science, 1800-1905.* Cambridge.

Hoyer, Ulrich (1977): „Ist das zweite Newtonsche Bewegungsaxiom ein Naturgesetz?", in: *ZAWT* 7, 292-301.

Hoyningen-Huene, Paul, Hg. (1983): *Die Mathematisierung der Wissenschaften.* Zürich.

Hoyningen-Huene, Paul/Hirsch, G., Hgg. (1988): *Wozu Wissenschaftsphilosophie? Positionen und Fragen zur gegenwärtigen Wissenschaftsphilosophie.* Berlin.

Hoyningen-Huene, Paul, Hg. (1989): *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns. Rekonstruktion und Grundlagenprobleme.* Braunschweig [u.a.].

Hoyningen-Huene, Paul (1990): „Kuhn's Conception of Incommensurability", in: *SHPS* 21, 481-492.

Hull, David (1988): *Science as a Process - An Evolutionary Account of the Social and Conceptual Development of Science.* Chicago.

Humboldt, Alexander von (1797): *Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfaser.* 2 Theile, Posen [u.a.].

Hume, David (1739/40): *A Treatise of Human Nature.* London (Ed. with an Introduction by E.C. Mossner. London 1969).

Hume, David (1777): *Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals.* London (repr. and ed. by L.A. Selby-Bigge. 3rd ed. by P.H. Nidditch. Oxford 1975).

Hume, David (1911): *Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand.* Hg. von R. Richter. Leipzig (*An Enquiry Concerning Human Understanding*. London 1758; orig.: *Philosophical Essays Concerning Human Understanding*. London 1748).

Hume, David (1973): *Ein Traktat über die menschliche Vernunft.* Aus dem Engl. von T. Lipps, neu hg. von R. Brandt. Hamburg (*A Treatise of Human Nature*. London 1739/40).

Hutter, Kolumban, Hg. (1989): *Die Anfänge der Mechanik. Newtons Principia gedeutet aus ihrer Zeit und ihrer Wirkung auf die Physik.* Berlin [u.a.].

Hutton, Charles (1795/96): *Mathematical and Philosophical Dictionary. Containing an Explanation of the Terms, and an Account of the Several Subjects Comprized under the Heads Mathematics, Astronomy, and Philosophy, both Natural and Experimental [...].* 2 Bde., London (repr. Hildesheim 1973).

Huygens, Christian (1673): *Horologium oscillatorium.* Paris.

Ide, Johannes J.A. (1802): *System der reinen und angewandten Mechanik.* 2 Theile, Berlin.

Ihmig, Karl N. (1989): *Hegels Deutung der Gravitation. Eine Studie zu Hegel und Newton.* Frankfurt a.M.

Iltis, Carolyn M. (1970): „D'Alembert and the vis viva controversy", in: *SHPS* 1, 135-144.

Iltis, Carolyn M. (1971): „Leibniz and the vis viva controversy", in: *Isis* 62, 21-35.

Iltis, Carolyn M. (1972): „The Leibnizian-Newtonian Debates: Natural Philosophy and Social Psychology", in: *BJHS* 6, 341-377.

Iltis, Carolyn M. (1973): „The Decline of Cartesianism in mechanics: The Leibnizian-Cartesian debates", in: *Isis* 64, 356-373.

Irmscher, Johannes/Müller, Raimar, Hgg. (1983): *Aristoteles als Wissenschaftstheoretiker. Eine Aufsatzsammlung.* Berlin.

Isenkrahe, Caspar (1879): *Das Rätsel von der Schwerkraft.* Braunschweig.

Isenkrahe, Caspar (1881): „Euler's Theorie von der Ursache der Gravitation", in: *Zeitschrift für Mathematik und Physik (Historisch-literarische Abtheilung)* 26, 1-19.

Jacobi, Carl G.J.: *Opuscula mathematica.* 3 Bde., Berlin 1846/51/71.

Jacobi, Carl G.J.: *Gesammelte Werke.* Hg. auf Veranlassung der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften von C.W. Borchardt (Bd. 1), K. Weierstraß (Bde. 2-7), E. Lottner (Suppl.bd.). 7 Bde. und 1 Suppl.bd., Berlin 1881-91.

Jacobi, Carl G.J. (1884): *Vorlesungen über Dynamik.* 2. Aufl., Berlin ([1]1866) [*Werke* Suppl.bd.].

Jacobi, Carl G.J. (1891): „Über die Pariser polytechnische Schule. Ein Vortrag, gehalten am 22. Mai 1835 in einer öffentlichen Sitzung der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg", in: *Werke* 7, 355-370.

Jacobi, Carl G.J. (1901): „Eine in den hinterlassenen Papieren Franz Neumann's vorgefundene Rede von C.G.J. Jacobi. Veröffentlicht von W. von Dyck", in: *Sitzungsberichte der Bayrischen Akademie der Wissenschaften; Mathematisch-physikalische Klasse* (1902) 31, 203-208 = *Mathematische Annalen* 1903, 56, 252-256.

Jacobi, Carl G.J. (1995): „Eine in den hinterlassenen Papieren Franz Neumann's vorgefundene Rede von C.G.J. Jacobi. Veröffentlicht von W. von Dyck", Übersetzung von Jacobi 1901 in: Knobloch/Pieper/Pulte 1995, 110-114.

Jacobi, Carl G.J. (1996): *Vorlesungen über analytische Mechanik. Berlin 1847/48.* Nach einer Mitschrift von Wilhelm Scheibner hg. von H. Pulte (Dokumente zur Geschichte der Mathematik, 8.). Braunschweig [u.a.].

Jahnke, Hans N./Otte, Michael, Hgg. (1981): *Epistemological and Social Problems of the Sciences in the Early Nineteenth Century*. Dordrecht [u.a.].

Jahnke, Hans N. (1981): „Zahlen und Größen - Historische und didaktische Bemerkungen", in: *Mathematische Semesterberichte* 28(2), 202-229.

Jahnke, Hans N. (1985): „Zur historischen Bedeutung des Begriffs der indirekten Anwendung", in: Steiner/Winter 1985, 48-53.

Jahnke, Hans N. (1990a): *Mathematik und Bildung in der Humboldtschen Reform*. Göttingen.

Jammer, Max (1957): *Concepts of Force*. Cambridge (Mass.).

Jammer, Max (1980): *Das Problem des Raumes. Die Entwicklung der Raumtheorien*. Aus dem Engl. von P. Wilpert. 2. Aufl., Darmstadt (*Concepts of Space*. Cambridge, Mass. 1954).

Jammer, Max (1981): *Der Begriff der Masse in der Physik*. Aus dem Engl. von H. Hartmann. 3. Aufl., Darmstadt ([1]1964) (*Concepts of Mass*. Cambridge, Mass. 1961).

Janich, Peter, Hg. (1981): *Wissenschaftstheorie und Wisenschaftsforschung*. München.

Jardine, Nicholas (1976): „Galileo's Road to Truth and the Demonstrative Regress", in: *SHPS* 7, 277-318.

Jardine, Nicholas (1984): *The Birth of History and Philosophy of Science. Kepler's Defence of Tycho against Ursus*. Cambridge.

Jolly, Phillip G. von (1852): *Die Principien der Mechanik gemeinfaßlich dargestellt*. Stuttgart.

Jouguet, Émile (1908/09): *Lectures de mécanique*. 2 vols., Paris.

Jourdain, Philipp E.B., Hg. (1908): *Abhandlungen über die Prinzipien der Mechanik von Lagrange, Rodrigues, Jacobi und Gauss* (OKEW, 167.). Leipzig.

Jourdain, Philipp E.B. (1913): „The Nature and Validity of the Principle of Least Action", in: *The Monist* 23, 277-293.

Jungnickel, Christa/McCormmach, Russell (1986): *Intellectual Mastery of Nature: Theoretical Physics from Ohm to Einstein*. 2 vols., Chicago [u.a.].

Kaiser, Walter (1981): *Theorien der Elektrodynamik im 19. Jahrhundert*. Hildesheim.

Kaiser, Walter (1982a): „Einleitung zu L. Boltzmann, Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes", in: Boltzmann *Gesamtausgabe* II, 5*-48*.

Kaiser, Walter (1982b): „Boltzmanns mechanische Darstellung von Thermodynamik und Elektrodynamik", in: Sexl/Blackmore 1982, 207-221.

Kambartel, Friedrich (1966): „Der Satz vom zureichenden Grund und das Begründungsproblem der Mechanik. Zu einer Bemerkung von Leibniz im 2. Schreiben an Clarke", in: *Zeitschrift für philosophische Forschung* 20, 457-470.

Kamlah, Andreas (1995): „Two Kinds of Axiomatization of Mechanics", in: *Philosophia Naturalis* 32, 27-46.

Kant, Immanuel: *Gesammelte Schriften*. Hg. von der (Königlich) Preußischen Akademie der Wissenschaften bzw. der (Deutschen) Akademie der Wissenschaften (der DDR). 29 Bde., Berlin (und Leipzig) 1910-1983 [*AA*].

Kant, Immanuel: *Werke in zehn Bänden*. Hg. von W. Weischedel. Darmstadt 1983.

Kant, Immanuel (1755): *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels oder Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes, nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt*. Königsberg [u.a.] [*AA* 1, 215-368].

Kant, Immanuel (1763): *Der einzig mögliche Beweisgrund zu einer Demonstration des Daseins Gottes*. Königsberg [*AA* 2, 63-163].

Kant, Immanuel (1785): *Grundlegung zur Metaphysik der Sitten*. Riga [*AA* 4, 385-463].

Kant, Immanuel (1786): *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. Riga. [*AA* 4, 465-565].

Kant, Immanuel (1787): *Kritik der reinen Vernunft*. 2. Aufl., Riga [*AA* 3].

Kant, Immanuel (1790a): *Erste Fassung der Einleitung in die Kritik der Urteilskraft*, in: *Werke* 8, 171-232].

Kant, Immanuel (1790b): *Kritik der Urtheilskraft*. Riga [*AA* 5, 165-485].

Kant, Immanuel (1793): *Über den Gemeinspruch: Das mag in der Theorie richtig sein, taugt aber nicht für die Praxis*, in: *AA* 8, 273-313.

Kant, Immanuel (1996): *Übergang von den Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik*. Aus dem Opus postumum hg. von I. Heidemann; mit einem editorischen Bericht von G. Büchel. Hildesheim [u.a.].

Kaulbach, Friedrich (1965): *Der philosophische Begriff der Bewegung. Studien zu Aristoteles, Leibniz und Kant*. Köln [u.a.].

Kelsen, Hans (1941): *Vergeltung und Kausalität*. The Hague.

Kepler, Johannes (1939): *Weltharmonik* (*Harmonices mundi*. Linz 1619). Übers. und eing. von M. Caspar. München (repr. Darmstadt 1967).

Killing, Wilhelm K.J. (1885): „Die Mechanik in den Nicht-Euklidischen Raumformen", in: *JRAM* 98, 1-48.

Kirchhoff, Gustav R. (1850): „Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe", in: *JRAM* 40, 51-88.

Kirchhoff, Gustav R. (1865): *Über das Ziel der Naturwissenschaften*. Heidelberg.

Kirchhoff, Gustav R. (1882): *Gesammelte Abhandlungen*. Leipzig.

Kirchhoff, Gustav R. (1897): *Vorlesungen über mathematische Physik*, Bd. 1: *Mechanik*. Hg. von W. Wien. 4. Aufl., Leipzig ([1]1876).

Kitcher, Philip (1981): „Explanatory Unification", in: *Philosophy of Science* 48, 507-531.

Kitcher, Philip (1984): *The Nature of Mathematical Knowledge*. New York [u.a.].

Kitcher, Philip (1986): „Projecting the Order of Nature", in: Butts 1986, 201-235.

Klaucke, Andreas (1990): „Hegels Lagrange-Rezeption", in: König 1990, 130-151.

Klein, Felix (1890/91): „Über neuere englische Arbeiten zur Mechanik (Vortrag auf der Naturforscherversammlung in Halle, 1891)", in: *JDMV* 1, 35-36.

Klein, Felix (1894/95): „Riemann und seine Bedeutung für die Entwicklung der modernen Mathematik", in: *JDMV* 4, 71-87.

Klein, Felix (1897): „Erwerbungen neuer, auf Bernhard Riemann bezüglicher Manuscripte", in: *NGWG* 1897, 189-190.

Klein, Felix (1900): „Allgemeines über angewandte Mathematik", in: Klein/Riecke 1900, 15-25.

Klein, Felix/Riecke, Eduard, Hgg. (1900): *Über angewandte Mathematik und Physik in ihrer Bedeutung für den Unterricht an den höheren Schulen. Nebst Erläuterungen der bezüglichen Göttinger Universitätseinrichtungen. Vorträge, gehalten in Göttingen, Ostern 1900*. Leipzig [u.a.].

Klein, Felix (1904): „Mathematik, Physik, Astronomie an den deutschen Universitäten in den Jahren 1893-1903", in: *JDMV* 13, 457-475.

Klein, Felix (1926/27): *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert*. 2 Bde., Berlin (repr. Darmstadt 1986).

Klein, Hermann (1872): *Die Principien der Mechanik. Historisch und kritisch dargestellt*. Leipzig.

Klein, Martin J. (1972): „Mechanical Explanation at the End of the Nineteenth Century", in: *Centaurus* 17, 58-82

Klein, Martin J. (1974): „Boltzmann, Monocycles and Mechanical Explanation", in: *BSPS* 11, 155-175.

Kleinert, Andreas, Hg. (1980): *Physik im 19. Jahrhundert.* Darmstadt.

Kleinert, Andreas (1985): „Mathematik und anorganische Naturwissenschaften", in: Vierhaus 1985, 218-248.

Kleinpeter, Hans (1898): „Die Entwicklung des Raum- und Zeitbegriffs in der neueren Mathematik und Mechanik und seine Bedeutung für die Erkenntnistheorie", in: *Archiv für systematische Philosophie* 4, 32-43.

Kleinpeter, Hans (1905): *Die Erkenntnistheorie der Naturforschung der Gegenwart.* Leipzig.

Kleinpeter, Hans (1913): *Der Phänomenalismus. Eine naturwissenschaftliche Weltanschauung.* Leipzig.

Kline, Morris (1972): *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times.* New York.

Kline, Morris (1977): *Calculus: An Intuitive and Physical Approach.* New York.

Klügel, Georg S. (1789): *Grundsätze der reinen Mechanik* (Eberhard's Philosophisches Magazin Bd. I u. II.) Halle.

Klügel, Georg S. (1792) *Anfangsgründe der Naturlehre.* Leipzig.

Klügel, Georg S. (1803-31): *Mathematisches Wörterbuch. Erste Abtheilung: Die reine Mathematik.* 5 Bde., Leipzig.

Kneser, Adolf (1928): *Das Prinzip der kleinsten Wirkung von Leibniz bis zur Gegenwart.* Leipzig.

Knight, David (1986): *The Age of Science: The Scientific World-View in the Nineteenth Century.* Oxford [u.a.].

Knobloch, Eberhard (1980): „Einfluß der Symbolik und des Formalismus auf die Entwicklung des mathematischen Denkens", in: *BWG* 3, 77-94.

Knobloch, Eberhard/Pieper, Herbert/Pulte, Helmut (1995): „,... das Wesen der reinen Mathematik verherrlichen'. Reine Mathematik und mathematische Naturphilosophie bei C.G.J. Jacobi. Mit seiner Rede zum Eintritt in die philosophische Fakultät der Universität Königsberg", in: *Mathematische Semesterberichte* 42, 99-132.

Kockelmans, Joseph, ed. (1968): *Philosophy of Science: The Historical Background.* New York.

Köhnke, Karl Ch. (1986): *Entstehung und Aufstieg des Neukantianismus - Die deutsche Universitätsphilosophie zwischen Idealismus und Positivismus.* Frankfurt a.M. (repr. 1993).

Koenig, Edmund (1899): „Die Unterscheidung von reiner und angewandter Mathematik bei Kant", in: *Kant-Studien* 3, 373-402.

König, Gert (1966): *Der Begriff des Exakten. Eine bedeutungsdifferenzierende Untersuchung* (Monographien zur philosophischen Forschung, 38.). Meisenheim a.G.

König, Gert (1967): „Naturphilosophie", in: A. Diemer/I. Frenzel, Hgg.: *Fischer Lexikon Philosophie.* Frankfurt a.M., 186-209.

König, Gert (1968a): *Die Metatheorie der Naturwissenschaften im 19. Jahrhundert. Ein Beitrag zur Geschichte der Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaften.* [unveröffentlichtes Ms.].

König, Gert (1968b): „Der Wissenschaftsbegriff bei Helmholtz und Mach", in: Diemer 1968a, 90-114.

König, Gert (1968c): „Vergleich der entwickelten Systemproblematik mit der J.H. Lamberts", in: Diemer 1968d, 178-180.

