

BEITRÄGE

zur Geschichte von Technik
und technischer Bildung

Folge 7



Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur
Leipzig (FH)
1993

Die Newton-Rezeption in der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts Wissenschaftstheoretische, -historische und -historiographische Reflexionen zu einem kontroversen Thema*

Helmut Pulte

0. Einleitung

*Ich habe auch vor Newtons Grabmal in Westminsterabtei gestanden; ich habe Shakespeares Denkmal, vermischt mit denen von großen Helden, angesehen; allein ich muß bekennen, vielleicht zu meiner Schande, daß der Eindruck sehr gemischt und eigen war. Ich konnte mich unmöglich überzeugen, daß Newton und Shakespeare dadurch geehrt würden, sondern ..., so war es mir, als ständen diese Denkmäler da, die übrigen zu ehren und dem Platz Ehre zu verschaffen. Es war mir unmöglich, mich von diesem Gefühl loszumachen.
(Georg Christoph Lichtenberg)*

Ähnlich wie Lichtenberg in der Westminster Abbey geht es wohl auch jedem, der aufgefordert ist, über Newtons Mechanik und ihre Rezeption zu berichten: Das Original Newton hat es nicht nötig, 'ihm zu Ehren' *historiographische* Denkmäler zu errichten; und die vorhandenen Denkmäler sind schon so monumental, daß es kaum möglich erscheint, sie noch durch wesentlich neue Bausteine zu bereichern. Wohl werden die beinahe religiöse Newton-Verehrung des Aufklärungszeitalters, die Ende des 18. Jahrhunderts in Frankreich tatsächlich in Plänen für ein gigantisches Newton-Monument 'gipfelte' [55, S. 147], wie auch die wissenschaftshistorischen Apotheosen eines W. Thomson und P.G. Tait im Viktorianischen Zeitalter [52, S. 62] heute eher als kuriose Phänomene betrachtet, die selber der historischen Erklärung bedürfen. Das 'Denkmal' Newtons als des *Revolutionärs der neuzeitlichen Mechanik und Physik schlechthin* blieb von diesen 'Profanationen' jedoch weitgehend unberührt.

In diesem Beitrag soll nun eine Art 'kritische Denkmalpflege' versucht werden. Es geht mit anderen Worten darum, das von der Wissenschaftsgeschichtsschreibung geschaffene Bild (oder Denkmal) von Newtons Mechanik und ihrer Wirkung im 18. Jahrhundert zu skizzieren und im Lichte einiger neuerer Forschungsergebnisse zu überprüfen. Im *ersten Teil* werde ich daher auf das gängige Geschichtsbild und seine Implikationen eingehen.

* Erweiterte Fassung meines Vortrages auf dem Symposium *Isaak Newton und die Schaffung einer neuen Physik*, veranstaltet von der Sächsischen Akademie der Wissenschaften und dem Karl-Sudhoff-Institut der Universität Leipzig am 21. Oktober 1993 in Leipzig. Ich danke den Teilnehmern für Diskussion und Kritik.

Der Begriff 'Newtonianismus' gehört vermutlich zu den am häufigsten mißbrauchten in der ganzen Wissenschaftsgeschichtsschreibung [34]. Hier soll es nur um einen kleinen, aber wichtigen Ausschnitt des Problemkomplexes gehen, der durch dieses Etikett angedeutet wird, nämlich die *Grundlagen der Mechanik*. Im *zweiten Teil* werde ich daher eine auf *diesen* Ausschnitt ausgerichtete, historisch begründete und einigermaßen präzise Bestimmung von 'Newtonscher Mechanik' geben und diese von anderen einflußreichen Grundlegungsversuchen abgrenzen.

Die Rezeption der Newtonschen Mechanik soll dann im *dritten Teil* vor allem am Beispiel Leonhard Eulers, aber auch Pierre Louis Moreau de Maupertuis' und Jean le Rond d'Alemberts näher untersucht werden. Ich wähle diese drei kontinentalen Mathematiker aus, weil alle drei in der historischen Literatur aus verschiedenen Gründen als 'Newtonianer' geführt werden.

Im Schlußteil werde ich kurz auf die Stellung der Newtonschen innerhalb der klassischen Mechanik eingehen.

Das Ziel dieses Beitrages ist es *nicht*, eine detaillierte wissenschaftshistorische Analyse der Rezeption der Newtonschen Mechanik und ihres Verhältnisses zu anderen Grundlegungsversuchen zu geben. Für die Beziehung von Newtonscher und früher analytischer Mechanik findet sich eine solche Analyse in [52]. Es geht hier vielmehr darum, die historiographische Problematik eines solchen Unterfangens herauszustellen, anhand einiger historischer Beispiele auf verkürzende Einordnungen aufmerksam zu machen und dem Begriff 'Newtonianismus' für den Kontext der rationalen Mechanik eine präzise Bedeutung (zurück) zu geben.

1. Die Newtonsche Mechanik und ihre Rezeption im Lichte der Wissenschaftsgeschichte

In fast allen Lehrbüchern der Physik, aber durchaus auch in wissenschaftshistorischen und -theoretischen Darstellungen, werden die Begriffe 'klassische' und 'Newtonsche Mechanik' weitgehend synonym gebraucht. Stellvertretend zitiere ich aus einem Buch, das mittlerweile selbst zu den Klassikern der Wissenschaftsgeschichtsschreibung gezählt werden darf, nämlich Thomas Kuhns *Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Dort heißt es zu Newtons *Principia* [37, S. 48f.]:

Die *Principia* zum Beispiel erwiesen sich nicht immer als ein leicht anzuwendendes Werk, teils weil es noch etwas von der bei einem ersten Wagnis unvermeidlichen Unverständlichkeit an sich hatte, und teils weil so viel von seiner Bedeutung erst bei den Anwendungen zutage trat. Deshalb haben sich von Euler und Lagrange im achtzehnten bis zu Hamilton, Jacobi und Hertz im neunzehnten Jahrhundert viele der glänzendsten mathematischen Physiker des Kontinents wiederholt bemüht, die Mechanik in einer äquivalenten, aber logisch und ästhetisch zufriedenstellenderen Form neu zu formulieren. ... Ähnliche Neuformulierungen

eines Paradigmas kamen wiederholt in allen Wissenschaften vor, aber die meisten von ihnen haben im Paradigma mehr substantielle Veränderungen bewirkt als die erwähnten Neuformulierungen der *Principia*.

Newtons Hauptwerk ist für Kuhn das Paradebeispiel eines neuen Paradigmas schlechthin. Bis zum *Beginn* dieses Jahrhunderts, also bis zum *Ende* der heute 'klassisch' genannten Periode, sieht er die 'Substanz' dieses Paradigmas im wesentlichen unangetastet, die zahlreichen späteren Versuche, neue und allgemeine Gesetze der Bewegung zu formulieren, sind für ihn sozusagen normalwissenschaftliche 'Aufräumtätigkeiten', bloße 'Artikulationen' der Newtonschen Lehre. Ihren 'revolutionären' Charakter behauptet er dabei ausdrücklich für die *Mechanik im engeren Sinne*, d.h. die Mechanik als Wissenschaft von der Bewegung und ihren Gesetzen.

Mit dieser Ansicht steht nun Kuhn, der mit seinem Werk eine historiographische *Revolution* beabsichtigte und wohl auch erreichte, ironischerweise ganz in der *Tradition* einer älteren Geschichtsschreibung. So schreibt Ernst Mach in seinem äußerst einflußreichen Werk *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* bereits im Jahre 1883 [40, S. 272]:

Die Newtonschen Prinzipien sind genügend, um ohne Hinzuziehung eines neuen Prinzips jeden praktisch vorkommenden Fall ... zu durchschauen. Wenn sich hierbei Schwierigkeiten ergeben, so sind dieselben immer nur mathematischer (formeller) und keineswegs mehr prinzipieller Natur.

Ausdrücklich hebt Mach neben der "Entdeckung der *allgemeinen Gravitation*" als das zweite große Verdienst Newtons die axiomatische Grundlegung der Mechanik hervor [40, S. 179]:

Dann hat er auch die Aufstellung der heute angenommenen *Prinzipien der Mechanik zu einem Abschluß gebracht*. Nach ihm ist ein wesentlich neues Prinzip nicht mehr ausgesprochen worden. Was nach ihm in der Mechanik geleistet worden ist, bezog sich durchaus auf die deduktive, formelle und mathematische Entwicklung der Mechanik auf Grund der Newtonschen Prinzipien.

Mach wiederum kann sich hier auf keinen geringeren berufen als Lagrange, der ein Jahrhundert vor Machs *Mechanik* und nach Newtons *Principia* genau dieses Bild in seiner *Mécanique Analytique* 'präformiert' hat [38, S. 159]:

La Mécanique devint une Science nouvelle entre les mains de Newton, & ses *Principes Mathématiques* ... furent l'époque de cette révolution. Enfin l'invention du calcul infinitésimal mit les Géometres en état de réduire à des équations analytiques les loix du mouvement des corps; & la recherche des forces & des mouvemens qui en résultent, est devenue depuis le principal objet de Leurs travaux.

Das 'Lagrange-Mach-Kuhnsche Denkmal' der Newtonschen Mechanik beherrscht bis heute die Lehrwerke und Geschichtsbücher. Für die weitere Diskussion erscheint es daher sinnvoll, auf zwei Implikationen dieses Geschichtsbildes besonders hinzuweisen:

1. *Vollständigkeitsthese*: Die Newtonschen Axiome - genauer gesagt: die von Newton in den *Principia* niedergelegten drei Gesetze der Bewegung - sind hinreichend, um alle mechanischen Probleme zu lösen.

2. *Normalwissenschaftlichkeitsthese*: Die Entwicklung der rationalen Mechanik nach Newton vollzog sich im wesentlichen nicht in Auseinandersetzung mit den Voraussetzungen der Newtonschen Lehre, sondern *auf ihrer Grundlage*. Es handelt sich um Arbeiten im Rahmen des Newtonschen Paradigmas, die sich logischen und mathematischen Bedürfnissen verdanken. (Mach spricht hier von Leistungen "in bezug auf die *Ökonomie* des Denkens" [40, S. 445].).

Nach diesem gängigen Geschichtsbild kann man das 17. Jahrhundert als eine Phase revolutionärer Neuschöpfungen und das 19. Jahrhundert als eine Phase der formalen Vervollendung und Vereinheitlichung kennzeichnen, während das 18. Jahrhundert merkwürdig konturenlos und amorph bleibt. Henk Bos konstatierte als Folge dieser Unbestimmtheit sogar eine langwährende "amnesia of the eighteenth century" [8, S. 328] innerhalb der *scientific community* - ein Gedächtnisschwund, der im herrschenden Geschichtsbild immer noch seine Wirkungen zeigt.

