

Ricardo Lopes Coelho

Zur  
Konzeption  
der  
Kraft  
der  
Mechanik

*Fig 3.*

WAXMANN





Ricardo Lopes Coelho

# Zur Konzeption der Kraft der Mechanik



Waxmann Münster / New York  
München / Berlin

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Lopes Coelho, Ricardo:**

Zur Konzeption der Kraft der Mechanik / Ricardo Lopes Coelho. –  
Münster ; New York ; München ; Berlin : Waxmann, 2001

(Internationale Hochschulschriften ; 358)

ISBN 978-3-8309-1011-4

**Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek**

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

**Internationale Hochschulschriften, Bd. 358**

Die Reihe für Habilitationen und sehr  
gute und ausgezeichnete Dissertationen

ISSN 0932-4763

Print-ISBN 978-3-8309-1011-4

E-Book-ISBN 978-3-8309-6011-9

© Waxmann Verlag GmbH, 2001

[www.waxmann.com](http://www.waxmann.com)

[info@waxmann.com](mailto:info@waxmann.com)

Umschlaggestaltung: Matthias Grunert

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier, säurefrei gemäß ISO 9706

Printed in Germany

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages  
in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer  
Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

# Inhalt

Vorwort.....	7
Einleitung.....	9
I. Zum Begriff der Kraft in der Geschichte der Mechanik.....	13
I. § 1 Newtons Principia.....	13
I. § 2 Eulers Mechanik.....	19
I. § 3 D’Alemberts Abhandlung.....	24
I. § 4 Lagranges Mechanik.....	33
I. § 5 Carnots Prinzipien.....	46
I. § 6 Saint-Venants Prinzipien.....	50
I. § 7 Reechs Mechanik.....	59
I. § 8 Kirchhoffs Mechanik.....	68
I. § 9 Machs Mechanik.....	78
I. § 10 Hertz’ Prinzipien.....	82
I. § 11 Poincarés Analyse.....	90
I. § 12 Ludwigs Theoretische Physik.....	97
II. Bestimmung des Problems und Lösungsvorschlag.....	105
II. § 1 Bestimmung des Problems.....	105
These 1.....	105
These 2.....	118
II. § 2 Zur Begründung des Trägheitsgesetzes.....	143
II. § 3 Lösungsvorschlag.....	170
a) These, Schritte und Begriff.....	170
b) Der Begriff und die Grundgleichung.....	174

c) Der Begriff und die Meßverfahren .....	175
d) Der Begriff und die klassische Systematisierung.....	184
e) Der Begriff und die Hertzsche Systematisierung .....	189
f) Der Begriff und die mechanische Vorgehensweise .....	191
g) Der Begriff und offene Fragen der Mechanik.....	196
III. Schluß .....	207
Literaturverzeichnis .....	211

## Vorwort

Der Ansatz dieser Arbeit über die Konzeption der Kraft der Mechanik besteht im Rückgriff auf die Philosophie und die Wissenschaftsgeschichte, um ein Problem der Physik, genauer der physikalischen Theorie zu lösen. Ein Grund für die Wahl dieses Ansatzes ist, daß sich in der Physik zwischen dem unterscheiden läßt, was durch die Erfahrung gewonnen wird, dem, was der Mathematik entnommen wird, und dem, was den Zusammenhang der verschiedenen Phänomene miteinander bzw. die Aufstellung der Theorie betrifft. Es können also dabei Probleme auftreten, die weder mathematischer noch physikalischer Natur sind, sondern als theoretische bezeichnet werden können, insofern sie die hergestellten Verbindungen zwischen den Phänomenen, also die Theorie an sich betreffen. Mit einem theoretischen Problem in diesem Sinn befaßt sich die vorliegende Arbeit. Aufgrund der Art des zu behandelnden Problems wird verständlich, daß bei seiner Lösung auf die Philosophie und Wissenschaftsgeschichte zurückgegriffen wird. Für diese Vorgehensweise scheinen zudem die Ergebnisse der Untersuchung zu sprechen.

