Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig

Theatrum naturae et artium – Leibniz und die Schauplätze der Aufklärung

Internationale Konferenz der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, der Universität Leipzig und der Deutschen Gesellschaft zur Erforschung des 18. Jahrhunderts in Kooperation mit der Stadt Leipzig und dem Max-Planck-Institut für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig anlässlich des 300. Todestages von Gottfried Wilhelm Leibniz. Leipzig, 28. bis 30. September 2016

Herausgegeben von
Daniel Fulda und Pirmin Stekeler-Weithofer

In Kommission bei S. Hirzel Stuttgart/Leipzig

Inhalt

A. Leibniz und die Mathematik

Helmut Pulte

Mathesis pura und Mathesis mixta: Die Leitfunktion der Mathematik als Vernunft- und Anwendungswissenschaft im Zeitalter der Aufklärung

1. Einleitung

Das Wissenschaftsverständnis der Aufklärung ist wohl durch keine andere Disziplin so stark geprägt worden wie durch die Mathematik.[1] Als „Stolz der Vernunft" wird sie von Immanuel Kant bezeichnet und es bringt ihre *epistemische* Leistung zum Ausdruck, wenn er sie weiter als „das glänzendste Beispiel einer sich ohne Beihilfe der Erfahrung von selbst glücklich erweiternden Vernunft"[2] charakterisiert. Der Göttinger Mathematiker Abraham Gotthelf Kästner, Lehrer von Carl Friedrich Gauß und Autor mathematischer Werke, die Kant gründlich studierte, beklagt aber etwa zur gleichen Zeit auch gewisse Degenerationserscheinung, nämlich eine Entfernung von der Empirie und der konkreten Anschauung, die Teile der Mathematik in abstrakte Höhen führe, so dass deren Aussagen „nicht mehr Werth [...] als manche Sätze der scholastischen Philosophie"[3] hätten.

Was hier, zwischen Kant und Kästner, auseinandertritt, ist die *Wertsetzung* in Bezug auf die Mathematik als Wissenschaft: erkenntnisermöglichende Vernunftwissenschaft bei Kant, alltagsnützliche Anwendungswissenschaft bei Kästner.[4] Beide Seiten der *einen* Medaille sind für das Aufklärungszeitalter zentral und gleichermaßen unverzichtbar: Die epistemische Leitfunktion der Mathematik ebenso wie ihre utilitaristi-

1 Ich danke Frau Maria Wargin für die technische Einrichtung des Manuskripts und für inhaltliche Diskussionen zu diesem Beitrag.

2 Immanuel Kant: Kritik der reinen Vernunft (^{2}1787). In: Gesammelte Schriften. Akademie-Ausgabe, Berlin 1902–1983. 23 Bde., hier Bd. 3 (^{2}1911), B 740.

3 Vgl. Brief an Johann Friedrich Pfaff, o. D.; zit. nach Herbert Mehrtens: Mathematicians in Germany circa 1800. In: Epistemological and Social Problems of the Sciences in the Early Nineteenth Century, hg. von Hans N. Jahnke und Michael Otte, Dordrecht 1981. S. 401–420, hier S. 405.

4 Hinzu tritt bei Kästner, was hier nicht weiter ausgeführt werden soll, noch eine deutlich spezifischere Kritik an einer bloß symbolischen, gleichsam ‚scholastisch-sterilen' Mathematik, die weder theoretische Erkenntnis noch praktischen Gewinn abwirft, also in doppeltem Sinne nutzlos ist.

sche Funktion, hat doch Wissenschaft allgemein in dieser Zeit immer auch im Dienste der Verbesserung der menschlichen Lebensverhältnisse zu stehen. Die im 18. Jahrhundert geläufigen Bezeichnungen *mathesis pura* bzw. reine Mathematik[5] und *mathesis applicata* oder *mathesis mixta* bzw. angewandte oder ‚vermischte' Mathematik[6] bringen diese beiden Seiten zum Ausdruck, wenn auch nicht in wünschenswerter Klarheit, denn ihr Gebrauch ist durchaus uneinheitlich und schwankend.[7] Was jeweils als *rein* angesehen wird, was als *gemischt*, und was überhaupt *Anwendung* in einer Zeit bedeutet, in der die Natur selbst oft als mathematisch verfasst gedacht wird, erschließt sich nicht unmittelbar und erfordert jeweils genauere Untersuchungen, deren Ergebnisse wohl aufschlussreich für die jeweiligen Mathematikkonzeptionen sind, aber kein einheitliches Bild ergeben. Vorerst sei nur festgehalten: *Rein* und *gemischt* bilden eine gängige Grundunterscheidung, wonach *mathesis pura* zu ihrem Gegenstand die von der Erfahrung nicht beeinträchtigten, ‚abgesonderten' Größen hat, die *mathesis mixta* handelt dagegen auch von den ‚sinnlich wahrnehmbaren' Dingen.

In der frühen Neuzeit bildet sich ein Bereich von *mathesis mixta* aus, der seiner hauptsächlichen, epistemischen Funktion der Welterschließung und -erklärung nach keineswegs utilitaristisch geprägt ist, obwohl sein – bis auf die Antike zurückreichender – Vorläufer im Wesentlichen der *Technik* zugerechnet werden kann, nämlich die *Mechanik*. Isaac Newton nennt sie später in seinem Hauptwerk, den *Principia* rationale Mechanik, um sie als theoretische Disziplin von der praktischen *mechanikē téchnē* der Aristotelischen Tradition abzugrenzen.[8] Ich bevorzuge, in terminologischer Hinsicht etwas anachronistisch, die erst später, wenngleich mit Blick auf die *Principia*, eingeführte Bezeichnung ‚Mathematische Naturphilosophie', um den bedeutenden naturphilosophischen und wissenschaftstheoretischen Reflexionsanteil an der Entwicklung dieses Feldes deutlicher zum Ausdruck zu bringen.[9] Als *Prinzipientheorie* bedarf sie in der Aufklärungszeit und darüber hinaus der philosophischen Begründung; als (in moderner Terminologie) mathematische Physik wird sie zugleich von der Entwicklung der Mathematik und den systematisierten Empiriebeständen der Zeit zur Bewegung von Körpern stark beeinflusst.

---

5 Vgl. hierzu Gert Schubring: The Conception of Pure Mathematics as an Instrument in the Professionalization of Mathematics. In: Social History of Nineteenth Century Mathematics, hg. von Herbert Mehrtens, Henk Bos und Ivo Schneider. Boston, Basel und Stuttgart 1981, S. 111–135.

6 S. Gary I. Brown: The Evolution of the term ‚Mixed Mathematics'. In: Journal of the History of Ideas 52, 1991, S. 81–102.

7 Vgl. z. B. Ian Hacking: Why is there Philosophy of Mathematics at all? New York 2014, S. 146–148.

8 Vgl. Isaac Newton: Die mathematischen Prinzipien der Physik, hg. und übers. von Volkmar Schüller, Berlin und New York 1999, S. 3.

9 Die Bezeichnung ist titelgebend für eines der Hauptwerke des Kantianers Jakob Friedrich Fries: Die mathematische Naturphilosophie nach philosophischer Methode bearbeitet. Ein Versuch (1822). In: Sämtliche Schriften, hg. von Gert König und Lutz Geldsetzer, Aalen 1967–2011, 33 Bde., hier Bd. 13 (1971). Als eine Hauptaufgabe dieses Werkes beschreibt er: „Jetzt käme es darauf an, die Mathematik des Newton mit der Philosophie des Kant glücklich zu vereinigen." Ibid. S. 398).

Der Beitrag stellt die Hauptlinien der Entwicklung der Mathematischen Naturphilosophie in der Aufklärungszeit dar und sucht einige markante Transformationsprozesse herauszuarbeiten. Die Strukturskizze beginnt mit einer Darstellung des Programms von Francis Bacon – jenem Philosophen also, den Jean le Rond d'Alembert beschrieb als ersten unter denen, die „aus der Ferne und in aller Stille die Aufklärung vorbereiteten, von deren Licht die Welt allmählich und in unmerklichem Aufstieg erfasst werden sollte".[10] Anschließend wird die Weiterführung des Baconschen Programms durch Isaac Newton unter dem Eindruck der *Mechanisierung* der Naturphilosophie im 17. Jahrhundert beleuchtet. Danach werden Hauptcharakteristika der mathematischen Naturphilosophie von Gottfried Wilhelm Leibniz in den Blick genommen.

Mit Absicht wird hauptsächlich das Leibniz'sche Programm dem Bacon-Newtonschen gegenübergestellt, und nicht – was historisch ‚näher' läge – das Cartesianische: Es scheint so besser möglich, den ‚Geburtsfehler' des neuzeitlichen Empirismus in der Mathematischen Naturphilosophie, der wesentlich mit dessen Kritik an der Logik und Mathematik zu tun hat, zu beleuchten; der *mathesis mixta* traut Bacon keinen wichtigen Beitrag zur Naturerkenntnis zu. Leibniz dagegen bringt mit seiner spezifischen Konzeption einer *mathesis pura* ein neues Mathematikverständnis in die Diskussion ein, das auch für die Architektonik der Mathematischen Naturphilosophie aufschlussreiche Folgen hat. Dieser Punkt soll gegenüber der empiristischen Tradition und ihrem Verständnis einer *mathesis mixta* herausgestellt werden. Ein Überblick über die Entwicklungstendenzen der Mathematischen Naturphilosophie im Aufklärungszeitalter schließt diese Strukturskizze ab.

2. Das Baconsche Programm und die weitere Mechanisierung der Naturphilosophie

Bacons *Novum Organum* ist nicht, wie Peter Urbach und andere vertreten[11], Zeugnis einer modernen, geradezu ‚Popperianisch' anmutenden Theorie der empirischen Wissenschaft, sondern bleibt – bei all seiner Kritik an der Aristotelischen Tradition – eine Fortsetzung des klassischen Wissenschaftsverständnisses, wie es auch Aristoteles vertreten hat, mit anderen methodischen Mitteln: Die von Bacon entwickelte Theorie der Induktion zielt ab auf eine Erfahrungswissenschaft, die in ihrem Kern axiomatisch, fundamentalistisch und essentialistisch ist. Wolfgang Detel spricht mit Bezug auf diese drei Prädikate, sich selber auf Aristoteles' Konzept der *epistēmē* in der *Zweiten Analytik* beziehend, von einer ‚AFE-Interpretation' des Aristotelischen Wissensbegriffs.[12] Eine solche AFE-Charakterisierung lässt sich auch auf Bacons

10 Jean le Rond d'Alembert: Discours Préliminaire de l'Encyclopédie (1751), hg. von Erich Köhler und übers. von Annemarie Heins, Hamburg ²1975, S. 13.