Wenn nun aber die Geschichtsschreibung der rationalen Mechanik in den letzten drei bis vier Jahrzehnten *ein* wichtiges und unhintergebares Resultat erzielt hat, so ist es dies, daß die 'Vollständigkeitsthese' unhaltbar ist: Newton hat *nicht* als erster die drei Bewegungsgesetze, wie sie uns heute in den Lehrbüchern begegnen, formuliert; er hat vor allem sein zweites Gesetz in der Form 'Kraft = Änderung der Bewegung' (d.h. des Impulses) aufgestellt [47, S. 32] und es *nicht* in der ihm heute zugeschriebenen Form 'Kraft = Masse x Beschleunigung' formulieren *können*. (Als Gesetz für *alle* Arten von dynamischen Kraftausübungen würde die zweite Form aufgrund der Newtonschen Doktrin vollkommen harter Körper das Auftreten unendlich großer Kräfte implizieren). Newton selber sah, anders als die meisten seiner späteren Bewunderer, die Originalität seiner *Principia* keineswegs in den drei *leges motus* begründet. Vielmehr bemerkte er ausdrücklich, er habe lediglich "die Principien dargestellt, welche von den Mathematikern angenommen, und durch vielfältige Versuche bestätigt worden sind" [47, S. 39]. Im Vorwort formuliert er nach der Annoncierung des 'Weltsystems', d.h. der Himmelsmechanik des dritten Buches, selber, daß eine entsprechende Behandlung anderer mechanischer Systeme, zu denen insbesondere feste und flüssige Continua zu rechnen sind, ein Desiderat darstellt: "Möchte es gestattet sein, die übrigen Erscheinungen der Natur auf dieselbe Weise aus mathematischen Prinzipien abzuleiten!" [47, S.2]

Clifford Truesdell [59-63], Thomas Hankins [30, 31] und andere haben gezeigt, daß Newtons Axiomatisierung der Mechanik in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts *zu-*
recht wenig Aufmerksamkeit erregte und als nicht hinreichend zur Lösung aller Bewe-

gungsprobleme angesehen wurde. Insbesondere Truesdell hat in seinen ausgedehnten Forschungen nachgewiesen, daß die Bemühungen der Mathematiker des 18. Jahrhunderts um allgemeine Gesetze der Punkt-, Kontinuums- und Hydromechanik nicht als 'Artikulationen' der in den *Principia* enthaltenen Sätze und Methoden abgetan werden können. Die sogenannten 'Newtonschen' Differentialgleichungen für Systeme von Massenpunkten in Cartesischen Koordinaten, die Theorie des starren Körpers und insbesondere der Drehimpulssatz, die Theorie schwingender Saiten und idealer Flüssigkeiten sind nur einige Beispiele für die eigenständigen Beiträge des 18. Jahrhunderts zur rationalen Mechanik. [63]

Es hat also bereits eine gewisse 'Entmythologisierung' der *Principia* stattgefunden, wenngleich diese - aus hier nicht zu erläuternden Gründen [53] - wenig Beachtung gefunden hat. Diese 'Entmythologisierung' ermöglicht und *erfordert* eine neue Bewertung der Mechanik des 18. Jahrhunderts. Truesdells *historische Beiträge*, insbesondere zur Kontinuumsmechanik, sind enorm, sein *historiographischer Ansatz* für eine solche Neubewertung ist jedoch zu eng: Philosophische Entstehungs- und Rechtfertigungszusammenhänge im weitesten Sinne, im Bemühen um ein Verständnis der Grundlagenentwicklung der Mechanik unverzichtbar, werden nämlich bei ihm (wie im übrigen auch bei Mach) durchgehend ausgeblendet. Sein Dogma lautet: "The history of rational mechanics is neither experimental nor philosophical, it is *mathematical* ..." [61, S. 11]. Wer sich diesem Dogma nicht unterwirft, schreibt keine Geschichte der Mechanik mehr, sondern allenfalls, so will es die Truesdellsche Polemik [62], eine fragwürdige Geschichte der Vorwörter gewisser mechanischer Lehrwerke.

Truesdells Selbstbeschränkung 'halbiert' m.E. die Möglichkeit eines neuen Verständnisses der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts, die gerade durch seine 'Entmythologisierung' der *Principia* eröffnet wurde. Insbesondere perpetuiert sie ungewollt die 'Normalwissenschaftlichkeitsthese' in dem Sinne, daß sie die nachnewtonsche Entwicklung auf 'bloße' mathematische Fortsetzung früherer Ansätze reduziert. Im nächsten Teil soll zumindest in groben Umrissen ein Bild von der rationalen Mechanik der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts skizziert werden, das die von Truesdell ignorierte Grundlagendiskussion gerade in den *Mittelpunkt* stellt, dabei keinen geradlinigen 'Triumphzug' des Newtonianismus behauptet, aber auch dessen spezifische Bedeutung für die weitere Entwicklung nicht verkennt.

2. 'Newtonsche' und 'nichtnewtonsche' Mechanik: Ein Abgrenzungsversuch und seine Implikationen

"Die Mechanik", so sagt Wittgenstein in seinem *Tractatus*, "ist ein Versuch, alle *wahren* Sätze, die wir zur Weltbeschreibung brauchen, nach Einem Plane zu konstruieren" [66, S. 107, 6.343]. Etwas früher bemerkt er [66, S.106, 6.341]:

Alle Sätze der Weltbeschreibung müssen aus einer Anzahl gegebener Sätze - den mechanischen Axiomen - auf eine gegebene Art und Weise erhalten werden. Hierdurch liefert sie die Bausteine zum Bau des wissenschaftlichen Gebäudes und sagt: Welches Gebäude immer du aufzuführen willst, jedes mußt du irgendwie mit diesen und nur mit diesen Bausteinen zusammenbringen.

Ich zitiere Wittgensteins Worte, weil sie die Bedeutung der Mechanik als einer ganzen 'Weltanschauung' und ihrer Axiome als 'Bausteine' einer wissenschaftlichen Weltauffassung zum Ausdruck bringen - eine Bedeutung, die heute nicht mehr so gegenwärtig ist, wie es im 19. und besonders im 18. Jahrhundert der Fall war. Ich zitiere diese Worte *auch*, weil es einen Berührungspunkt mit dem Kuhnschen Paradigmenbegriff gibt. Nach Kuhn ist es nämlich die Frage: "Welches sind die Grundbausteine des Universums?" [37, S. 19], auf die ein Paradigma zuallererst eine Antwort geben muß. Die Normalwissenschaft, so Kuhn, spezifiziert "nicht nur, welche Entitäten das Universum bevölkern, sondern auch, welche es nicht enthält" [37, S. 21]. Es läßt sich jedoch am Beispiel der Newtonschen Kräfte ausgezeichnet belegen, daß *Kuhn selber* in der Anwendung seines vagen Paradigmenbegriffs dieser eigenen, grundlegenden Anforderung nicht genügt und nicht sagt, welche Basisentitäten zur Newtonschen Mechanik gehören und welche nicht. Nur deshalb kann er das 18. und 19. Jahrhundert als Normalwissenschaft in der Tradition der *Principia* verstehen. Er hat übersehen, daß sein eigener, theoretisch formulierter, wenn auch nicht hinreichend präzisierter Paradigmenbegriff mit dem tradierten Geschichtsbild der Mechanik eines Lagrange und Mach seinerseits 'inkompatibel' ist. Die Subsumierung der gesamten klassischen Mechanik unter ein Newtonsches Paradigma widerspricht daher Kuhns eigener Theorie der Wissenschaftsgeschichtsschreibung. [52, S. 19]

Dabei bietet gerade eine Untersuchung der Grundlagenentwicklung der Mechanik gegenüber den meisten anderen Disziplinen einen methodischen Vorteil, der ihr aus dem Gegenstandsbereich ihres Faches erwächst und der zugunsten einer präzisen Bestimmung übergeordneter historischer Einheiten (Paradigmen, Programme, etc.) genutzt werden sollte: Betrachtet man die Bewegungen von Körpern im Raum mit der Zeit als genuine Aufgabe einer Mechanik, dürfte (bei allen Unterschieden in der Ausprägung) Einigkeit darüber bestehen, daß Masse, räumliche Ausdehnung und Zeitdauer unverzichtbare Basiskonzeptionen jeder mathematischen Beschreibung sind. Die Hinzunahme einer vierten, unabhängigen Basiskonzeption wie 'Kraft' oder 'Energie' (hier im modernen Sinne) ist ein Schritt, der die Gestalt eines mechanischen Paradigmas noch *vor allen weiteren* Festlegungen entscheidend prägt. Solche *unterschiedlichen* Festlegungen 'erster Ordnung' findet man in der Tat in der rationalen Mechanik des 18. Jahrhunderts, und diese korrespondieren mit verschiedenen ontologischen Voraussetzungen, so daß durchaus von verschiedenen *Basisentitäten* gesprochen werden kann.

Danach weist das 18. Jahrhundert mindestens *drei historisch einflußreiche Programme* einer rationalen Mechanik auf, die von jeweils verschiedenen, notwendigerweise 'metaphysischen' Voraussetzungen über die Beschaffenheit der Welt ausgehen und daher ver-

schiedene Basisentitäten als Grundlage der empirischen Wissenschaften auszeichneten. Jedes dieser drei Programme legte der Mechanik gewisse Gesetze der Ruhe und Bewegung als 'Axiome' zugrunde, aber keines ist 'vollständig' in dem Sinne, daß es alle bekannten mechanischen Prozesse hieraus deduktiv ableiten und somit 'erklären' kann. Es sind dies die Programme von Descartes, Leibniz und Newton, die sich kurz (und notwendigerweise verkürzend) so charakterisieren lassen [52, S. 23-25]:

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 und die universelle Erhaltung der Bewegungsgröße (verkürzt: 'Impuls', $m \cdot v$) sind die Grundgesetze der Cartesianischen Mechanik. Da Kräfte als physische Ursachen der Bewegung oder Bewegungsänderungen grundsätzlich ausgeschlossen sind, läßt sich Descartes' Ansatz als *kinematisch* kennzeichnen.

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 (vgl. 3.2), und eine *materietheoretische*, die die Cartesianischen Wesenseigenschaften der Körper (Ausdehnung, Undurchdringlichkeit, Trägheit) allein für solche Änderungen verantwortlich macht (vgl. 3.1).

2. Das *Leibnizische 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 $m \cdot v$, sondern die *vis viva* $m \cdot v^2$ (in heutiger Terminologie: die kinetische Energie). Die universelle Erhaltung dieser *vis viva* ist (neben dem Trägheitsprinzip) das zweite Grundgesetz seiner Mechanik.

3. Das Newtonsche Programm schließlich ist ebenfalls als ein wesentlich *dynamisches* zu kennzeichnen. Die größte konzeptuelle Leistung Newtons dürfte in der Einführung der *vis impressa* als einer äußeren, direktiven Kraft liegen. Die *vis impressa* tritt als *vierter*

unabhängiger Grundbegriff neben Raum, Zeit und Masse in allen vier Grundgesetzen seiner Mechanik auf (d.h. den drei Bewegungsgesetzen und dem Gravitationsgesetz). Sie ist im Aufbau der Mechanik zweifellos unverzichtbar und irreduzibel. "Die rationale Mechanik", so lautet denn auch Newtons Definition, ist "die genau dargestellte und erwiesene Wissenschaft, welche von den aus gewissen Kräften *hervorgehenden* Bewegungen und umgekehrt den, zu gewissen Bewegungen *erforderlichen* Kräften handelt" [47, S. 2].