König, Gert (1971): *Was heißt Wissenschaftstheorie?* Düsseldorf.
König, Gert (1972): „Extremalprinzipien", in: *HWP* 2, 880-883.
König, Gert/Geldsetzer, Lutz (1973): „Vorbemerkungen der Herausgeber zum 16. Band", in: Fries *Sämtliche Schriften* 16, V*-LII*.
König, Gert/Geldsetzer, Lutz (1979): „Einleitung zur Abteilung" [und] „Vorbemerkungen der Herausgeber zum 13. Band", in: Fries *Sämtliche Schriften* 13, S. 17*-94*.
König, Gert (1984): Art. „Naturwissenschaft", in: *HWP* 6, 641-650.
König, Gert, Hg. (1990): *Konzepte des mathematisch Unendlichen im 19. Jahrhundert* (Studien zur Wissenschafts-, Sozial- und Bildungsgeschichte der Mathematik, 5.). Göttingen.
König, Gert/Pulte, Helmut (1998): Art. „Theorie II. 20. Jh. (Wissenschaftstheorie)", in: *HWP* 10, 1146-1154.
König, Johann S. (1751): „De universali principio aequilibrii et motus, in vi viva reperto, deque nexu inter vim vivam et actionem, utriusque minimo, dissertatio", in: Nova Acta Eruditorum, 125-135, 144, 162-176 [Euler *Opera omnia* (2)5, 303-324].
Koenigsberger, Leo (1896): *Hermann von Helmholtz's Untersuchungen über die Grundlagen der Mathematik und Mechanik.* Leipzig.
Koenigsberger, Leo (1901): *Die Prinzipien der Mechanik.* Leipzig.
Koenigsberger, Leo (1902/03): *Hermann von Helmholtz.* 3 Bde., Braunschweig.
Koenigsberger, Leo (1904a): *Carl Gustav Jacob Jacobi.* Leipzig.
Koenigsberger, Leo (1904b): „Carl Gustav Jacob Jacobi. Rede zu der von dem internationalen Mathematiker-Kongreß in Heidelberg veranstalteten Feier der hundertsten Wiederkehr seines Geburtstages gehalten am 9. August 1904", in: *JDMV* 13, 405-435.
Koenigsberger, Leo (1911): „Zur Erinnerung an Jacob Friedrich Fries", in: *Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 9, 3-28.
Körner, Stephan (1968): *Philosophie der Mathematik. Eine Einführung.* München.
Körner, Stephan (1970): *Erfahrung und Theorie. Ein wissenschaftstheoretischer Versuch.* Frankfurt a.M.
Koetsier, Teun (1991): *Lakatos' Philosophy of Mathematics. A Historical Approach.* Amsterdam [u.a.].
Kötter, Rudolf (1991): „Kants Schwierigkeiten mit der Physik. Ansätze zu einer problemorientierten Interpretation seiner späten Schriften zur Philosophie der Naturwissenschaft", in: *Übergang. Untersuchungen zum Spätwerk Immanuel Kants.* Hg. vom Forum für Philosophie Bad Homburg. Frankfurt a.M., 157-184.
Koyré, Alexandre/ Cohen, I. Bernard (1962): „Newton and the Leibniz-Clarke Correspondance", in: *AHES* 15, 63-126.
Koyré, Alexandre (1965): *Newtonian Studies.* London.
Koyré, Alexandre (1988): *Galilei. Die Anfänge der neuzeitlichen Wissenschaft.* Aus dem Engl. und Franz. von R. Dragsta. Berlin.
Krafft, Fritz (1967): „Die Anfänge einer theoretischen Mechanik und die Wandlung ihrer Stellung zur Wissenschaft von der Natur", in: Baron 1967, 12-33.
Krafft, Fritz (1970): *Dynamische und statische Betrachtungsweise in der antiken Mechanik.* Wiesbaden.
Krafft, Fritz/Mainzer, Klaus (1980): Art. „Mechanik", in: *HWP* 5, 850-959.

Krafft, Fritz (1981): „Das Verdrängen teleologischer Denkweisen in den exakten Naturwissenschaften", in: Poser 1981a, 31-59.

Krafft, Fritz (1982): *Das Selbstverständnis der Physik im Wandel der Zeit*. Weinheim.

Krafft, Fritz/Meyer-Abich, Adolf, Hgg. (1970): *Große Naturwissenschaftler: Biographisches Lexikon*. Frankfurt a.M.

Krafft, Jens (1787): *Mechanik, aus der lateinischen mit Zusätzen vermehrten Uebersetzung des Herrn Prof. Tetens ins Deutsche übersetzt und hin und wieder verbessert von J.Ch.A. Steingrüber*. Dresden.

Krause, Albrecht (1878) *Kant und Helmholtz über den Ursprung und die Bedeutung der Raumanschauung und der geometrischen Axiome*. Lahr.

Krings, Hermann/Baumgartner, Hans M./Wild, Christoph, Hgg. (1973/74): *Handbuch philosophischer Grundbegriffe*. 6 Bde., München.

Kröber, Günter, Hg. (1968): *Der Gesetzesbegriff in der Philosophie und den Einzelwissenschaften*. Berlin.

Krohn, Wolfgang (1981): „Zur Geschichte des Gesetzesbegriffs in Naturphilosophie und Naturwissenschaft", in: M. Hahn/H.-J. Sandkühler, Hgg.: *Gesellschaftliche Bewegung und Naturprozeß*. Köln, 61-70.

Krohn, Wolfgang (1994): „Die Natur als Labyrinth, die Erkenntnis als Inquisition, das Handeln als Macht: Bacons Philosophie der Naturerkenntnis betrachtet in ihren Metaphern", in: Schäfer/Ströker 1994, S. 59-100.

Kronecker, Leopold (1891): „Verzeichnis der Vorlesungen, welche Jacobi an den Universitäten zu Berlin und zu Königsberg gehalten hat", in: *JRAM* 108, 332-334.

Krüger, Lorenz, Hg. (1970): *Erkenntnisprobleme der Naturwissenschaften. Texte zur Einführung in die Philosophie der Wissenschaft*. Köln [u.a.].

Krug, Wilhelm Traugott (1827-29): *Allgemeines Handwörterbuch der philosophischen Wissenschaften nebst ihrer Literatur und Geschichte*. 5 Bde., Leipzig.

Küttler, Wolfgang/Rüsen, Jörn/Schulin, Ernst, Hgg. (1993): *Geschichtsdiskurs, Bd. 1: Grundlagen und Methoden der Historiographiegeschichte*. Frankfurt a.M.

Kuhn, Thomas S. (1977): *Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte*. Hg. von L. Krüger; übers. von H. Vetter. Frankfurt a.M.

Kuhn, Thomas S. (1981): *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Übers. von K. Simon/H. Vetter. 2. rev. und um das Postskriptum 1969 erg. Aufl., Frankfurt a.M. (*The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago 1970; [1]1962).

Kutschmann, Werner (1983): *Die Newtonsche Kraft. Metamorphose eines wissenschaftlichen Begriffs*. Stuttgart.

Kuznecov, Boris G. (1970): *Von Galilei bis Einstein*. Deutsch hg. von G. Buchheim/S. Wollgast. Berlin (Orig.: Moskau 1966).

Lagrange, Joseph L.: *Œuvres*. Ed A. Serret/G. Darboux. 14 vols., Paris 1867-92.

Lagrange, Joseph L. (1759): „Recherche sur la méthode de maximis et minimis", in: *Miscellanea Taurinensia* 1, 18-32 [*Œuvres* 1, 3-20].

Lagrange, Joseph L. (1760a): „Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et les minima des formules indéfinies", in: *Miscellanea Taurinensia* (1762) 2, 173-195 [*Œuvres* 1, 335-362].

Lagrange, Joseph L. (1760b): „Application de la méthode exposée dans le mémoire précédent à la solution de différens Problèmes de Dynamique", in: *Miscellanea Taurinensia* (1762) 2, 196-268 [*Œuvres* 1, 365-468].

Lagrange, Joseph L. (1764): „Recherches sur la libration de la Lune dans lesquelles on tâche de résoudre la Question proposée par l'Académie Royale des Sciences, pour le Prix de l'année 1764", in: *Recueil de pièces qui ont remporté les Prix de l'Académie Royale des Sciences de Paris* (1777) 9, 1-50 [*Œuvres* 6, 5-61].

Lagrange, Joseph L. (1772): „Sur une nouvelle espèce du calcul relative à la différentiation et à l'intégration des quantités variables", in: *MASB* (1774) 185-221 [*Œuvres* 3, 439-476].

Lagrange, Joseph L. (1780): „Théorie de la libration de la lune, et des autres Phénomènes qui dépendent de la figure non sphérique de cette Planète", in: *MASB* (1782) 203-209 [*Œuvres* 5, 5-123].

Lagrange, Joseph L. (1788): *Méchanique Analitique*. Paris.

Lagrange, Joseph L. (1797a): *Théorie des fonctions analytiques contenant les principes du calcul différentiel, dégagés de toute considération d'infiniment petits ou d'évanouissans, de limites ou de fluxions, et réduits à l'analyse algebrique des quantités finies*. Paris.

Lagrange, Joseph L. (1797b): *Analytische Mechanik*. Deutsch hg. von F.W.A. Murhard. Göttingen (*Méchanique Analitique*. Paris 1788).

Lagrange, Joseph L. (1798): „Sur le principe des vitesses virtuelles", in: *JEP* (1)2, cah. 5, 115-118 [*Œuvres* 3, 315-321].

Lagrange, Joseph L. (1798/99): *Theorie der analytischen Funktionen*. Deutsch von J.P. Grüson. 2 Bde., Berlin (*Théorie des fonctions analytiques*. Paris 1797).

Lagrange, Joseph L. (1811/15): *Mécanique Analytique*. Nouvelle édition, revue et augmentée par l'auteur. 2 vols., Paris.

Lagrange, Joseph L. (1813): *Théorie des fonctions analytiques*. Nouvelle édition, revue et augmentée par l'auteur. Paris.

Lagrange, Joseph L. (1823): *Theorie der analytischen Funktionen (Mathematische Werke, 1.)*. Deutsch hg. von A.L. Crelle. Berlin (*Théorie des fonctions analytiques*. Paris 1813).

Lagrange, Joseph L. (1847): *Théorie des fonctions analytiques*. Troisième édition, revue et suivie d'une note par M.J.-A. Serret. Paris [*Œuvres* 9].

Lagrange, Joseph L. (1853/55): *Mécanique analytique*. Revue, corrigée et annotée par J. Bertrand. 2 vols., Paris [*Œuvres* 11, 12].

Lagrange, Joseph L. (1887): *Analytische Mechanik*. Deutsch hg. von H. Servus (*Mécanique Analytique*. Paris 1811/15).

Laitko, Hubert/Vogt, Annette (1977): „Der weltanschauliche Standort Bernhard Riemanns", in: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 11, 1344-1356.

Lakatos, Imre/Musgrave, Alan, eds. (1974): *Kritik und Erkenntnisfortschritt*. Übers. von P.K. Feyerabend/A. Szabó. Braunschweig (*Criticism and the Growth of Knowledge*. London 1970).

Lakatos, Imre (1976): *Proofs and Refutations. The Logic of Mathematical Discovery*. Cambridge (repr. 1995).

Lakatos, Imre (1978): *Philosophical Papers*. Ed. by J. Worroll/G. Currie. 2 vols., Cambridge.

Lakatos, Imre (1982): *Philosophische Schriften*. Hg. von J. Worrall/G. Currie; aus dem Engl. von A. Szabó/H. Vetter. 2 Bde., Braunschweig (*Philosophical Papers*. 2 vols., Cambridge 1978).

Lambert, Johann H.: *Philosophische Schriften*. Hg. von H.W. Arndt. [Bisher] 10 Bde., Hildesheim 1965ff.

Lambert, Johann H. (1782/87): *Logische und philosophische Abhandlungen*. Hg. von J. Bernoulli. 2 Bde., Berlin [u.a].

Lambert, Johann H. (1946/48): *Mathematische Werke*. Hg. von A. Speiser. 2 Bde., Zürich.

Lambert, Johann H. (1990): *Neues Organon oder Gedanken über die Erforschung und Bezeichnung des Wahren und dessen Unterscheidung von Irrtum und Schein*. Hg. von G. Schenk. Berlin 1990 ([1]1764).

Lampariello, Giovanni (1957): „B. Riemanns physikalisches Denken", in: Naas/Schröder 1957, 222-234.

Lanczos, Cornelius (1966): *The Variational Principles of Mechanics*. Toronto.

Lanczos, Cornelius (1967): „William Rowan Hamilton - An Appreciation", in: *University Review* (National University of Ireland) 4, 151-166.

Lanczos, Cornelius (1970): *Space through the Ages. The Evolution of Geometrical Ideas from Pythagoras to Hilbert and Einstein*. London [u.a.].

Lange, Friedrich A. (1873/75): *Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart*. 2 Bde., 2. Aufl., Iserlohn (repr. Frankfurt a.M. 1974; [1]1866).

Lange, Heinrich (1954/61): *Geschichte der Grundlagen der Physik*. 2 Bde., Freiburg [u.a.].

Lange, Ludwig (1885a): „Ueber das Beharrungsgesetz", in: *BGWL* 37, 333-351.

Lange, Ludwig (1885b): „Ueber die wissenschaftliche Fassung des Beharrungsgesetzes", in: W. Wundt, Hg.: *Philosophische Studien* 2, 266-297.

Lange, Ludwig: (1885c): „Nochmals über das Beharrungsgesetz", in: W. Wundt, Hg.: *Philosophische Studien* 2, 539ff.

Lange, Ludwig (1886): *Die geschichtliche Entwicklung des Bewegungsbegriffs und ihr voraussichtliches Endergebnis. Ein Beitrag zur historischen Kritik der mechanischen Principien*. Leipzig.

Lange, Ludwig (1902): „Das Inertialsystem vor dem Forum der Naturforschung. Kritisches und Antikritisches", in: W. Wundt, Hg.: *Philosophische Studien* 20, 12-71.

Langsdorff, Karl E. (1802): *Grundlehren der mechanischen Wissenschaften*. Erlangen.

Laplace, Pierre S. de: *Œuvres complètes*. Publiées sous les auspieces de l'Académie des Science. 14 vols., Paris 1878-1912 (repr. Hildesheim 1966).

Laplace, Pierre S. de (1773): „Recherches sur l'intégration des équations différentielles aux différences finies et sur leur usage dans la théorie des hasards", in: *MASP* 1776 [*Œuvres* 8, 69-197].

Laplace, Pierre S. de (1782): „Mémoire sur les approximations des formules qui sont fonctions de très grands nombres", in: *MASP* 7, 1786 [*Œuvres* 10, 209-291].

Laplace, Pierre S. de (1783): „Suite du mémoire sur les approximations des formules qui sont fonctions de très grands nombres (Suite)", in: *MASP* 1786, 423-467 [*Œuvres* 10, 295-338].

Laplace, Pierre S. de (1799-1825): *Traité de mécanique céleste*. 5 vols., Paris [*Œuvres* I-V].

Laplace, Pierre S. de (1814): *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris [*Œuvres* 7, I-CLIII].

Laplace, Pierre S. de (1820): *Théorie analytique des probabilités*. 3. éd., Paris ([1]1812) [*Œuvres* 7].

Laplace, Pierre S. de (1835): *Exposition du système du monde*. 6. éd., Paris ([1]1796) [*Œuvres* 6].

Laplace, Pierre S. de (1932): *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*. Aus dem Franz. hg. von R. von Mises. Leipzig (*Essai philosophique sur les probabilités*. Paris 1814).

Laßwitz, Kurd (1878): *Atomistik und Kriticismus. Ein Beitrag zur erkenntnistheoretischen Grundlegung der Physik*. Braunschweig.

Laudan, Larry (1968): „Theories of Scientific Method from Plato to Mach: A Bibliographical Review", in: *HS* 7, 1-64.

Laudan, Larry (1981): *Science and Hypothesis. Historical Essays on Scientific Methodology.* Dordrecht [u.a.].

Laugwitz, Detlef (1996): *Bernhard Riemann, 1826-1866. Wendepunkt in der Auffassung der Mathematik.* Basel [u.a.].

Layman, R. (1976): „Newton's Bucket Experiment", in: *JHI* 16, 399-414.

Lefèvre, Wolfgang, Hg. (2001): *Between Leibniz, Newton and Kant. Philosophy and Science in the Eighteenth Century* (BSPS, 220.). Dordrecht [u.a.].

Lehmann, Jacob W.H. (1831): *Anfangsgründe der höheren Mechanik, nach der antiken, rein geometrischen Methode beobachtet.* Berlin.

Lehmus, Daniel-Ch.L. (1836): *Anwendung des höheren Calcüls auf geometrische und mechanische, besonders ballistische Aufgaben.* Leipzig.

Lehmus, Daniel-Ch.L. (1842): *Kurzer Leitfaden für den Vortrag der höhern Analysis, höhern Geometrie und analytischen Mechanik.* Berlin.

Lehmus, Daniel-Ch.L. (1845): *Die reine Mathematik und die mechanischen Wissenschaften.* Berlin.

Leibniz, Gottfried W.: *Mathematische Schriften.* Hg. von C.I. Gerhardt. 7 Bde., Berlin [u.a.] 1849-1863.

Leibniz, Gottfried W.: *Philosophische Schriften.* Hg. von C.I. Gerhardt. 7 Bde., Berlin 1875-1890.

Leibniz, Gottfried W. (1686): „Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum circa legem naturalem, secundum quam volunt a Deo eandem semper quantitatem motus conservari", in: *Acta Eruditorum*, 161-163 [*Mathematische Schriften* 2(2), 117-119].