Dieser Rückgriff auf die Philosophie bedeutet nicht, daß aus dem Problem der Mechanik ein logisches oder philosophisches Problem gemacht wird, das dann im Rahmen der Philosophie gelöst werden soll. Die Geschichte kennt mehrere erfolglose Versuche solcher Art. Der einzuschlagende Weg muß daher ein anderer sein, wenn die Lösung für ein Problem der Mechanik erarbeitet werden soll, die der Mechanik selbst hilfreich sein kann. Der Philosophie kommt hier also eine eher dienende Aufgabe zu; dasselbe gilt *mutatis mutandis* für die Wissenschaftsgeschichte.

Auf die Geschichte der Mechanik wird zurückgegriffen, weil sie eine sinnvolle Grundlage für die Untersuchung bietet. Berücksichtigt man, daß Physiker des 19. und 20. Jahrhunderts nicht nur wissenschaftliche Daten in eine Theorie integrieren mußten, sondern auch „historische Residuen“, d.h. hinterlassene Begriffe vergangener Theorien, die sich im Laufe der Zeit eingebürgert hatten, wird ersichtlich, wie hilfreich es sein kann, die historischen Hintergründe der Mechanik zu kennen. In der Tat können so die Ursachen der Probleme besser erkannt werden.

Seit der Zeit meiner Dissertation über die Hertzsche Mechanik Anfang der neunziger Jahre beschäftigt mich das Problem der Kraft. Die Forschung zum Kraftproblem konnte jedoch nicht durchgeführt werden, da ich im akademischen Jahr 93–94 nach Portugal zurückkehrte, um meine Lehrtätigkeit weiterzuführen, wo selbst die Gesamtheit der Bibliotheken noch keine gute Bibliothek ergibt.

Dank der Unterstützung des Präsidenten des Wissenschaftsrates der *Faculdade de Ciências* der Universität Lissabon, Prof. Dr. Pinto Paixão, und aufgrund eines Postdoc-Stipendiums der JNICT (später FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia), zu dem Prof. Dr. Andrade e Silva und Prof. Dr. Ana Luísa Janeira beigetragen haben, kam ich Ende 1995 nach Berlin zurück. Der Physikhistoriker Burghard Weiss, dessen sorgfältig verfaßte Jahresberichte hier besonders hervorzuheben sind, übernahm bei der Stiftung die Betreuung meiner Arbeit. Die FCT hat meine gesamte Forschung im Ausland (sowie dieses Buch mit-) finanziert.

Ende des Jahres 1998 ist die Arbeit im Institut für Philosophie, Wissenschaftstheorie, Wissenschafts- und Technikgeschichte der TU Berlin vorgelegt worden. Mit Prof. Dr. Hans Poser, dem ich für viele persönliche und offizielle Unterstützungen dankbar bin, fanden ebenso wie mit Prof. Dr. Eberhard Knobloch und mit PD Dr. Burghard Weiss hochinteressante Diskussionen hierüber statt. Sie haben darüber hinaus wie auch Prof. Dr. Herber Berger aus Hannover in der Habilitationskommission über die Arbeit berichtet. Allen Genannten gilt mein ausdrücklicher Dank.

## Einleitung

Auf dem 1. internationalen Kongreß für Philosophie im Jahr 1900 in Paris sagte Poincaré, man wisse nicht, was Kraft und Masse seien. Er ist der Auffassung, daß für eine Definition dieser Begriffe die Angabe entscheidend ist, wie sie zu messen sind, und zieht daher die jeweiligen Meßverfahren zur Analyse heran. In seiner Untersuchung von 1897 kommt er zu dem Schluß, es sei unmöglich, im Rahmen des klassischen Systems eine befriedigende Vorstellung von Masse und Kraft zu gewinnen. Wenn man aber nicht weiß, was Kraft und Masse sind, dann kann man sie auch kaum erklären.