Newton war sich zweifellos der wissenschaftsphilosophischen Problematik des Kraftkonzeptes bewußt und sah, welches Erkenntnishindernis die Einführung von Kräften für die Aufnahme seiner Mechanik auf dem Kontinent bedeuten mußte. Vermutlich sind *gerade deshalb* seine Äußerungen zum ontologischen Status der *vis impressa* im allgemeinen und der Gravitationskraft im besonderen so uneinheitlich und z.T. widersprüchlich: Ihrer Kennzeichnung als bloß 'mathematische Größen', insbesondere in Buch I der *Principia*, steht die Kennzeichnung von Kräften als nicht weiter hinterfragten *Ursachen* der Bewegungsänderung an zahlreichen Stellen der *Principia* [47], der *Opticks* [48] und verschiedenen, erst in den letzten Jahrzehnten veröffentlichten Manuskripten wie etwa *De gravitatione* [49] gegenüber. Mit Richard Westfall, dessen *Force in Newtons Physics* mir bisher die gründlichste Studie zu Newtons Grundlegung der Dynamik zu sein scheint, vertrete ich hier die Auffassung: "Despite what he said, however, force was never a mere mathematical abstraction to him. [...] 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." [64, S.506f.]

Auch wenn man in diesem ganz zentralen Punkt Westfalls Interpretation für Newton selber nicht teilen mag, wird man kaum umhin können, diese Interpretation als vorherrschend in der frühen *Rezeptionsgeschichte* des Newtonianismus auf dem Kontinent anzuerkennen. Hier wurde sehr wohl registriert, daß Roger Cotes in der 2. Auflage der *Principia* die Auffassung vertrat, Newton habe die Unmöglichkeit *jeder Form* Cartesianischer Nahwirkung 'bewiesen', und die Gravitation sei unter die 'ursprünglichen' Körper-eigenschaften einzureihen: "Unter den ursprünglichen Eigenschaften aller Körper 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." [47, S.11] - kaum vorstellbar, daß diese Worte *ohne* Newtons Zustimmung in den Druck gegangen sein könnten.

Der *Anspruch* der Newtonschen Mechanik läßt sich dahingehend beschreiben, daß es möglich sein sollte, mit den drei Bewegungsgesetzen die Wirkung von Gravitationskräften, aber auch von eventuell später noch aufzudeckenden weiteren Kräften zu bestimmen. Die *Himmelsmechanik* hat insofern eine Leitfunktion für das Newtonsche Programm schlechthin: Alle Phänomene sind durch die Kraftwirkung diskreter Teilchen aufeinander erklärbar. [47, S. 2]

Der *Erhaltungsgedanke* ist dem Newtonschen Programm fremd. Beim Stoß harter Körper geht Bewegung verloren. 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.

Noch ein letzter Punkt ist für die *Rezeption* der Newtonschen Lehre von Bedeutung: Zweifellos stellten die *Principia*, wie sich erst später zeigte, nicht nur das empirisch erfolgreichste Programm der Physik des 18. Jahrhunderts dar, sondern von vornherein auch das *mathematisch avancierteste*. Die Aufnahme des Werkes auf dem Kontinent war deshalb zunächst auf wenige *führende Mathematiker* (wie insbesondere Huygens, Leibniz, Herrmann, Varignon, die Bernoullis und Euler) beschränkt, und die *mathematische Bedeutung* des Werkes stand in der Rezeption auch nie in Frage. [26] Eine wichtige Konsequenz dieser Tatsache war, daß sich neben den Anhängern der *Fernwirkungslehre* viele deshalb zum Newtonianismus bekannten, weil sie der Anwendung der *mathematischen Methode* in der Naturbeschreibung und -erklärung besondere Bedeutung beimäßen (vgl. 3.3). Eine solche Einschätzung ist jedoch nachweisbar verkürzt: *Jedes* der drei Programme hatte eine möglichst vollständige (wenngleich jeweils verschieden ausgeprägte) Mathematisierung der empirischen Wissenschaften zum Ziel.

Betrachtet man die verschiedenen Kontroversen innerhalb der Mechanik des 18. Jahrhunderts, die durch das Auftreten der dynamischen Programme von Leibniz und Newton ausgelöst wurden, so ergibt sich ein Bild, das alles andere als konturenlos und amorph ist, wie das ältere Geschichtsbild von Bos zurecht kritisiert wurde. Gerade die *erste Jahrhunderthälfte* erlebte eine Grundlagendiskussion, die in ihrer Intensität und Fruchtbarkeit wohl ohne Parallele innerhalb der klassischen Mechanik ist, wie insbesondere die Annoncierung zahlreicher neuer mechanischer Prinzipien und Konzepte zeigt. Es handelt sich hier eben nicht nur um die Produkte einer gleichsam 'unbewußten' Anwendung der neuen Werkzeuge der Analysis auf die Mechanik, sondern wesentlich *auch* um eine breite metatheoretische Diskussion darüber, welche Entitäten in der Naturbeschreibung zugelassen werden sollten, welche Methoden die geeigneten seien, um allgemeine Naturgesetze zu entdecken, und welchen Status diese Gesetze beanspruchen können.

Im wesentlichen lassen sich drei große und kontroverse Themen innerhalb dieser Grundlagendiskussion der ersten Jahrhunderthälfte unterscheiden:

1. Die Auseinandersetzung über die Zulässigkeit von Kräften in der Mechanik überhaupt (hier standen Cartesianer gegen Newtonianer und Leibnizianer; s. etwa [31, 52]),
2. Die Auseinandersetzung über den Ursprung der Gravitation (Newtonianer gegen Cartesianer und Leibnizianer, [10]),
3. Die Auseinandersetzung um das 'wahre Kraftmaß' (Leibnizianer gegen Cartesianer und 'spätere' Newtonianer, [56]).

Es läßt sich sagen, daß die Auseinandersetzung über das 'wahre Kraftmaß' etwa ab der Jahrhundertmitte allgemein als fruchtloser 'Wortstreit' angesehen wurde, der keiner allgemeinen Beantwortung fähig sei, und die beiden ersten Kontroversen zugunsten einer dynamischen Naturauffassung, in einer näher zu bestimmenden Weise (vgl. Teil 4) insbesondere zugunsten des Newtonianismus entschieden wurden. Dabei hat die Diskussion über den Ursprung der Gravitation in der Rezeption der Newtonschen Mechanik eine dominierende Rolle gespielt. Im nächsten Teil soll anhand der drei Fallbeispiele Euler, Maupertuis und d'Alembert dieser Rezeption nachgegangen werden. Diese drei grundverschiedenen Persönlichkeiten und Mathematiker sehr verschiedenen Ranges haben als Theoretiker der Mechanik mehr gemeinsam, als es auf den ersten Blick erscheinen mag - und zwar nicht nur das Etikett 'Newtonianer', das ihnen die Geschichtsschreibung so großzügig beigelegt hat. Die Berechtigung dieser Einordnung soll im Folgenden diskutiert werden.

3. Drei sogenannte 'Newtonianer' des 18. Jahrhunderts:

Euler, Maupertuis und d'Alembert

3.1 Leonhard Euler

Euler (1707-1783, [57]) wurde schon von Ernst Cassirer charakterisiert als derjenige Forscher, der "das wissenschaftliche Bewußtsein im 18. Jahrhundert am vollständigsten vertritt" [13, S. 472], obwohl die Bedeutung seines monumentalen Lebenswerkes im vollen Umfang erst gewürdigt werden kann, seit zu Beginn dieses Jahrhunderts mit der Herausgabe seiner *Opera Omnia* begonnen wurde, die in nunmehr 73 Bänden vorliegen, aber längst noch nicht abgeschlossen sind. Kein anderes *Oeuvre* des 18. Jahrhunderts widerlegt so eindrucksvoll die eingangs erwähnte, insbesondere von Mach propagierte These von der Vollständigkeit der Newtonschen Mechanik. Immer wieder betonte Euler die Unzulänglichkeit der vorhandenen Prinzipien der Mechanik, insbesondere der Mechanik der Kontinua. Er selber gab als erster etwa eine allgemeine Formulierung des (heute so genannten) 'zweiten Newtonschen Axioms' (im Jahre 1750) und stellte den allgemeinen Drehimpulssatz sowie die Bewegungsgleichung idealer Flüssigkeiten auf (im Jahre 1755).

Bis in die aktuelle Geschichtsschreibung hinein wird sein Werk als mathematische Neuformulierung der Newtonschen Mechanik charakterisiert. Dieses hartnäckige Vorurteil dürfte vor allem auf Eulers *Mechanica* von 1736 zurückgehen [18] - eine 'Übersetzung' der *Principia* in den Leibnizschen Infinitesimalkalkül, wie man von Jammer über Calinger bis zu Elkana immer wieder lesen kann. [52, S.106f.]

In der Tat knüpft Euler in der Einleitung dieses Werkes, das ihn in der wissenschaftlichen Welt berühmt machte, ausdrücklich an Newtons *Principia* und Hermanns *Phoronomia* an und macht es sich zur Aufgabe, deren synthetische (d.h. geometrische) Behandlung durch eine analytische zu ersetzen. [18, S. 7] Auch die Voraussetzungen der Newton-

schen Mechanik scheint er kritiklos zu akzeptieren. Zu Beginn definiert er Kraft (*Potentia*) ganz im Sinne Newtons als "die Gewalt, welche einen Körper von der Ruhe zur Bewegung bringt, oder seine bereits stattfindende Bewegung verändert" [18, S. 33]. Ohne Zweifel stellt dieses Konzept das 'Rückgrat' im mathematischen Aufbau der *Mechanica* dar.

Euler führt auch gleich zu Beginn Newtons erstes Gesetz, das Trägheitsprinzip, ein; das dritte Gesetz findet sich zumindest implizit im zweiten Band der *Mechanica*. Das (erst später so genannte) zweite 'Newtonsche' Bewegungsgesetz gibt Euler für einen Massenpunkt mit der Masse A , auf den eine Kraft p wirkt, in folgender differentiellen Form an: $dc = n p dt / A$.

(c ist die Geschwindigkeit von A , n ein einheitenbedingter Proportionalitätsfaktor).

Newton wird in diesem Zusammenhang charakteristischerweise *nicht* erwähnt.

In einem bemerkenswerten Kontrast zur zentralen Stellung der Newtonschen *vis impressa* im mathematischem Aufbau der *Mechanica* stehen Eulers spärliche Bemerkungen zu ihrem *Ursprung*. Auf den beinahe 900 Seiten finden sich hierzu nur zwei kurze Bemerkungen. Sehr aufschlußreich ist die zweite, grundsätzliche Stellungnahme Eulers in Band II (§28). Nachdem er gezeigt hat, daß eine Masse, die sich in einer gekrümmten Röhre bewegt, eine Fliehkraft auf diese Röhre ausübt, schließt er:

Man ersieht hieraus, wie wir schon im ersten Theile angedeutet haben, dass es ungewiss ist, ob die Bewegung durch Kräfte oder umgekehrt diese durch jene erzeugt werden. Wir finden in der Natur beides, Kräfte und Bewegung; welches von beiden die Ursache des andern sei, ist eine Frage, die durch Schlussfolge und Beobachtung beantwortet werden muß. Es scheint keineswegs vernunftgemäss, den Körpern ein innewohnendes Bestreben zuzuschreiben, noch weit weniger, die Kräfte als für sich bestehend anzunehmen. ... Wir haben nämlich oben klar bewiesen, dass eine einmal bestehende Bewegung stets erhalten werden muss; hier aber haben wir auseinander gesetzt, wie aus der Bewegung Kräfte entspringen. Dagegen kann man sich nicht vorstellen, wie Kräfte ohne Bewegung bestehen oder erhalten werden können. *Wir schliessen daher, 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.