Leibniz, Gottfried W. (1689): *Dynamica de Potentia et Legibus Naturae corporae* [*Mathematische Schriften* 6, 281-514].

Lenoir, Timothy (1982): *The Strategy of Life. Teleology and Mechanics in Nineteenth Century German Biology.* Dordrecht.

Lewin, M. (1898): *Über die Prinzipien von Hamilton und Maupertuis.* Leipzig.

Lichtenberg, Georg Ch. (1963): *Aphorismen, Essays, Briefe.* Hg. von K. Batt. Leipzig (repr. 1992).

Lichtenstein, Leon (1923): *Astronomie und Mathematik in ihrer Wechselwirkung.* Leipzig.

Liebmann, Heinrich (1927): „Zur Erinnerung an Carl Neumann", in: *JDMV* 36, 174-178.

Liebmann, Otto (1911): *Zur Analysis der Wirklichkeit. Eine Erörterung der Grundprobleme der Philosophie.* 4. Aufl., Straßburg ([1]1876).

Lind, Gunter (1992): *Physik im Lehrbuch 1700-1850. Zur Geschichte der Physik und ihrer Didaktik in Deutschland.* Berlin [u.a.].

Lindt, Richard (1904): „Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten; seine Beweise und die Unmöglichkeit seiner Umkehrung bei Verwendung des Begriffs ‚Gleichgewicht eines Massensystems'", in: *Abhandlungen zur Geschichte der Mathematischen Wissenschaften* 18, 145-196.

Link, Heinrich F. (1798): *Grundriß der Physik für Vorlesungen.* Hamburg.

Liouville, J. (1856): „Expression remarquable de la quantité qui est un minimum en vertu du principe de la moindre action", in: *Journal de mathématique* 1, 297.

Lipschitz, Rudolf O. (1876): „Bedeutung der theoretischen Mechanik", in: R. Virchow/F. Holtzendorff, Hgg.: *Sammlung gemeinverständlicher wissenschaftlicher Vorträge*. Bd. 11. Berlin, 109-140.
Lipschitz, Rudolf O. (1877): „Bemerkungen zu dem Prinzip des kleinsten Zwanges", in: *JRAM* 82, 316ff.
Lloyd, Geoffrey E.R. (1996): *Aristotelian explorations*. Cambridge [u.a.].
Locke, John (1979): *An Essay Concerning Human Understanding*. [4th ed., London 1700] Ed. by P.H. Nidditch. Oxford ([1]1690).
Lorenz, Bettina (1985): *Der Anteil Christian Wolffs an der Rezeption von Grundprinzipien der Newtonschen Physik zu Beginn des 18. Jahrhunderts. Ein Beitrag zum Verhältnis von Physik und Frühaufklärung*. Leipzig (Diss.).
Lorenzen, Paul (1960): *Die Entstehung der exakten Wissenschaften*. Berlin [u.a.].
Lorenzen, Paul (1974): *Konstruktive Wissenschaftstheorie*. Frankfurt a.M.
Lorey, Wilhelm (1916): *Das Studium der Mathematik an den deutschen Universitäten seit Anfang des 19. Jahrhunderts*. Leipzig [u.a.].
Losee, John (1977): *Wissenschaftstheorie. Eine historische Einführung*. Übers. von W. Hoening. München (*A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. London [u.a.] 1972).
Lotze, Rudolph H. (1883): *Grundzüge der Logik und Encyclopädie der Philosophie*. Leipzig.
Lotze, Rudolph H. (1889): *Grundzüge der Naturphilosophie: Diktate aus den Vorlesungen*. 2. Aufl., Leipzig ([1]1882).
Lützen, Jesper (1989): „The Geometrization of Analytical Mechanics. A Pioneering Contribution of J. Liouville (ca. 1850)", in: Rowe/Mc Clearly 1989 II, 77-97.
Lützen, Jesper (1990): *Joseph Liouville, 1809-1882: Master of Pure and Applied Mathematics* (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences, 15.). New York [u.a.].
Mach, Ernst (1863): *Compendium der Physik für Mediciner*. Wien.
Mach, Ernst (1872): *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. Prag.
Mach, Ernst (1909): *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*. Zweiter, unveränderter Abdruck. Leipzig ([1]1872).
Mach, Ernst (1910): „Die Leitgedanken meiner naturwissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen", in: *Physikalische Zeitschrift* 11, 599-606.
Mach, Ernst (1915): *Kultur und Mechanik*. Stuttgart.
Mach, Ernst (1933): *Die Mechanik, historisch-kritisch dargestellt*. 9. Aufl., Leipzig (repr. Darmstadt 1982; [1]1883).
Mach, Ernst (1980): *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*. 5. Aufl., Darmstadt ([1]1905).
Mach, Ernst (1986): *Populärwissenschaftliche Vorlesungen*. 5. Aufl., Wien [u.a.] ([1]1982).
Mach, Ernst (1991): *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*. 9. Aufl., Darmstadt ([1]1886).
MacLaurin, Colin (1748): *An Account of Sir Isaac Newton's Philosophical Discoveries*. London (repr. Hildesheim [u.a.]).
Madden, Edward H., ed. (1966): *Theories of Scientific Method: The Renaissance through the Nineteenth Century*. Seattle [u.a.].
Mädler, Johann H. (1846b): *Astronomische Briefe, 1844-1846*. Mitau.
Mädler, Johann H. (1847/48): *Untersuchungen über die Fixstern-Systeme*. 2 Bde., Mitau [u.a.].

Maier, Anneliese (1938): *Die Mechanisierung des Weltbildes im 17. Jahrhundert.* Leipzig.
Maier, Anneliese (1955): *Metaphysische Hintergründe der spätscholastischen Naturphilosophie.* Rom.
Maier, Anneliese (1958): *Zwischen Philosophie und Mechanik* (Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik, 5.). Rom.
Mainzer, Klaus (1980): *Geschichte der Geometrie.* Mannheim [u.a.].
Majer, Ulrich (1985): „Hertz, Wittgenstein und der Wiener Kreis", in: H.-J. Dahms, Hg.: *Philosophie, Wissenschaft und Aufklärung.* Berlin, 40-66.
Mao, Yi-Hong (1990): *Die Teleologie in der Wissenschaftskonzeption von Fries und Kant.* Düsseldorf (Diss.).
Martin, Gottfried (1960): *Immanuel Kant. Ontologie und Wissenschaftstheorie.* 3. Aufl., Köln ([1]1951).
Mathieu, Émile L. (1878): *Dynamique analytique.* Paris.
Maupertuis, Pierre L. M. de (1768): *Œuvres.* 4 Vols., Lyon (repr. Hildesheim [u.a.] 1974).
Maupertuis, Pierre L. M. de (1732): *Discours sur les différentes Figures des Astres avec une Exposition des Systèmes de MM. Descartes et Newton.* Paris [*Œuvres* 1, 79-170].
Maupertuis, Pierre L.M. de (1740): „Loi du Repos des Corps", in: *MASP* 1742, 170-176 [mit Änderungen in: *Œuvres* 4, 45-64].
Maupertuis, Pierre L.M. de (1744): „Accord des différentes Loix de la Nature qui avoient jusqu'ici paru incompatibles", in: *MASP* 1748, 417-426 [mit Änderungen in: *Œuvres* 4, 3-28].
Maupertuis, Pierre L.M. de (1746): „Les Lois du Mouvement et du Repos déduites d'un Principe Métaphysique", in: *HASB* (1748) 2, 267-294 [mit Änderungen in: *Œuvres* 4, 31-42].
Maupertuis, Pierre L.M. de (1750): *Essai de Cosmologie.* Berlin [*Œuvres* 1, ix-xxxvi und 3-78].
Maxwell, James C.: *The Scientific Papers.* Ed. by W.D. Niven. 2 vols., Cambridge 1890.
Maxwell, James C. (1873): *Treatise on Electricity and Magnetism.* 2 vols., Oxford.
Maxwell, James C. (1877): *Matter and Motion.* London (repr. 1888).
Mayer, Adolph (1869/70): „Der Satz der Variationsrechnung, welcher dem Principe der kleinsten Wirkung in der Mechanik entspricht", in: *Annalen der Mathematik* 2, 143-149.
Mayer, Adolph (1877): *Geschichte des Princips der kleinsten Action.* Leipzig.
Mayer, Adolph (1886): „Die beiden allgemeinen Sätze der Variationsrechnung, welche den beiden Formen des Princips der kleinsten Action in der Dynamik entsprechen", in: *BGWL* 38, 343-355.
McGuire, J.E. (1968): „The Origin of Newton's Doctrine of Essential Qualities", in: *Centaurus* 12, 233-260.
McGuire, J.E. (1974): „Forces, Powers, Aethers and Fields", in: *BSPS* 14, 119-159.
McGuire, J.E. (1978): „Existence, Actuality and Necessity: Newton on Space and Time", in: *AS* 35, 463-508.
McLaughlin, Peter (1989): *Kants Kritik der teleologischen Urteilskraft* (Abhandlungen zur Philosophie, Psychologie und Pädagogik, Bd. 221.). Bonn.
Mehrtens, Herbert/Bos, Henk/Schneider, Ivo, eds. (1981): *Social History of Nineteenth Century Mathematics.* Boston [u.a.].
Mehrtens, Herbert (1981): „Mathematicians in Germany circa 1800", in: Jahnke/Otte 1981, 401-420.
Mehrtens, Herbert (1990): *Moderne-Sprache-Mathematik. Eine Geschichte des Streits um die Grundlagen der Disziplin und des Subjekts formaler Systeme.* Frankfurt a.M.

Meli, Domenico B. (1993): *Equivalence and Priority: Newton versus Leibniz*. Oxford.
Merz, John Th. (1896-1914): *A History of European Thought in the Nineteenth Century*. 4 vols., Edinburgh (repr. New York 1965).
Mill, John St. (1862/63): *System der deductiven und inductiven Logik. Eine Darlegung der Principien wissenschaftlicher Forschung, insbesondere der Naturforschung*. Aus dem Engl. von J. Schiel. 2 Bde., 2. Aufl., Leipzig ([1]1849) (*A System of Logic, Ratiocinative and Inductive*. 2 vols., London 1843).
Minding, Ferdinand (1838): *Handbuch der theoretischen Mechanik. Zunächst zum Gebrauche in Vorlesungen*. Berlin.
Minding, Ferdinand (1844): „Mechanik", in: H.W. Dove/L. Moser, Hgg.: *Repertorium der Physik*, Bd. 5., Berlin, 1-87.
Minkowski, Hermann (1905): „Peter Gustav Lejeune Dirichlet und seine Bedeutung für die heutige Mathematik", in: *JDMV* 14, 149-163.
Misch, Georg (1901): „Zur Entstehung des französischen Positivismus", in: *Archiv für Geschichte der Philosophie* 14, 1-39 und 156-209.
Mittelstaedt, Peter (1970): *Klassische Mechanik*. Mannheim.
Mittelstraß, Jürgen, Hg.: *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. 4 Bde., Bde. 1,2: Mannheim [u.a.] 1980/84 (Korr. Nachdruck Stuttgart [u.a.] 1995/96); Bde. 3,4: Stuttgart [u.a.] 1995/96 [*EPW*].
Mittelstraß, Jürgen (1962): *Die Rettung der Phänomene. Ursprung und Geschichte eines antiken Forschungsprinzips*. Berlin.
Mittelstraß, Jürgen (1970): *Neuzeit und Aufklärung*. Berlin.
Mittelstraß, Jürgen (1971): „The Galilean Revolution. The Historical Fate of a Methodological Insight", in: *SHPS* 2, 297-328.
Mittelstraß, Jürgen (1974): „Prolegomena zu einer konstruktiven Theorie der Wissenschaftsgeschichte", in: Ders.: *Die Möglichkeit von Wissenschaft*. Frankfurt a.M., 106-144.
Mittelstraß, Jürgen (1977): „Historismus in der neueren Wissenschaftstheorie", in: *Studia Leibnitiana* Sonderheft 6, 43-56.
Mittelstraß Jürgen (1981): „Rationale Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte", in: Janich 1981, 89-111.
Mittelstraß, Jürgen (1984): Art. „Laplacescher Dämon", in: *EPW* 2, 540-542.
Mittelstraß, Jürgen (1988): „Philosophische Grundlagen der Wissenschaften. Über wissenschaftstheoretischen Historismus, Konstruktivismus und Mythen des wissenschaftlichen Geistes", in: Hoyningen-Huene/Hirsch 1988, 179-212.
Mittelstraß, Jürgen (1995): „Galilei als Methodologe", in: *BWG* 18, 15-25.
Mittelstraß, Jürgen (1996): Art. „Theoria", in: *EPW* 4, 259-260.
Möbius, August F. (1837): *Lehrbuch der Statik*. 2 Theile, Leipzig.
Montucla, John É. (1799-1802): *Histoire des mathématiques*. Nouvelle Édition, considérablément augmentée. 4 vols., Paris (repr. 1968; [1]1758).
Moulines, Carlos U. (1988): „Die Entstehung und Struktur der Axiomatisierung der Mechanik durch I. Newton", in: Poser/Burrichter 1988, 47-74.
Moyer, Donald F. (1977): „Energy, Dynamics, Hidden Machinery: Rankine, Thomson and Tait, Maxwell", in: *SHPS* 8, 251-268.
Moyer, Donald F. (1978): „Continuum Mechanics and Field Theory: Thomson and Maxwell", in: *SHPS* 9, 35-50.

Müller, Aloys (1911): *Das Problem des absoluten Raums und seine Beziehung zum allgemeinen Raumproblem*. Braunschweig.

Mueller, Ian (1969): „Euclid's Elements and the Axiomatic Method", in: *BJPS* 20, 289-309.

Müller, Klaus E./Rüsen, Jörn, Hgg. (1997): *Historische Sinnbildung*. Reinbek bei Hamburg.

Muncke, Georg W. (1809): *System der atomistischen Physik*. Hannover.

Mutschler, Hans-Dieter (1990): *Spekulative und empirische Physik: Aktualität und Grenzen der Naturphilosophie Schellings*. Stuttgart.

Naas, J./Schröder, K., Hgg. (1957): *Der Begriff des Raumes in der Geometrie: Bericht von der Riemann-Tagung des Forschungsinstituts für Mathematik* (Schriftenreihe des Forschungsinstituts für Mathematik, 1.). Berlin.

Nagel, Ernest (1971): *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*. 3. ed., London ([1]1961).

Narr, Friedrich (1875): *Einleitung in die theoretische Mechanik*. Leipzig.

Natorp, Paul (1923): *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Leipzig [u.a.] ([1]1910).

Nelson, Leonard, Hg. (1906): „Vier Briefe von Gauss und Wilhelm Weber an Fries", in: *Abhandlungen der Friesschen Schule. Neue Folge*. 1(3), 431-440.

Nelson, Leonard (1962): *Fortschritte und Rückschritte der Philosophie. Von Hume und Kant bis Hegel und Fries*. Aus dem Nachlaß hg. von J. Kraft. Frankfurt a.M.

Neuenschwander, Erwin (1981a): „Lettres de Bernhard Riemann a sa famille", in: *Cahiers du Séminaire d'histoire des Mathématiques* 2, 85-131.

Neuenschwander, Erwin (1981b): „Über die Wechselwirkungen zwischen der französischen Schule, Riemann und Weierstraß. Eine Übersicht mit zwei Quellenstudien", in: *AHES* 24, 221-225.

Neuenschwander, Erwin (1988): „A Brief Report on a Number of Recently Discovered Sets of Notes on Riemann's Lectures and on the Transmission of the Riemann *Nachlass*", in: *HM* 15, 101-113.

Neumann, Carl (1865a): *Der gegenwärtige Standpunct der mathematischen Physik. Akademische Antrittsrede gehalten in der Aula der Universität Tübingen am 9. November 1865*. Tübingen.

Neumann, Carl (1865b): *Das Dirichlet'sche Princip in seiner Anwendung auf die Riemann'schen Flächen*. Leipzig.

Neumann, Carl (1868a): „Theoria nova phaenomenis electricis applicanda", in: *Annali di matematica pura ed applicata* (2)2, 120-128.

Neumann, Carl (1868b): *Die Prinzipien der Elektrodynamik. Eine mathematische Untersuchung*. Tübingen.

Neumann, Carl (1869a): „Untersuchungen über die Bewegung eines Systems starrer Körper", in: *BGWL* 21, 132ff.

Neumann, Carl (1869b): „Ueber den Satz der virtuellen Verrückungen", in: *BGWL* 21, 257-280.

Neumann, Carl (1869c): „Geometrische Untersuchungen über die Bewegung eines starren Körpers", in: *Mathematische Annalen* 1, 195-207.

Neumann, Carl (1870): *Ueber die Principien der Galilei-Newton'schen Theorie. Akademische Antrittsrede gehalten in der Aula der Universität Leipzig am 3. November 1869*. Leipzig.

Neumann, Carl (1879): „Über das Prinzip der virtuellen oder fakultativen Verrückungen", in: *BGWL* 31, 53-64.