Den Lehrbüchern der Mechanik fällt die Aufgabe zu, diese Wissenschaft darzustellen. Hierbei ist von Kraft und Masse schon deshalb die Rede, weil sie Elementarbestandteile der sogenannten Grundgleichung der Mechanik, Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung, sind. Daß in bezug auf diese Begriffe ein Problem besteht, wird in den Lehrbüchern des 20. Jahrhunderts selten ausgesprochen. Da es aber besteht, taucht es dennoch in verschiedenen Formen auf.

So wird etwa behauptet, die Grundgleichung der Mechanik biete eine Definition der Kraft und der Masse. Wenn die Kraft durch die Gleichung definiert wird, geht man davon aus, daß sie durch die Masse und die Beschleunigung definiert wird. Wenn aber die Gleichung auch noch eine Definition der Masse ist, wird die Masse aus demselben Grund durch Kraft und Beschleunigung definiert. Die Kraft ist also Definiendum durch die Masse und Definiens der Masse, somit besteht ein *Circulus vitiosus*. Eine solche Vorgehensweise hat Mach schon 1868 kritisiert: Er wies auf den logischen Fehler hin, das Gewicht durch die Masse und die lokale Beschleunigung und die Masse wiederum durch das Gewicht und die Beschleunigung zu definieren.

Oft wird in Lehrbüchern die Kraft anhand unserer Empfindung erklärt, d.h., die Idee der Kraft wird auf unsere muskuläre Anstrengung zurückgeführt, wie beispielsweise beim Schieben oder Ziehen eines Objekts. Eine solche Auffassung von Kraft wurde von Reech 1852 vertreten, der auf dieser Grundlage eine mechanische Theorie entwickelte. Jules de Andrade, der den Reechschen Kraftbegriff übernahm, vertrat dann die These, die Mecha-

nik sei anthropomorph. Aus diesem Grund wurde seine Auffassung von Poincaré kritisiert, der sagt, der Anthropomorphismus könne nichts begründen, was einen echt wissenschaftlichen oder philosophischen Charakter habe. Schon vorher hatte auch Hertz anthropomorphe Gedankengänge in der Mechanik grundsätzlich zurückgewiesen.

In diesen beiden Beispielen werden Erklärungen für die Kraft gegeben, welche schon damals kritisiert bzw. zurückgewiesen worden sind. Diese Unkenntnis der Geschichte der Mechanik mag ein Grund dafür sein, daß das Kraft-Problem in den Lehrbüchern selten angesprochen wird. Ein anderer Grund hierfür liegt darin, daß in dem mathematischen und experimentellen Teil der Mechanik die Schwierigkeit nicht auftaucht, d.h., wenn Meßergebnisse in die entsprechenden Gleichungen eingesetzt werden, erweisen sich die Resultate der mathematischen Verarbeitung als übereinstimmend mit der Erfahrung. Denkt man aber über die Meßverfahren nach, wie etwa Poincaré es getan hat, oder versucht man, eine Definition der Kraft oder der Masse aufzustellen, treten Schwierigkeiten auf. Dies deutet darauf hin, daß das Kraft-Problem sich nicht mittels der Mathematik oder der Physik lösen läßt. Falls es so ist, scheint es trotz des Schlusses von Poincaré nicht unvernünftig zu sein, das Problem zu untersuchen, und dies ist das Vorhaben dieser Arbeit.

*Wie läßt sich die Kraft konzipieren?* lautet die Frage, mit der sich die vorliegende Untersuchung befaßt. Ihre Zielsetzung ist, zu einer Konzeption für die Kraft zu gelangen, die mit der Mechanik in Einklang steht, namentlich mit deren Grundgleichung, mit den entsprechenden Meßmethoden und mit der Vorgehensweise bei der Behandlung der mechanischen Aufgaben, und die darüber hinaus eindeutig ist. Dazu ist es zuerst notwendig, zu wissen, in welcher Weise der Kraftbegriff der klassischen Mechanik kritisiert wurde, welche Schwierigkeiten bereits erörtert und welche Auffassungen von Kraft vorgelegt worden sind. Dies führt uns in die Geschichte hinein, und zwar zuerst zu den Werken, die für die Geschichte des Begriffes der Kraft bedeutsam sind.