Diese Passage verdiente ausführlich wiedergegeben zu werden, weil in ihr das Leitmotiv vieler Untersuchungen, die Euler - vermutlich der 'eifrigste Forscher' des 18. Jahrhunderts - zu den Grundlagen der Mechanik anstellte [etwa: 19, 20, 22, 23], deutlich hervortritt: die beobachtbaren Naturphänomene zwar *zunächst* mit Hilfe von Kräften zu beschreiben, diese Kräfte aber im Anschluß auf 'Materie in Bewegung' zurückzuführen. Man könnte auch sagen: Euler war zu sehr *Mathematiker*, um in seiner quantitativen Naturbeschreibung auf die fruchtbare Newtonsche Kraftkonzeption zu verzichten. Er war aber auch zu sehr *Naturphilosoph* in der Cartesianischen Tradition, um Kräfte als primäre Entitäten anzuerkennen.

Eulers Programm umfaßt zwei Aufgaben: Einmal, scheinbare Fernwirkungen, insbesondere die Gravitation, auf Nahwirkungen zurückzuführen; zum anderen, eine Theorie der Materie aufzubauen, aus der Nahwirkungskräfte selber erklärbar, d.h. auf die Wesenseigenschaften der Materie zurückführbar und möglichst auch mathematisch bestimmbar sind. (Die Bestimmung der Zentrifugalkraft durch Masse und Geschwindigkeit eines bewegten Körpers sowie den Krümmungsradius seiner Bahn hat hierfür Modellfunktion.) Ich nenne dieses Programm hauptsächlich aus zwei Gründen 'Cartesianisch' [52, S. 110ff., 170ff.]:

Erstens ist Eulers Ontologie fest im Cartesianischen Dualismus begründet. Euler unterscheidet strikt zwischen aktivem Geist und passiver Materie [20, 23]. Die Wechselwirkung beider Bereiche kann kein Gegenstand der Naturlehre sein. Die Trägheit ist ihm wesentlicher Ausdruck der Passivität der Körperwelt. Sie ist eine essentielle, jedem Körper notwendig zukommende Eigenschaft.

Eulers Forderung ist nun, den Körpern nur solche weiteren Eigenschaften zuzuschreiben, die mit der Trägheit 'verträglich' sind. Nach diesem Kriterium kommen für ihn nur noch die Ausdehnung und die Undurchdringlichkeit als Wesenseigenschaften der Materie in Frage. Er lehnt jede Grundlegung der Mechanik ab, die den Körpern aktive, inhärente Kräfte zuspricht [20]. Daher bekämpft er in verschiedenen Schriften die Leibnizsche Dynamik mit ihrer Substanzmetaphysik der Kräfte. In seinem strikten Dualismus ist aber auch kein Platz für die 'aktiven Prinzipien', mit denen Newton in der *Opticks* [48, S. 265] Kräfte verständlich machen wollte. Namentlich die Gravitation als Fernwirkungskraft erschien ihm Zeit seines Lebens als (wie er sagte) 'größte Absurdität'. An den 'Philosophes Angloises', wie er die *Nachfolger* Newtons nennt, übt er daher bis in seine späte naturphilosophische Schriften hinein harsche Kritik.

Der zweite Grund ist der, daß Euler ganz einer 'essentialistischen' Wissenschaftsauffassung in der Tradition Descartes verpflichtet ist. Er will aus der Wesensbestimmung der Körper eine Mechanik aufbauen, deren Gesetze *mathematische Notwendigkeit* für sich beanspruchen können. Bereits in der *Mechanica* unterstreicht er, daß die Bewegungsgesetze "nicht nur gewiss, sondern notwendig wahr" seien [18, S. 6]. Den Leibnizanhängern in der Berliner Akademie, aber auch den Vertretern einer Newtonschen Attraktions-theorie wirft er vor, durch die Einführung von Kräften die Mechanik zu einer *kontingenten* Wissenschaft machen zu wollen. Die von Newton betriebene Befreiung der Mechanik von den Fesseln des Cartesianischen wissenschaftstheoretischen Essentialismus wird von Euler nicht akzeptiert.

Die bisherige Beschreibung bezieht sich sozusagen auf den festen, 'zeitlich invarianten' Kern des Eulerschen Programms.

Was nun seine Versuche betrifft, zu einer materiethoretischen Klärung des Kraftbegriffes zu gelangen, läßt sich innerhalb dieses Rahmens eine bemerkenswerte *Entwicklung* nachweisen. Der Spannung zwischen mathematischer Fruchtbarkeit und philosophischer Problematik der Newtonschen Kraftkonzeption verdanken zweifellos eine Reihe von

Eulers Arbeiten ihre Entstehung. Ein zeitlicher 'Längsschnitt' durch seine einschlägigen Veröffentlichungen und Briefe zeigt, daß sich diesbezüglich drei verschiedene Phasen unterscheiden lassen [52, S. 150ff.]:

In der *ersten* Phase verwendet Euler Newtonsche Kräfte, ohne ihren Ursprung zu erklären, aber auch, ohne sie als primär anzuerkennen. Diese Phase des 'Erklärungsaufschubes', in die auch seine *Mechanica* fällt, dauert bis 1744. In einer *zweiten* Phase von 1744 bis 1750 versucht Euler, alle Kräfte auf die Trägheit der Körper zurückzuführen. In der *dritten* und letzten Phase schließlich ersetzt er die Trägheit durch die Undurchdringlichkeit, verbunden mit einer 'materietheoretischen' Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung.

Ich kann diese Entwicklung hier nicht im einzelnen darlegen, sondern werde nur kurz auf seine abschließende Antwort zum Kraftproblem eingehen, die er 1750 gibt.

In der Arbeit *Découverte d'un nouveau principe de mécanique* stellt Euler der Berliner Akademie ein 'neues, allgemeines und fundamentales Gesetz der Mechanik' in folgender mathematischer Form vor [21, S. 90]:

$$\text{I. } 2M \, ddx = P \, dt^2, \quad \text{II. } 2M \, ddy = Q \, dt^2, \quad \text{III. } 2M \, ddz = R \, dt^2.$$

Dies sind natürlich die *heute* so genannten 'Newtonschen Bewegungsgleichungen' für eine Masse M in Cartesischen Koordinaten x , y und z , auf die eine äußere Kraft mit den Komponenten P , Q und R wirkt. Euler war der erste, der die Bewegungsgleichungen in dieser allgemeinen Form aufstellte und ihre Bedeutung für *alle* Bereiche der Mechanik erkannte. Auch hier werden Newtons *Principia* mit keinem Wort erwähnt.

Mit der *Découverte* akzeptiert Euler die Bewegungsgleichungen und das Newtonsche Konzept der äußeren direktiven Kraft endgültig als Ausgangspunkt des *mathematischen* Teils seiner Mechanik. Sein neues Prinzip erscheint ihm von solcher Allgemeinheit, daß es, wie er etwas voreilig postuliert, "alle anderen Prinzipien der Mechanik enthält" [21, S. 89f.]. Zweifellos ist dieser Aufsatz als wichtiger Beitrag für die *mathematische* Durchsetzung des Newtonschen Programms innerhalb der rationalen Mechanik zu werten; insofern hat also die Kennzeichnung Eulers als 'Newtonianer' durchaus einen guten Sinn.

Nur einen Monat nach der *Découverte* liest nun aber Euler in der Akademie einen Vortrag mit dem bemerkenswerten Titel *Réflexions sur les forces en général* (publ. als [22]). In ihm setzt er sich mit der Frage nach dem Ursprung und der Größe von Kräften auseinander, die beim Stoß zweier Körper auftreten.

Auf Stoßprozesse reduzieren sich für ihn als Nahwirkungsvertreter *alle* in der Natur feststellbaren Bewegungsänderungen. Die körperliche Ursache aller Kräfte findet er nun erstmals in der *Undurchdringlichkeit* - in dem Sinne, daß beim Stoß zweier gegeneinander in relativer Bewegung befindlicher Körper A und B in A eine Kraft erst *erzeugt* wird, die auf B als äußere Ursache einwirkt und die gegenseitige Durchdringung verhindert. Eine gleichgroße Kraft wird in B erzeugt und ist für die Bewegungsänderung von A verantwortlich.

Mit der Undurchdringlichkeit kann sich Euler klar machen, daß in der Wechselwirkung zweier Körper Kräfte sehr verschiedener Größe hervorgebracht werden, "einmal extrem große, ein anderes Mal sehr kleine" [22, S.118]. Die erzeugten Kräfte sind immer so groß, daß die gegenseitige Durchdringung verhindert wird.

Hier tritt jedoch nach seinem Wissenschaftsverständnis ein Dilemma auf, daß Euler klar gesehen und artikuliert hat: Die Frage nach der *eindeutigen Bestimmtheit* der Kräfte - schließlich könnten beim Stoß auch solche erzeugt werden, die *viel größer* sind, als es die Vermeidung der gegenseitigen Durchdringung erfordern würde. Da die Kräfte für ihn im Stoß tatsächlich *erzeugt* werden, müssen sie ihrer Größe nach auch eindeutig festgelegt sein - weil es "unmöglich ist, daß etwas existiert, was nicht vollständig bestimmt ist" [22, S. 117].

Eulers Vorwurf an die Leibnizsche und Newtonsche Mechanik war ja gerade, daß sie Kräfte beliebig einführen und damit die Mechanik zu einer kontingenten Wissenschaft machen. Um diese, in seinem Cartesianismus geradezu monströs erscheinende Lösung zu vermeiden, führt er das von Maupertuis und ihm unabhängig gefundene Prinzip der kleinsten Wirkung als ein 'regulatives' Prinzip in seine Metaphysik der Materie ein: Dieses Prinzip garantiert ihm nämlich, daß beim Stoß zweier Körper eine eindeutig bestimmte, nämlich die kleinstmögliche Kraft erzeugt wird, die zur Vermeidung der gegenseitigen Durchdringung ausreicht: "[...] alle Änderungen in der Welt", so sagt Euler, "werden mit dem kleinstmöglichen Aufwand erreicht, oder mit den kleinstmöglichen Kräften, die dieser Wirkung fähig sind" [22, S. 118f.].

Das Prinzip der kleinsten Wirkung ist für Euler ein 'Bindeglied' zwischen primärer Materie und abgeleiteten Kräften. Es erlaubt ihm, an seiner Cartesianischen Ontologie festzuhalten, ohne auf mathematisch-empirischer Ebene auf den erfolgreichen 'Newtonschen' Aufbau seiner Mechanik zu verzichten. In diesem Sinne hebt dieses Prinzip auch jene Spannung zwischen dem 'Mathematiker' und dem 'Naturphilosophen' Euler auf, die ich zu Beginn am Beispiel der *Mechanica* aufgezeigt habe. In der Geschichtsschreibung der Mechanik wurde der Zusammenhang zwischen der Undurchdringlichkeit als körperlicher Ursache der Kräfte und dem Prinzip der kleinsten Wirkung durchgehend übersehen, was sowohl zu Fehldeutungen seiner Materietheorie als auch seiner Interpretation des Prinzips der kleinsten Wirkung geführt hat. [52]

Euler selber war mit seiner Lösung offenbar durchaus zufrieden: Später, in seinen berühmten *Lettres à une Princesse d'Allemagne* [25, Bd. I, S. 170f.] und seinem zweiten großen Mechanik-Lehrwerk, der *Theoria motus* [24, S. 59ff.], kommt er auf sie zurück.