Neumann, Carl (1886): „Über eine einfache Methode zur Begründung des Prinzips der virtuellen Verrückungen", in: *Mathematische Annalen* 27, 502-505.
Neumann, Carl (1887): „Grundzüge der analytischen Mechanik, insbesondere der Mechanik starrer Körper", in: *BGWL* 39, 153-190.
Neumann, Carl (1888): „Grundzüge der analytischen Mechanik starrer Körper. Zweiter Artikel", in: *BGWL* 40, 22-88.
Neumann, Carl (1890/91): „Über die Beziehungen zwischen dem mathematischen und dem physikalischen Unterricht", in: *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht* 4, 217-236.
Neumann, Carl (1899): „Beiträge zur analytischen Mechanik", in: *BGWL* 51, 371-444.
Neumann, Carl (1902): „Beiträge zur analytischen Mechanik, zweite und dritte Abhandlung", in: *BGWL* 54, 333-362.
Neumann, Carl (1904): „Über die sogenannte absolute Bewegung", in: *Festschrift Ludwig Boltzmann. Gewidmet zum 60. Geburtstag. 20. Februar 1904.* Leipzig.
Neumann, Carl (1908): „Worte zum Gedächtnis an Wilhelm Scheibner. Nekrolog, gesprochen in der öffentlichen Gesamtsitzung beider Klassen am 14. November 1908", in: *BGWL* 60, 377-390.
Neumann, Carl (1910a): „Über den Körper Alpha", in: *BGWL* 62, 69-86.
Neumann, Carl (1910b): „Nachtrag zu dem Aufsatz über den Körper Alpha", in: *BGWL* 62, 383-385.
Neumann, Ernst R. (1922): *Vorlesungen zur Einführung in die Relativitätstheorie.* Jena.
Neumann, Franz E.: *Gesammelte Werke.* 3 Bde., Leipzig 1906-1928.
Neumann, Franz E. (1883): *Einleitung in die theoretische Physik.* Hg. von C. Pape. Leipzig.
Neumann, Franz E. (1889): *Die mathematischen Gesetze der inducirten elektrischen Ströme.* Hg. von C. Neumann. (OKEW, 10.) Leipzig.
Neurath, Otto: *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften.* Hg. von R. Haller/H. Rutte. 2 Bde., Wien 1981.
Neurath, Otto (1930/31): „Wege der wissenschaftlichen Weltauffassung", in: *Erkenntnis* 1, 106-125 [*Schriften* I, 371-385].
Neurath, Otto (1935): „Einheit der Wissenschaft als Aufgabe", in: *Erkenntnis* 5, 16-22 [*Schriften* II, 625-634].
Neurath, Otto (1938): „Einheitswissenschaft als enzyklopädische Integration [Aus dem Engl.: „Unified Science as Encyclopedic Integration", in: *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 1. Chicago 1938, 1-27], in: *Schriften* II, 873-894.
Newton, Isaac: *Opera quae extant omnia.* Ed. S. Horsley. 5 vols., London 1779-1785 (repr. Stuttgart [u.a.] 1964).
Newton, Isaac: *The Mathematical Papers.* Ed. by D.T.Whiteside. 8 vols., Cambridge 1967-1981.
Newton, Isaac: *The Correspondence.* Ed. by H.W. Turnbull/J.F. Scott/A.R. Hall/L. Tilling. 7 vols., Cambridge 1959-1977.
Newton, Isaac (1687): *Philosophiae naturalis principia mathematica.* London (repr. Brüssel 1966).
Newton, Isaac (1704): *Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light.* London (repr. Brüssel 1966).
Newton, Isaac (1717): *Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light.* 2nd ed., London.

Newton, Isaac (1726): *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd ed., London.

Newton, Isaac (1872): *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*. Mit Bemerkungen und Erläuterungen hg. von J.Ph. Wolfers. Berlin; repr. Darmstadt 1963 (*Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd ed., London 1726).

Newton, Isaac (1898): *Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Bewegungen und Farben des Lichts*. Übers. und hg. von W. Abendroth. (OKEW, 96 und 97.) Leipzig; repr. Braunschweig [u.a.] 1983 (*Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. 2nd ed., London 1717).

Newton, Isaac (1934): *Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*. Translated into English by A. Motte in 1729. Revised, and Supplied with an Historical and Explanatory Appendix, by F. Cajori. 2 vols., Berkeley; repr. Berkeley [u.a.] 1982 (*Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd ed., London 1726).

Newton, Isaac (1952): *Opticks: Or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections Colours of Light*. 4th ed., London 1730. With a Foreword by A. Einstein ed. by I. B. Cohen. New York (repr. 1979).

Newton, Isaac (1958): *Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents*. Ed. by I.B. Cohen. Cambridge (Mass.).

Newton, Isaac (1962): *Unpublished Scientific Papers*. Ed. by A.R. Hall/M.B. Hall. Cambridge.

Newton, Isaac (1972): *Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd ed., London 1726. With Variant Readings Assembled by A. Koyré/I.B. Cohen/A. Whitman. 2 vols., Cambridge [u.a.].

Newton, Isaac (1988): *Über die Gravitation ...* . Texte zu den philosophischen Grundlagen der klassischen Mechanik. Übers. und erl. von G. Böhme. Frankfurt a.M.

Newton, Isaac (1999): *Die mathematischen Prinzipien der Physik*. Übers. und hg. von V. Schüller. Berlin [u.a.] (*Philosophiae naturalis principia mathematica*. 3rd ed., London 1726).

Nieto, Michael M. (1972): *The Titius-Bode Law of Planetary Distances. Its History and Theory*. Oxford [u.a.].

Novalis (1939): *Romantische Welt. Die Fragmente*. Leipzig.

Norton, John D. (1995): „Mach's Principle before Einstein", in: Barbour/Pfister 1995, 9-57.

Novalis: *Schriften*. Hg. von P. Kluckhohn/R. Samuel. 4 Bde., Stuttgart (Bd. 1) und Darmstadt (Bde. 2-4) 1968-83.

Nowak, Gregory (1989): „Riemann's *Habilitationsvortrag* and the Synthetic *Apriori* Status of Geometry", in: Rowe/Mc Clearly 1989 I, 17-46.

Oerstedt, Hans Christian (1851): *Der mechanische Theil der Naturlehre*. Braunschweig.

Oldroyd, David (1986): *The Arch of Knowledge*. London.

Olesko, Kathryn M. (1980): *The Emergence of Theoretical Physics in Germany: Franz Neumann and the Königsberg School of Physics, 1830-1880*. Cornell University (PhD).

Olesko, Kathryn M. (1991): *Physics as a Calling: Discipline and Practice in the Königsberg Seminar for Physics*. Ithaca [u.a.].

Oravas, Gunhard/Mc Lean, Leslie (1966): „Historical Development of Energetical Principles in Elastomechanics", in: *Applied Mechanics Review* 19, 647-658 und 919-933.

Ostrogradsky, Michail V. (1835): „Considérations générales sur les moments des forces", in: *Mémoires de l'Académie des Sciences de St.-Pétersbourg, VI sér., sciences math. et phys. 1835-1838* (1838), 1, 129-150.

Ostrogradsky, Michail V. (1838): „Mémoire sur les déplacements instantanés des systèmes assujettis à des conditions variables", in: *Mémoires de l'Académie des Sciences de St.-Pétersbourg, VI sér., sciences math. et phys. 1835-1838* (1838), 1, 565-600.

Ostrogradsky, Michail V. (1841): „Sur le principe des vitesses virtuelles et sur la force d'inertie", in: *Bulletin Scientifique publié par l'Académie des Sciences de St.-Pétersbourg* (1842), 10, 34-41.

Päsler, Max (1968): *Prinzipe der Mechanik*. Berlin.

Pagliaro, H.E. (ed.) (1972): *Irrationalism in the 18th Century*. Cleveland.

Painlevé, Paul (1922): *Les Axiomes de la Mécanique*. Paris.

Pannekoek, A. (1969): *A History of Astronomy*. New York.

Panza, Marco (1991/92): „The Analytical Foundation of Mechanics of Discrete Systems in Lagrange's ‚Théorie des Fonctions Analytiques', Compared with Lagrange's Earlier Treatments of this Topic". 2 Parts, in: *Historia Scientiarum* 44 (1991), 87-132 und 45(1992), 181-212.

Panza, Marco (1995): „De la nature épargnante aux forces généreuses: le principe de moindre action entre mathématiques et métaphysique", in: *RHSA* 43, 435-520.

Pap, Arthur (1946): *The A priori in Physical Theory*. New York.

Papineau, David (1977): „The vis viva controversy: Do meanings matter?", in: *SHPS* 8, 111-142.

Parrot, Georg F. (1809/11): *Übersicht des Systems der theoretischen Physik*. 2 Bde., Dorpat.

Pârvu, I. (1980): „Riemann vs. Kant: A Case Study for a New Histography of the Philosophy of Science", in: *Noesis* 6, 179-191.

Pemberton, Henry (1728): *A View of Sir Isaac Newton's Philosophy*. London.

Peters, Christian H.F. (1836): *De principio minimae actionis*. Berlin.

Petry, Michael John, Hg. (1987): *Hegel und die Naturwissenschaften*. Stuttgart.

Petzold, Joseph (1891): *Maxima, Minima und Ökonomie*. Altenburg.

Pieper, Herbert (1982): „Jacobi in Berlin", in: H. Laitko, Hg.: *Zur Entwicklung der Mathematik in Berlin (Beiträge des 28. Berliner Wissenschaftshistorischen Kolloquiums - 8.6.1982)*. Berlin, 1-35.

Pieper, Herbert (1987a): „Alexander von Humboldt zu astronomischen Problemen in seinem Briefwechsel mit dem Mathematiker Jacobi", in: *Die Sterne* 63(2), 93-102.

Pieper, Herbert, Hg. (1987b): *Briefwechsel zwischen Alexander von Humboldt und C.G. Jacob Jacobi*. Berlin.

Plaass, Peter (1965): *Kants Theorie der Naturwissenschaft*. Göttingen.

Planck, Max (1965): *Vorträge und Erinnerungen*. 8. Aufl., Darmstadt ([1]1933).

Plato, Jan von (1994): *Creating Modern Probability. Its Mathematics, Physics and Philosophy in Historical Perspective*. Cambridge.

Poggendorff, Johann Ch.: *Biographisch-literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften*. 7 Bde., Leipzig 1863-1904.

Poggendorff, Johann Ch. (1879): *Geschichte der Physik*. Leipzig (repr. 1964).

Poincaré, Henri (1897): „Les idées de Hertz sur la mécanique", in: *Revue Générale des Sciences pures et appliquées* 8, 734-743.

Poincaré, Henri (1910): *Der Wert der Wissenschaft*. Deutsch von E. und H. Weber (*La valeur de la science*. Paris 1905).

Poincaré, Henri (1913): *Letzte Gedanken*. Übers. von K. Lichtenecker. Leipzig (*Dernières pensées*. Paris 1913).

Poincaré, Henri (1914a): *Wissenschaft und Hypothese*. Deutsch von F. und L. Lindemann. 3. Aufl., Leipzig ([1]1904; *La science et l'hypothèse*. Paris 1902).

Poincaré, Henri (1914b): *Wissenschaft und Methode*. Deutsch von F. und L. Lindemann. Leipzig [u.a.]; repr. Stuttgart 1973 (*Science et méthode*. Paris 1908).

Poinsot, Louis (1803): *Eléments de statique*. Paris.

Poinsot, Louis (1806): „Théorie générale de l'équilibre et des mouvements des systèmes", in: *JEP* (1)6, cah. 13, 206-241.

Poinsot, Louis (1838): „Note sur une certaine démonstration du principe des vitesses virtuelles, qu'on trouve au chapitre III de livre 1er de la 'Mécanique céleste'", in: *JMPA* 3, 244-248.

Poinsot, Louis (1846): „Remarque sur un point fondamental de la mécanique analytique de Lagrange", in: *JMPA* 11, 241-253.

Poinsot, Louis (1975): *La théorie générale de l'équilibre et du mouvement des systèmes*. Édition critique et commentaire par P. Bailhache. Paris.

Poisson, Simon D. (1809): „Mémoire sur la variation des constantes arbitraires dans les questions de mécanique (lu à l'Institut le 16 Octobre 1809)", in: *JEP* (1)8, cah. 15, 266-344.

Poisson, Simon D. (1811): *Traité de mécanique*. 2 vols., Paris.

Poisson, Simon D. (1829): „Mémoire sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques", in: *MASP* 8, 357-570.

Poisson, Simon D. (1833): *Traité de mécanique*. 2em. ed., 2 vols., Paris.

Poisson, Simon D. (1890): *Lehrbuch der Mechanik*. Dtsch. hg. von F.A. Pfannstiel. 2 Bde., Dortmund (*Traité de mécanique*. 2 vols., Paris 1833).

Polak, L.S. (1958): „The Development of the Principles of the Dynamics of System in the 19th and 20th Centuries", in: *Actes du VIIIe Congrès International d'Histoire des Sciences, Florence-Milan*. 1er vol., Florenz, 174-177.

Poppe, Johann H.M. (1807): *Die Mechanik des 18ten Jahrhunderts und der ersten Jahre des 19ten*[...]. Hannover.

Popper, Karl R. (1949): „Naturgesetze und theoretische Systeme", in: S. Moser, Hg.: *Gesetz und Wirklichkeit*. Innsbruck [u.a.] [Albert 1964, 87-102].

Popper, Karl R. (1953): „A Note on Berkeley as a Precursor of Mach", in: *BJPS* 4, 26-36.

Popper, Karl R. (1957): „Über die Zielsetzung der Erfahrungswissenschaften", in: *Ratio* 1, 24-35.

Popper, Karl R. (1982): *Logik der Forschung*. 7. Aufl. Tübingen ([1]1935).

Popper, Karl R. (1993): *Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf*. Aus dem Engl. von H. Vetter. Hamburg (*Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*. Oxford 1972).

Popper, Karl R. (1994/97): *Vermutungen und Widerlegungen. Das Wachstum der wissenschaftlichen Erkenntnis*. Aus dem Engl von G. Albert [u.a.]. 2 Bde., Tübingen (*Conjectures and Refutations. The Growth of Scientific Knowledge*. London 1973).

Portnoy, Esther (1982): „Riemann's Contribution to Differential Geometry", in: *HM* 9(1), 1-18.

Poser, Hans, Hg. (1981a): *Formen teleologischen Denkens. Philosophische und wissenschaftshistorische Analysen*. Berlin.

Powell, Baden (1837): *On the Nature and Evidence of the Primary Laws of Motion*. Oxford.

Prange, Georg (1935): „Die allgemeinen Integrationsmethoden der analytischen Mechanik", in: *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluß ihrer Anwendungen* (4), 4(2). Leipzig, 506-804.

Pratt, Henry (1841): *The Mathematical Principles of Mechanical Philosophy, and Their Application to the Theory of Universal Gravitation.* Cambridge.

Prony, Gaspard C.F.M.R. de (1798): „Sur le principe des vitesses virtuelles, et la décomposition des mouvemens circulaires", in: *JEP* (1)2, cah. 5, 191-208.

Pulte, Helmut (1989): *Das Prinzip der kleinsten Wirkung und die Kraftkonzeptionen der rationalen Mechanik. Eine Untersuchung zur Grundlegungsproblematik bei Leonhard Euler, Pierre Louis Moreau de Maupertuis und Joseph Louis Lagrange.* Stuttgart.

Pulte, Helmut (1991): [Rezension:] „Leonhardi Euleri Opera Omnia, Vol. IV A, 6. Commercium epistolicum. Commercium cum P.-L.M. de Maupertuis et Frédéric II. Basel 1986", in: *AS* 48, 91-94.

Pulte, Helmut (1993a): „Die Newton-Rezeption in der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts. Wissenschaftstheoretische, -historische und -historiographische Reflexionen zu einem kontroversen Thema", in: *Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung* 7, 33-59.

Pulte, Helmut (1993b): „Zum Niedergang des Euklidianismus in der Mechanik des 19. Jahrhunderts", in: Allgemeine Gesellschaft für Philosophie, Hg.: *Sektionsbeiträge zum XVI. Deutscher Kongreß für Philosophie 1993.* Bd. II. Berlin, 833-840.

Pulte, Helmut (1993c): [Sammelrezension:] „Neuere Newtoniana: Zum 350. Geburtsjahr Isaac Newtons (1643-1727)", in: *ZAWT* 24, 169-185.

Pulte, Helmut (1994): „C.G.J. Jacobis Vermächtnis einer ‚konventionalen' analytischen Mechanik. Vorgeschichte, Nachschriften und Inhalt seiner letzten Mechanik- Vorlesung", in: *Annals of Science* 51(5), 487-517.

Pulte, Helmut (1995): „Darwin in der Physik und bei den Physikern des 19. Jahrhunderts. Eine vergleichende wissenschaftstheoretische und -historische Untersuchung", in: Engels 1995, 105-146.

Pulte, Helmut (1996): „Einleitung des Herausgebers", in: Jacobi 1996, XVIII-LVIII.

Pulte, Helmut (1997): „After 150 years: ‚News' from Jacobi on Lagrange", in: *Mathematical Intelligencer* 19, 48-54.

Pulte, Helmut (1998): „Jacobi's Criticism of Lagrange: The Changing Role of Mathematics in the Foundations of Classical Mechanics", in: *Historia Mathematica* 25, 154-184.