11 Vgl. stellvertretend Peter Urbach: Francis Bacon's Philosophy of Science: An Account and a Reappraisal, La Salle 1993, v. a. S. 49–58 und S. 187–192, hier bes. S. 188.

12 Wolfgang Detel: Einleitung. In: Aristoteles: Analytica Posteriora. Werke in deutscher Über-

Programm anwenden – jedenfalls dann, wenn man sich von dem rationalistischen Präjudiz befreit, dass die Aufdeckung von Wesensallgemeinheiten allein Sache der Vernunft sei. So beansprucht Bacon ausdrücklich, ausgehend von einer gereinigten, vorurteilsfreien Beobachtung des Besonderen mit Hilfe einer Induktionslogik schrittweise das Allgemeine zu gewinnen und auch, es als wahr und gewiss begründen zu können. „Notiones quam axiomata", „Begriffe sowohl als Axiome", so heißt es bereits in einem der frühen Aphorismen, können auf „einem sichern Wege von den Dingen" hergeleitet werden.[13] Bacon spricht hier von den induktiv zu gewinnenden Gesetzen oder auch Formen der Natur. Sie sind *allgemein*, d. h. kommen allen Körpern zu, und sie sind ausdrücklich „ewig" und „unveränderlich".[14] Die bei ihm auch zu findende Forderung, keine „sichren Principien festzusetzen",[15] erweist sich bei genauer Betrachtung als das methodologische Regulativ, erste Gesetze oder Formen nicht als gewiss anzuerkennen, solange ihre Absicherung durch den richtigen, nämlich induktiven Weg nicht verbürgt ist.

Dass Bacons Theorie der Induktion dennoch eine *Dynamisierung* wissenschaftlichen Wissens initiiert, ist in diesem Zusammenhang oft und zu Recht betont worden. Diese Dynamisierung darf allerdings nicht mit einer epistemischen *Relativierung* verwechselt werden. Das gerne zitierte Diktum, die Wahrheit sei „eine Tochter der Zeit", ist ohne seinen wichtigen Zusatz unvollständig und irreführend: „... und nicht der menschlichen Autoritäten".[16] Bacons These ist daher nicht, dass jede Zeit ihre *eigene* Wahrheit hat, sondern die, dass die *falschen* Autoritäten der Zeit, die Schulphilosophen und Theologen, nicht über die *eine* Wahrheit der Natur verfügen und verfügen können, weil ihnen der richtige Weg zur Natur versperrt ist. Die sichere Methode der Induktion allein kann und wird die Gesetze der Natur enthüllen, und dies auf infallible Weise:

> „In der Natur nämlich existiert nichts wahrhaft außer den einzelnen Körpern mit ihrer besonderen, reinen, gesetzmäßig hervorgebrachten Wirksamkeit; in den Wissenschaften ist eben dieses Gesetz, seine Erforschung, Auffindung und Erklärung die Grundlage des Wissens wie des Wirkens. Dieses Gesetz nun und seine Bestimmungen verstehe ich unter dem Namen Form, zumal diese Bezeichnung Geltung erlangt hat und gebräuchlich ist."[17]

Gerade weil die korrekt durchgeführte Induktion infallibel ist, kann Bacon die durch sie gewonnenen allgemeinsten Gesetze oder *Formen* auch als *axiomata* ansprechen.

---

setzung, hg. von Ernst Grumach und Hellmut Flashar, Berlin 1956–2002, Bd. 3 II (1) (1993), S. 101–438, und Bd. 3 II (2), insbes. S. 278–309, 553–577 und 684–726.

13 Francis Bacon: Neues Organon der Wissenschaft (1620), übers. und hg. von Anton Theobald Brück, Leipzig 1981, 2 Bde., hier Bd. I, Aph. 18, S. 28. Ich verwende an dieser Stelle die mir getreuer erscheinende Übersetzung des Baconschen Hauptwerkes von A. Brück, ansonsten auch die modernere von Rudolf Hoffmann. Siehe hierzu Francis Bacon: Neues Organon, hg. von Wolfgang Krohn, Hamburg 1990, 2 Bde.

14 Bacon: Neues Organon (1990), Bd. II, Aph. 9, S. 106 [wie Anm. 13].

15 Ibid., Bd. I, Aph. 26, S. 93.

16 Ibid. Bd. I, Aph. 84, S. 63.

17 In Aph. 2 erklärt Bacon (ibid., Bd. II, S. 281), warum er beide Begriffe nebeneinander stellt.

In Ansätzen, nicht aber in entwickelter Form wird dabei auch deutlich, dass er – die frühe Renaissance der Korpuskularphilosophie aufnehmend – in den Gesetzen der Bewegung der kleinsten Teilchen erfolgreiche Kandidaten für die aufzudeckenden Formen der Natur sieht: „Es ist besser, die Natur zu zerschneiden, als von ihr Abstraktionen zu bilden."[18] Mit diesen Worten ergreift Bacon Partei für Demokrit und gegen Platon.

Ohne nun gegen Bacon einem Platonismus für die Naturphilosophie das Wort reden zu wollen, scheint mir *genau hier* der ‚Geburtsfehler' des frühneuzeitlichen Empirismus zu liegen: Auch Bacons Formen der Natur bleiben ontologische Setzungen ohne hinreichende erkenntnistheoretische und vor allem methodologische Begründung. Während für die spätere Korpuskularphilosophie Formen der Natur die Messung und mathematische Naturgesetzlichkeit *ermöglichen*, sind *solche* Formen für Bacon geradezu ausgeschlossen. Zwar fordert auch er eine messende Erfassung der Natur, aber gerade die Mathematik kommt für ihn als eine *formgebende* Instanz nicht infrage: Wie der traditionellen, syllogistischen Logik wirft Bacon auch ihr letztlich epistemische Sterilität vor und stellt sie unter den Verdacht, bloße Antizipationen der Natur zu befördern, nicht aber deren *wahre* Interpretation. Zwar *liefert* die Mathematik unbestreitbar Formen, und insofern spielt sie für Bacon auch in der Metaphysik eine Rolle.[19] Ihre Funktion in der Naturforschung ist aber ausdrücklich keine *konstitutive*, sondern eine *begrenzende*: „Eine reine Naturphilosophie", so erklärt er unmissverständlich, gebe es bisher nicht – sie sei verdorben unter anderem durch die Mathematik, und diese „soll die Naturphilosophie eingrenzen, nicht aber befruchten und schöpferisch gestalten".[20]

Bacons Ablehnung von Logik und Mathematik führt auch dazu, dass die Deduktion als Verfahren der begründeten Anwendung höherstufiger empirischer Aussagen auf niedrigere Stufen bei ihm methodisch unterentwickelt bleibt. Und so bleibt auch die Anwendung theoretischer Einsicht für die Erfindung, die sog. ‚Deduktion zur Praxis', entgegen seinen Bestrebungen zur Nutzbarmachung von Wissenschaft, weitgehend unbestimmt: Bacons Mechanik etwa, die als Maschinenlehre für ihn noch zur praktischen Seite der Physik gehörig, lässt keinen näheren Zusammenhang zum naturphilosophischen Gesetzeswissen erkennen.

Es ist nicht einfach, von Bacons Lehre, die die Programmatik der *Royal Society* und den britischen Empirismus allgemein nachhaltig beeinflusste, den Bogen zu schlagen zu demjenigen, der ein knappes Jahrhundert später zum Präsidenten dieser Gesellschaft aufrückte und zwei weitere Jahrhunderte die Gestalt der Mathematischen Naturphilosophie wesentlich mitprägte: Isaac Newton. Eduard J. Dijksterhuis hat für diesen sachlichen und zeitlichen Kontext, aber mit weitergehenden histori-

---

18 Bacon: Neues Organon (1620), Bd. I, Aph. 51, S. 115; vgl. Bacon: Neues Organon (1990) Bd. II, Aph. 2, S. 280 f. [wie Anm. 13]

19 Vgl. Kuno Fischer: Francis Bacon und seine Schule: Entwicklungsgeschichte der Erfahrungsphilosophie. 3. Aufl. Heidelberg 1923, S. 232–233. Fischer liegt allerdings falsch, wenn er *diese* Formen als Ziel der Naturphilosophie ausmacht.

20 Bacon: Neues Organon (1990), Bd. I, Aph. 96, S. 211 [wie Anm. 13]; konkret kritisiert Bacon hier den Neuplatonismus.

schen Absichten, als sie hier verfolgt werden, den Ausdruck *Mechanisierung* geprägt, wohl wissend um dessen Erklärungsbedürftigkeit.[21] Ich bediene mich, in Ermangelung einer besseren Alternative, dieser Verlaufsbezeichnung und werde die Hauptcharakteristika des gemeinten Prozesses in Anlehnung an, aber nicht in völliger Übereinstimmung mit Dijksterhuis gleich skizzieren. Die aus diesem Prozess hervorgehende metaphysische Überzeugung, dass alle Vorgänge zumindest der physischen Natur durch Gesetze der (neuen) Mechanik beschreibbar und erklärbar seien, bezeichne ich als *Mechanismus*. Vorab sei gesagt, dass die fragliche Mechanisierung innerhalb der Naturphilosophie, die sich im 17. Jahrhundert vollzieht, die Struktur und die Methodologie des Baconschen Programms zwar grundlegend verändert hat, aber an den wesentlichen Charakteristika wissenschaftlichen Wissens festhält: Über Newton hinaus lässt sich dieses Wissen als axiomatisch, essentialistisch und fundamentalistisch kennzeichnen. Was aber ist nun unter Mechanisierung genauer zu verstehen? Drei Hinsichten scheinen mir für die Entwicklung der Naturphilosophie zentral zu sein:

(1) Mechanisierung im Sinne einer Quantifizierung von Qualitäten und deren Verhältnissen: Quantifizierbare empirische Eigenschaften werden in die Nähe von traditionellen ‚Wesenseigenschaften' gerückt und steigen zu kausalen Erklärungsprinzipien auf, nichtquantifizierbare Eigenschaften werden herabgestuft und selber erklärungsbedürftig. Die Durchsetzung einer relativ einheitlichen Norm dessen, was ‚Verstehbarkeit der Natur' bedeutet, ist die entscheidende Konsequenz. Galilei stellt im *Il Saggiatore* fest: „In den Körpern außerhalb *von uns* [gibt es] nichts anderes als Größen, Gestalten, Mengen und schnelle oder langsame Bewegung, damit in uns die Geschmäcke, Gerüche und Geräusche geweckt."[22] Hinter

21 „Wir haben im Vorangehenden die Ausdrücke ‚Mechanisierung des Weltbildes' und ‚mechanistische Betrachtungsweise' ohne nähere Erläuterung und Umschreibung gebraucht. Das geschah nicht in der irrtümlichen Annahme, daß sie einer solchen Erläuterung und Umschreibung nicht bedürfen, sondern aus der Einsicht heraus, daß ihre Bedeutung so ungenau und zeitgebunden ist, daß sie sich zu einer kurzen Begriffsbestimmung ganz und gar nicht eignen. In gewisser Hinsicht ist dieses ganze Buch eigentlich ein Versuch, die Frage zu beantworten, in welchem Sinne man von einem mechanischen Weltbild reden kann; ob man dabei an die Bedeutung Werkzeug oder Maschine denkt, die der griechische Ausdruck μηχανή unter anderem besitzt, ob man also die Welt, mit oder ohne Einbeziehung der menschlichen Psyche, als eine Maschine betrachten will, dass die zur Beschreibung des Naturgeschehens verwandten Begriffe und Methoden einer Wissenschaft entstammen, die man in einem ganz anderen als dem ursprünglichen Sinne des Wortes (der durch Werkzeugkunde wiedergegeben werden kann), Mechanik nennt, worunter jetzt Bewegungslehre zu verstehen ist. Vorläufig wollen wir das also dahingestellt lassen." Eduard Jan Dijksterhuis: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin 1956, S. 1–2.