Diese Werke sind der historischen Forschung zu entnehmen; fast alle, die hier betrachtet werden, sind bereits in den Untersuchungen von R. Dugas und M. Jammer zu finden, die sich in einem Artikel von 1946 bzw. in einem Buch von 1957 unter historischem Aspekt ausschließlich mit dem

Thema befaßt haben. Eine Beschränkung auf die von diesen Autoren betrachteten Werke wird deshalb vorgenommen, weil nicht die verschiedenen Begriffe der Kraft, sondern das Begreifen der Kraft, die mit der Grundgleichung verbunden ist, das Thema der vorliegenden Arbeit ist. Folgende Werken werden also betrachtet: Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Eulers *Mechanica sive motus scientia analytice exposita*, d'Alemberts *Traité de dynamique*, Lagranges *Mécanique analytique*, L. Carnots *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, Saint-Venants *Principes de mécanique fondés sur la cinématique*, Reechs *Cours de Mécanique*, Machs *Mechanik*, Kirchhoffs *Vorlesungen über Mechanik*, Hertz' *Prinzipien der Mechanik* und von Poincaré die Artikel *Sur les idées de Hertz sur la Mécanique* und *Sur les Principes de la Mécanique*. Dieser Auswahl wird ein Werk hinzugefügt, welches erst nach den erwähnten historischen Untersuchungen erschienen ist. Es handelt sich um die *Einführung in die Grundlagen der Theoretischen Physik* von Ludwig, in der das Kraft-Problem erkannt ist und eine Lösung für dasselbe vorgeschlagen wird. All dies wird im I. Kapitel der vorliegenden Arbeit behandelt.

Der folgende Untersuchungsschritt besteht in der Bestimmung des Problems: *Wo liegt das Problem der Kraft?* lautet dann die Frage, deren Beantwortung angestrebt wird. Es wird sich zeigen, daß der Begriff der Kraft durch die Theorie bedingt ist und daß das, was sie aus ihm macht, nicht mit der Erfahrung im Einklang steht. Dies wird in zwei Thesen dargestellt, deren Argumentation zwei Komponenten einschließt, wobei die eine als logische bezeichnet werden kann, während sich die andere Komponente als historische charakterisieren läßt. Letztere dient dazu, zu zeigen, daß das, was in den Thesen vertreten wird, in Übereinstimmung mit der Geschichte der Mechanik steht. Nachdem das Problem bestimmt worden ist, wird eine Lösung vorgeschlagen.

Ein entscheidender Punkt bei der Erarbeitung der Konzeption der Kraft liegt in der Erkenntnis, daß ein Begriff der Kraft, der der Größe Kraft in der Grundgleichung der Mechanik entsprechen soll, derartige Informationen oder, wenn man will, Voraussetzungen beinhaltet, daß er nicht auf ein einzelnes Phänomen bezogen werden kann. Die immer wieder unternommenen Versuche, die Kräfte in den Phänomenen zu „erblicken“, die an sich verständlich sind, konnten schon deshalb nicht erfolgreich sein. Der Lösungs-

vorschlag und die Bestimmung des Problems hängen miteinander zusammen und werden im zweiten Kapitel dargelegt.

Schließlich wird im dritten und letzten Kapitel zusammenfassend eine Bilanz dessen gezogen, was man mit der vorgeschlagenen Konzeption gewinnt. Dies betrifft zum einen die Probleme, die auf dem Trägheitsgesetz und auf dem klassischen Begriff der Kraft beruhen und die überwunden werden, und zum anderen das, was unter dem vorgeschlagenen Begriff der Kraft subsumiert wird. Von weiteren Vorteilen der hier entwickelten Konzeption, welche sogar über die Mechanik hinaus von Nutzen sein kann, wird im Rahmen dieser Untersuchung nicht die Rede sein können, da sie sich auf die Erforschung der Konzeption der Kraft der Mechanik beschränkt.