Pulte, Helmut (1999a): „‚... sondern Empirismus und Spekulation sich verbinden sollen': Historiographische Überlegungen zur bisherigen Rezeption des wissenschaftstheoretischen und naturphilosophischen Werkes von J.F. Fries und einige Gründe für dessen Neubewertung", in: Hogrebe/Herrmann 1999, 57-94.

Pulte, Helmut (1999b): „Von der Physikotheologie zur Methodologie. Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Analyse der Transformation von nomothetischer Teleologie und Systemdenken bei Kant und Fries", in: Hogrebe/Herrmann 1999, 301-351.

Pulte, Helmut (1999c): „Mannigfaltigkeit der Regeln und Einheit der Prinzipien: Zur Entmetaphysierung teleologischen Denkens im Anschluß an P.L.M. de Maupertuis", in: Hecht 1999, 235-259.

Pulte, Helmut (2000a): „Beyond the Edge of Certainty: Reflections on the Rise of Physical Conventionalism in the 19th Century", in: *Philosophiae Scientiae. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences* Vol. 4(1), 87-109.

Pulte, Helmut (2000b): „Hypothesos (non) fingo? Das Wissenschaftsverständnis der Aufklärung im Spiegel ihrer Newton-Rezeption", in: R. Rózanowski, Hg.: *Die Aktualität der Aufklärung.* Wroclaw 2000, 77-106.

Pulte, Helmut (2001): „Order of Nature and Orders of Science. On the Mathematical Philosophy of Nature from Newton and Euler to Lagrange and Kant", in: Lefèvre 2001, 61-92

Pulte, Helmut/Thiele, Rüdiger (2002): „Meccanica Variazionale", in: *Enciclopedia Italiana, Storia della Scienza, Vol. VI: L'Età dei Lumi*. Rom, 453-461.

Pulte, Helmut (2003): „Meccanica Analitica", in: *Enciclopedia Italiana, Storia della Scienza, Vol. VII: L'Ottocento*. Rom, 75-83.

Pulte, Helmut (2004a): Art. „Wissenschaft III"., in: *HWP* 12, 921-948.

Pulte, Helmut (2004b): Art. „Wissenschaftstheorie, Wissenschaftsphilosophie", in *HWP* 12, 973-981.

Pulte, Helmut (2005a): „Kant, Fries and the Expanding Universe of Science", in: M. Friedman, A. Nordmann, (eds.): *Kant's Scientific Legacy in the Nineteenth Century*. Cambridge, Mass. [im Erscheinen].

Pulte, Helmut (2005b): „Isaac Newton: Entdeckung des Weltsystems - System der Weltentdekkung?", in: P. Leich, Hg.: *Leitfossilien naturwissenschaftlichen Denkens*. Würzburg [im Erscheinen].

Putnam, Hilary (1982): „Three Kinds of Scientific Realism", in *Philosophical Quarterly* 32, 195-200.

Pycior, Helen (1976): *The Role of Sir William Rowan Hamilton in the Development of British Modern Algebra*. Cornell University (PhD).

Pyenson, Lewis (1983): *Neohumanism and the Persistence of Pure Mathematics in Wilhelminian Germany*. Philadelphia.

Quine, Willard V.O. (1991): *Theorien und Dinge*. Aus dem Engl. von J. Schulte. Frankfurt a.M. (*Theories and Things*. Cambridge, Mass. 1981).

Quine, Willard V.O. (1995): *Unterwegs zur Wahrheit. Eine konzise Einleitung in die theoretische Philosophie*. Aus dem Engl. von M. Gebauer. Paderborn [u.a.] (*The Pursuit of Truth*. Cambridge, Mass. 1992).

Rankine, William (1864): „On the Use of Mechanical Hypotheses in Science, and Especially in the Theory of Heat", in: *Proceedings of the Royal Philosophical Society of Glasgow* 5, 126-132.

Raupach, Johann F. (1819): *Grundriß der Dynamik*. Halle.

Rausch, Hannelore (1982): *Theoria. Von ihrer sakralen zur philosophischen Bedeutung*. München.

Rausenberger, Otto (1893). *Lehrbuch der analytischen Mechanik*. 2. Aufl. Leipzig ([1]1888).

Reden, Wolf von (1988): „Heinrich Hertz and the ‚Principles of Mechanics'", in: G. Boerger, ed.: *Commemorative Essays on the 100th Anniversary of His Pioneering Experiments on Electromagnetic Waves*. Berlin, 69-95.

Redtenbacher, Ferdinand J. (1852): *Principien der Mechanik und des Maschinenbaus*. Mannheim.

Redtenbacher, Ferdinand J. (1879): *Geistige Bedeutung der Mechanik und Geschichtliche Skizze der Entdeckung ihrer Principien*. München.

Reich, Karin (1973): „Die Geschichte der Differentialgeometrie von Gauß bis Riemann", in: *AHES* 11, 273-382.

Reichenbach, Hans (1968): *Der Aufstieg der wissenschaftlichen Philosophie*. Aus dem Engl. von M. Reichenbach. 2. Aufl., Braunschweig ([1]1953; *The Rise of Scientific Philosophy*. Berkeley [u.a.] 1951).

Reinecke, W. (1910): „Kant und Fries", in: *Kant-Studien* 15, 486-498.
Rescher, Nicolas (1985): *Die Grenzen der Wissenschaft.* Aus dem Engl. von K. Puntel. Stuttgart (*The Limits of Science.* Berkeley [u.a.] 1984).
Rey, Abel (1908): *Die Theorie der Physik bei den modernen Physikern.* Aus dem Franz. von R. Eisler. Leipzig (*La théorie de la physique chez les physiciens contemporains.* Paris 1907).
Rickert, Heinrich (1921): *Die Grenzen der naturwissenschaftlichen Begriffsbildung. Eine logische Einleitung in die historischen Wissenschaften.* 4. Aufl., Tübingen [u.a.] ([1]1902).
Riehl, Alois (1876/79/87): *Der philosophische Kriticismus und seine Bedeutung für die positive Wissenschaft.* 2 Bde. (in 3 Teilen), Leipzig.
Riemann, Bernhard G.F.: *Gesammelte mathematische Werke und wissenschaftlicher Nachlaß.* Nach der Ausgabe von H. Weber und R. Dedekind; neu hg. von R. Navasimhan. Berlin [u.a.]/Leipzig 1990 [*Werke**].
Riemann, Bernhard G.F.: *Gesammelte mathematische Werke und wissenschaftlicher Nachlaß.* Hg. unter Mitwirkung von R. Dedekind und H. Weber. 2. Aufl., Leipzig 1892 ([1]1876) [*Werke* = *Werke**, 23-590].
Riemann, Bernhard G.F. (1853a): „Neue mathematische Principien der Naturphilosophie", in: *Werke*, 528-532.
Riemann, Bernhard G.F. (1853b): „Gravitation und Licht", in: *Werke*, 532-538.
Riemann, Bernhard G.F. (1854a): „Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen (Habilitationsvortrag vom 10. Juni 1854)", in: *AGWG* 1866/67, 13 [*Werke*, 272-286].
Riemann, Bernhard G.F:(1854b): „Ueber die Gesetze der Vertheilung von Spannungselectricität in ponderabeln Körpern, wenn diese nicht als vollkommene Leiter oder Nichtleiter, sondern als dem Enthalten von Spannungselectricität mit endlicher Kraft widerstrebend betrachtet werden. (Vortrag, gehalten am 21. Sept. 1854)", in: *Werke*, 49-54.
Riemann, Bernhard G.F. (1858): „Ein Beitrag zur Elektrodynamik (1858)", in: *AP* 1867, 131, 237-243 [*Werke*, 288-297].
Riemann, Bernhard G.F. (1880): *Schwere, Elektricität und Magnetismus.* Nach den Vorlesungen von B. Riemann bearbeitet von Karl Hattendorff. 2. Aufl., Hannover ([1]1876).
Riemann, Bernhard G.F (1882): *Partielle Differentialgleichungen und ihre Anwendung auf physikalische Fragen. Vorlesungen.* Für den Druck bearbeitet und hg. von K. Hattendorff. 3. Aufl., Braunschweig (repr. 1938; [1]1869).
Riemann, Bernhard G.F. (1902): *Bernhard Riemann's Gesammelte Mathematische Werke. Nachträge.* Hg. von E. Noether/W. Wirtinger. Leipzig [*Werke**, 591-714].
Riemann, Bernhard G.F. (1923): *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen.* Neu hg. und erläutert von H. Weyl. 3. Aufl., Berlin ([1]1919).
Ritter, Aloys (1853): *Über das Prinzip des kleinsten Zwanges.* Göttingen (Diss.).
Ritter, Aloys (1883): *Lehrbuch der höheren Mechanik, Theil 1: Lehrbuch der analytischen Mechanik.* 2. Aufl., Leipzig.
Ritter, Joachim/Gründer, Karlfried/Gabriel, Gottfried Hgg.: Historisches Wörterbuch der Philosophie. 12 Bde. (A-V), Basel 1971-2004
Roberts, Clayton (1996): *The Logic of Historical Explanation.* Philadelphia.
Rodrigues, Benjamin-Olinde (1816): „De la manière d'employer le principe de la moindre action, pour obtenir les équations du mouvement rapportées aux variables indépendents", in: *Correspondance sur l'École Polytechnique à l'usage des élèves de cette École*, 1814-1816, 3, 159-162.

Rodrigues, Benjamin-Olinde (1908): „Über die Verwendung des Prinzips der kleinsten Wirkung zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen ausgedrückt durch die unabhängigen Veränderlichen", in: Jourdain 1908, 12-15.

Röseberg, Ulrich, Hg. (1991): *Mathematik und Wirklichkeit*. Berlin.

Rogers, G.A.J. (1978): „Locke's Essay and Newton's Principia", in: *JHI* 39, 217-232.

Rosenberger, Ferdinand (1882-90): *Die Geschichte der Physik*. 3 Bde., Braunschweig (repr. Hildesheim 1965).

Rosenberger, Ferdinand (1895): *Isaac Newton und seine physikalischen Principien*. Leipzig (repr. Darmstadt 1987).

Rosenfeld, Boris A. (1988): *A History of Non-Euclidean Geometry: Evolution of the Concept of a Geometric Space*. New York [u.a.].

Roseveare, N.T. (1982): *Mercury's Perihelion. From Le Verrier to Einstein*. Oxford.

Rousseau, George S./Porter, Roy, eds. (1980): *The Ferment of Knowledge. Studies in the Historiography of Eighteenth-Century Science*. Cambridge.

Routh, Edward J. (1896): *A Treatise on Analytical Statics*. 2 vols., 2nd ed., Cambridge ([1]1891/92).

Routh, Edward J. (1897): *A Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies*. 2 vols., London.

Rowe, David E./Mc Clearly, John (1989): *The History of Modern Mathematics*. 2 vols., Boston [u.a.].

Rühlmann, Moritz (1881-85): *Vorträge über die Geschichte der technischen Mechanik und theoretischen Maschinenlehre und der damit in Zusammenhang stehenden mathematischen Wissenschaften*. Leipzig [u.a.] (repr. Hildesheim [u.a.] 1979).

Rüsen, Jörn (1986): *Rekonstruktion der Vergangenheit. Grundzüge einer Historik II: Die Prinzipien der historischen Forschung*. Göttingen.

Rüsen, Jörn (1993): „‚Moderne' und ‚Postmoderne' als Gesichtspunkte einer Geschichte der modernen Geschichtswissenschaft", in: Küttler/Rüsen/Schulin 1993, 17-30.

Russell, John L. (1975): „Action and Reaction Before Newton", in: *BJPS* 8, 25-38.

Ruzavin, Gregorij I. (1977): *Die Natur der mathematischen Erkenntnis. Studien zur Methodologie der Mathematik*. Übers. von G. Rieske. Berlin (Orig.: Moskau 1968).

Sabra, Alan I. (1981): *Theories of Light from Descartes to Newton*. Cambridge.

Saint-Venant, A.J.C. Barré (1851): *Principes de mécanique fondés sur la cinématique*. Paris.

Salié, Hans (1981): „Carl Neumann", in: *100 Jahre mathematisches Seminar der Karl-Marx-Universität Leipzig*. Hg. von H Beckert/H. Schumann. Berlin 1981, 92-101.

Sapper, K. (1929): „Die Minimumprinzipe der Mechanik", in: *Annalen der Philosophie und Philosophischen Kritik* 8, 65-74.

Sarton, George (1911): *Les principes de la mécanique de Newton*. Ghent.

Sarton, George (1944): „Lagrange's Personality (1736-1813)", in: *Proceedings of the American Philosophical Society* 88, 456-496.

Sartorius von Waltershausen, Wolfgang (1865): *Gauß zum Gedächtnis*. Leipzig.

Schäfer, Clemens (1919): *Die Prinzipe der Dynamik*. Berlin [u.a.].

Schäfer, Lothar (1966): *Kants Metaphysik der Natur*. Berlin.

Scharlau, Winfried (1981): „The Origins of Pure Mathematics", in Jahnke/Otte 1981, 331-347.

Scheffler, Hermann (1858): „Über das Gauss'sche Grundgesetz der Mechanik", in: *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 3, 197-223, 261-274.

Scheibe, Erhard (1986): „Kohärenz und Kontingenz: Die Einheit der Physik und die rationalistische Tradition", in: *Zeitschrift für Philosophische Forschung* 40, 321-336.
Scheibner, Wilhelm (1848): *Über die Variabilität der Functionen*. Halle-Wittenberg (Diss.).
Scheibner, Wilhelm (1868): „Auszug von C. Neumanns ‚Principien der Elektrodynamik'", in: *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 13, 37ff.
Schell, Wilhelm (1870): *Theorie der Bewegung und der Kräfte. Ein Lehrbuch der theoretischen Mechanik mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse technischer Hochschulen*. Leipzig.
Schellbach, Karl H. (1860): *Neue Elemente der Mechanik*, dargestellt und bearbeitet von G. Arendt. Berlin.
Schelling, Friedrich W.J.: *Sämmtliche Werke*. Hg. von K.F.A. Schelling. 14 Bde., Stuttgart [u.a.] 1856-1861.
Schelling, Friedrich W.J. (1975): *Ausgewählte Werke. Schriften von 1799-1801*. Darmstadt.
Schelling, Friedrich W.J. (1976): *Ausgewählte Werke. Schriften von 1801-1804*. Darmstadt.
Schering, Ernst (1867): „Bernhard Riemann zum Gedächtnis", in: *NGWG*, 305-314.
Schering, Ernst (1873a): „Die Schwerkraft in mehrfach ausgedehnten Gaussischen und Riemannschen Räumen", in: *NGWG* 1873, 149-159.
Schering, Ernst (1873b): „Die Hamilton-Jacobi'sche Theorie der Kräfte, deren Maass von der Bewegung der Körper abhängt", in: *NGWG* 1873, 744-753.
Schiemann, Gregor (1997): *Wahrheitsgewissheitsverlust. Hermann von Helmholtz ' Mechanismus im Anbruch der Moderne. Eine Studie zum Übergang von klassischer zu moderner Naturphilosophie*. Darmstadt.
Schleiden, Matthias J. (1844): *Schellings und Hegels Verhältnis zur Naturwissenschaft*. Leipzig.
Schleiden, Matthias J. (1848): *Die Pflanze und ihr Leben. Populäre Vorträge*. Leipzig.
Schleiden, Matthias J. (1861): *Die Botanik als inductive Wissenschaft. (Grundzüge der wissenschaftlichen Botanik nebst einer methodologischen Einleitung als Anleitung zum Studium der Pflanzen)*. 4. Aufl., Leipzig ([1]1849).
Schlick, Moritz (1938): *Gesammelte Aufsätze*. Wien (repr. Hildesheim 1969).
Schmid, Karl Ch.E. (1794): „Erste Linien einer reinen Theorie der Wissenschaft", in: *Philosophisches Journal für Moralität, Religion und Menschenwohl* 3(3), 348-362 [Diemer 1968a, 229-234].
Schmid, Karl Ch.E. (1797): *Grundriß der Logik*. Jena [u.a.].
Schnädelbach, Herbert (1991): *Philosophie in Deutschland 1831-1933*. 4. Aufl., Frankfurt a.M. ([1]1983).
Schneider, Ivo, Hg. (1981a): *Carl Friedrich Gauss*. München.
Schneider, Ivo (1981b): „Die Situation der mathematischen Wissenschaften vor und zu Beginn der wissenschaftlichen Laufbahn von Gauß", in: Schneider 1981a, 9-36
Schneider, Ivo (1988): „Die Mathematisierung der Naturwissenschaften", in: *BWG* 11, 207-217.
Schnuse, C.H. (1851): *Die Grundlehren der Statik fester Körper*. Leipzig.
Scholz, Erhard (1980): *Geschichte des Mannigfaltigkeitsbegriffs von Riemann bis Poincaré*. Boston [u.a.].
Scholz, Erhard (1982a): „Herbart's Influence on Bernhard Riemann", in: *HM* 9, 413-440.
Scholz, Erhard (1982b): „Riemanns Studie der Philosophie J.F. Herbarts", in: *Dialektika* 17, 69-81.
Scholz, Erhard (1982c): „Riemanns frühe Notizen zum Mannigfaltigkeitsbegriff und zu den Grundlagen der Geometrie", in: *AHES* 27, 213-231.