22 Zit. nach der Übersetzung in Dijksterhuis: Die Mechanisierung des Weltbildes, s. 474 [wie Anm. 21]; für den Originaltext S. Galileo Galilei: Le Opere. Edizione Nazionale, ed. A. Favaro, Florenz 1890–1909, 20 Bde., hier Bd. VI, (1933), S. 350: „Ma che ne´ corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e I suoni, si rechiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo; e stimo che, tolti via gli orecchi le lingue e I nasi, restino bene le figure I numeri e I moti, ma non già gli odori né i sapori né i suoni, li quali fuor dellánimal vivente non credo che sieno altro che nomi, come a puanto altro che nome non è il

einer solchen These steht der Geltungsanspruch der jungen Korpuskularphilosophie, der *hypothetisch* zwar in der konkreten Erklärungspraxis, nicht aber in den grundlegenden, auf mathematische Bewegungsgesetze abzielenden Erklärungsprinzipien ist.

(2) Mechanisierung der bereits mathematisierten oder ‚klassischen' Wissenschaften im Sinne von Thomas S. Kuhn,[23] etwa der Astronomie. Es findet eine Ausdehnung *kausaler Erklärungsansprüche* auch auf diese Wissenschaften statt, die die scharfe aristotelische Trennung von Mathematik und Naturphilosophie unterläuft. Anneliese Maier hat meines Wissens als Erste darauf hingewiesen, dass dieser Übergang im Ganzen zunächst keine Exaktheitssteigerung mit sich brachte, sondern durch einen *Verzicht* auf Exaktheit erst erkauft werden musste.[24] Keplers Übergang etwa von einer mathematischen Astronomie zur ‚Rettung der Phänomene', zu einer Himmelsmechanik mit Realitätsansprüchen, ist von dieser Art. Gegen Aristoteles macht Kepler geltend, dass er „jeden Unterschied in den geschaffenen Dingen durch ein ‚Mehr' oder ‚Weniger' auszudrücken" in der Lage sei: „[…] wo Materie ist, da ist auch Geometrie."[25]

---

solletico e la titillazione, rimosse láscelle e la pelle intorno al naso."

23 Thomas S. Kuhn: Mathematische vs. exp. Traditionen (1976). In: Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte, hg. von Lorenz Krüger; übers. von Hermann Vetter, Frankfurt a. M. 1978, S. 84–125.

24 Vgl. Anneliese Maier: Metaphysische Hintergründe der spätscholastischen Naturphilosophie, Rom 1955, S. 402.

25 „Aristoteles, der seine Philosophie über die Geometrie stellt und sie als allgemeiner ansieht, erkennt als ersten Gegensatz in der Metaphysik den zwischen Gleichheit und Differenz an. Mir scheint, dass die Unterschiedlichkeit in den geschaffenen Dingen nur aus der Materie oder dem Nachdenken über die Materie entsteht. Aber wo Materie ist, da ist Geometrie. Daher finde ich das, was Aristoteles als ersten Gegensatz erklärt, nämlich den zwischen Gleichheit und Differenz ohne Mitte, ebenfalls im Bereich der Geometrie, wenn man sie philosophisch betrachtet, als ersten Gegensatz, aber mit Mitte, und zwar dergestalt, dass das, was bei Aristoteles ein Begriff war, Differenz, bei uns in zwei Begriffe aufgeteilt wird, [nämlich] Mehr oder Weniger. Weil die Geometrie das Beispiel für die Erschaffung der ganzen Welt darstellte, stimmen diese geometrischen Gegensätze nicht unpassend zur Einrichtung der Welt, die in unterschiedlichen Kräften der Planeten besteht." Für den Originaltext S. Johannes Kepler: De fundamentis astrologiae certioribus (1601). In: Gesammelte Werke, hg. von Max Caspar, Walther von Dyck, München 1938–2017, 26 Bde., hier Bd. IV (1940), S. 15: "Primam contrarietatem Aristoteles in Metaphysics recipit illam, quae est inter Idem et Aliud: volens supra Geometriam altius et generalius philosophari. Mihi Alteritas, in creatis nulla aliunde esse videtur, quàm ex materia, aut occasione materiae; at ubi materia, ibi Geometria. Itaque quam Aristoteles dixit primam contrarietatem sine medio, inter Idem et Aliud; eam ego in Geometricis, philosophicè consideratis, invenio esse primam quidem contrarietatem, sed cum medio, sic quidem, ut quod Aristoteli fuit aliud, unus terminus, eum nos in plus et minus, duos terminus dirimamus. Cum ergo Geometria toti mundo creando praebuerit exemplar, non ineptè haec Geometrica contrarietas ad ornatum mundi, qui consistit in variatis planetarum viribus, concurret." Für die Bedeutung einer solchen Unterminierung der aristotelischen Unterscheidung von Metaphysik und Mathematik S. Stephen Gaukroger: Explanatory Structures. A Study of Concepts of Explanation in Early Physics and Philosophy, Brighton 1971, S. 102–105. Vgl. außerdem die Analyse der Implikationen der Unterscheidung für ein neues

(3) Mechanisierung der Mathematik selber: Von entscheidender Relevanz ist dabei das Eindringen des Bewegungsbegriffs in die Geometrie und die Arithmetik. Es erlaubt die Konstruktion neuer mathematischer Objekte (wie algebraischer Kurven und Größen) und führt zu neuen mathematischen Begründungsverfahren. Vor allem aber ist dieser Prozess äußerst folgenreich für die klassische Mathematische Naturphilosophie bis ins 19. Jahrhundert hinein: Sie hat es primär mit Bewegung zu tun, und soweit Bewegung mathematisch konzeptualisierbar ist, versteht sie sich jetzt selber als genuin mathematische Disziplin.[26] Stellvertretend verweise ich auf Newtons prägnante Feststellung im Vorwort seiner *Principia*: „Die Geometrie beruht also auf der mechanische[n] Praxis und ist nichts anderes als jener Teil der allgemeinen Mechanik, welcher die Kunst des Messens exakt darlegt und beweist. Weil sich aber die Technik vorwiegend mit solchen Körpern beschäftigt, die bewegt werden sollen, kommt es, daß sich im Allgemeinen die Geometrie auf ihre Größe und die Mechanik auf ihre Bewegung bezieht. In diesem Sinne wird die rationale Mechanik eine exakt dargelegte und bewiesene Wissenschaft von den Bewegungen sein, die aus irgendwelchen Kräften resultieren, und von den Kräften, die für irgendwelche Bewegungen erforderlich sind."[27]

3. Newtons Weiterführung des Baconschen Programms und sein mechanischer Euklidianismus

Der gerade angedeutete dritte Aspekt der Mechanisierung der Naturphilosophie im 17. Jahrhundert führt bereits zu Isaac Newtons *Principia*. Es kann kein Zweifel darüber bestehen, dass es sich hierbei um ein Werk handelt, das die Mathematische Naturphilosophie des 18. Jahrhunderts stärker beeinflusst hat als jedes andere. Infrage steht aber nicht die systematische Bedeutung und historische Wirksamkeit der *Principia*, sondern *worin* diese begründet ist. Wie an anderer Stelle ausgeführt, sollte man jedenfalls *nicht* davon ausgehen, dass Newton mit diesem Werk eine Grundlagenrevolution der Mathematischen Naturphilosophie herbeigeführt und eine klassische Mechanik etabliert hat, die bis zum Ende des 19. Jahrhunderts Bestand hatte.[28]

Verständnis der ‚klassischen' Wissenschaft Astronomie bei Nicholas Jardine: The Birth of History and Philosophy of Science. Kepler's Defence of Tycho against Ursus, Cambridge 1984, S. 225–257.

26 In diesem Punkt stimme ich vollkommen überein mit Dijksterhuis: Die Mechanisierung des Weltbildes, S. 105 [wie Anm. 22]: „[...] 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."

27 Newton: Die mathematischen Prinzipien der Physik, S. 3 [wie Anm. 8].

28 S. hierzu näher Helmut Pulte: 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 1989,

Und weil es keine *Newtonsche* Revolution in diesem Sinne gab, sollte man – wie ich im letzten Teil etwas näher ausführen werde – die Mechanikentwicklung des 18. Jahrhunderts auch nicht als eine ‚Normalwissenschaft' im Kuhnschen Sinne begreifen.

Newton knüpft zum einen mit seiner empiristischen Methodologie an Bacons Programm an; ich komme auf diesen Punkt später zurück. Zum anderen wurden seine *Principia* erst ermöglicht durch die Mechanisierung der Naturphilosophie in allen drei der oben angedeuteten Hinsichten. Insbesondere kann Newton bereits auf eine Fülle mechanischer Gesetzmäßigkeiten zurückgreifen, die auf die mechanisierte Naturphilosophie des 17. Jahrhunderts und daneben auf ältere Ingenieurstraditionen zurückgehen: Fallgesetze, Planetengesetze, Stoßgesetze, Parallelogrammregel, Schwerpunktsatz und andere Gesetze mehr. Wenngleich ‚übergreifende' Gesetze wie sein Gravitationsgesetz noch nicht vorlagen, hatte eine *Nomologisierung* der sub- und supralunaren Bereiche im Sinne einer Ausbildung von mathematischen Naturgesetzlichkeiten zu seiner Zeit bereits stattgefunden.