Auf eine Kritik des eigenwilligen Versuchs Eulers, sozusagen zwischen Descartes und Newton zu vermitteln, kann hier nicht eingegangen werden. Es sollte jedoch deutlich geworden sein, warum eine Beschreibung Eulers als "an eclectic who embraced and articulated the fundamental mechanical and methodological thought of Newton" [12, S. 233]. Eine solche Einordnung *halbiert* gewissermaßen Eulers Programm einer Grundle-

gung der Mechanik und verdeckt eher die fruchtbare Spannung, die aus seiner Auseinandersetzung mit den dynamischen Programmen von Newton und Leibniz resultiert.

3.2 Pierre Louis Moreau de Maupertuis

Maupertuis (1698-1759, [7, 9]) war, wie bereits d'Alembert im *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* konstatierte, "der Erste, der sich bei uns offen als Anhänger Newtons zu erklären gewagt hat" [2, S. 165]. Schon während seines England-Aufenthaltes im Jahre 1728 zum Anhänger der Newtonschen Gravitationstheorie geworden, leistete er bis 1740 wichtige theoretische und praktische Beiträge zur Verbreitung und Anerkennung der Newtonschen Lehre auf dem Kontinent.

Unter seinen *theoretischen* Schriften ist hier v.a. der *Discours sur les différentes figures des astres* von 1732 zu nennen, der auch seinen Ruf als 'Newtonianer' begründete. Maupertuis Strategie in dieser Arbeit ist es, durch eine systematische Kritik des Cartesischen Substanzbegriffes den Nachweis zu erbringen, daß die Gravitation *mit gleichem Recht* unter die 'ursprünglichen' Eigenschaften (s. Cotes' Zitat in Teil 2; Maupertuis spricht gewöhnlich wie Newton 'nur' von den 'allgemeinen' Eigenschaften) der Materie eingereiht werden könne wie etwa die Ausdehnung und Undurchdringlichkeit [52, S. 37ff.]. Eine Erklärung von Bewegungsänderungen durch eine fernwirkende Gravitationskraft ist für ihn nicht mehr oder weniger obskur als die Cartesianischer Erklärung durch Druck oder Stoß, da die Kräfte, die diesen Nahwirkungsprozessen zugrunde liegen, für uns ebenfalls verborgen seien: "Qu'est-ce que cette force impulsive? comment réside-t-elle dans les corps; qui eût pu deviner qu'elle y réside, avant que d'avoir vu des corps se choquer?" [42, S. 98]

Maupertuis beansprucht jedoch keineswegs, einen schlüssigen 'Beweis' für die Existenz der Gravitation zu erbringen, sondern lediglich den Nachweis, daß sie "metaphysisch nicht unmöglich sei" [42, S. 103]. Die endgültige Entscheidung überantwortet er, ganz im Sinne der von Newton propagierten Methodologie, der Erfahrung [42, S. 103f.]:

L'attraction n'est plus, pour ainsi dire, qu'une question de fait; c'est dans le système de l'univers qu'il faut aller chercher si c'est un principe qui ait effectivement lieu dans la Nature, jusqu'à quel point il est nécessaire pour expliquer les phénomènes, ou enfin s'il est inutilement introduit pour expliquer des faits que l'on explique bien sans lui.

Einen wichtigen *praktischen* Beitrag zur Durchsetzung der Newtonschen Gravitationstheorie leistete Maupertuis in den Jahren 1736/37 durch die Leitung einer von der Pariser Akademie initiierten Lappland-Expedition. Sie sollte die Frage der Erdgestalt, ein wichtiger Streitpunkt zwischen den Anhängern Descartes' und Newtons, durch Meridianmessungen am Polarkreis beantworten. Die Expedition, vielfach zum *experimentum crucis* über die Gültigkeit der Gravitationstheorie Newtons stilisiert, bestätigte im wesentlichen

die von jenem behauptete Abplattung an den Polen und verhalf seiner Lehre in den folgenden Jahren auch auf dem Kontinent zu breiter Anerkennung.

Soweit ist es also durchaus berechtigt, 'Sir Isaac Maupertuis', wie er später gelegentlich wegen seiner emphatisch vorgetragenen Ansprüche auf die eigentliche Durchsetzung des Newtonianismus genannt wurde, als einen Vertreter des "Newtonian Style" [11, S. 125] zu bezeichnen.

Erst nach dieser Expedition, die ihm zu wissenschaftlichen Ruhm und letztlich auch zum Amt des Präsidenten der Berliner Akademie verhalf, beschäftigte sich Maupertuis mit den Grundlagen der Mechanik im engeren Sinne (d.h. der Wissenschaft von der Bewegung und ihren Gesetzen). Der Hintergrund dieser späteren Entwicklung ist weniger bekannt als sein früher 'Newtonianismus' und soll zumindest kurz angedeutet werden (s. hierzu näher [52, S. 45-103]):

Die Newton-Übersetzerin Marquis du Châtelet konfrontierte Maupertuis 1738 mit der Frage nach dem 'wahren Kraftmaß', d.h. der wahren Erhaltungsgröße beim elastischen und inelastischen Stoß.

Erst in Auseinandersetzung mit dem für die Cartesianische wie auch für die Leibnizsche Mechanik paradigmatischen Stoßprozeß kommt Maupertuis zu einer grundsätzlichen Behandlung der Kraftproblematik, in Maupertuis' Worten der "Verwicklung von Kraft und Materie" [52, S. 67], und zu einer grundsätzlichen Reflexion über den Status mechanischer Gesetze und Prinzipien. Seine eigene Formulierung des *principe de la moindre action* [43, 44] ist nur in diesem Kontext überhaupt zu verstehen.

In einer wissenschaftstheoretisch z.T. recht modern anmutenden Argumentation kommt Maupertuis dabei zu dem Schluß, daß die Wissenschaft der Mechanik auf jede Art von Kräften zur Erklärung von Bewegungen und Bewegungsänderungen verzichten müsse. Er kann dabei an eine Kritik des Kausalitäts- und Kraftbegriffes anknüpfen, die v.a. von Malebranche und Berkeley gegen die Newtonsche Gravitationstheorie vorgebracht und später von David Hume weitergeführt wurde. Schon 1746 verteidigt er sein Prinzip der kleinsten Wirkung gegen 'rivalisierende' mechanische Prinzipien, die vom Konzept der Kraft Gebrauch machen, mit einer Kritik eben dieses Konzeptes [44, S.280]:

Il est vrai que nous ne connoissons le Mouvement que par nos sens: mais y a-t-il beaucoup de choses que nous connoissons autrement? La force motrice, la puissance qu'a un corps en mouvement, d'en mouvoir d'autres, sont des mots inventés pour suppléer à nos connoissances, & qui ne signifient des résultats de Phenomènes.

Auch Newton, so bemerkt Maupertuis in seiner Spätschrift *Examen philosophique*, habe mit seinem Konzept der "force motrice imprimée" (d.h. der *vis impressa*) den Boden der "wahren Philosophie" verlassen [46, S. 413]:

Newton dans sa seconde loi partant de la force, tombe malgré toute sa réserve dans l'abus d'un mot qui ne signifie que ce qui a précédé un phénomène, & qui ne

donne aucune idée claire. De cela même on peut conclure que cette loi qui fait le changement de mouvement proportionnel à la force, n'est rien moins qu'évidente ou qu'une suite de raisonnemens évidents; ou que si par *force* on entend ce qui produit ou détruit proportionnellement le mouvement, cette loi ne seroit plus qu'une proposition identique & puérile. On pourroit encore dire qu'on ne voit point avec évidence que le changement de mouvement se doive faire selon la ligne dans laquelle la force est imprimée.

Das zweite Bewegungsgesetz in *Newtons* Form versteht Maupertuis also nicht wie jener als ein empirisches Gesetz von universeller Gültigkeit, sondern als eine überflüssige *Tautologie*. Während der 'frühe' Maupertuis mit seiner Verteidigung der Newtonschen Gravitationstheorie wesentlich dazu beitrug, Kräfte als Erklärungsentitäten in der kontinentalen Mechanik 'hoffähig' zu machen, übt der 'späte' Maupertuis entschieden Kritik an der Erklärung jeder Art von Bewegungen und Bewegungsänderungen durch jede Art von Kräften.

Den dynamischen, von (wenngleich je verschiedenen) Kraftkonzeptionen Gebrauch machenden mechanischen Prinzipien Leibniz' (*vis viva* - Erhaltung) und Newtons (2. Bewegungsgesetz) stellt Maupertuis sein Prinzip der kleinsten Wirkung für den elastischen und inelastischen Stoß gegenüber. Dieses Prinzip behauptet nach Maupertuis, daß unter gewissen einschränkenden Bedingungen unter allen 'möglichen' Bewegungsvorgängen derjenige realisiert wird, für den die 'Aktion', d.h. das Produkt aus Masse, Geschwindigkeit und zurückgelegter Wegstrecke, minimal wird (näher hierzu [52, S. 1-10]).

Das Wirkungsprinzip liefert Maupertuis eine bloße *Beschreibung* von Bewegung und Bewegungsänderungen, die nur auf die erkenntnistheoretisch unproblematischen, 'replizierbaren' Größen Masse, Wegstrecke und Zeitdauer zurückgreift. Hierin sieht Maupertuis einen entscheidenden Vorteil gegenüber allen Ansätzen, die sich des 'obskuren' Kraftbegriffs bedienen.

Die Tatsache, daß sein Prinzip nicht nur Stoßprozesse, sondern (wie Euler schon 1744 gezeigt hatte) auch Gravitationsbewegungen zu beschreiben vermag, läßt den 'späten' Maupertuis sogar annehmen, daß die nach seiner Auffassung bestehende Ökonomie des Naturgeschehens 'im Großen' eine Folge der Ökonomie 'im Kleinen' sei, d.h. daß die Gravitationsphänomene *doch noch* durch einen Nahwirkungsmechanismus erklärbar seien. Er beruft sich dabei ausdrücklich auf Newton und glaubt, gerade jenes *principe antérieur*, jenes grundlegendere Prinzip entdeckt zu haben, das Newton suchte, aber nicht mehr angeben konnte. [45, S. 47ff.]

Tatsächlich bleibt Maupertuis hier jedoch keineswegs der von ihm beschworenen Newtonschen Lehre treu, sondern fällt unbemerkt in den Okkasionalismus eines Malebranche zurück. Er hält nicht an der selbstauferlegten Beschränkung der Mechanik auf Beobachtung und mathematische Beschreibung fest, sondern sucht nach einer letzten Erklärung von Bewegung und Bewegungsänderung, die *ohne* die Einführung problematischer Kräfte auskommt. Dabei greift er zurück auf die alte Gotteslösung des Bewegungsproblems. Sein Prinzip der kleinsten Wirkung grenzt er so gegenüber den Erhaltungsgesetzen Descartes' und Leibniz' ab [45, S. 44f.]:

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 sieht es hier geradezu als Vorzug seines Prinzips an, daß es aufgrund seines teleologischen Charakters eine ständige Einwirkung Gottes in das Naturgeschehen nahelegt. In der Folge dieser theologischen Interpretation wird die Aktionsgröße, die seinem Prinzip zufolge minimiert wird, unausgesprochen zum Maß der *von Gott ausgeübten* Kraft, die "notwendig ist, um Veränderungen in der Natur zu bewirken" und die nicht erhalten wird, sondern "gewissermaßen in jedem Augenblick" und "mit größtmöglicher Ökonomie" geschafften wird [45, S. xxvi]. In der Interpretation der Aktionsgröße spiegelt sich die ganze Ambiguität seiner Anschauungen wieder: Sie ist ihm 'kausal unverdächtige', deskriptive Größe und Maß eines 'übernatürlichen' Kraftaufwandes zugleich.