Scholz, Erhard (1992): „Riemann's Vision of a New Approach to Geometry", in: Boi/Flament/Salanskis 1992, 22-34.

Scholz, Heinrich (1931): *Geschichte der Logik*. Berlin.

Scholz, Heinrich (1933): „Die Axiomatik der Alten", in: *Blätter für deutsche Philosophie* 4, 259-279.

Schrader, Wilhelm H./Kimminich, Otto (1976): Art. „Konvention", in: *HWP* 4, 1071-1078.

Schramm, Matthias (1985): *Natur ohne Sinn? Das Ende des teleologischen Weltbildes*. Graz [u.a.].

Schreiber, Alfred (1975): *Theorie und Rechtfertigung. Untersuchungen zum Rechtfertigungsproblem axiomatischer Theorien in der Wissenschaftstheorie*. Braunschweig.

Schubring, Gert (1981a): „On Education as a Mediating Element Between Development and Application: The Plans for the Berlin Polytechnical Institute", in Jahnke/Otte 1981, 269-284.

Schubring, Gert (1981b): „The Conception of Pure Mathematics as an Instrument in the Professionalization of Mathematics", in: Mehrtens/Bos/Schneider 1981, 111-134.

Schubring, Gert (1990): „Das mathematisch Unendliche bei J.F. Fries", in: König 1990, 152-164.

Schubring, Gert (1991): *Die Entstehung des Mathematiklehrerberufs im 19. Jahrhundert*. 2. Aufl., Weinheim ([1]1983).

Schüling, Hermann (1969): *Die Geschichte der axiomatischen Methode im 16. und beginnenden 17. Jahrhundert*. Hildesheim [u.a.].

Schüller, Volkmar, Hg. (1991): *Der Leibniz-Clarke Briefwechsel*. Berlin.

Schultz, Johann (1804): *Anfangsgründe der reinen Mechanik, die zugleich Anfangsgründe der reinen Naturwissenschaft sind*. Königsberg.

Schultze, Fritz (1881/82): *Philosophie der Naturwissenschaft. Eine Philosophische Einleitung in das Studium der Natur und ihrer Wissenschaften*. 2 Bde., Leipzig.

Schwertschlager, Joseph (1883): *Kant und Helmholtz erkenntnis-theoretisch verglichen*. Freiburg.

Scott, Wilson L. (1970): *The Conflict between Atomism and Conservation Theory 1644 to 1860*. London.

Scriba, Christoph J. (1973): „Carl Gustav Jacob Jacobi", in: *DSB* 1937, 7, 50-55.

Seeliger, Hugo (1906): „Über die sogenannte absolute Bewegung", in: *Sitzungsberichte der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 85-137.

Sexl, Roman/Blackmore, John, Hgg. (1982): *Ausgewählte Abhandlungen der Internationalen Tagung über Ludwig Boltzmann Wien, 5.-8. September 1981*. Braunschweig [u.a.] [Boltzmann *Gesamtausgabe* VIII].

Shapere, Dudley (1993): „Overview: Newton's Place in History", in: Theerman/Seeff 1993, 300-311.

Shea, William R., ed. (1983): *Nature Mathematized: Historical and Philosophical Case Studies in Classical Modern Natural Philosophy*. Dordrecht [u.a.].

Siegel, Carl (1913): *Geschichte der deutschen Naturphilosophie*. Leipzig.

Simon, H.A. (1947): „The Axioms of Newtonian Mechanics", in: *Philosophical Magazine* 38, 888-905.

Snelders, Hendrik A.M. (1970): „Romanticism and Naturphilosophie and the Inorganic Natural Sciences 1797-1840", in: *Studies in Romanticism* 9, 193-215.

Snell, Karl (1839): *Philosophische Betrachtungen der Natur*. Dresden.

Snell, Karl (1858): *Newton und die mechanische Naturwissenschaft. Zu Newton's Gedächtniß im zweiten Säcularjahr seiner Geburt*. 2. Aufl., Leipzig ([1]1843).
Snow, A.J. (1927): „The Role of Mathematics and Hypothesis in Newton's Physics", in: *Scientia* 42, 1-10.
Snyder, Laura J. (1994): „It's ‚All' Necessarily So. William Whewell on Scientific Truth", in: *SHPS* 25, 785-807.
Sonnet, H. (1867): *Dictionnaire des Mathématiques Appliquées*. Paris.
Speiser, Andreas (1927): „Naturphilosophische Untersuchungen von Euler und Riemann", in: *JRAM* 157, 105-114.
Speiser, Andreas (1934): *Leonhard Euler und die deutsche Philosophie*. Zürich.
Speiser, David (1989): „Die Grundbegriffe der Mechanik in Huygens Oscillatorium und in Newtons Principia", in: Hutter 1989, 21-46.
Spiess, Otto (1929): *Leonhard Euler. Ein Beitrag zur Geistesgeschichte des 18. Jahrhunderts*. Leipzig.
Stadler, August (1874): *Kants Teleologie und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung*. Berlin.
Stäckel, Paul (1906): *Elementare Dynamik der Punktesysteme und starren Körper*. Leipzig.
Stäckel, Paul/Ahrens, Wilhelm (1907/08): „Der Briefwechsel zwischen C.G.J. Jacobi und P.H. von Fuss über die Herausgabe der Werke Leonhard Eulers", in: *Bibliotheca Mathematica* 3(8), 233-306.
Stallo, Johann B. (1901): *Die Begriffe und Theorien der modernen Physik*. Übers. und hg. von H. Kleinpeter. Leipzig (*The Concepts and Theories of Modern Physics*. London 1882).
Stammel, Hans (1982): *Der Kraftbegriff in Leibniz' Physik*. Mannheim (Diss.).
Stegmüller, Wolfgang (1967/68): „Gedanken über eine mögliche rationale Rekonstruktion von Kants Metaphysik der Erfahrung", in: *Ratio* 9, 1-32 und 10, 1-31.
Stegmüller, Wolfgang (1969-83): *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*. 4 Bde., Berlin [u.a.].
Stegmüller, Wolfgang (1974): „Theoriendynamik und logisches Verständnis", in: Diederich 1974b, 167-209.
Stein, Alois von der (1968): „Der Systembegriff in seiner geschichtlichen Entwicklung", in: Diemer 1968d, 1-14.
Stein, Howard (1967): „Newtonian Space-Time", in: *Texas Quarterly* 10, 174-200.
Stein, Howard (1970): „On the Notion of Field in Newton, Maxwell, and Beyond", in: Stuewer 1970, 264-287.
Steiner, Hans-Georg/Winter, Heinrich, Hgg. (1985): *Mathematikdidaktik, Bildungsgeschichte, Wissenschaftsgeschichte*. Köln.
Steinle, Friedrich (1991): *Newtons Entwurf ‚Über die Gravitation ...'. Ein Stück Entwicklungsgeschichte seiner Mechanik* (Boethius, 26.). Stuttgart.
Steinle, Friedrich (1992): „Was ist Masse? Newtons Begriff der Materiemenge", in: *Philosophia Naturalis* 29(1), 94-117.
Steinle, Friedrich (1995): „The Algamation of a Concept: Laws of Nature in the New Sciences", in: Weinert 1995a, 316-368.
Stichweh, Rudolf (1984): *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen. Physik in Deutschland 1740-1890*. Frankfurt a.M.
Streintz, Heinrich (1883): *Die physikalischen Grundlagen der Mechanik*. Leipzig.

Strong, Edward W. (1936): *Procedures and Metaphysics. A Study in the Philosophy of Mathematical-Physical Science in the Sixteenth and Seventeenth Centuries*. Berkeley (repr. Hildesheim 1966).

Strong, Edward W. (1951): „Newton's Mathematical Way", in: *JHI* 12, 90-110.

Strubecker, Karl (1969): „Die Mathematisierung der Wissenschaften", in: *Physikalische Blätter* 25, 488-495.

Struik, Dirk J. (1931): „Outline of a History of Differential Geometry", in *Isis* 20, 161-191.

Struik, Dirk J. (1981): „Mathematics in the Early Part of the Nineteenth Century", in: Mehrtens/Bos/Schneider 1981, 6-20.

Study, Eduard (1923): *Mathematik und Physik. Eine erkenntnistheoretische Untersuchung*. Braunschweig.

Stuewer, Roger H., ed. (1970): *Historical and Philosophical Perspectives of Science* (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, 5.). Minneapolis.

Stuloff, Nikolaus N. (1968): „Über den Wissenschaftsbegriff der Mathematik in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts", in: Diemer 1968a, 71-89.

Suchting, W.A. (1969): „Euler's ‚Reflections on Space and Time'", in: *Scientia* 104, 270-278.

Swartz, Norman (1985): *The Concept of Physical Law*. Cambridge [u.a.].

Szabó, Árpád (1960): „Anfänge des griechischen Axiomensystems", in: *AHES* 1, 38-196.

Szabó, Árpád (1969): *Anfänge der griechischen Mathematik*. München [u.a.].

Szabó, István (1979): *Geschichte der mechanischen Prinzipien*. Basel [u.a.].

Szily, Coloman (1872): „Das Hamilton'sche Princip und der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie", in: *AP* 145, 295-302.

Szily, Coloman (1873): „Das dynamische Princip von Hamilton in der Thermodynamik", in: *AP* 149, 74-86.

Szily, Coloman (1876): „Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie abgeleitet aus dem ersten", in: *AP* 7 (Erg.bd.) 154-167.

Tait, Peter Guthrie (1899): *Newton's Laws of Motion*. London.

Tate, Thomas (1853): *The Principles of Mechanical Philosophy Applied to the Author's Exercises on Mechanics and Natural Philosophy*. London.

Tazzioli, Rossana (1993): „Fisica e ‚filosofia naturale' in Riemann", in: *Nuncius* 8(1), 105-120.

Tetens, Holm (1985): „Rationale Dynamik", in: *Philosophia Naturalis* 22, 61-86.

Theermann, Paul/Seeff, Adele T., eds. (1993): *Action and Reaction. Proceedings of a Symposium to Commemorate the Tercentenary of Newton's ‚Principia'*. Newark [u.a.].

Theobald, David W. (1966): *The Concepts of Energy*. London.

Thiel, Christian (1972): *Grundlagenstreit und Grundlagenkrise*. Meisenheim a.G.

Thiel, Christian, Hg. (1975): *Frege und die moderne Grundlagenforschung*. Meisenheim a.G.

Thiel, Christian (1995): *Philosophie und Mathematik. Eine Einführung in ihre Wechselwirkungen und in die Philosophie der Mathematik*. Darmstadt.

Thiel, Christian (1996): Art. „Theorie", in: *EPW* 4, 260-270.

Thiele, Joachim (1963): „Ernst Mach-Bibliographie", in: *Centaurus* 8, 189-237.

Thiele, Rüdiger (1982): *Leonhard Euler*. Leipzig.

Thiele, Rüdiger (1996): „Euler und Maupertuis vor dem Horizont des teleologischen Denkens. Über die Begründung des Prinzips der kleinsten Aktion", in: *Schweizer im Berlin des 18. Jahrhunderts*. Hg. von M. Fontius/H. Holzhey. Berlin, 374-390.

Thöle, Bernhard (1991): *Kant und das Problem der Gesetzmäßigkeit der Natur*. Berlin.

Thomson, James (1884): „On the Law of Inertia", in: *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. vol. 12, 568-578.

Thomson, William/Tait, Peter G. (1871/74): *Handbuch der theoretischen Physik*. Aus dem Engl. von H. Helmholtz/G. Wertheim. 2 Bde., Braunschweig (*Treatise on Natural Philosophy*. Cambridge 1867).

Tiles, Mary (1991): *Mathematics and the Image of Reason*. London [u.a.].

Tilly, M. de (1879): „Essai sur les principes fondamentaux de la géométrie et de la mécanique", in: *Mémoire de la société des sciences physiques et naturelles à Bordeaux* (2)3, 1-190.

Timerding, Heinrich E. (1910): *Die Mathematik in den physikalischen Lehrbüchern* (Abhandlungen über den mathematischen Unterricht in Deutschland. Bd II, Heft 2. Hg. von F. Klein). Leipzig [u.a.].

Timerding, Heinrich E. (1914): *Die Verbreitung mathematischen Wissens und mathematischer Auffassung*. Leipzig.

Timerding, Heinrich E. (1919): „Kant und Euler", in: *Kant-Studien* 23, 18-64.

Todhunter, Isaac (1876): *William Whewell, D.D.: An Account of His Writings*. 2 vols., London.

Tonelli, Giorgio (1959a): „Der Streit über die mathematische Methode in der Philosophie in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts und die Entstehung von Kants Schrift über die ‚Deutlichkeit'", in: *Archiv für Philosophie* 9, 37-66.

Tonelli, Giorgio (1959b): „La nécessité des lois de la nature au XVIIIe siècle et chez Kant", in: *RHSA* 12, 225-241.

Tonelli, Giorgio (1966): „Die Anfänge von Kants Kritik der Kausalbeziehungen und ihre Voraussetzungen im 18. Jahrhundert", in: *Kant-Studien* 57, 417-456.

Tonelli, Giorgio (1974): Art. „Hypothese, Hypothesis", in *HWP* 3, 1261-1265.

Topper, David Roy (1980): „‚To Reason by Means of Images': J.J. Thomson and the Mechanical Picture of Nature", in: *AS* 37, 31-57.

Torretti, Roberto (1978): *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*. Dordrecht.

Toulmin, Stephen E. (1959): „Criticism in the History of Science: Newton on Absolute Space, Time, and Motion", in: *Philosophical Review* 68, 1-29, 203-227.

Toulmin, Stephen E. (1981): *Voraussicht und Verstehen. Ein Versuch über die Ziele der Wissenschaft*. Aus dem Engl. von E. Bubser. Frankfurt a.M. (*Foresight and Understanding. An Inquiring into the Aims of Science*. London 1961).

Trendelenburg, Friedrich A. (1870): *Logische Untersuchungen*. 2 Bde. in 1 Bd., 3. Aufl., Leipzig ([1]1840).

Trudeau, Richard J. (1987): *The Non-Euclidean Revolution*. Basel [u.a.].

Truesdell, Clifford A. (1954): „Rational Fluid Mechanics, 1687-1765. Editors Introduction to: Leonhardi Euleri Commentationes Mechanicae Ad Theoriam Corporum Fluidorum Pertinentes", in: Euler *Opera omnia* (2)12, VIII-CXXV.

Truesdell, Clifford A. (1957): „Eulers Leistungen in der Mechanik", in: *L'enseignement mathématique* 3(4), 251-262.

Truesdell, Clifford A. (1960a): „The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies, 1638-1788, Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia, Vol. X et XI seriei secondae [Euler *Opera omnia* (2)11(2)].

Truesdell, Clifford A. (1960b): „A Programm toward Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason", in: *AHES* 1, 1-36.

Truesdell, Clifford A. (1968): *Essays in the History of Mechanics*. Berlin [u.a.].

Truesdell, Clifford A. (1972): „Leonhard Euler, Supreme Geometer (1707-1783)", in: Pagliaro 1972, 51-95.

Truesdell, Clifford A. (1982): „Euler's Contribution to the Theory of Ships and Mechanics. An Essay Review", in: *Centaurus* 26, 323-335.

Truesdell, Clifford A. (1989): „Newtons Einfluß auf die Mechanik des 18. Jahrhunderts", in: Hutter 1989, 47-73.

Tyndall, John (1875): *Die Wärme betrachtet als eine Art der Bewegung*. Autorisierte deutsche Übers. hg. durch H. Helmholtz/G. Wiedemann. 3. Aufl., Braunschweig (*Heat Considered as a Mode of Motion*. London 1863).

Ueberweg, Friedrich (1916): *Grundriss der Geschichte der Philosophie. Vierter Teil: Das neunzehnte Jahrhundert und die Gegenwart*. Neu bearbeitet und hg. von K. Oesterreich. 11. Aufl., Berlin ([1]1862-66).

Ungerer, Emil (1922): *Die Teleologie Kants und ihre Bedeutung für die Logik der Biologie*. Berlin.

Unsöld, A.H. (1970): „H. Hertz, Prinzipien der Mechanik", in: *Physikalische Blätter* 26, 337-342.

Urbach, Peter (1993): *Francis Bacon's Philosophy of Science: An Account and a Reappraisal*. La Salle (Ill.).

Varignon, Pierre (1725): *Nouvelle Mécanique ou Statique*. 2 Bde., Paris.

Vega, Georg Freiherr von (1817): *Vorlesungen über die Mathematik, Bd. 3: Dynamik und Mechanik*. 4. Aufl., Wien.

Vierhaus, Rudolf, Hg. (1985): *Wissenschaft im Zeitalter der Aufklärung*. Göttingen.

Voigt, Waldemar (1889): *Elementare Mechanik als Einleitung in das Studium der theoretischen Physik*. Leipzig.

Volkert, Klaus Th. (1986): *Die Krise der Anschauung: Eine Studie zu formalen und heuristischen Verfahren in der Mathematik seit 1850*. Göttingen.