Newtons *Principia* stellen zwar nicht den ersten Versuch zur systematischen Organisation dieser Gesetzesbestände dar – das hieße, wichtige andere Systematisierungsleistungen, etwa die von Christian Huygens,[29] zu ignorieren – aber sie stellen die erste umfassende und deduktiv weitgehend stringente Systematisierung der theoretischen Mechanik mit Hilfe bestimmter, als solcher ausgewiesener Axiome dar. In dieser Hinsicht kann man die Axiomatisierungsleistung der *Principia* durchaus mit Euklids *Elementen* vergleichen.[30] Dabei werden, wie an anderer Stelle gezeigt wurde, die epistemischen Hauptmerkmale des klassischen, an Euklids Geometrie ausgebildeten Axiombegriffs perpetuiert und es wird – mit einigen, nicht gravierenden Modifikationen – auch das durch diese Geometrie exemplifizierte AFE-Ideal aufrechterhalten: Newtons *Principia* verlängern das klassische Verständnis von Wissenschaft als von einem *axiomatischen, fundamentalistischen* und *essentialistischen* System. Im Einzelnen ist Newtons Hauptwerk[31]

(1) *axiomatisch*, weil es eine mechanische Theorie auf wenigen und allgemeinsten mathematischen Naturgesetzen aufbaut, die als Axiome ausgewiesen werden und die in die Erklärung der Phänomene ihres Gegenstandsbereichs eingehen. Diese markieren den logischen Gehalt seiner rationalen Mechanik;

insbes. S. 6–26.

29 S. Christian Huygens: Horologium oscillatorum, Paris 1673. Einen instruktiven Vergleich zu Newtons *Principia* gibt David Speiser: Die Grundlegung der Mechanik in Huygens' Horologium Oscillatorum und in Newtons Principia. In: Die Anfänge der Mechanik. Newtons Principia gedeutet aus ihrer Zeit und ihrer Wirkung auf die Physik, hg. von Kolumban Hutter, Berlin, Heidelberg und New York 1989, S. 21–46.

30 Man könnte hier die Analogie wagen: Newton verhält sich diesbezüglich in etwa zu einem Huygens wie Euklid zu einem Hippokrates von Chios.

31 Zur näheren Begründung dieser sicherlich nicht unkontroversen Charakterisierung siehe Helmut Pulte: Axiomatik und Empirie. Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Untersuchung zur Mathematischen Naturphilosophie von Newton bis Neumann, Darmstadt 2005, S. 89–134. Es ist wichtig zu betonen, dass es hier um ein klassisches Verständnis von Axiomen geht, nicht um ein modernes, wie es von David Hilbert und anderen vertreten wurde.

(2) *fundamentalistisch*, weil den Axiomen, ihrer als korrekt beanspruchten ‚Deduktion aus den Phänomenen' nach, unbedingte Wahrheit und auch Evidenz beigemessen wird;
(3) *essentialistisch*, weil die Prinzipien der Theorie nicht bloß eine formale Systematisierungsfunktion erfüllen, sondern, wie bei Euklid, semantisch aufgeladen sind: Ihre Grundbegriffe bringen ‚Wesenseigenschaften' oder aber zumindest Universaleigenschaften der Körper und deren kausale Verknüpfungen zum Ausdruck.

Der *Mathematik* kommen in dieser Bacon-Newtonschen Erweiterung des aristotelischen Wissenschaftsideals, anders als noch bei Bacon selber, entscheidende, nämlich erkenntnissichernde Funktionen zu: zum einen auf der Prinzipienebene im Sinne einer Evidenzsicherung nach dem Vorbild Euklids, zum anderen als Instanz der deduktiven Vermittlung von Wahrheit von den Prinzipien auf die nachgeordneten Theoreme.

Ohne die großartige Systematisierungsleistung der *Principia* infragestellen zu wollen, bleibt das ihr zugrundeliegende Wissenschaftsverständnis in mindestens zwei fundamentalen Punkten, die beide die Mathematik betreffen, fraglich. Der erste Punkt sei hier nur kurz angedeutet und wird später[32] erneut aufgegriffen: Newton führt die wichtigsten Prinzipien seiner Mathematischen Naturphilosophie, seine drei berühmten Axiome, in einer Doppelfunktion ein und macht dies auch terminologisch deutlich: Sie heißen bei ihm *axiomata sive leges motus*.[33] Als *leges motus* sollen sie die Bewegung materieller Körper beschreiben und kausal erklären. Als *axiomata* sollen sie zugleich den deduktiven Aufbau einer ganzen mathematischen Theorie der Bewegung und der Kräfte fundieren. Es ist nicht leicht zu sehen, und wird von Newton auch nicht weiter begründet, wie beide Funktionen durch die gleichen Propositionen erfüllt werden können. In der Tat wird die hier angesprochene Spannung im 18. Jahrhundert zu einem grundlegenden Problem.

Zweitens verficht auch Newton im Großen und Ganzen die Baconsche Methode einer certistischen Induktion und verbindet diese mit Elementen der antiken Pappus'schen Methodenlehre von Analyse und Synthese. Entscheidend ist hier die enge Verbindung, die er dabei zwischen verallgemeinernder Induktion und ursachenenthüllender Analyse herstellt.[34] Naturphilosophie beginnt mit der Feststellung der

32 Vgl. hierzu den Teil 5 dieser Strukturskizze.

33 Isaac Newton: Philosophiae naturalis principia mathematica (^{3}1726), with variant readings assembled by Alexandre Koyré, I. Bernard Cohen, Anne Whitman, Cambridge und Mass. 1972, 2 Bde, hier Bd. I, S. 54.

34 „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

Phänomene. Was sie eint, ist ihr Ursprung *in* der Erfahrung, ihre Unwiderlegbarkeit *durch* die Erfahrung und ihre Funktion als Ausgang (weiterer) Verallgemeinerung *von* Erfahrung.[35] Die sich auf Phänomene in diesem Sinne stützende Induktion ist ebenfalls sicher: Sie verfährt nicht negativ bzw. eliminativ, sondern sie ist ein „positiver und direkter" Weg vom Einzelnen zum Allgemeinen.[36] Und sie ist der *einzige* Weg dorthin: „[...] Experimental philosophy proceeds *only* upon Phenomena & deduces general Propositions from them *only* by Induction."[37] Eine nähere Bestimmung des Verhältnisses von verallgemeinernder Induktion und Ursachen enthüllender Analyse sucht man allerdings vergeblich. Insbesondere zeigt Newton nicht, warum am Ende der Induktion (und also am Ende der Analyse) die Kenntnis von *Ursachen* stehen soll: Dass die Analyse mit allgemeinsten mathematischen Naturgesetzen endet, in denen *zugleich* (und sogar im Singular) *die* ‚allgemeinste Ursache' zum Ausdruck kommt, bleibt bei Newton, methodologisch betrachtet, ein *reiner Glaubenssatz*. Mögliche widerlegende empirische Instanzen, das macht er in der vierten seiner berühmten *regulae philosophandi*[38] klar, können gewonnene allgemeine Naturgesetze nur restringieren, aber nicht falsifizieren.[39] Der entscheidende Punkt ist hier, dass Newtons Methode

---

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." I. Newton: Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Bewegungen und Farben des Lichts (^{2}1717), übers. und hg. von William Abendroth, eingeleitet von Markus Fierz, Braunschweig und Wiesbaden 1983, S. 269.

35 In der ersten Auflage der *Principia* wird dies noch durch Newtons schwankende Begrifflichkeit verdeckt: Er nennt dort (noch) ‚Hypothese', was später ‚Phänomen' heißt; vgl. Alexandre Koyré: Newtonian Studies, Chicago 1965, und I. Bernard Cohen: Franklin and Newton. An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof, Cambridge 1966.

36 „[...] 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 examine 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" (I. Newton: Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents, ed. by I. Bernard Cohen, Cambridge 1958, S. 93.

37 I. Newton an Cotes vom 31. März 1713. I. Newton: The Correspondence of Isaac Newton, ed. by H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. Rupert Hall and Laura Tilling, 7 Bde., Cambridge 1959–1977, hier Bd. V, S. 400.

38 Newton: Philosophiae naturalis principia mathematica, Bd. II, S. 555 [wie Anm. 33].

39 Sein gegen den Rationalismus gerichtetes ‚Hypotheses non fingo' gehört in genau diesen methodologischen Kontext: Es ist gegen den Cartesianischen und wohl auch Leibnizschen Rationalismus gerichtet und zielt darauf ab, metaphysische Hypothesen von dieser Seite in die Naturforschung

der bloßen *Geltungsbeschränkung* keinesfalls auf die Sätze angewandt werden kann, die er als *axiomata* an die Spitze des deduktiven Aufbaus seiner Theorie stellt: Diese Sätze verdanken ihre Stellung gerade der behaupteten uneingeschränkten Allgemeinheit, die wiederum in der mechanistischen Überzeugung wurzelt, dass die allgemeinsten Körpereigenschaften durch Größe, Form und Bewegung bestimmt sind.

In Newtons ‚induktiver Hierarchie' fallen daher am Ende auch zwei epistemische Prädikate in nicht weiter begründeter Weise zusammen: die unbeschränkte Allgemeinheit und die Sicherheit der *axiomata*. Newton vertritt die metaphysische, methodologisch eben nicht abgesicherte Überzeugung, dass Gesetze größter Allgemeinheit quasi ‚Wesenseigenschaften' der Körperwelt erfassen. Diese Überzeugung manifestiert sich methodologisch in der Verbindung von Induktion und Analyse, wird durch sie aber nicht gerechtfertigt. Allgemeiner gesagt: Der ‚klassische Empirismus', wie ihn Newton vertritt, muss seinen Certismus *methodologisch* einkleiden, weil er den diesem Certismus zugrundeliegenden Essentialismus, der letztlich ein *mathematischer Realismus* ist, nicht empirisch begründen *kann* und nicht metaphysisch begründen *darf.*

4. Das Leibniz'sche Programm und die Architektonik der Mathematischen Naturphilosophie

Leibniz war nach den Worten von Heinrich Scholz „der konservativste Revolutionär der abendländischen Geistesgeschichte".[40] Seine vielschichtige Mathematische Naturphilosophie mit ihren tradierenden wie auch revolutionierenden Elementen hier in einer gewissen Allgemeinheit darzustellen, ist ganz und gar unmöglich, aber auch nicht notwendig: Für die Zwecke dieser Strukturskizze reicht es aus, mit Fokus auf dem späteren Leibniz – dem Leibniz nach der Pariser Zeit – einige zentrale Differenzpunkte zum älteren Mechanismus und innovative Ausgangspunkte mit Blick auf das 18. Jahrhundert zu umreißen.

Leibniz ist, wie Descartes und wie auch sein großer Gegenspieler Newton, von einer mathematischen Verfasstheit und Erkennbarkeit der Natur überzeugt, *aber auf eine ganz andere Weise.* Und auch bei Leibniz hat die Euklidische Geometrie eine Vorbildfunktion für die Mathematische Naturphilosophie, *aber in einem ganz anderen Sinn.* Anders als *Bacon und Descartes* bricht Leibniz *nicht* mit der Aristotelischen Logik, sondern schließt seine Mathematik an die Logik an, baut sie sogar auf einer weiterentwickelten Logik auf.[41] Anders als für *Bacon und Newton* kann und muss es für Leibniz keine Induktionslogik geben, um zu allgemeinsten mathematischen Na-

---

einzuführen. Siehe Koyré: Newtonian Studies, S. 25–53, hier inbes. S. 35. [wie Anm. 35].