## I. Zum Begriff der Kraft in der Geschichte der Mechanik

Im folgenden werden diejenigen Werke herangezogen, die hinsichtlich der systematischen und historischen Forschung zum Kraftbegriff von Bedeutung sind. In jedem dieser Werke gilt es, die Kritiken am Begriff der Kraft zu betrachten sowie die je eigene Auffassung der Kraft und die bei ihrer Verwendung aufgetretenen Schwierigkeiten zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird textorientiert vorgegangen. Diese Interpretationsmethode wird aus der Philosophie übernommen, stützt sich auf die Neohermeneutik und die Logik und wird dem vorliegenden Forschungsobjekt angepaßt, d.h. den Texten, in denen zwischen Mathematik, Erfahrung und Logik zu unterscheiden ist. In Übereinstimmung mit ihr wird jedes der zu betrachtenden Werke als eine Einheit behandelt bzw. als ein System betrachtet. Die Frage nach dem Begriff der Kraft wird dann in Zusammenhang mit der entsprechenden Problemstellung und mit der Funktion des Begriffs in diesem System untersucht. Die Resultate der Interpretation stellen sich hier dann als Konsequenzen dieser Methode dar.

Da nach dieser hermeneutischen Methode jedes der zu betrachtenden Werke als ein System zu behandeln ist, wird jedes für sich untersucht und dargestellt. So soll soweit wie möglich vermieden werden, die einzelnen Werke aus einer anderen als ihrer je eigenen Fragestellung zu interpretieren. Dementsprechend wird das I. Kapitel so strukturiert, daß jedem dieser Werke ein Abschnitt gewidmet wird, wobei nach einer kurzen allgemeinen Einführung konkret auf den *Kraftbegriff* eingegangen wird. Der Abschnitt zu Poincaré bildet dabei eine Ausnahme, da dieser kein Buch geschrieben hat, in dem er einen eigenen Kraftbegriff vorschlägt. Er führt aber eine Analyse des Begriffs der Kraft der klassischen Theorie durch, die hier diskutiert wird. Auf die in diesem Kapitel erlangten Resultate wird erst im zweiten zurückgegriffen.

### I. § 1 Newtons *Principia*

Die *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687 (<sup>2</sup>1713, <sup>3</sup>1726) veröffentlicht, sind gemäß der euklidischen Form dargestellt: Zuerst werden die Grundlagen der Theorie dargelegt, Definitionen und Axiome; dann fol-

gen die drei „Bücher“ über die Bewegungen der Körper im Vakuum, im widerstehenden Mittel und über das Gefüge der Welt. Durch den Begriff „Philosophie“ wird auf den theoretischen Charakter des Werkes hingewiesen, denn er wird einer praktischen bzw. technischen Mechanik gegenübergestellt, welche für Handwerker geeignet wäre, für die aber das Werk, liest man in der Vorrede, nicht gedacht ist. Die Aufgabe der Philosophie besteht der Newtonschen Auffassung nach darin, die Naturkräfte ausgehend von den Bewegungen zu untersuchen und dann die Phänomene ausgehend von den Kräften zu erweisen.<sup>1</sup> Dieser Konzeption nach beruhen also die Bewegungen auf Kräften. Der Begriff der Kraft der Theorie Newtons hängt, wie wir sehen werden, mit der von ihm durchgeführten Systematisierung der Bewegungen zusammen.