Volkmann, Paul (1892): *Über Gesetze und Aufgaben der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik, in formaler Hinsicht*. Berlin.

Volkmann, Paul (1894): „Hat die Physik Axiome? Erkenntnistheoretische Studien über die Grundlagen der Physik", in: *Schriften der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg* 35, 13-22.

Volkmann, Paul (1898): *Über Newton's Philosophia naturalis*. Königsberg.

Volkmann, Paul (1900): *Einführung in das Studium der theoretischen Physik, insbesondere in das der analytischen Mechanik. Mit einer Einleitung in die Theorie der physikalischen Erkenntnis*. Leipzig.

Volkmann, Paul (1910): *Erkenntnistheoretische Grundzüge der Naturwissenschaften*. 2. Aufl., Leipzig ([1]1896).

Vorländer, Karl (1975): *Geschichte der Philosophie*, Bd. III(1): *Die Philosophie in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts*. Neubearbeitung von L. Geldsetzer. Hamburg.

Voss, Aurel (1901): „Die Prinzipien der rationellen Mechanik", in: *EMWA*, 4(1), 1-121.

Waerden, Bartel van der (1967): „Klassische und moderne Axiomatik", in: *Revue des mathématiques élémentaires* 22, 1-4.

Wahsner, Renate (1996): *Zur Kritik der Hegelschen Naturphilosophie. Über ihren Sinn im Lichte der heutigen Naturerkenntnis* (Hegeliana, 7.). Frankfurt a.M.

Wallace, William A. (1992): *Galileo's Logic of Discovery and Proof: The Background, Content and Use of his Appropriated Treatises on Aristotle's ‚Posterior Analytics'* (BSPS, 137.). Dordrecht.

Wallner, Friedrich (1982): „Boltzmann, Hertz und Wittgenstein", in: Boltzmann *Werke* 8, 143-153.

Waschkies, Hans-Joachim (1987): *Physik und Physikotheologie des jungen Kant* (Bochumer Studien zur Philosophie, 8.). Amsterdam.

Watkins, Eric (1997): „The Laws of Motion from Newton to Kant", in: *Perspectives on Science* 5, 311-348.

Watkins, Eric (1998): „Kant's Justification of the Laws of Mechanics", in: *SHPS* 29, 539-560.

Weber, Heinrich (1900): *Über die Entwicklung unserer mechanischen Naturanschauung im 19. Jahrhundert*. Strassburg.

Weinert, Friedel, ed. (1995a): *Laws of Nature. Essays on the Philosophical, Scientific and Historical Dimensions*. Berlin [u.a.].

Weinert, Friedel (1995b): „Laws of Nature - Laws of Science", in: Weinert 1995a, 3-64.

Weiß, Georg (1912): *Fries' Lehre von der Ahndung in Ästhetik, Religion und Ethik*. Göttingen.

Wenck, Julius (1866): *Die Mechanik*. Leipzig.

Westfall, Richard S. (1970): *Force in Newton's Physics: The Science of Dynamics in the 17th Century*. London.

Westfall, Richard S. (1980): *Never at Rest. A Biography of Isaac Newton*. Cambridge (repr. 1993).

Westfall, Richard S. (1993): „The Culmination of the Scientific Revolution: Isaac Newton", in: Theerman/Seeff 1993, 31-60.

Westphal, A.H.C. (1867): *Ueber die Beweise für das Parallelogramm der Kräfte*. Göttingen (Diss.).

Weyl, Hermann (1923): „Vorwort des Herausgebers", in: Riemann 1923, III-V.

Weyl, Hermann (1982): *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaften*. 5. Aufl., München [u.a.] ([1]1926).

Whewell, William (1823): *A Treatise on Dynamics*. Cambridge.

Whewell, William (1833a): *Astronomy and General Physics Considered with Reference to Natural Theology*. 4th ed., London ([1]1830).

Whewell, William (1833b): *Analytical Statics; a Supplement to the Fourth Edition of an Elementary Treatise of Mechanics*. Cambridge.

Whewell, William (1835): „On the Nature and the Truth of the Laws of Motion", in: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 5, 149-172.

Whewell, William (1843): *The Mechanical Euclid; Containing the Elements of Mechanics and Hydrostatics, Demonstrated after the Manner of the Elements of Geometry*. 4. ed., London ([1]1837).

Whewell, William (1847a): *An Elementary Treatise on Mechanics*. 7. ed., Cambridge ([1]1819).

Whewell, William (1847b): *The Philosophy of the Inductive Sciences, Founded upon Their History*. 2 vols., 2nd ed., London (repr. 1967; [1]1840).

Whewell, William (1849): „On Hegel's Criticism of Newton's Principia", in: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 8, 696-706.

Whewell, William (1857): *History of the Inductive Sciences. From the Earliest to the Present Time*. 3 vols., 3rd ed., London (repr. 1967; [1]1837).

Whewell, William (1860): *On the Philosophy of Discovery*. London.
Whitehead, Alfred N. (1949): *Wissenschaft und moderne Welt*. Aus dem Engl. von G. Tschiedel/R. Corti; hg. von R. Corti. Zürich (*Science and the Modern World*. New York. 1925).
Whiteside, Derek T. (1962): „The Expanding World of Newtonian Research", in: *HS* 1, 16-29.
Whiteside, Derek T. (1966): „Newtonian Dynamics", in: *HS* 5, 104-117.
Whiteside, Derek T. (1970): „The Mathematical Principles Underlying Newton's *Principia Mathematica*", in: *Journal of the History of Astronomy* 1, 116-138.
Whitrow, Gerald J. (1950): „On the Foundations of Dynamics", in: *BJPS* 1, 92-107.
Whitrow, Gerald J. (1971): „The Laws of Motion", in: *BJPS* 5, 217-234.
Whittacker, Edmund T. (1910): *A History of the Theories of Aether and Electricity from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*. London [u.a.].
Whittacker, Edmund T. (1917): *Analytical Dynamics*. 2nd ed., Cambridge ([1]1904).
Wiener, Philip P., ed. (1973): *Dictionary of the History of Ideas. Studies of Pivotal Ideas*. 4 vols., New York.
Wigner, Eugene P. (1960): „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences", in: *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13, 1-14 [Wigner 1967, 222-237].
Wigner, Eugene P. (1967): *Symmetries and Reflections. Scientific Essays*. Bloomington.
Williams, L. Pearce (1962): „The Physical Sciences in the First Half of the Nineteenth Century. Problems and Sources", in: *HS* 1, 1-15.
Wilson, Andrew D. (1989): „Hertz, Boltzmann and Wittgenstein Reconsidered", in: *SHPS* 20, 245-263.
Windelband, Wilhelm (1894): „Geschichte und Naturwissenschaft", in: Ders., *Präludien. Aufsätze und Reden zur Einführung in die Philosophie*. Bd. 2., 4. Aufl., 136-160.
Wise, Norton M. (1981): „German Concepts of Force, Energy and the Electromagnetic Ether: 1845-1880", in: Cantor/Hodge 1981, 269-307.
Wise, Norton M. (1982): „The Maxwell Literature and British Dynamical Theory", in: *HSPS* 13, 175-205.
Wittgenstein, Ludwig (1969): *Philosophische Untersuchungen. Tractatus Logico-Philosophicus, Tagebücher 1914-1916*. Frankfurt a.M.
Wohlgenannt, Rudolf (1969): *Was ist Wissenschaft?* Braunschweig.
Wolff, Christian: *Gesammelte Werke*. Hg. von J. École/J.E. Hofmann/M. Thomann/H.W. Arndt. 90 Bde., Hildesheim [u.a.] 1968-1991
Wolff, Christian (1717): „Besprechung des Leibniz-Clarke-Briefwechsels", in: *Acta Eruditorum*, 439-447 [Schüller 1991, 269-279].
Wolff, Christian (1737): *Cosmologia Generalis*. 2. Aufl., Frankfurt [u.a.] ([1]1731) [*Werke* II, 4].
Wolff, Christian (1740): *Philosophia rationalis sive logica*. 3. Aufl., 3 Bde., Frankfurt ([1]1728) [*Werke* II 1,1 - II 1,3].
Wolff, Christian (1750): *Anfangsgründe aller mathematischen Wissenschaften*. 7. Aufl., 4 Bde., Frankfurt [u.a.] ([1]1710) [*Werke* I, 12 - 15,1].
Wolters, Gereon (1979): *Basis und Deduktion. Studien zur Entstehung und Bedeutung der Theorie der axiomatischen Methode bei J.H. Lambert (1728-1777)*. Berlin [u.a.].
Wolters, Gereon (1986): „Topik der Forschung. Zur wissenschaftstheoretischen Funktion der Heuristik bei Ernst Mach", in: C. Burrichter/R. Inhetveen/R. Kötter, Hgg.: *Technische Rationalität und rationale Heuristik*. Paderborn, 123-154.

Wolters, Gereon (1987): *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen.* Berlin [u.a.].

Woolhouse, Roger S., ed. (1988): *Metaphysics and Philosophy of Science in the Seventeenth and Eighteenth Centuries: Essays in Honour of Gerd Buchdahl.* Dordrecht.

Wright, George H. von (1971): *Explanation and Understanding.* London.

Wright, Susan P. (1975): *Henri Poincaré: A Development Study of his Philosophical and Scientific Thought.* Harvard University (PhD).

Wronski, Josef M.H. de (1811): *Introduction à la métaphysique des mathématiques.* Paris.

Wundt, Wilhelm (1866): *Die physikalischen Axiome und ihre Beziehung zum Kausalprinzip.* Heidelberg.

Wundt, Wilhelm (1910): *Die Prinzipien der mechanischen Naturlehre. Ein Kapitel aus einer Philosophie der Naturwissenschaften.* Stuttgart.

Wundt, Wilhelm (1920): *Logik der exakten Wissenschaften.* 4. Aufl., Stuttgart ([1]1883).

Wußing, Hans/Arnold, Wolfgang, Hgg. (1985): *Biographien bedeutender Mathematiker. Eine Sammlung von Biographien.* 2. Aufl., Darmstadt ([1]1975).

Yoder, Joella G. (1988): *Unrolling Time. Christiaan Huygens and the Mathematization of Nature.* Cambridge.

Young, J.R. (1838): *The Elements of Mechanics, Comprehending Statics and Dynamics.* London.

Zahar, Elie (1980): „Positivismus und Konventionalismus", in: *ZAWT* 11, 292-301.

Zech, Julius-August-Christoph (1842): „Ueber das Princip der kleinsten Wirkung", in: *JRAM* 24, 177-188.

Ziegler, Renatus (1985): *Die Geschichte der geometrischen Mechanik im 19. Jahrhundert. Eine historisch-systematische Untersuchung von Möbius und Plücker bis zu Klein und Lindemann* (Boethius. Texte und Abhandlungen zur Geschichte der exakten Wissenschaften, Band 13). Stuttgart.

Zilsel, Edgar (1976): *Die sozialen Ursprünge der neuzeitlichen Wissenschaft.* Hg. von W. Krohn. Frankfurt a.M.

Zöllner, J.K. Friedrich (1867): *Über die universelle Bedeutung der mechanischen Principien.* Leipzig.

Zwerger, Max (1885): *Die lebendige Kraft und ihr Maß. Ein Beitrag zur Geschichte der Physik.* München.

Namensregister

Abendroth, William 90
Adams, John C. 357
Adickes, Erich 228, 230, 234, 252
Agassi, Joseph 288
Ahrens, Wilhelm 295, 309, 311, 315, 319
Albert, Hans 24, 26, 33-35, 38, 56, 77, 119, 158
Amir Arjomand, Kamran 270
Ampère, André M. 213, 355f., 374, 406
Anaximander 67
Archimedes 11, 42f., 163, 204, 212
Archytas von Tarent 11
Aristoteles 17, 19, 23f., 28-33, 36, 43, 50, 53-55, 107, 162, 245, 305, 322
Armstrong, David M. 49
Bacon, Francis 16, 27, 32-40, 46, 50, 122, 124, 259, 264
Bailhache, Patrice 196, 213, 340, 355
Bailly, Jean-Sylvain 89
Barbour, Julian B. 427
Barker, Peter 436
Baumgartner, Hans M. 23
Becker, Martin 111
Bentley, Richard 131, 370
Benvenuto, Edoardo 151, 162f., 166, 191, 196, 213
Berkeley, George 113, 138, 147, 250, 431
Bernoulli, Daniel 135, 139, 165f., 169, 177, 195, 212, 311
Bernoulli, Johann I. 143, 177, 191
Bertrand, Joseph 339, 342
Bessel, Friedrich W. 314, 339
Biermann, Kurt-R. 295
Bigelow, John 49
Bilfinger, Georg B. 159
Blake, Ralph M. 119, 132
Bloch, Léon 132
Boeckh, August 309, 320
Böhme, Gernot 38, 59, 117, 232f.
Boi, Luciano 216, 362
Boltzmann, Ludwig 81, 240, 404
Bolyai, Johann 356, 369
Bolyai, Wolfgang 356
Bonsiepen, Wolfgang 239, 263, 310
Borchardt, Wilhelm 311
Bos, Henk J.M. 43, 284
Bottazzini, Umberto 362
Bourget, Louis 157
Braithwaite, Robert B. 70, 262, 356
Breger, Herbert 146
Breunig, Hans P. 435
Brewster, David 370
Brück, Anthon Th. 33
Buchdahl, Gerd 49, 231f., 252, 256, 261f.
Burckhardt, Jakob 78
Burtt, Edwin A. 40, 46, 113
Cajori, Florian 90
Calinger, Ronald S. 156
Cannon, Walter F. 288
Carlyle, Thomas 292
Carnap, Rudolf 69f.
Carnot, Lazare 146f., 149, 213
Carroll, John W. 49
Cartwright, Nancy 65
Cassirer, Ernst 63f., 138, 170, 183, 286, 288, 377
Castelli, Benedotto 46
Cauchy, Augustin-Louis 342, 364, 374
Cayley, Arthur 295f.
Chandler, Philip 146
Charpa, Ulrich 288, 437
Chasles, Michel 282
Clagett, Marshall 43
Clairaut, Alexis-Claude 89, 146
Clarke, Samuel 115, 137, 143, 145, 157, 158
Clebsch, Alfred 214, 315
Clifford, William K. 60
Cohen, I. Bernard 36, 52f., 89-91, 110, 121, 124, 143
Coleridge, Samuel T. 292
Comte, Auguste 198, 284-293

Conti, Abbé 158
Copernicus, Nicolaus *siehe*: Kopernikus
Costabel, Pierre 340
Cotes, Roger 96, 122, 124-130
Cournot, Antoine A. 213, 355
Crelle, August L. 298f., 378
Crowe, Michael J. 193
Crusius, Paul 159
Cunningham, Andrew 92
D'Alembert, Jean le Rond 46, 58f., 68, 81, 84, 135, 137, 139, 140, 146-151, 153f., 160-164, 177, 181, 191f., 196, 199-202, 209, 214, 217, 219, 240, 247-250, 322, 360
D'Arcy, Chevalier Patrick 151, 195, 250
D'Arrest, Heinrich L. 357
Danto, Arthur C. 78f., 82
Daston, Lorraine J. 43, 139
Davis, Philip 41, 356
Dedekind, Richard 361, 370f., 376, 389, 395
DeGandt, François 139
Derham, William 246
Descartes, René 25, 27, 28, 30, 33- 37, 42f., 48-52, 55f., 68, 73, 84, 92-95, 109, 116, 118, 122, 126-129, 132, 138, 142-144, 151, 153, 158, 171, 208-210, 318
Detel, Wolfgang 30-32, 50, 54f.
Dhombres, Jean 165
Diderot, Denis 326
Diederich, Werner 330-332, 428
Diemer, Alwin 18f., 24-38, 50, 54f., 71, 73, 76, 81, 83, 155, 240, 243f., 403f., 432, 436
Dierse, Ulrich 19, 242
Dijksterhuis, Eduard J. 12, 16f., 40-43, 91
Dingler, Hugo 16, 197, 220, 223
Diophant 318
Dirichlet, Johann Peter G.L. 295, 309, 339-342, 360
DiSalle, Robert J. 115f., 402, 418, 425f.
Donagan, Alan 79
Drake, Stillmann 42, 46
Du Bois-Reymond, Emil 59-62, 68
Dugac, Pierre 198
Dugas, René 17, 151, 167f., 194, 204f., 338, 340
Duhem, Pierre 60, 65, 69, 74, 102f., 238, 316
Dühring, Eugen 17-19
Dundon, Stanislaus J. 145
Düsing, Klaus 242, 262
Dyck, Walter von 311
Earman, John 115
Eccarius, Wolfgang 295, 298
Einstein, Albert 88, 113, 308, 356, 361, 399-402, 420, 427, 431f., 436, 438
Eisenstein, Ferdinand G.M. 360
Elkana, Yehuda 178, 394
Ellis, Brian 91
Elsenhans, Theodor 266
Emerson, William 138, 149
Ende, Helga 234, 301
Engels, Eve-Marie 242
Engfer, Hans-Jürgen 251, 259
Erdmann, Benno 362, 407
Esenbeck, Nees von 305
Euklid 11, 21, 68-75, 83, 91, 93, 104, 130, 153, 180, 188, 220, 297, 300, 307, 312, 355f., 367-369, 373f., 398, 405, 432, 438
Euler, Leonhard 46, 68, 81-84, 135, 137, 140, 142, 145-154, 159-167, 170-203, 207, 209-211, 217-219, 222, 225, 235, 240, 245, 248-252, 277, 282, 296f., 308-311, 313, 319, 323, 389f., 394, 433
Faraday, Michael 370, 374
Fechner, Gustav Th. 375
Fehér, Martha 55
Fellmann, Emil A. 139
Fellmann, Ferdinand 59
Fermat, Pierre de 194, 258, 261
Fetscher, Iring 285
Feyerabend, Paul 121, 126
Feynman, Richard 40
Fichte, Johann G. 264
Fischer, Johann C. 284
Flament, Dominique 216
Fontenelle, Bernard le Bovier de 89
Fourier, Jean B.J. de 162f., 212f., 311-315, 340, 355, 374
Fox, Robert 144
Frank, Philipp 60
Fraser, Craig G. 148, 151, 162, 191, 198, 200, 202
Frege, Gottlob 25, 428
Freudenthal, Hans 361
Frey, Gerhard 41, 326