Die Anklänge an die okkasionalistische Variante des Cartesianismus sind offenkundig. Maupertuis aber beruft sich gerade nicht auf Malebranche, sondern den 'theologischen' Newton, wie er insbesondere am Ende der *Opticks* hervortritt, da dieser im Unterschied zu Descartes und Leibniz das Universum in einer *Abhängigkeit* von Gott belasse.

Die Gotteslösung jedoch ist bei *Newton* letztendlich ein Anachronismus, der sich v.a. der fehlenden Ausbildung eines Erhaltungskonzeptes verdankt und der seinem dynamischen System lediglich *aufgesetzt* ist. Bei *Newton* klingt sie als *ultima ratio* an, um offene 'Restprobleme' seiner Wissenschaft der Dynamik zu 'lösen' [52, S. 101f.]. Von Maupertuis jedoch wird diese Lösung, vermeintlich in Einklang mit seinem Prinzip der kleinsten Wirkung, zur *Grundlage* der Mechanik verkehrt. Der 'späte' Maupertuis geht unbemerkt einen Schritt zurück *von Newton zu Malebranche*. Seine Beiträge zur Grundlegung der Mechanik ab 1744 sind keineswegs zu verstehen als 'Artikulationen' eines Newtonschen Paradigmas, sondern eher der Versuch einer wörtlich verstandenen 'theologischen Revolution' dieses Paradigmas. Dies sollte jedoch nicht vergessen lassen, daß Maupertuis' letztlich anachronistischer Lösungsvorschlag seinen Grund in ontologischen und erkenntnistheoretischen Problemen hat, die die dynamischen Grundlegungsversuche von Leibniz und *Newton* in der 'mechanischen Weltanschauung' des Cartesianismus generierten.

3.3 Jean le Rond D'Alembert

D'Alembert (1717-1783, [31]) wurde schon von Pierre Bailly in seiner *Histoire de l'Astronomie* unter die Reihe der großen frühen Newtonianer des Kontinents eingereiht [14, S. 123]; die Zahl gleichlautender Einordnungen bis heute ist Legion [etwa: 29]. Für die *Popularisierung* der Newtonschen Lehre hat d'Alembert zweifellos weniger getan als ein Maupertuis oder Voltaire, und sein Beitrag zur rationalen Mechanik ist sicherlich nicht so hoch zu veranschlagen wie der Eulers. Da er jedoch eine zentrale Figur der französischen Aufklärung war, ist sein Wissenschaftsverständnis für die zweite Hälfte des

18. Jahrhunderts allgemein als bedeutsam anzusehen. Auch seine Newton-Rezeption kann unter diesem Gesichtspunkt besonderes Interesse beanspruchen.

D'Alembert legte besonderes Gewicht auf die *Newtonsche Methodologie*. "Dieses große Genie", so bemerkte er im *Discours Préliminaire de l'Encyclopedie* (1751) zu Newton, "begriff, daß die Zeit zur Ausmerzung aller Mutmaßungen und unsicheren Hypothesen in der Philosophie [...] gekommen war und daß diese Wissenschaft allein auf Versuche und auf Mathematik aufgebaut werden dürfe" [2, S. 150f.]. Durch die Vereinigung von Experiment und Kalkül, so sagt er an anderer Stelle, schuf Newton eine "exakte, gründliche, brillante und neue Wissenschaft" [14, S. 45]. Ausdrücklich nennt er Newtons Lehre nicht ein System, sondern eine Welttheorie (*Théorie du Monde*), weil ihm der Ausdruck 'System' eine Abgeschlossenheit und Endgültigkeit suggeriert, die gerade eine an der Erfahrung orientierte Wissenschaft nicht verbürgen kann. So bemerkt er zu Newton: "... seine wichtigste Tat für die Philosophie war es vielleicht, ihr Zurückhaltung aufzuerlegen und jene ihr von Descartes [...] verliehene Vermessenheit in vernünftigen Grenzen zu halten" [2, S. 151]. In D'Alemberts Wissenschaftsphilosophie des "mathematischen Positivismus" [28] ist Newtons *Principia* der methodologische 'Leitstern'.

Welchen Einfluß hat nun dieses wissenschaftstheoretische Bekenntnis d'Alemberts zur Newtonschen Methode auf seine Wissenschaftspraxis, hier also: seine tatsächliche Grundlegung der Mechanik, genommen? Um diese Frage zu beantworten, empfiehlt sich neben einer Lektüre verschiedener *Encyclopédie*-Artikel zur Mechanik v.a. ein Studium seines berühmten Lehrwerkes *Traité de dynamique* (1743; ²1758). Das Ergebnis ist recht bemerkenswert [vgl. 31, S. 151-194]:

In beiden Ausgaben des *Traité* spielen Newtons *Principia* keine nennenswerte Rolle. Bei der von d'Alembert hauptsächlich intendierten Klärung der Grundbegriffe und Prinzipien der Mechanik wird dieses Werk nur zu Beginn, im Zusammenhang mit dem Trägheitsprinzip, genannt [1, S. 3]. Anders als Newton formuliert er allerdings zwei Trägheitsprinzipie (für Ruhe und Bewegung) und verwendet den Begriff 'Trägheitskraft' (*force d'inertie*) nur mit Vorbehalt [1, S. ivf.].

Zum Kraftproblem allgemein äußert sich d'Alembert u.a. im Vorwort des *Traité*. Er übt dort eine erkenntnistheoretisch begründete Kritik am 'metaphysischem und obskuren' Konzept der Kraft und verwirft wie der 'späte' Maupertuis generell die Einführung von Kräften in die Mechanik. Die Mechanik als Wissenschaft von den beobachtbaren Wirkungen muß eine Beschreibung von Bewegungen ohne kausalwirkende Kräfte leisten. Den Körpern inhärente Kräfte, so bemerkt er in Hinblick auf die *vis viva* - Kontroverse, sind "dunkle und metaphysische Wesen, die nur dazu geeignet sind, Schatten auf eine Wissenschaft zu werfen, die für sich selber klar ist" [1, S. xvi].

Die Ablehnung von Kräften hat jedoch nicht nur Konsequenzen für seine Haltung in dieser berühmten Kontroverse, die er bekanntlich als bloßen Wortstreit (*logomachie*) ansah: D'Alembert geht es um einen streng mathematischen, axiomatisch-deduktiven Aufbau der Mechanik. Sein Ziel im *Traité* ist es, "die Prinzipien umfassender zu machen durch Beschränkung ihrer Anzahl" [1, iv]. Unter den 'dunklen' Prinzipien der Mechanik, die es dabei zu eliminieren gilt, führt er auch eines an, von dem "heutzutage jedermann Gebrauch macht, dass die beschleunigende oder verzögernde Kraft dem Geschwindigkeitselement proportional ist" [1, xi]. Es handelt sich um das zweite Bewegungsgesetz in der von Newton tatsächlich angegebenen mathematischen Form - wobei *auch* d'Alembert (vgl. 3.1, 3.2) dieses Gesetz *nicht* Newton zuschreibt oder diesen auch nur erwähnt. Seine Kritik dieses Gesetzes fällt vernichtend aus [1, xif.]:

Nous n'examinerons point si ce Principe est de verité nécessaire; nous avouons seulement que les preuves qu'on en a données jusqu'ici, ne nous paroissent pas fort convaincantes: nous ne l'adaptons pas non plus, avec quelques Geomètres, comme de verité purement contingente, ce qui ruineroit la certitude de la Méchanique, & la réduiroit à n'être plus qu'une Science expérimentale: nous nous contenterons d'observer, que vrai ou douteux, clair ou obscur, il est inutile à la Méchanique, & que par conséquent il doit en être banni.

Schwerlich ist d'Alemberts Kraftkritik im allgemeinen und seine Kritik des zweiten Bewegungsgesetzes im besonderen mit einer 'Newtonschen' Grundlegung der Mechanik in Einklang zu bringen. Wie Euler, vertritt auch er die Auffassung, daß die Einführung von Kräften den rationalen und mathematischen Charakter der Mechanik zerstören und sie zu einer bloßen *science expérimentale* machen würde. Für d'Alembert wäre diese Konsequenz gleichbedeutend mit der Aufgabe der Mechanik *als Wissenschaft*, obwohl er sich *theoretisch* nicht nur zur mathematischen, sondern sehr wohl auch zur *experimentellen Methode* Newtons bekennt.

Tatsächlich zeigt d'Alemberts Verständnis von rationaler Mechanik, wie Thomas Hankins [31] im Detail gezeigt hat, starke Züge eines ziemlich orthodoxen Cartesianismus:

Im Mittelpunkt des *Traité* steht eine Behandlung von Stoßprozessen geometrisch idealisierter Körper, bei denen jede Bewegungsänderung in der Undurchdringlichkeit begründet ist. Die ersten Prinzipien dieser Nahwirkungsmechanik hält er für notwendigerweise wahr, evident und *erfahrungsunabhängig*. Die Mechanik insgesamt erhält durch sie den Status einer axiomatisch-deduktiv organisierten mathematischen Theorie nach dem Vorbild der Euklidischen Geometrie. Um diesen Status zu sichern, darf die Mechanik aber nur auf 'Materie und Bewegung' zurückgreifen, wobei die Materie selber im Sinne Descartes' als undurchdringliche Ausdehnung geometrisch gefaßt wird.

Es erhebt sich natürlich die Frage, wie eine *so* verstandene Wissenschaft der Mechanik mit dem Problem der Gravitation umgeht. Im *Traité* werden solche Phänomene, die nicht (oder noch nicht) durch den Stoß beschreibbar sind, im *zweiten Teil* gesondert behandelt. Ihre "Ursachen sind nur durch ihre Wirkungen bekannt, und wir sind völlig unwissend,

was ihre Natur betrifft" [1, S. x]. Die *hier* geltenden Gesetze, insbesondere das Gravitationsgesetz, zeichnen sich nicht durch mathematische Notwendigkeit aus, dürfen aber auch nicht auf Kräfte als physikalische Ursachen zurückgreifen. Es handelt sich um bloße mathematische Beschreibungen ohne Anspruch auf physikalische Erklärung.

Die hier von d'Alembert eingeführte Dichotomie korrespondiert damit, daß er in der Frage der Gravitation einen Agnostizismus vertritt, der bei Newton (unter anderem) *auch* zu finden ist. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang allerdings, daß d'Alembert die eigentliche Position *Newtons* anders einschätzt [3, S. 854]:

Si M. Newton paroît indécis en quelques endroits de ses ouvrages sur la nature de la force *attractive*; s'il avoue même qu'elle peut venir d'une impulsion, il y a lieu de croire que c'étoit une espece de tribut qu'il vouloit bien payer au préjugé, ou, si l'on veut, à l'opinion générale de son siecle; & on peut croire qu'il a avoit pour l'autre sentiment une sorte de prédilection; puisqu'il a souffert que M. Côtés son disciple adoptât ce sentiment sans aucune réserve, dans la préface qu'il a mise à la tête de la seconde édition des *Principes*; préface faite sous les yeux de l'auteur, & qu'il paroît avoir approuvée. D'ailleurs M. Newton admet entre les corps célestes une *attraction* réciproque; & cette opinion semble supposer que est une vertu inhérente aux corps.