#### ZUM KRAFTBEGRIFF

Die Grundlagen der *Principia* bestehen aus acht Definitionen und drei Axiomen, welche im folgenden der Reihe nach betrachtet werden. Die acht Sätze lassen sich unter drei Begriffe subsumieren: *Materie*, *Bewegung* und *Kraft*. Denn die erste Definition betrifft die Materie, die zweite die Bewegung und die übrigen sechs die Kraft. Von einem anderen Gesichtspunkt aus betrachtet können die acht Sätze in zwei Gruppen zusammengestellt werden, denn in drei von ihnen werden *Begriffe* und in den übrigen fünf *Quantitäten* definiert. In den Definitionen III, IV und V wird gesagt, was unter innewohnender Kraft, eingedrückter Kraft und Zentripetalkraft verstanden wird; die übrigen Definitionen besagen, wie bestimmte Größen einzuschätzen sind. Dabei handelt es sich um die Quantität der Materie,<sup>2</sup> die Quantität der Bewegung,<sup>3</sup> die absolute Quantität der Zentripetalkraft,<sup>4</sup> die

---

<sup>1</sup> „Omnis enim philosophiae difficultas in eo versari videtur, ut a phaenomenis motuum investigemus vires naturae, deinde ab his viribus demonstremus phaenomena reliqua“ (1726, Auctoris Praefatio).

<sup>2</sup> „Definitio I. Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim“ (S. 1).

<sup>3</sup> „Definitio II. Quantitas motus est mensura ejusdem orta ex velocitate et quantitate materiae conjunctim“ (S. 1).

<sup>4</sup> „Definitio VI. Vis centripetae quantitas absoluta est mensura ejusdem major vel minor pro efficacia causae eam propagantis a centro per regiones in circuitu“ (S. 4).

beschleunigende Quantität der Zentripetalkraft<sup>5</sup> und die bewegende Quantität der Zentripetalkraft<sup>6</sup>. Die Zentripetalkraft, einer der drei definierten Begriffe,<sup>7</sup> sei, so Newton, ein besonderer Fall der eingedrückten Kraft.<sup>8</sup> Aus den Definitionen folgt also, daß es zwei Typen von Kräften gibt: die innewohnende und die eingedrückte Kraft.

Unter innewohnender Kraft wird eine der Materie eingepflanzte Kraft verstanden, welche Widerstand leiste und aufgrund deren jeder Körper für sich in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung verharre. Gemäß dem, was damals unter Trägheit der Materie verstanden wurde, sei es, so Newton, angemessen, diese einem Körper innewohnende Kraft als Trägheitskraft zu bezeichnen.<sup>9</sup>

Die eingedrückte Kraft sei dagegen eine Einwirkung auf einen Körper, so die Definition, die auf eine Veränderung der Zustände, die ein Körper für sich beibehalten würde, gerichtet sei. Newton erklärt hierzu, die eingedrückte Kraft bestehe im Körper nur während der Einwirkung und verbleibe anschließend nicht in ihm. Sobald die Einwirkung beendet sei, verharre der Körper dank der Trägheitskraft in dem neuen Zustand.<sup>10</sup>

Die Definitionen lassen also eine deutliche Unterscheidung erkennen: zwischen der Trägheitskraft, die einem Körper innewohnt, und allen anderen Kräften, die außerhalb desselben liegen; die erste wird als Widerstand

<sup>5</sup> „Definitio VII. Vis centripetae quantitas acceleratrix est ipsius mensura velocitati proportionalis, quam dato tempore generat“ (S. 4).

<sup>6</sup> „Definitio VIII. Vis centripetae quantitas motrix est ipsius mensura proportionalis motui, quem dato tempore generat“ (S. 5).

<sup>7</sup> „Definitio V. Vis centripeta est, qua corpora versus punctum aliquod, tanquam ad centrum, undique trahuntur, impelluntur, vel utcumque tendunt“ (S. 3).

<sup>8</sup> „Est autem vis impressa diversarum originum, ut ex ictu, ex pressione, ex vi centripetae“ (S. 2).

<sup>9</sup> „Definitio III. Materiae vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.

[...] Per inertiam materiae fit, ut corpus omne de statu suo vel quiescendi vel movendi difficulter deturbetur. Unde etiam vis insita nomine significantissimo vis Inertiae dici possit“ (S. 2).