Friedman, Michael 115, 228, 232f.
Fries, Jakob F. 15-17, 21, 40, 77, 81, 85, 237-243, 264-284, 299-305, 329, 434
Fritz, Kurt von 31
Fuss, Paul H. 195
Gabbey, Alan 91, 94
Galilei, Galileo 16, 25, 40-55, 58f., 91, 103, 108, 130, 158, 165, 191, 209f., 217-221, 322, 360, 364, 370, 373, 402, 405, 407, 409, 411, 414, 418, 420-422, 426
Galle, Johann G. 357
Gauß, Carl F. 17, 137, 193, 213-216, 295, 297f., 302-308, 314, 340, 342, 356-358, 369f., 372, 374, 378, 383, 395
Gehler, Johann S.T. 241, 248
Geldsetzer, Lutz 16, 40, 272, 300f., 303, 305
Gent, Werner 402
Giere, Ronald N. 58, 82
Gilbert, William 53
Gillispie, Charles C. 149
Gloy, Karen 228, 233
Goldstein, Herbert 189
Goldstine, Herbert H. 200
Grabiner, Judith V. 198f., 207
Grassmann, Hermann 356, 406
Grattan-Guinness, Ivor 66, 144, 151, 162, 196, 207, 213, 340
Graves, Robert P. 290-293
Gregory, Frederick 264
Gren, Friedrich A.C: 284
Grosser, Morton 326, 357
Grünbaum, Adolf 423
Guerlac, Henry 145
Haas, Arthur E. 178
Hahn, Robert 227
Halley, Edmund 92
Hamilton, William R.17, 82, 137, 193, 198, 290-296, 313-315, 320-323, 386, 439
Hankins, Thomas L. 91, 135, 141, 147-149, 162, 165, 191, 290-292
Hanson, Norwood R. 58, 65, 108, 424, 432
Hardenberg, Friedrich von *siehe*: Novalis
Harnack, Adolf 150
Hartmann, Eduard von 438
Hattendorff, Karl 363f.
Hecht, Hartmut 158
Hegel, Georg W.F. 16, 24, 299, 305-307, 310, 315
Heidelberger, Michael 375
Heilbron, John L. 359
Helmholtz, Herman von 40, 82, 146, 175, 240, 282f., 308, 317f., 362, 364, 394, 404, 406f., 411, 417, 437
Hempel, Carl G. 79
Hentschel, Klaus 431
Herbart, Johann F. 86, 364, 367, 369, 371, 376-379, 389
Hermann, Jakob 137, 139, 165
Herrmann, Kay 239
Herschel, John 68, 287-293
Hersh, Reuben 41, 356
Hertz, Heinrich 17, 81f., 136f., 144, 147, 193, 212, 331, 435
Hesse, Mary B. 145
Hiebert, Erwin N. 146, 404
Hilbert, David 26, 87, 211, 294, 308
Hindenburg, Carl F. 297, 301
Hobbes, Thomas 326
Hogrebe, Wolfram 239, 265
Hölder, Otto 201, 402
Hooke, Robert 52
Hooykaas, Reijer 77
Hoppe, Edmund 181
Hoppe, Hansgeorg 234, 236f.
Hoyningen-Huene, Paul 41, 145, 222
Humboldt, Alexander von 303, 309, 318-321, 342, 357
Hume, David 147-149, 225f., 250
Huygens, Christian 43, 48, 91, 137, 139, 151f., 178, 402, 415
Ide, Johannes J. 68
Iltis, Carolyn M. 146
Jacobi, Carl G.J. 81f., 86, 161, 191, 201, 214f., 281, 290, 292, 295-299, 305-342, 346-360, 364-369, 375, 378f., 387f., 410-417, 421, 428, 430, 434
Jacobi, Moritz H. 295, 309, 315, 319
Jahnke, Hans N. 284, 295, 297f., 303, 305
Jammer, Max 91, 95, 113, 145, 399f., 402
Jardine, Nicolas 51
Johnson, William E. 262
Jolly, Philipp von 359
Jouguet, Émile 338
Jungnickel, Christa 317, 408
Kaiser, Walter 356f., 364, 370, 395, 406
Kalmár, Lazlo 71

Kant, Immanuel 14-17, 19, 24, 27, 29, 64, 81, 85, 137, 149, 153, 159, 186, 191, 198, 224-284, 290-293, 299-305, 329, 333, 363, 367, 377f., 407, 433f.
Kelsen, Hans 43
Kepler, Johannes 16, 99, 102f., 121, 160, 191, 312f.
Kimminich, Otto 326
Kirchhoff, Gustav R. 58, 68, 81, 147, 317, 402-405, 409
Kitcher, Philip 24, 51, 71, 262, 273
Klaucke, Andreas 310
Klein, Felix 311, 316
Klein, Hermann 17, 81, 402
Kleinpeter, Hans 60
Kline, Morris 362
Klügel, Georg S. 297, 300
Kneale, William C. 49, 262
Kneser, Adolf 146, 247
Knobloch, Eberhard 295, 299f., 309-311, 315
Koenigsberger, Leo 17, 189, 309f., 317-319, 323, 330
Koetsier, Teun 71f.
Köhnke, Karl Ch. 18f., 86
König, Gert 16-19, 24, 29, 40, 58, 69, 76, 87, 110, 240, 244, 272, 284, 288, 300-305, 404, 409, 436
König, Johann S. 151
Kopernikus, Nikolaus 124, 415
Körner, Stephan 41, 284
Kötter, Rudolf 234, 252
Koyré, Alexandre 41, 44, 90, 93, 121, 124, 143
Krafft, Fritz 43, 77, 107, 247
Krause, Albrecht 407
Krohn, Wolfgang 40, 43, 259
Kuhn, Thomas S. 38, 52, 55, 77, 89f., 140f., 145, 220, 222, 400
Kutschmann, Werner 107, 117f.
Küttler, Wolfgang 79
Kuzcnecov, Boris G. 402
Lagrange, Joseph L. 43, 55, 68, 81f., 89, 136f., 141, 145-147, 150f., 154, 163f., 167-170, 178, 187-222, 225f., 237, 240, 248, 276, 281-283, 287, 292, 297, 299, 308, 310, 313, 315f., 319-327, 330, 334-356, 375, 387, 410, 433f.
Laitko, Hubert 381
Lakatos, Imre 21, 24, 38, 44, 51, 70-78, 101, 104, 122f., 136, 155, 178, 208, 211, 214, 220, 222, 334, 355, 357, 386, 429, 432, 438
Lambert, Johann H. 20, 150, 225, 240
Lampariello, Giovanni 370
Lanczos, Cornelius 189, 194
Lange, Ludwig 326, 423-425, 428-430
Laplace, Pierre S. de 50, 59-66, 69, 76, 82-84, 144-147, 161, 167f., 213, 271, 292, 308, 311, 357, 364, 366
Laugwitz, Detlef 361, 369, 372, 375, 384-386
Lefèvre, Wolfgang 145
Legendre, Adrien-Marie 311, 369
Lehmann, Jacob W.H. 282
Leibniz, Gottfried W. 43f., 48, 50, 56, 59, 61, 84, 113, 115, 128f., 137-139, 142-146, 151-158, 165, 167, 172, 177f., 181, 184, 194, 209, 247, 250, 294, 318, 322, 402, 409, 411, 416
Lenoir, Timothy 247
Leonardo da Vinci 82
Leverrier, Urbain J.J. 326, 356f.
Lichtenberg, Georg Ch. 14
Liebmann, Otto 63f., 402, 430
Lind, Gunter 284
Lindt, Richard 162, 191, 196, 340, 346
Link, Heinrich F. 284
Lloyd, Geoffrey E.R. 30
Lobatschewski, Nikolai I. 356, 369
Locke, John 44, 52, 381, 387
Lorenz, Bettina 156
Lorenz, Ludvig V. 406
Lorenzen, Paul 197, 220-223
Lorey, Wilhelm 307f.
Losee, John 110
Mach, Ernst 17, 47, 59f., 69, 77, 81, 84, 86, 90, 113, 147, 151, 168-170, 197f., 209, 215, 295, 319, 358, 402-405, 409f., 423-431, 438
MacLaurin, Colin 133, 149
Maier, Anneliese 16, 43, 58
Mainzer, Klaus 216
Majer, Ulrich 436
Malebranche, Nicolas 142, 147, 250
Manteuffel, Ernst Ch. von 156
Mao, Yi-Hong 264
Martin, Gottfried 229, 284

Maupertuis, Pierre L.M. de 49, 81, 84, 135, 146-153, 161, 163, 166, 177, 183, 189-191, 194-196, 200-203, 237, 246, 248-258, 261, 276, 278
Maurice, Jean F.Th. 207
Maxwell, James C. 47, 60, 370
Mayer, Adolph 146
Mayer, Julius R. 406
McCormmach, Russell 317, 408
McLaughlin, Peter 242
Mehrtens, Herbert 284, 295f., 362, 379f., 388
Mill, John St. 246, 288, 293f.
Mittelstraß, Jürgen 19, 36, 45f., 59, 136, 187, 189, 197, 208, 217-222
Möbius, August F. 282
Monge, Gaspard 282
Montucla, John É. 77, 163
Morveau, Guyton de 207
Motte, Andrew 90, 130
Moulines, Carlos U. 100
Müller, Klaus E. 79
Mutschler, Hans-Dieter 306f.
Nagel, Ernest 65
Napoleon Bonaparte 366
Nelson, Leonard 266
Nemore, Jordanus de 163
Neuenschwander, Erwin 360-362
Neumann, Carl 72, 81, 86, 295, 359-361, 402-432, 437f.
Neumann, Ernst R. 409
Neumann, Franz E. 314-317, 360
Neurath, Otto 60, 63f., 66
Newton, Isaac 11, 15-17, 42-44, 47, 49, 52, 53, 57f., 70, 72f., 77, 81, 84f., 89-199, 208f., 217-222, 225-236, 242, 246f., 250, 268, 272, 276f., 282, 289, 291, 293, 307, 313, 320, 322, 328, 331-333, 356f., 360-374, 381-385, 389f., 398, 402-438, 458
Norton, John 427
Novalis 295, 306, 309-312
Nowak, Gregory 362
Oesterreich, Konstantin 243
Ohm, Martin 297
Olesko, Kathryn M. 314
Osiander, Andreas 124, 415, 418
Ostrogradsky, Michail V. 213, 340
Otte, Michael 284
Panza, Marco 200, 202, 204, 208
Papineau, David 152
Pargetter, Robert 49
Parrot, Georg Friedrich 161, 284
Pasch, Moritz 308
Päsler, Max 17
Pemberton, Henry 133
Picot, Claude 36, 51f.
Pieper, Herbert 295, 299f., 309-311, 315, 318-321, 342, 357
Plaass, Peter 233f.
Planck, Max 359
Platon 25, 85, 305
Plotin 312
Poincaré, Henri 60, 81, 115, 147, 322, 326f., 330-333, 428
Poinsot, Louis 163, 213f., 282, 355
Poisson, Simon D. 145, 161, 213, 315f., 320, 364, 374
Popper, Karl R. 24, 33-38, 49, 57, 65, 67, 70, 72, 95, 102f., 334, 414-419, 429, 431, 438
Portnoy, Esther 369
Poser, Hans 245, 247
Prony, Gaspard C.F.M.R. de 212f.
Ptolemäus 318
Purkert, Walter 361
Putnam, Hilary 376
Pycior, Helen 291f.
Pyenson, Lewis 295
Quine, Willard V.O. 74, 379, 383
Rausch, Hannelore 19
Reden, Wolf von 435
Reech, Frédéric 326
Reich, Karin 369
Reinhold, Karl L. 264
Reusch, Karl D. 159
Rey, Abel 60, 69
Riemann, Georg F.B. 16, 81, 86, 308, 359-403, 407, 411, 413, 416f., 434-438
Riemann, Wilhelm 395
Roberts, Clayton 79
Rogers, G.A.J. 134
Röseberg, Ulrich 41
Rosenberger, Ferdinand 284
Roseveare, N.T. 356, 360
Rötscher, Heinrich T. 315
Rüsen, Jörn 79-83
Russell, John L. 91

Ruzavin, Gregorij I. 41
Sabra, Alan I. 125, 194
Salanskis, Jean-Michel 216
Salié, Hans 402
Sarton, George 209, 213
Sartorius von Waltershausen, Wolfgang304
Schäfer, Lothar 228, 230, 233f.
Scharlau, Winfried 295, 324
Scheibner, Wilhelm 359f., 410
Schell, Wilhelm 430, 435
Schelling, Friedrich W.J.15f., 40, 85f., 264, 299, 305-307
Schering, Ernst 372, 386f.
Schiemann, Gregor 88, 404
Schleiden, Matthias J. 85f., 243
Schlick, Moritz 427
Schmid, Karl Ch.E. 19-21, 24
Schnädelbach, Herbert 23f., 85, 304, 306, 309
Schneider, Ivo 66, 284
Scholz, Erhard 369, 371, 376, 378f.
Scholz, Heinrich 31
Schrader, Wilhelm H. 326
Schramm, Matthias 245
Schubring, Gert 295, 301f., 304
Schulin, Ernst 79
Schüling, Hermann 36
Schüller, Volkmar 115, 143, 157f.
Schumacher, Heinrich Christian 305, 320
Schwertschlager, Joseph 407
Scott, Wilson L. 146
Scriba, Christoph J. 309
Seeliger, Hugo 430
Servus, Hermann 207
Siegel, Carl 239
Speiser, Andreas 389, 396f., 400
Speiser, David 91
Spiess, Otto 140, 170f.
Stäckel, Paul 319
Stadler, August 242
Stallo, Johann B. 60, 69
Stammel, Hans 48
Stegmüller, Wolfgang 227
Stein, Alois von der 20
Stein, Howard 115
Steiner, Jakob 315, 360
Steinle, Friedrich 34, 43, 95, 121, 247
Stevin, Simon 191
Stichweh, Rudolf 19, 84, 284, 295, 297, 304, 307f., 315
Streintz, Heinrich 326, 402, 428, 430
Strong, Edward W. 113
Strubecker, Karl 41
Struik, Dirk J. 295, 369, 399f.
Stuloff, Nikolaus N. 207, 295
Swartz, Norman 262
Szabó, Árpád 17, 91, 130, 151, 348
Tait, Peter G. 143
Tazzioli, Rossana 362
Thiel, Christian 41, 223, 437
Thiele, Rüdiger 245
Thomson, William 143
Thümmig, Ludwig P. 159
Tiles, Mary 42
Todhunter, Isaac 68
Tonelli, Giorgio 124, 133
Torretti, Roberto 216, 402, 423
Toulmin, Stephen E. 109, 111
Trendelenburg, Friedrich A. 18
Truesdell, Clifford A. 90f., 135, 137, 151, 168-170, 201
Ueberweg, Friedrich 243, 285
Ungerer, Emil 242
Urbach, Peter 35f., 38
Varignon, Pierre 139, 191
Vogt, Annette 381
Volkert, Klaus Th. 386
Voss, Aurel 17, 189
Wallace, William A. 59
Wallner, Friedrich 436
Waschkies, Hans-Joachim 252
Watkins, Eric 159, 228, 233, 236
Weber, Heinrich 361
Weber, Wilhelm 317, 369f., 395, 406
Weinert, Friedel 21, 49
Westfall, Richard S. 91, 96f., 101, 107, 117f.
Weyl, Hermann 171, 374, 399f.
Whewell, William 47, 68, 198, 239, 291-293
Whitehead, Alfred N. 22, 85
Whitrow, Gerald 83
Wigner, Eugene P. 41
Wilson, Andrew D. 436
Windelband, Wilhelm 245
Wise, Norton M. 370f., 394
Wittgenstein, Ludwig 436

Wohlgenannt, Rudolf 21, 24, 26
Wolfers, J. Ph. 90, 96, 108, 130
Wolff, Christian 152, 156, 158f., 167, 172, 235, 245
Wolters, Gereon 404, 427, 430
Wright, George H. 79
Wright, Susan P. 332
Wundt, Wilhelm 405f.
Xenophanes 67
Zekl, Hans G. 415
Ziegler, Renatus 282
Zilsel, Edgar 43