40 Heinrich Scholz: Leibniz. In: Mathesis Universalis. Abhandlungen zur Philosophie als strenger Wissenschaft, hg. von Hans Hermes, Friedrich Kambartel und Joachim Ritter. 2. Aufl., Darmstadt 1969, S. 128–151, hier S. 129.

41 Vorschnelle Vereinnahmungen seiner Philosophie der Mathematik für den modernen Logizismus sind dennoch durchaus problematisch. S. dazu Hans Poser: Zum Verhältnis von Logik und Mathematik bei Leibniz. In: Leibniz: Questions de Logique, hg. von Albert Heinekamp, Stuttgart 1988, S. 197–207, hier S. 199.

turgesetzen aufzusteigen und diese abzusichern. Und anders als für *Descartes und Newton* ist für Leibniz eine Physik (respektive Mechanik) auf der Grundlage von Größenausdehnung, Form und Bewegung *alleine* nicht zu errichten: Die Mathematik ist zwar, wie er verschiedentlich betont, der ‚Ariadnefaden' der Naturphilosophie, aber die Naturphilosophie erschöpft sich nicht in der Mathematik.[42]

Dies ist nicht zu verstehen ohne Leibniz' Begriffs- und Urteilstheorie, die hier vorausgesetzt werden muss. Während Descartes' *mathesis universalis* bei aller Allgemeinheit immer noch an den Größenbegriff und damit an Größenrelationen gebunden bleibt, schließt Leibniz' Konzeption, wie v. a. die *analysis situs* zeigt, auch Qualitäten bzw. Formen ein. In Verbindung mit seiner allgemeinen Zeichenlehre, der *characteristica universalis,* konzipiert er eine formale und symbolische Mathematik, die man als die erste *reine Mathematik* im modernen Sinne überhaupt bezeichnen könnte. Sie ist nicht rein begrifflich zu denken, sondern bedarf als *scientia rerum imaginabilium* einer nichtempirischen Anschauung.[43] Leibniz selber spricht nicht auf Erfahrung bezogene Teile der Mathematik gelegentlich als *mathesis pura* an.[44] Es steht außer Frage, dass die *mathesis universalis* als begriffliches Rückgrat und methodisches Organon zugleich dazu dient, solchen Bereichen der Leibniz'schen *scientia generalis,* die der intuitiven Klarheit der Mathematik ermangeln, dennoch deren *materiale* Sicherheit

---

42 S. hierzu die Belege (1) und (2) unten (Anm. 47 und 48).

43 Dietrich Mahnke schreibt dazu: „Trotz aller Anerkennung des Wertes der Anschauung ist Leibnizens wissenschaftliches Ideal doch die arithmetisierte Geometrie und die logisierte Arithmetik, mit einem Worte die formale Mathematik; ja er ist der eigentliche Begründer dieser modernen Wissenschaftsgestalt, die das Euklidische Ideal der Verwandlung der anschaulichen Mathematik in ein rein logisches Begriffssystem konsequent zu Ende führt. Während nämlich Euklid zwar alle geometrischen Sätze ohne Benutzung der Anschauung aus den vorangestellten Axiomen deduziert, aber die Axiome selbst doch wieder der Raumanschauung entnimmt, ist nach Leibniz das Ziel der Logisierung erst dann erreicht, wenn die Axiome ganz und gar auf formale Definitionen zurückgeführt und diese rein logisch als miteinander verträglich erwiesen sind. Doch gerade bei dieser konsequenten Durchführung zeigt sich nun, dass eine vollständige Ausschaltung zwar der gewöhnlichen Raumanschauung möglich ist, nicht aber die jeder Anschauung überhaupt. Denn es gibt keinen Weg, um den grundlegenden Beweis der Widerspruchslosigkeit oder, wie Leibniz sagt, der ‚compossibilitas' der mathematischen Grundbegriffe lediglich mit Hilfe der formal-analytischen Vernunft zu führen, da diese den systematischen Zusammenhang in lauter gesonderte Begriffselemente auflöst; vielmehr ist hierfür die Mithilfe der synthetischen Anschauung unentbehrlich, die allein jene diskreten Bruchstücke zu einer kontinuierlichen Gegenständlichkeit zusammenzuschliessen imstande ist." Dietrich Mahnke: Leibniz als Begründer der symbolischen Mathematik. In: Isis 9, 1927, S. 279–293, hier: S. 284–285.

44 „Die Mathesis pura ist zwar nicht die Vernunfftlehre an sich selbst, wohl aber eine der ersten geburthen und gleichsam deren gebrauch bey denen größen oder bey zahl, maaß und gewicht." Gottfried Wilhelm Leibniz: Brief an G. Wagner. In: Die philosophischen Schriften, Bd. VII, hg. von Carl Immanuel Gerhardt, Berlin 1890, S. 514–527, hier S. 524. Volker Peckhaus schreibt zum Kontext dieser und ähnlicher Ausführungen treffend: „An einigen Stellen nimmt Leibniz [...] Stellung zum Verhältnis von Logik und Mathematik. Die reine Mathematik (Mathesis pura) sei nicht die Logik an sich, sondern deren Anwendung auf Größe, Zahl und Gewicht." Volker Peckhaus: Logik, Mathesis universalis und allgemeine Wissenschaft. Leibniz und die Wiederentdeckung der formalen Logik im 19. Jahrhundert, Berlin 1997, S. 38.

zu vermitteln.[45] Dieser Punkt ist wesentlich für seine Naturphilosophie, aber *per se* nicht Leibniz-spezifisch und auch nicht neu. Die interessante Frage ist vielmehr, *welche Bedingungen* für eine Vermittlung sich aus Leibniz' besonderer Konzeption einer *mathesis universalis* im Kontext seiner Philosophie ergeben. Im Zentrum steht hier wohl folgende Argumentation:

Wenn die logisch-mathematischen Vernunfturteile der *mathesis universalis*, nur dem Widerspruchsprinzip unterliegend, mit Notwendigkeit und in allen möglichen Welten gelten und unsere Welt gleichsam mit allen möglichen Welten verbinden sollen, bedürfen sie offenbar einschränkender Bestimmungen für *unsere Welt*, die für diese auch *universell* gelten müssen. Nur so können sie zu mathematischen Naturgesetzen beitragen, denen also für diese Welt eine *physische Notwendigkeit* eigen ist.[46] Dies ist der eine Grund, warum reine Mathematik auf Metaphysik angewiesen ist, wenn sie Naturgesetzlichkeit konstituieren will. Gleichsam ‚umgekehrt' gilt auch: Wenn alle Tatsachenurteile über unsere Welt vor dem menschlichen Auge als bloß kontingente Aussagen dastehen, zugleich aber als Aussagen über *unsere* Welt und in der physikalischen Sprache unserer Welt doch teilhaben müssen an den vernünftigen Aussagen und der logisch-mathematischen Sprache für alle Welten, so bedarf es dazu *kennzeichnender* Prinzipien, die die Geltung der Tatsachenaussagen unserer Welt festlegen, weil es um eine Kennzeichnung (und letztlich auch Auszeichnung) dieser Welt *im Ganzen* gegenüber anderen möglichen Welten geht. Dies ist der zweite Grund, warum Mathematik in der Anwendung auf die physische Realität nicht ohne Metaphysik auskommen kann. Mir scheint, dass der spätere Leibniz nur in wenigen anderen seiner Thesen zur Metaphysik so beharrend eindeutig ist wie in der, dass hier – in der Bestimmung und Auszeichnung dieser Welt unter allen logisch-mathematisch möglichen Welten – eine ihrer *Hauptaufgaben* liegt. Auch wenn die Metaphysik in ihrer Methode von der Mathematik profitieren kann und profitieren sollte, ist die Mathematik im gerade skizzierten, *doppelten* Sinne abhängig von der Metaphysik, wenn sie zu einer Wirklichkeitswissenschaft werden will. Hier sieht Leibniz selber auch den wichtigsten Demarkationspunkt seiner Philosophie zur Korpuskularphilosophie und dem älteren Mechanismus. Dies soll an zwei kurzen Zitaten belegt werden:

(1) „[…] wenn auch die Physik auf die Mechanik zurückgeführt werden kann und muß, was wir den Korpuskularphilosophen voll einräumen, so wohnt doch den Gesetzen der Mechanik neben der Geometrie und den Zahlen etwas Metaphysisches inne, betreffs Ursache und Wirkung, Kraft und Widerstand, Veränderung und Zeit, Ähnlichkeit und Bestimmtheit, wodurch der Übergang von mathematischen Gegenständen zu wirklichen Substanzen geschieht."[47]

45 S. hierzu aufschlussreich Wilhelm Risse: Die Logik der Neuzeit, Bd. 2: 1640–1780, Stuttgart-Bad Cannstatt 1970, S. 176–178.

46 Zu Leibniz' Verständnis der ‚möglichen Welten' und den diesbezüglichen Modalbestimmungen s. näher Hans Poser: Leibniz' Philosophie. Über die Einheit von Metaphysik und Wissenschaft, Hamburg 2016, insbes. S. 248–259, 293–307.

47 Gottfried Wilhelm Leibniz: Die Elemente der Vernunft. In: Schöpferische Vernunft. Schriften aus den Jahren 1668–1686, hg. von Wolf von Engelhardt. 2. Aufl., Münster und Köln 1955,

(2) „Ich habe in der Tat die Erfahrung gemacht, daß man die physikalischen Bewegungen nicht allein durch mathematische Gesetze begründen kann, sondern daß notwendigerweise metaphysische Sätze hinzugefügt werden müssen. [...] [Es] folgt aber auf keinen Fall, daß man in den Körpern nichts anderes erkennen kann als das, was materiell und mechanisch ist; auch folgt nicht daraus, daß man in der Materie nur Ausdehnung findet. Denn wenn auch die verworrenen Attribute der Körper auf deutliche Attribute zurückgeführt werden können, so muß man doch wissen, daß es zwei Arten deutlicher Attribute gibt: einige nämlich sind aus der mathematischen und andere aus der metaphysischen Wissenschaft abzuleiten. Aus der mathematischen Wissenschaft stammen Größe, Gestalt, Lage und deren Veränderungen, aus der metaphysischen Wissenschaft aber: Existenz, Dauer, Wirken, Erleiden, Zweck des Wirkens oder Empfindung des Wirkenden."[48]

Stellt man den großen Begriff ‚Metaphysik' für einen Augenblick zur Seite und versucht, Leibniz' Anliegen in heutiger Sprache zu formulieren, ließe sich sagen: Die *mathesis pura* muss um allgemeine, sozusagen ‚prinzipienfeste' Intuitionen über die Konstitution und das Veränderungsverhalten von Körpern ergänzt werden, um eine mathematische Mechanik etablieren zu können. So lassen sich etwa für ihn keine Kausalaussagen mit mathematisch dargestellten Kräften *ohne* das Prinzip vom zureichenden Grund treffen, es kann keine Anwendbarkeit der Infinitesimalrechnung *ohne* Heranziehung des Kontinuitätsprinzips geben, und es gibt allgemein keine rational-mathematische Erkennbarkeit der Natur ohne ein Koordinationsprinzip zwischen Wirk- und Zweckursachen, wie er es in seiner *Monadologie* vertritt.