<sup>10</sup> „Definitio IV. *Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.*

Consistit haec vis in actione sola, neque post actionem permanet in corpore. Perseverat enim corpus in statu omni novo per solam vim inertiae“ (S. 2).

leistende charakterisiert, die eingedrückte Kraft dagegen als Einwirkung auf einen Körper definiert. Mit diesen beiden Arten von Kräften hängen die Axiome zusammen.

Das 1. Axiom besagt, jeder Körper verharre in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung.<sup>11</sup> Die Beibehaltung dieser Zustände wird gemäß der III. Definition auf die innewohnende Kraft zurückgeführt. Da dem Axiom nach jeder Körper in einem jener Zustände verharrt und ein Axiom als ein wahrer Satz anzunehmen ist, folgt, daß Newton eine einem Körper innewohnende Kraft postuliert. Im 3. Buch liest man, daß unter innewohnender Kraft nur die Trägheitskraft verstanden wird.<sup>12</sup> In seiner Theorie wird also auf eine einzige innewohnende Kraft zurückgegriffen, welche dazu dient, die Ruhe und die gleichförmig-geradlinige Bewegung zu erklären.

Das 2. Axiom besagt, die Veränderung der Bewegung sei der eingedrückten bewegendenden Kraft proportional und geschehe nach der Geraden, in der jene Kraft eingedrückt werde. In der Erklärung, die der Formulierung des Bewegungsgesetzes beigefügt ist, wird angegeben, wie sich die Richtung der Kraft und der Bewegung des Körpers, falls er sich in Bewegung befindet, zusammensetzen; in bezug auf die Größe der Kraft wird gesagt, eine doppelte bzw. dreifache Kraft erzeuge eine doppelte bzw. dreifache Bewegung, unabhängig davon, ob die Einwirkung allmählich oder auf einmal stattfindet.<sup>13</sup> Durch dieses Gesetz wird also eine Verbindung zwischen eingedrückter Kraft und Bewegung hergestellt: Einer bestimmten Kraft entspricht eine bestimmte Bewegung.

Die eingedrückte Kraft ist eine Einwirkung, die aus einem Stoß, Druck, einer Zentrifugalkraft u.a. herrühren kann; diese Beispiele führt Newton

---

<sup>11</sup> „Lex I. *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare*“ (S. 13).

<sup>12</sup> „Per vim insitam intelligo solam vim inertiae“ (S. 389).

<sup>13</sup> „Lex II. *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.*

Si vis aliqua motum quemvis generet; dupla duplum, tripla triplum generabit, sive simul & semel, sive gradatim & successive impressa fuerit. Et hic motus (quoniam in eandem semper plagam cum vi generatrice determinatur) si corpus antea movebatur, motui ejus vel conspiranti additur, vel contrario subducitur, vel obliquo oblique adjicitur, & cum eo secundum utriusque determinationem componitur“ (S. 13).

an.<sup>14</sup> Es mag daher der Fall auftreten, daß ein Körper auf einen anderen einwirkt und sich daraus keine Beschleunigung ergibt, sondern sich beide Körper in Ruhe befinden, etwa wenn zwei Körper Druck aufeinander ausüben, die sich aber nicht bewegen. In einem solchen Fall kann die Erklärung weder durch das 1. Bewegungsgesetz gegeben werden, da, obgleich jeder der Körper ruht, ein äußerer Einfluß stattfindet, wofür das Gesetz nicht gilt, noch durch das 2., da keine Veränderung des mechanischen Zustandes geschieht, wie es voraussagt. Zur Erklärung solcher Fälle dient das 3. Axiom.