Letztlich also verstehe Newton die Gravitation als eine den Körpern inhärente Kraft - eine Position, die d'Alembert in seiner eigenen Grundlegung der Mechanik für inakzeptabel erklärt. An dieser Stelle tritt deutlich das Problem hervor, eine kräftefreie Mechanik auf der Grundlage von 'Materie in Bewegung' mit der Newtonschen Lehre in Einklang zu bringen.

Ansonsten scheint d'Alembert selber die Ambiguität seiner Cartesianistischen Wissenschaftsauffassung von rationaler Mechanik einerseits und dem eingangs dargestellten, verbalen Bekenntnis zur Newtonschen Methodologie andererseits gar nicht wahrgenommen zu haben. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß er sich diesem Wissenschaftsverständnis zufolge im Bereich der rationalen Mechanik allemal in Einklang mit Newtons *mathematischer* Methode wähen *konnte*, während er die *experimentelle* Methode nur für andere Bereiche (wie etwa die Optik) als unentbehrlich ansehen *durfte*. Den Experimentalwissenschaften aber brachte d'Alembert zu keiner Zeit besondere Aufmerksamkeit entgegen. [31, S. 3f.]

3.4 Zusammenfassung

Die Rezeption der Newtonschen Gravitationstheorie wurde in einer Vielzahl von Arbeiten [u.a. 10] gründlich untersucht. Dagegen stehen vergleichbar detaillierte und umfassende Analysen zur Aufnahme der *leges motus* und ihrer Voraussetzungen in der Mechanik des 18. Jahrhunderts stehen immer noch aus - ein Desiderat, dessen Behebung wesentlich für eine historisch adäquate Einordnung der *Principia* wäre. Beide Rezeptionsstränge hängen eng miteinander zusammen, können jedoch nicht von vorne herein identifiziert werden. Der hier gegebene Überblick zu Euler, Maupertuis und d'Alembert sollte

auch auf dieses Problem aufmerksam machen. Es ist vielleicht am Platz, an diese Fallbeispiele einige verallgemeinernde Schlusfolgerungen anzuknüpfen:

Erstens sollte gezeigt werden, daß das Newtonsche Programm relativ präzise definiert und abgegrenzt werden kann, wenn es um die Grundlagen der Mechanik geht. Nach dem zu Beginn dargelegten Verständnis kann man keinen der drei kontinentalen Mathematiker - anders als etwa die Briten Keill, Freind und Cotes [54] - als eigentlichen 'Newtonianer' kennzeichnen: Die 'kraftkritischen' Haltungen Eulers, d'Alemberts und des 'späten' Maupertuis sind mit den Voraussetzungen der Newtonschen Mechanik inkompatibel.

Zweitens zeigen die Beispiele, daß die heute so wenig in Frage gestellte paradigmatische Bedeutung der *Principia* für die Grundlegung der Mechanik bei den Mathematikern der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts keineswegs präsent war. Das spezifisch Neue und 'Revolutionäre' wurde zurecht in der Newtonschen Gravitationstheorie und der Entwicklung mathematischer Methoden der Himmelsmechanik, nicht in Newtons Bewegungsgesetzen gesehen. Das zweite Bewegungsgesetz, mit dem Namen Newton verbunden oder nicht, erschien zunächst wissenschafts- und erkenntnistheoretisch problematisch.

Drittens zeigt die Rezeption der Gravitationstheorie, wie wichtig für ihre Durchsetzung eine *wesentliche Unbestimmtheit* in den Grundlagen war. Englische Newton-Schüler wie Cotes konnten eine essentialistische Interpretation der Gravitation vertreten, die noch von ihrem Lehrer selber sanktioniert wurde. Maupertuis sah sich bei seiner späten, letztlich okkasionalistischen Lösung des Bewegungsproblems in Einklang mit dem 'theologischen' Newton. Er blieb - nach *eigenem* Verständnis - Zeit seines Lebens 'Newtonianer'. D'Alembert entschied sich in dieser Frage *gegen* die Ansicht, die er für Newton eigentliche hielt, und für einen (*ebenfalls* bei Newton zu findenden) Agnostizismus. Er ließ sich im übrigen von der ganzen Debatte in seinem Cartesianischen Verständnis einer rationalen Mechanik nicht irritieren. Euler schließlich hielt immer am Cartesianismus fest, ohne auf die Anwendung der Newtonschen Gravitationstheorie und eine mathematische Weiterentwicklung der Newtonschen Bewegungsgleichungen zu verzichten.

Viertens zeigen diese Beispiele, wiederum für die Gravitationstheorie, wenig von den großen 'Bekehrungserlebnissen', dem 'Gestaltwandel', der nach Kuhn kennzeichnend für die Durchsetzung eines neuen Paradigmas ist. Es dominieren eher die Versuche, zwischen alter und neuer Lehre zu vermitteln und geeignete Strategien zu entwickeln, um das grundsätzlich *Neue* an das alte System zu adaptieren.

Einiges von diesen 'individuellen Rationalisierungsbemühungen' überdauerte die Zeit, während Anderes, *rückblickend* betrachtet die bloße 'Trauerarbeit' am alten System, fehlinterpretiert oder bestenfalls ignoriert wurde. (Hierzu kann man Eulers Materietheorie oder Maupertuis' okkasionalistische Interpretation des Wirkungsprinzips rechnen).

Zu den *fortwirkenden* Ergebnissen nun noch einige abschließende Bemerkungen.

4. Schluß: Die Newtonsche Mechanik innerhalb der klassischen Mechanik

Euler, d'Alembert und Maupertuis waren als kontinentale Mathematiker der 'ersten Generation' nach Newton mit den zu Beginn skizzierten Kontroversen zwischen den drei wichtigen Programmen der Mechanik groß geworden und entsprechend erkenntnis- und wissenschaftstheoretisch sensibilisiert. Von einer eigentlichen *Durchsetzung* der Newtonschen Lehre in dem Sinne, daß ihre zentralen Voraussetzungen *fraglos* akzeptiert wurden, kann m.E. erst ab der 'zweiten' Generation, d.h. ab Mitte des 18. Jahrhunderts, gesprochen werden.

Gewöhnt an direktive Kräfte im Sinne der Newtonschen Mechanik als selbstverständliche *mathematische* Beschreibungsmittel (s. etwa Euler) und 'verwöhnt' durch die großen Erfolge der Newtonschen Himmelsmechanik, erhielten diese Kräfte mehr und mehr den Status von Erklärungsentitäten mit Aussicht auf ein ontologisches Fundament. Man kann vielleicht das halbe Jahrhundert von Lagranges *Mécanique Analytique* (1787, [38]) über Laplaces *Mécanique céleste* (1799.1825) bis zu Poissons späten *Remarques* (1837, [52]) als die eigentliche *Hochzeit* des Newtonianismus bezeichnen, in der ein *Atomismus der Zentralkräfte* die physikalische Erklärung aller Naturphänomene verhieß.

John Heilbronn beklagte, daß mit dieser Durchsetzung der Newtonschen Lehre ein gewisser Instrumentalismus in der Physik einher ging, der "bedingungslos Imponderabilien zur Hilfe ruft, Hypothesen erdichtet, Kräfte vervielfacht, um die Phänomene bequem zu retten" (zit. nach [52], S. 180). William Whewell beschrieb diese Entwicklung wohlwollender als eine zugunsten der Newtonsche Lehre wirkenden 'fortschreitenden Anschauung'. Ferdinand Rosenberger bemerkte ironisch: "Es gab forthin in der Physik keinen Standpunkt ausserhalb des Newtonianismus mehr Newton war fortan nicht mehr ein blosser genialer Gelehrter ..., sondern ein Prophet, der den Gläubigen die directe Offenbarungen übermittelt hatte" [54, S. 526]. Im Sinne der zu Beginn dargelegten Absicht, eine *kritische* 'Denkmalpflege' zu betreiben und dabei die Grundlagen der Mechanik in den Mittelpunkt zu stellen, möchte ich (um im Bild zu bleiben), diese 'Siegessäule' des Newtonianismus zumindest in den historischen Rahmen stellen:

Die Kontroversen zwischen den eingangs erwähnten drei Programmen einer rationalen Mechanik manifestierten sich zum einen in philosophischen Auseinandersetzungen, die z.T. erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wieder aufgegriffen wurden. Stellvertretend sei hier auf die Kausalitäts- und Kraftkritik bei Kirchhoff, Mach, Hertz u.a. verwiesen, die wesentlich für eine Reformulierung der Mechanik wurde. Innerhalb dieser Grundlagendiskussion kam es aber *auch* zur Formulierung neuer, mathematisch und physikalisch fruchtbarer Prinzipien. Hier sind etwa das Prinzip der *vis viva* -Erhaltung, das Prinzip der kleinsten Wirkung oder d'Alemberts Prinzip zu nennen. Diese Prinzipien sind historisch keineswegs als bloße mathematische 'Artikulationen' des *Newtonianismus* zu begreifen. Vielmehr haben diese Prinzipien ihre Wurzeln im Leibnizschen und Cartesianischen Programm [31, 33, 52] und wurden erst in Lagranges *Mécanique Analytique* historisch und systematisch der (von Lagrange so genannten) 'Newtonschen Wissenschaft'

einverleibt [52, S. 252-261]. Interessant sind die Variationsprinzipien in Verbindung mit der *vis viva* - Erhaltung, weil sie mit fortschreitender Entwicklung der analytischen Mechanik eine axiomatische Grundlegung ermöglichten, die sich mit guten Gründen als dezidiert 'nicht-newtonsch' kennzeichnen läßt. Vor allem seit der Formulierung eines allgemeinen Energieerhaltungssatzes zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurden eine Reihe solcher Grundlegungsversuche unternommen.

Die Mechanik Newtons, so sollten schon diese wenigen Bemerkungen verdeutlichen, ist natürlich nicht die 'Newtonsche Mechanik' der Lehrbücher, und eine eigentlich so zu nennende 'Newtonsche' Mechanik wiederum ist nicht gleichzusetzen mit der klassischen Mechanik schlechthin. Die Wissenschaftsgeschichtsschreibung darf sich nicht auf die Aufgabe beschränken, den singulären Leistungen Newtons in der Mathematik, der Optik und der Himmelsmechanik noch bis in die kleinsten Verästelungen nachzuspüren, sondern muß auch bereit sein, selber nur historisch begreifliche Hypostasierungen und Verabsolutierungen zu korrigieren. William Whewell, gewiß einer der größten Newtonverehrer unter den Großen der Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftsphilosophie, hat diese Aufgabe für die Geschichtsschreibung der nachnewtonschen Mechanik schon früh gesehen und sich sein kritisches Unterscheidungsvermögen gegen die Zeitströmung bewahrt. Daher soll ihm das Schlußwort gehören:

The reader will recollect that we are here speaking of the *Principia* as a Mechanical Treatise only; we shall afterwards have to consider it as containing the greatest discoveries of Physical Astronomy. As a work on Dynamics, its merit is, that it exhibits a wonderful store of refined and beautiful mathematical artifices, applied to solve all the most general problems which the subject offered.

The *Principia* can hardly be said to contain any new inductive discovery respecting the principles of mechanics; for though Newton's *Axioms or Laws of Motion*, which stand at the beginning of the book, are a much clearer and more general statement of the grounds of Mechanics than had yet appeared, they do not involve any doctrines which had not been previously stated or taken for granted by other mathematicians.