Hier soll nur der *letztgenannte* Punkt etwas näher ausgeführt werden, weil er einen interessanten, aber kaum beachteten wissenschaftstheoretischen Gesichtspunkt beinhaltet: Dass wir nach Leibniz die Natur nicht nur nach Kausalursachen, sondern auch nach Finalursachen befragen und untersuchen sollten und beide Betrachtungen sich gegenseitig ergänzen und erhellen, läuft den Teleologie-Verdikten von Bacon und Descartes völlig zuwider. Beide vertreten in *dieser* Hinsicht eine antimetaphysische Seite des modernen Mechanismus, die Leibniz' Teleologie, eng verbunden mit seiner Lehre von der besten aller möglichen Welten und ihre Erschaffung durch Gott, auf die seine anagogischen Kausalüberlegungen letztlich abzielen, noch entschieden bekämpft. Dieser metaphysische Begründungskontext erschöpft aber *nicht* einen Zug seiner Mathematischen Naturphilosophie, der mit der von ihm behaupteteten Komplementarität kausaler und finaler Naturbetrachtung eng zusammenhängt: Leibniz bezieht sich bekanntlich in seiner Finalitätsargumentation verschiedentlich auf *optische* Extremalprinzipien, vergleichbar dem Fermatschen Prinzip der schnellsten Ankunft[49]. Ihm wurde von Hermann von Helmholtz, Adolf von Harnack, Max Planck,

S. 183–204, hier S. 194.

48 Leibniz: Entwurf zur Einleitung zu einem Buch über die Naturwissenschaft. In: Schöpferische Vernunft, S. 299–327, hier S. 327–328 [wie Anm. 47].

49 S. hierzu Leibniz: Unicum opticae, catoptricae et dioptricae principium. In: Acta Eruditorum 1682, S. 185–190; deutsche Übersetzung unter dem Titel: Ein einziges Prinzip der Optik, Kat-

Adolf Kneser und anderen sogar die Entdeckung eines universellen *mechanischen* Prinzips der kleinsten Wirkung zugeschrieben, das seine Finalitätsmetaphysik auf der einen Seite und seine Beiträge zur Variationsrechnung auf der anderen Seite komplementiert und gleichsam mathematisch-naturphilosophisch ‚gekrönt' hätte – Leibniz selber spricht in einem verwandten Kontext von „einer Art göttlichen Mathematik oder einem metaphysischen Mechanismus".[50] Allerdings erweist sich eine solche Zuschreibung bei genauerer historischer Betrachtung als durchaus problematisch.[51]

Auf die konkrete Form eines mathematischen Extremalprinzips, das physikalischen Prozessen gewisse allgemeine Minimal- und ggf. auch Maximaleigenschaften zuspricht, kommt es hier aber gar nicht an, sondern auf die *architektonische* Funktion, die Leibniz solchen Prinzipien in seiner Mathematischen Naturphilosophie beimisst: Im *Tentamen Anagogicum* vertritt er ausdrücklich die These, dass die Naturforschung neben *mechanischer, wirkursächlicher* Prinzipien auch *architektonischer, zweckursächlicher* Prinzipien bedürfe: Die Kausalerklärung nach *Wirkursachen* sei verwickelt und mühsam und sei dem Menschen nie vollständig möglich, weil er hier in eine offene zeitliche Kausalkette eintritt.[52] Dem korrespondiert in seiner Urteilstheorie allgemein, dass die Analyse von *Tatsachenwahrheiten* nach dem Prinzip, dass die Prädikate aller wahren Aussagen dem Subjekt inhärent sind, ebenfalls eine unendliche Aufgabe ist. In den Vernunfturteilen der Mathematik hingegen kann das *praedicatum inest subjecto* in endlich vielen Beweisschritten vollzogen werden.

Der angedeutete *Hiatus* lässt sich konkreter auch so fassen: Die mathematische Notwendigkeit der mechanischen Kausalurteile schränkt die physische Notwendigkeit ein, bestimmt diese aber nie eindeutig. Wenn daher solche Urteile auf konkrete Erscheinungen angewandt werden, lassen sie immer unendlich viele verschiedene physikalische Möglichkeiten offen. Ein architektonisches Extremalprinzip sorgt hier nach Leibniz für eine eindeutige Determination: Unter den kausalmechanisch möglichen verbleibenden physikalischen Prozessen werden diejenigen realisiert, die der Architektonik gemäß sind, d. h. in der Sprache der Mathematik: die die Extremwertforderung des Extremalprinzips erfüllen. In der Sprache der Finalitätsmetaphysik drückt sich hier die göttliche Weisheit bei der Erschaffung einer vollkommenen Welt aus: Leibniz' ‚göttliche Mathematik oder metaphysischer Mechanismus' garantiert absolute oder metaphysische Determination des Physischen oder, wie er auch sagt,

---

optrik und Dioptrik. In: Schöpferische Vernunft, S. 287–298 [wie Anm. 47].

50 „Ex his jam mirifice intelligitur, quomodo in ipsa originatione rerum Mathesis quaedam Divina seu Mechanismus Metaphysicus exerceatur, et maximi deterninatio habeat locum." Leibniz: De rerum originatione radicali. In: Die philosophischen Schriften, Bd. VII, S. 302–308, hier S. 304 [wie Anm. 44].

51 S. hierzu Pulte: Das Prinzip der kleinsten Wirkung [wie Anm. 28]. Zu diesem Ergebnis kommt auch Herbert Breger: Über den von Samuel König veröffentlichten Brief zum Prinzip der kleinsten Wirkung. In: Pierre Louis Moreaus de Maupertuis. Eine Bilanz nach 300 Jahren, hg. von Hartmut Hecht, Berlin 1999, S. 363–381. Eine Lanze für Leibniz' Urheberschaft bricht dagegen neuerdings wieder Ursula Goldenbaum: Ein gefälschter Leibnizbrief? Plädoyer für seine Authentizität, Hannover 2016.

52 S. Leibniz: Tentamen Anagogicum. Essay Anagogique dans la recherche des causes. In: Die philosophischen Schriften, Bd. VII, S. 270–279 [wie Anm. 44].

„eine physische Notwendigkeit abgeleitet aus einer metaphysischen Notwendigkeit".[53] Wird diese göttliche Finalität als Residuum einer heute nicht mehr vertretbaren Metaphysik ausgeblendet, bleibt in Leibniz' Argumentation doch ein guter wissenschaftstheoretischer Sinn in der Forderung bestehen, dass die Natur selber eine architektonische Ordnung aufweisen muss, wenn sie uns begreiflich sein soll. Man kann diese Forderung als die nach naturgesetzlicher Bestimmtheit der Natur überhaupt und die nach der Einfachheit ihrer Einzelgesetze auffassen. Diese Forderung impliziert aber auch, dass die Baconsche *physica sparsa*, die verstreute Natur, uns nicht auf einer höheren Ebene in Gestalt einer Mannigfaltigkeit mathematischer Naturgesetze erneut gegenübertritt, sondern dass diese Naturgesetze in einem logischen Zusammenhang stehen, dass sie gewissermaßen *systemfähig* sind. Die architektonische Leistung von Extremalprinzipien deutet Leibniz bereits in seiner Schrift *Unicum opticae, catoptricae et dioptricace principim* von 1682 an.[54] In der Sprache der neueren Wissenschaftstheorie könnte man sagen, dass es in dieser Architektonik nicht nur um intranomische Notwendigkeit der einzelnen Naturgesetze, sondern auch um internomische Notwendigkeit *zwischen* den Naturgesetzen geht. Das ist ein Anliegen, das Newton mit seiner Identifikation von Axiomen des theoretischen Systems und *leges motus*, die die Bewegungsabläufe der materiellen Körper bestimmen, vollkommen fremd ist: Mit seiner Bezeichnung *axiomata* sive *leges motus* benennt er unfreiwillig und unbemerkt ein Problem – das Problem nämlich, ob und warum theorieorganisierende Axiome zugleich Bewegungsgesetze sein können – bietet aber keine Lösung. Kant greift es in der *Transzendentalen Methodenlehre* der ersten Kritik und auch in der *Kritik der Urteilskraft* als Forderung nach einer subjektiven *formalen* Teleologie auf.[55]

5. Ein Ausblick auf das 18. Jahrhundert: Der Mechanische Euklideanismus und seine Folgen

Ein kurzer, notwendigerweise auch verkürzender Ausblick auf das Jahrhundert der Aufklärung mag verdeutlichen, in welche Problemlage eine Mathematische Naturphilosophie, die weiter einem mathematischen Leitideal verpflichtet bleibt, geraten kann, wenn sie nicht von einer Reflexion auf ihre Architektonik, wie Leibniz sie

53 Leibniz: De rerum originatione radical,i S. 304 [wie Anm. 50].

54 Vgl. Leibniz: Ein einziges Prinzip der Optik, Katoptrik und Dioptrik, insbes. S. 290 [wie Anm. 49].

55 Durchgehende Naturgesetzlichkeit, aber auch die Möglichkeit der systematischen Einheit der Einzelgesetze sind nach Kant Maximen der Naturforschung, deren die theoretische Vernunft bedarf. S. hierzu und zur weiteren, im Wesentlichen methodologischen Transformation dieser Forderung Helmut Pulte: Mannigfaltigkeit der Regeln und Einheit der Prinzipien: Zur Entmetaphysierung teleologischen Denkens im Anschluß an P. L. M. de Maupertuis. In: Pierre Louis Moreaus de Maupertuis. Eine Bilanz nach 300 Jahren, hg. von Hartmut Hecht, Berlin 1999, S. 235–259; Ders.: Von der Physikoteleologie zur Methodologie. Eine wissenschaftstheoriegeschichtliche Analyse der Transformation von nomothetischer Teleologie und Systemdenken bei Kant und Fries. In: Jakob Friedrich Fries – Philosoph, Naturwissenschaftler und Mathematiker, hg. von Wolfram Hogrebe und Kai Herrmann, Frankfurt a. M. [u. a.] 1999, S. 301–351.