Literatur:

- [1] D'Alembert, J.R.: *Traité de dynamique*. Paris 1743 (repr. Brüssel 1867).
- [2] Ders.: *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (1751) (Einleitung zur Enzyklopädie, frz.-deutsch). Hrsg. von E. Köhler. Hamburg 1955.
- [3] Ders.: Article *Attraction*. *Encyclopédie ou Dictionnaire Raisoné des Sciences, des Arts et des Métiers*. Paris 1751-1780, Bd. 1, S. 850-854.
- [4] Ders.: Article *Force*. *Encyclopédie*, Bd. 7, S. 109-125.
- [5] Ders.: *Traité de Dynamique*. Paris 1758 (2. Aufl., repr. Paris 1921).
- [6] Ders.: Article *Mechanique*. *Encyclopédie*, Bd. 10, S. 222-226.
- [7] Beeson, D.: *Maupertuis. An Intellectual Biography*. Oxford 1992
- [8] Bos, H.J.M.: *Mathematics and Rational Mechanics*, in: G.S. Rousseau/ R. Porter (Hrsg.), *The Ferment of Knowledge. Studies in the Historiography of Eighteenth Century Science*. Cambridge 1980, S. 327-355.
- [9] Brunet, P.: *Maupertuis: Étude biographique. L'oeuvre et sa place dans la pensée scientifique et philosophique du XVIIe siècle*. Paris 1929.
- [10] Ders.: *L'introduction des théories de Newton en France au XVIIIe siècle avant 1738*. Paris 1931.
- [11] Calinger, R.S.: *The Newtonian-Wolffian Controversy (1740-1759)*. *Journal of the History of Ideas* 30(1969), S. 319-330.
- [12] Ders.: *Euler's 'Letters to a Princess of Germany' as an expression of his mature scientific outlook*. *Archive for the History of Exact Sciences* 15(1975/76), S. 211-233.
- [13] Cassirer, E.: *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*, Bd. II. Berlin 1922 (repr. Darmstadt 1974).
- [14] Cohen, I.B.: *The Newtonian Revolution*. Cambridge/London/New York 1980.
- [15] Descartes, R.: *Oeuvres*. Hrsg. von C. Adam/P. Tannery. 13 Bde., Paris 1897-1913.
- [16] Ders.: *Die Prinzipien der Philosophie (Principia Philosophiae, 1647)*. Übers. und hrsg. von A. Buchenau. Hamburg 1955.
- [17] Euler, L.: *Leonhardi Euleri Opera Omnia sub auspiciis Societatis Scientiarum Naturalium Helveticae*. (Bisher) 72 Bde., Leipzig bzw. (ab 1752) Zürich und Basel 1911-1986.
- [18] Ders.: *Mechanik oder analytische Darstellung der Wissenschaft von der Bewegung (Mechanica sive motus scientia analytice exposita, 1736)*. Übers. und hrsg. von J.P. Wolfers. 2 Bde., Greifswald 1848/1850.
- [19] Ders.: *De la force de percussion et de sa véritable mesure*. *Histoire de l'Académie des Sciences et Belles-lettres de Berlin* I (1746), S. 21-35, in: *Opera Omnia*, Bd. II,8, S. 27-53.
- [20] Ders.: *Gedanken von den Elementen der Körper, in welchem das Lehr-Gebäude von den einfachen Dingen und Monaden geprüft, und das wahre Wesen der Körper entdeckt wird*. Berlin 1746, in: *Opera Omnia*, Bd. III,2, S. 349-366.
- [21] Ders.: *Découverte d'un nouveau principe de mécanique*. *Histoires* 6 (1752), S. 185-217, in: *Opera Omnia*, Bd. II,5, S. 81-108.
- [22] Ders.: *Recherches sur l'origines des forces*. *Histoires* 6(1752), S. 419-447, in: *Opera Omnia*, Bd. II,5, S. 109-131.
- [23] Ders.: *Anleitung zur Naturlehre, worin die Gründe zur Erklärung aller in der Natur sich ereignenden Begebenheiten und Veränderung festgesetzt werden*, in: *Opera Omnia*, Bd. III,1, S. 16-178.
- [24] Ders.: *Mechanik. Dritter Theil: Theorie der Bewegung fester und starrer Körper (Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum ex primis nostrae cognitionis*

- principiis stabilita et ad omnes qui in huiusmodi corpora cadere possunt accommodata, 1765). Übers. und hrsg. von J.P. Wolfers. Greifswald 1853.
- [25] Ders.: Lettres à une Princesse d'Allemagne sur divers sujets de Physique et de Philosophie. 3 Bde., Petersburg 1768-1772. Opera Omnia, Bd. III, 11 und 12.
- [26] Fellmann, E.A., Newtons 'Principia' und die zeitgenössischen Mathematiker auf dem Kontinent, in: K. Hutter (Hrsg.), Die Anfänge der Mechanik. Newtons Principia gedeutet aus ihrer Zeit und ihrer Wirkung auf die Physik. Berlin/Heidelberg/New York 1989, S. 75-98.
- [27] Grattan-Guinness, I.: Convolutions in French Mathematics. 3 Bde., Basel/Boston/Stuttgart 1990.
- [28] Guerlac, H.: Newton's Changing Reputation in the Eighteenth Century, in: R.O. Rockwood (Hrsg.), Carl Becker's heavenly City Revisited. Ithaca/New York 1958, S. 3-26.
- [29] Ders.: Where the Statue Stood: Divergent Loyalties to Newton in the Eighteenth Century, in: E.R. Wassermann (Hrsg.), Aspects of Eighteenth Century. Baltimore 1965, S. 317-334.
- [30] Hankins, T.L.: The Reception of Newton's Second Law of Motion in the Eighteenth Century. Archives Internationales d'Histoire des Sciences, 20(1967), S. 43-65.
- [31] Ders.: Jean d'Alembert: Science and the Enlightenment. Oxford 1970.
- [32] Herivel, J.W.: The Background to Newton's *Principia*. Oxford 1965.
- [33] Hiebert, E.N.: Historical Roots of the Principle of Conservation of Energy. Madison 1962.
- [34] Home, R.W.: Out of a Newtonian Straightjacket: Alternative Approaches to Eighteenth-Century Physical Science, in: E. Brissenden/J.C. Eade (Hrsg.), Studies in Eighteenth Century. Canberra 1979, S. 235-249.
- [35] Jammer, M.: Concepts of Force. Cambridge (Mass.) 1957.
- [36] Koyré, A.: Newtonian Studies. London 1965.
- [37] Kuhn, T.S.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Zweite revidierte und um das Postskriptum von 1969 ergänzte Auflage. Frankfurt a.M. 1981.
- [38] Lagrange, J.L.: Mécanique Analytique. Paris 1788.
- [39] Leibniz, G.W.: Philosophische Schriften. Hrsg. von C.J. Gerhardt. 7 Bde., Halle 1860 (repr. Hildesheim 1962).
- [40] Mach, E.: Die Mechanik, historisch-kritisch dargestellt. Leipzig 1933 (repr. Darmstadt 1982).
- [41] Maupertuis, P.L.M. de: Oeuvres. 4 Bde., Lyon 1768 (repr. Hildesheim/New York 1974 et Hildesheim 1965, avec une introduction par G. Tonelli).
- [42] Ders.: Discours sur les différentes Figures des Astres avec une Exposition des Systèmes de MM. Descartes et Newton. Paris 1732, in: Oeuvres, Bd. 1, S. 79-170.
- [43] Ders.: Accord de différentes Loix de la Nature qui avoient jusqu'ici paru incompatibles (1744). Mémoires de l'Académie Royale des Sciences des Paris. 1748, S. 417-426; mit Änderungen in: Oeuvres, Bd. 4, S. 3-28.
- [44] Ders.: Les Loix du Mouvement et du Repos déduites d'un Principe Metaphysique. Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles-lettres de Berlin 2(1748), S. 267-294; mit Änderungen in: Oeuvres, Bd. 4, S. 31-42.
- [45] Ders.: Essai de Cosmologie. Berlin 1750, in: Oeuvres, Bd. 1, S. ix-xxxvi und S. 3-78.
- [46] Ders.: Examen philosophique de la preuve de l'Existence de Dieu employée dans l'Essai de Cosmologie. Histoire 12(1758), S. 389-424.
- [47] Newton, I.: Mathematische Prinzipien der Naturlehre (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, 3¹⁷²⁶). Übers. und hrsg. von J.P. Wolfers. Berlin 1872 (repr. Darmstadt 1963).
- [48] Ders.: Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts (Opticks or a treatise of reflections, refractions, inflections and

- colours of light, ⁴1730). Übers. und hrsg. von W. Abendroth. Leipzig 1898; neu hrsg. von U. Sexl/K. von Meyenn, mit einer Einleitung von M. Fierz. Braunschweig/Wiesbaden 1983.
- [49] Ders.: Über die Gravitation ... (De Gravitatione) . Texte zu den philosophischen Grundlagen der klassischen Mechanik. Text lateinisch-deutsch; übers. und erl. von G. Böhme. Frankfurt a.M. 1988.
- [50] Ders.: Isaac Newton's Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents. Hrsg. von I.B. Cohen. Cambridge 1958.
- [51] Poisson, S.D.: Remarques sur l'integration des equations différentielles de la dynamique. *Journal de Mathematiques pures et appliquées* 2(1837), S. 317-336.
- [52] Pulte, H.: 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 (*Studia Leibnitiana*, Sonderheft 19). Wiesbaden 1989.
- [53] Ders.: Neuere Newtoniana. Zum 350. Geburtsjahr Isaac Newtons. *Journal for the General Philosophy of Science* 24(1993), S. 169-185.
- [54] Rosenberger, F.: Isaac Newton und seine Physikalischen Principien. Leipzig 1895.
- [55] Schneider, I.: Isaak Newton. München 1988.
- [56] Scott, W.L. The conflict between atomism and conservation theory 1644 to 1860. London 1970.
- [57] Thiele, R.: Leonhard Euler (Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner, 56.). Leipzig 1982.
- [58] Tonelli, G.: Maupertuis et la critique de la métaphysique, in: *Centre National de la Recherche Scientifique (Hrsg.), Actes de la Journée Maupertuis*. Paris 1975, S. 79-90.
- [59] Truesdell, C.A.: Rational fluid mechanics, 1687-1765. Editor's introduction to: Leonhardi Euleri Commentationes Mechanicae Ad Theoriam Corporum Fluidorum Pertinentes. *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, Bd. II, 12. Lausanne 1954, S. VIII-CXXV.
- [60] Ders.: The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies, 1638-1788. Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia, Vol. X et XI seriei secundae. *Opera Omnia*, Bd. II, 11(2). Zürich 1960.
- [61] Ders.: A Programme toward Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason. *Archive for the History of Exact Sciences* 1(1960), S. 1-36. (abgedruckt auch in [62], S. 85-136).
- [62] Ders.: *Essays in the History of Mechanics*. Berlin/Heidelberg/New York 1968.
- [63] Ders.: Newtons Einfluß auf die Mechanik des 18. Jahrhunderts, in: Hutter [27], S. 47-73.
- [64] Westfall, R.S.: Force in Newton's physics. The science of dynamics in the 17th century. London 1971.
- [65] Whewell, W.: *The History of the Inductive Sciences*. 3 Bde., London 1857 (repr. Hildesheim 1975).
- [66] Wittgenstein, L.: *Philosophische Untersuchungen. Tractatus Logico-Philosophicus*, Tagebücher 1914-1916. Frankfurt a.M. 1969.