geleistet hat, begleitet wird. In Erinnerung zu rufen ist dabei vorab, dass es hier weiter um die Grundlagen der rationalen *theoretischen* Mechanik geht, die mit Clifford Truesdell als ein experimentell wenig beeinflusstes, wesentlich von der Entwicklung der Mathematik getragenes Unternehmen zu begreifen ist, in dem allerdings – und dies ist *gegen* Truesdell zu konstatieren – die philosophische Grundlagenreflexion zunächst noch eine wichtige und konstitutive Rolle spielt.[56] Es handelt sich bei ihr *nicht*, entgegen einem verbreiteten und offenbar kaum auszurottenden Vorurteil, um eine Newtonsche ‚Normalwissenschaft' im Sinne Thomas S. Kuhns, einem Unternehmen also, das sozusagen nur noch mit der inhaltlichen Detailarbeit an einem Newtonschen Paradigma beschäftigt war.[57] Klassische und Newtonsche Mechanik sind, worauf zuerst hinzuweisen ist, klar zu unterscheiden, denn Klassische Mechanik bildet sich im 18. Jahrhundert überhaupt erst aus unter dem Einfluss *verschiedener* Programme, unter denen die von Newton, Leibniz und Descartes nur die wichtigsten sind.[58]

Zweitens ist ein Hauptcharakteristikum der zu skizzierenden Entwicklung, dass nahezu alle (und zumal die wichtigsten) Grundlegungsprogramme der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts sich am Ideal der Euklidischen Geometrie orientierten, d. h. sie entwickelten ihrem Anspruch nach mathematische, axiomatisch-deduktiv aufgebaute und empirisch gehaltvolle Theorien zugleich, wobei deren erste Prinzipien Anspruch auf unbezweifelbare Wahrheit erheben. Deshalb spreche ich hier auch von einem ‚Mechanischen Euklideanismus', der – bei allen Begründungsdifferenzen im Einzelnen – weiterhin als axiomatisch, fundamentalistisch und essentialistisch gekennzeichnet werden kann. Die ersten Prinzipien der jeweiligen Theorien werden als ‚Axiome', ‚notwendige Wahrheiten' oder ‚unbezweifelbare Bewegungsgesetze' ausgewiesen, denen *nichts* Hypothetisches anhaftet; es ist ihr *mathematischer* Charakter, der dabei als primärer Garant epistemischer Sicherheit fungiert. Die weitere Art ihrer Begründung – ob empirisch-induktiv wie bei Newton oder metaphysisch wie bei Leibniz – kann zwar verschieden sein, dient aber gewöhnlich dazu, diesen Prinzipien *Evidenz* zu verleihen; das ‚Licht der Erfahrung' und das ‚Licht der Vernunft' dienen diesem Ziel gleichermaßen. Es ist daher, je weiter die Entwicklung der rationalen Mechanik voranschreitet, nicht sehr fruchtbar, ihre Theorien nach empiristischen und rationalistischen Fundierungen zu unterscheiden. Entscheidend ist vielmehr für den ‚Mechanischen Euklideanismus' generell eine – mit Lakatos zu sprechen – „unbezweifelbare Wahrheitswertsetzung an der Spitze […], so daß die Wahrheit von dort auf sicheren wahrheitserhaltenden Kanälen der gültigen Schlüsse das ganze System

56 Vgl. hierzu Clifford A. Truesdell: A Programm towards Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason. In: Archive for the History of Exact Science 1 (1960), S. 1–36.

57 Zur Kritik dieses Vorurteils s. Pulte: Das Prinzip der kleinsten Wirkung, insbes. S. 13–22 [wie Anm. 28].

58 So ist die wichtige Rolle von Erhaltungs- und Variationsprinzipien in der Klassischen Mechanik nur unter der Prämisse zu verstehen, dass sie eben *keine* genuin Newtonsche ist, denn in Newtons Mechanik spielen weder Erhaltungssätze noch Extremalaussagen eine Rolle. Es sind die kontinentalen Programme der rationalen Mechanik, die diese und andere Theoriebestandteile zu dem beisteuern, was heute als Klassische Mechanik bezeichnet wird.

durchdringt".[59] Diese Wahrheitssetzung ist *unitarisch*, d.h. die Möglichkeit, dass es unterschiedliche Sätze mechanischer Axiome geben könnte, die unterschiedliche Theorien begründen und den gleichen Erfahrungsbereich beschreiben und erklären könnten, liegt ganz *außerhalb* des klassischen Wissenschaftsverständnisses, das hier am Werke ist.

Ich denke, dass man die Entwicklung des Mechanischen Euklidianismus im 18. Jahrhundert, wie ich ihn verstehe, schematisierend in drei Phasen unterteilen kann:[60]

Die erste Phase ist gekennzeichnet durch die Rivalität der großen Programme mit ihren jeweiligen mechanischen Prinzipien. Die meisten dieser Prinzipien sind noch synthetisch formuliert und werden auf der Grundlage der jeweiligen wissenschaftlichen Metaphysik und Methodologie als allein wahre Prinzipien ausgewiesen. Die philosophischen Kontroversen über alle Grundbegriffe der Mechanik – Raum, Zeit, Newtonsche Kraft (besonders die Gravitationskraft), Leibniz'sche *vis viva*, Cartesianische Bewegungsgröße, Masse – sind vor allem Kontroversen darüber, welche mathematische Semantik die richtige ist; denn *alle* in Rede stehenden Grundbegriffe sind *semantisch geladen*. Die Fruchtbarkeit dieser Kontroversen zeigt sich in einer wahren Inflation sogenannter ‚Prinzipien' während der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts, und es ist, wie Ernst Mach zu Recht bemerkte, eine wahre „Sucht zu beweisen" zu verzeichnen, die er als Indikator „einer *falschen und verkehrten Strenge*"[61] versteht. Das Streben, möglichst *alle* allgemeinen Aussagen der rationalen Mechanik aus den eigenen Prinzipien abzuleiten, dient dazu, die Evidenz letzterer auszuweisen.

Die zweite Phase ist die einer verstärkten Formalisierung und deduktiven Organisation. Jean le Rond d'Alemberts *Traité de Dynamique* liefert dafür ein mustergültiges Beispiel.[62] Die philosophischen Grundlagenkontroversen treten in den Hintergrund zugunsten des Versuchs, mechanische Gesetze auch anderer Programme, die sich für bestimmte Klassen von Bewegungsproblemen bewährt haben, unter möglichst all-

59 Imre Lakatos: Philosophische Schriften, Bd. 2, hg. von John Worrall und Gregory Curry; Braunschweig 1982, S. 5.

60 Der folgende Überblick fasst einige Hauptergebnisse einer ausgedehnteren wissenschaftstheoretischen Untersuchung zur rationale Mechanik des 18. Jahrhunderts in sehr knapper Form zusammen. Für eine detaillierte Darstellung s. Pulte: Axiomatik und Empirie, S. 35–239 [wie Anm. 31].

61 Ernst Mach: Die Mechanik, historisch-kritisch dargestellt. 9. Aufl. Leipzig, repr. Darmstadt 1982, S. 68. Später setzt er hinzu: „Solche Beispiele falscher Strenge finden sich fast in jedem Lehrbuch" (ibid., S. 72).

62 „En général, on a été plus occupé jusqu'à présent à augmenter l'édifice qu'à en éclairer l'entrée; & on a pensé principalement à l'élever, sans donner à ses fondamens toute la solidité convenable." Je me suis proposé dans cet Ouvrage de satisfaire à ce double objet, de reculer les limites de la Méchanique, & d'en applanir l'abord; & mon but principal a 'eté de remplir en quelque sorte un de ces objets par l'autre, c'est-à-dire, nonseulement de déduire les Principes de la Méchanique des notions les plus claires, mais de les appliquer aussi à de nouveaus usages; de faire voir tout à la fois, & l'initulité de plusieurs Principes qu'on avoit employés jusqu'ici dans la Méchanique, & l'avantage qu'on peut tirer de la combinaison des autres pour le progrès de cette Science; en un mot, d'étendre les Principes en les réduisant." Jean le Rond d'Alembert: Traité de Dynamique, Paris 1743, S. iv.

gemeine Prinzipien zu bringen. Dabei spielen analytische Variationsprinzipien, sowohl differentielle als auch integrale, wie Leibniz sie schon im Sinn hatte und wie sie maßgeblich von Euler entwickelt wurden, eine zentrale Rolle. Auch wenn es völlig verkürzt wäre, die Mathematik in dieser Phase als eine Art *lingua franca* anzusehen, die es erlauben würde, die ‚semantischen Gräben' zwischen den verschiedenen Programmen zu überbrücken, so ist doch zu konstatieren, dass das dem gemeinsamen Euklidianismus innewohnende Streben nach möglichst weitgehender deduktiver Unterordnung von Einzelgesetzen eine *semantische Entladung* der jeweils angenommenen Prinzipien befördert.[63] Erkauft wird diese enorme Integrationsleistung dadurch, dass die dabei vorausgesetzten Grundgesetze sich von semantischen zu wesentlich *syntaktischen* Prinzipien wandeln.[64]

Die *dritte und letzte Phase* bestimmt die zweite Jahrhunderthälfte und findet mit Lagranges *Mécanique analytique* von 1788 einen gewissen Abschluss. Sie ist dadurch charakterisiert, dass noch verbleibende synthetisch-geometrische Darstellungen durch analytische, d. h. durch Differential- oder Integralprinzipien ersetzt werden. Der Variationskalkül dominiert als Ableitungsinstrument, d. h. der Deduktion speziellerer Gesetze der Bewegung und Ruhe aus allgemeineren Variationsprinzipien, ohne dass die damit beanspruchte Wahrheitsvermittlung an raumzeitliche Anschauung gebunden bliebe. Die *semantische Entladung* von mechanischen Größen, die in die Prinzipien eingehen, findet hier ihren Abschluss: In der Ableitungspraxis der analytischen Mechanik ersetzen skalare Größen (etwa das Wegintegral über die Bewegungsgröße) solche, die in der älteren Mechanik noch gerichtete Bewegungsvorgänge ausdrückten und kausale Funktion beanspruchten (wie die Newtonsche, direktive Kraft). Lagrange verbindet den analytischen Ansatz denn auch mit einem bemerkenswerten Methodenpurismus: *Analytisch* ist seine Mechanik dem Anspruch nach nicht nur in dem Sinne, dass sie, *anders* als frühere Mechaniken, auf keinerlei geometrische Anschauung mehr Bezug nimmt.[65] *Analytisch* ist seine Mechanik auch in dem Sinne, dass sie, *anders* als die Hauptwerke Eulers oder d'Alemberts, jede *philosophische* Reflexion auf die Prinzipien und Grundbegriffe der Mechanik verzichtet; eine explizite Definition ihrer Grundbegriffe sucht man vergeblich. Die *Mécanique analytique* ist somit

63 Um nur ein Beispiel zu nennen: Euler machte Descartes' Prinzip der Bewegungserhaltung (modern: der Erhaltung des Impulses, skalar genommen, für gewisse Klassen von Wechselwirkungen) und Leibniz' Prinzip der Erhaltung der *vis viva* zu abgeleiteten Gesetzen, zu Integralen über den Weg und die Zeit. S. Pulte: Axiomatik und Empirie, S. 176–178 [wie Anm. 31].

64 Es ist, nebenbei bemerkt, diese zweite Phase, in der Newton in der wissenschaftlichen Welt zur beherrschenden Figur erhoben wird und – ironischerweise – eine induktivistische Methodologie verbale Siegeszüge feiert. Die hier aufkommende Sichtweise ist eher zu einer ‚ideologischen Unterströmung' des Aufklärungszeitalters denn zur Praxis der rationalen Mechanik in dieser Zeit zu rechnen. S. hierzu Helmut Pulte: Hypotheses (non) fingo? Das Wissenschaftsverständnis der Aufklärung im Spiegel ihrer Newton-Rezeption. In: Aktualität der Aufklärung, hg. von Ryszard Rózanowski, Warschau 2000, S. 77–106; Ders.: ‚'Tis much better to do a little with certainty': On the Reception of Newton's Methodology. In: The Reception of Isaac Newton in Europe, ed. by Scott Mandelbrote and Helmut Pulte. 3 vols. London 2017, [im Erscheinen].

65 Stolz bemerkt er im Vorwort seines Werkes: „On ne trouvera point de Figures dans cet Ouvrage." Joseph Louis Lagrange: Mécanique analytique, Paris 1788, S. vj.

nicht nur im mathematischen, sondern auch im wissenschaftstheoretischen Sinne des Wortes *kein synthetisches Werk* mehr. Dieser Endpunkt der Entwicklung der rationalen Mechanik ist *historisch* ebenso bemerkenswert wie *systematisch* fragwürdig, denn Lagrange hält trotz dieses Wandels einen Mechanischen Euklideanismus als wissenschaftstheoretisches Programm mit entsprechenden formalen Wahrheitsansprüchen hoch. Er versteht Mechanik als eine bloße Mathematik[66], die eine Erfahrungswissenschaft begründen kann, ohne dass ihre Prinzipien und Grundbegriffe selbst in erkennbarer Weise auf Erfahrung referieren. Hier wird eine unterstellte *intrinsisch mathematische* Natur gleichsam im Infinitesimalkalkül abgebildet: „Man kann also die Mechanik als eine Geometrie mit vier Dimensionen und die Analysis der Mechanik als eine Ausdehnung der geometrischen Analysis betrachten."[67] Er fasst die gesamte Mechanik, Statik und Bewegungslehre unter *ein einziges analytisches* Prinzip und beansprucht hierfür den Status eines *Axioms*. Erst spät gesteht er sich und der *scientific community* ein, dass seinem Prinzip dazu wesentliche epistemische Merkmale fehlen, nämlich Anschaulichkeit und Evidenz. Der Versuch, dieses Desiderat zu beheben, indem selbst das vermeintliche Axiom noch einmal durch angebliche Beweise anschaulich abgesichert wird, ist systematisch nicht ohne Ironie, aber vor allem ein untrügliches Zeichen der *Degeneration* des Mechanischen Euklideanismus, die von hier ihren Ausgang nimmt.[68]

Nicht ohne *historische* Ironie ist, dass Lagrange selber die *Mécanique analytique* als Krönung der Newtonschen Mechanik, gleichsam als ihren ‚induktiven Abschluss nach oben', verstanden hat. Mit Blick auf Newtons Wendung *axiomata sive leges motus* kann man sagen: Lagrange hat die rationale Mechanik semantisch entleert und – dem Anspruch nach – zu einer reinen Mathematik gemacht, indem er das *sive* in einem ausschließenden Sinne zugunsten der *axiomata* entschieden hat. Was Newton ein Jahrhundert zuvor noch zusammendenken konnte, tritt bei Lagrange unter dem Druck eines Jahrhunderts, das gekennzeichnet ist vom Streben nach systematisch-deduktiver Organisation und Formalisierung wachsender Wissensbestände der rationalen Mechanik, auseinander. Das ist die Entwicklung, die in diesem Übersichtsteil skizziert werden sollte, um zu zeigen, dass Leibniz' Forderung, neben kausalmechanischen Bewegungsgesetzen *auch* architektonische Prinzipien für den Aufbau einer Mathematischen Naturphilosophie einzusetzen, einen guten Sinn hat. Dass beiderlei Arten, wie die *Mécanique analytique* von 1788 glauben machen möchte, gleichsam in *einer* Welt- *und* Theorieformel zusammenfallen, dafür gibt es keine Garantie.

---

66 „Ceux qui aiment l'Analyse, verront avec plaisir la Mécanique en devenir une nouvelle branche, & me sauront gré d'en avoir étendue ainsi le domaine." Lagrange: Mécanique analytique, S. vj [wie Anm. 65].

67 Übersetzt nach Joseph Louis Lagrange: Théorie des fonctions analytiques. Nouvelle édition, revue et augmentée par l'auteur, Paris 1813, S. 337.

68 S. hierzu auch Helmut Pulte: Jacobi's Criticism of Lagrange: The Changing Role of Mathematics in the Foundation of Classical Mechanics. In: Historia Mathematica 25 (1998), S. 154–184.

6. Schluss

Ziel dieser Strukturskizze war es zu zeigen, in wie starkem Maße eine Wissenschaft, die selber von starken empirischen Ansprüchen getragen wird, durch ein mathematisches Leitideal geprägt wurde und welche Folgen hieraus in ihrer weiteren Ausbildung resultierten. Euklids *Elemente* dienten als Vorlage für eine Mathematische Naturphilosophie als eine axiomatisch-deduktiv verfahrende Wissenschaft, die ein klassisches Wissenschaftsideal in die moderne Naturwissenschaft hinein verlängerte. Empirismus und Rationalismus unterscheiden sich diesbezüglich zwar in der Verlaufsform, in der sich Mathematische Naturphilosophie entwickelt, wie natürlich auch in deren Begründungsform, aber nicht wesentlich hinsichtlich der an diese Wissenschaft gerichteten epistemischen Ansprüche. Stellt man in Rechnung, dass die neuzeitliche Naturwissenschaft zunächst und vor allem von der Mechanik als Leitbild orientiert war, ist es an der Zeit, sich von dem Mythos zu verabschieden, sie hätte bereits im Zuge der sogenannten ‚Wissenschaftlichen Revolution' einen modernen, hypothetisch-deduktiven Wissenschaftsbegriff hervorgebracht. Was die Mathematische Naturphilosophie angeht, gewinnt dieser Wissenschaftsbegriff vielmehr erst im 19. Jahrhundert die Oberhand.[69] Die im letzten Teil angedeutete, bis hin zu Lagrange sich aufbauende Spannung von empirischen Ansprüchen und Euklidianistischem Leitideal ist maßgeblich für diese Modernisierung des Wissenschaftsverständnisses: Die Degeneration des Mechanischen Euklidianismus mündet im 19. Jahrhundert in eine Krise der Prinzipien, die historisch betrachtet erst der Ermöglichungsgrund dafür war, dass die rationale Mechanik zu einer hypothetisch-deduktiven Wissenschaft im modernen Sinne wird, d. h. sich einer *grundsätzlichen* Kritik und Revision durch empirische Befunde öffnen konnte. Die Auflösung des tradierten ‚top down-Verständnisses' *musste* dem modernen ‚bottom up'-Verständnis, das *heute* als selbstverständlich gilt, historisch vorangehen. Dass der Positivismus des späteren 19. Jahrhunderts und der Empirismus des 20. Jahrhunderts die Geschichte der Mathematischen Naturphilosophie zu einem Siegeszug ‚ihrer' Philosophie verklärt haben, ist bestenfalls eine Geschichtsklitterung, die darüber hinwegtäuscht, dass die hohen epistemischen Ansprüche, die *auch von dieser Seite* an die Adresse der rationalen Mechanik gingen, systematisch höchst unzureichend untermauert wurden.[70] Das

69 Bis Mitte des 19. Jahrhunderts und darüber hinaus sind Lehrwerke der Mechanik, die den Vorbildcharakter der Euklidischen Geometrie betonen, an der Tagesordnung. So etwa, beeinflusst von Kant, das Lehrwerk von William Whewell: The Mechanical Euclid. Containing the Elements of Mechanics and Hydrostatics. Demonstrated after the Manner of the Elements of Geometry. 4. Aufl. London 1843.

70 Zu den wenigen Vertretern des Empirismus des 20. Jahrhunderts, die diesen Punkt gesehen haben, gehört wohl Richard B. Braithwaite, wenn er zum axiomatisch-deduktiven Aufbau von Newtons *Principia* bemerkt: „[...] 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

in dieser Tradition vorherrschende *abstraktive* Verständnis von Mathematik macht die Mechanik zu einer *mathesis mixta*, die an der epistemischen Autorität der Mathematik partizipiert. Hier tritt ein genuines Anwendungsproblem gar nicht auf: Die Begriffe und Beziehungen der Mathematik werden gewonnen durch Erfahrung an der physischen Realität, und repräsentieren daher auch die Grundstrukturen dieser Realität. Dies ist die dominierende Auffassung der korpuskularphilosophischen Tradition und auch der wichtigsten Vertreter der rationalen Mechanik des Aufklärungszeitalters. Die Konzeption einer *mathesis pura*, wie Leibniz sie vertritt, war dagegen in der Mathematischen Naturphilosophie dieser Zeit wenig einflussreich. Sie erfordert eine Vermittlung zwischen den Vernunfturteilen der Mathematik und den Tatsachenurteilen der Erfahrung. Die Mathematik allein kann daher die hohen epistemischen Ansprüche an eine Mathematische Naturphilosophie nicht einlösen: Zum einen bedürfen die Prinzipien der Mechanik einer metaphysischen Absicherung; zum anderen bedarf es einer Architektonik, die garantiert, dass sich die Gesetzmäßigkeiten der Mechanik in einem System zusammenschließen lassen. Kants Versuch einer transzendentalphilosophischen Fundierung der rationalen Mechanik, wie es vor allem in den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* (1786) hervortritt, ist in jüngerer Zeit – vor allem in der angelsächsischen Kantforschung – recht stark ‚newtonianisiert' worden, steht aber in seinen Begründungsabsichten dieser zweiten Linie näher.

---

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." Richard B. Braithwaite: Scientific Explanation. A Study of the Function of Theory, Probability and Law in Science, New York [u. a.] 1960, S. 353.