Das 3. Bewegungsgesetz besagt, Aktion und Reaktion seien immer gleich und entgegengesetzt zueinander oder äquivalent, die gegenseitigen Einwirkungen zweier Körper aufeinander seien gleich und wendeten sich jeweils in die Gegenrichtung.<sup>15</sup> Um das Gesetz durch die Erfahrung zu rechtfertigen, führt Newton u.a. das folgende Experiment an. Ein Magnet und ein Eisenstück werden in zwei runde Gefäße gestellt, die voneinander getrennt sind und im stehenden Wasser liegen, so daß sie schwimmen können. Sie ziehen sich gegenseitig an und erreichen eine Gleichgewichtslage, sie befinden sich dann in Ruhe.<sup>16</sup> In diesem Experiment läßt sich gemäß der Newtonschen Auffassung eine gegenseitige Aktion zwischen Magnet und Eisen feststellen, und zudem beobachtet man die Ruhe der beiden Körper. Legt man das 3. Gesetz zugrunde, ist ersichtlich, daß sich die Einwirkungen gegenseitig aufheben und infolgedessen die Körper ruhen.

Das folgende Experiment, ebenfalls Newtons Beispielen entnommen, betrifft eine andere Funktion des 3. Gesetzes. Es handelt sich um ein Pendelexperiment: Ein Körper A mit neun „Bewegungseinheiten“ falle auf einen ruhenden Körper B; der Körper A setze seine Bewegung mit zwei

---

<sup>14</sup> Siehe Anmerkung 8.

<sup>15</sup> „Lex III. *Actioni contrariam semper & aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales & in partes contrarias dirigi*“ (S. 14).

<sup>16</sup> „Tentavi hoc in magnete & ferro. Si haec in vasculis propriis sese contingentibus seorsim posita, in aqua stagnante juxta fluitent; neutrum propellet alterum, sed aequalitate attractionis utrinque sustinebunt conatus in se mutuos, ac tandem in aequilibrio constituta quiescent“ (S. 25).

Einheiten fort, und der Körper B springe mit sieben Einheiten zurück.<sup>17</sup> In diesem Experiment stellt man Folgendes fest: Der mechanische Zustand eines jeden der beiden Körper wird verändert, und zwar dergestalt, daß die von dem einen Körper abgegebenen Bewegungseinheiten von dem anderen erworben werden. Die Veränderung der Bewegung eines Körpers wird durch eine eingedrückte Kraft erklärt, also aufgrund des 2. Gesetzes; dieses rechtfertigt jedoch nicht die Äquivalenz zwischen „Verlust“ und „Gewinn“, hierfür dient das 3. Gesetz.

Da das 1. Axiom die einem Körper innewohnende Kraft betrifft und das 2. für die eingedrückte bzw. für die außerhalb des Körpers liegende Kraft formuliert wird, werden durch diese beiden Axiome die von der Theorie angenommen Typen von Kräften ausgeschöpft. Infolgedessen kann das 3. Gesetz keine neue Kraft ins Spiel bringen, es stellt statt dessen eine Beziehung zwischen den angenommenen Kräften dar: Die Äquivalenz der Reaktion, die natürlich von der Widerstand leistenden Kraft stammt, die gemäß der Definition eine dem Körper innewohnende Kraft ist, und der Aktion, durch die die eingedrückte Kraft definiert wird. Da in der Wechselwirkung die Bestimmung des einwirkenden Körpers und des Widerstand leistenden von dem Standpunkt abhängt, von dem aus die in Wechselwirkung stehenden Körper betrachtet werden, wird die Formulierung in der zweiten Hälfte des Gesetzes verständlich, gegenseitige Einwirkungen seien gleich und entgegengesetzt.

### *Schlußbemerkung*

Bei Newton gibt es zwei Typen von Kraft: die einem Körper innewohnende Kraft, *vis insita*, und die außerhalb des Körpers liegende Kraft, *vis impressa*. Vom ersten Typ wird nur eine einzige angenommen, die Trägheitskraft; die äußeren Kräfte können aus Stoß, Druck, Zentrifugalkraft u.a. herühren.

Durch die Trägheitskraft wird die Ruhe und die gleichförmigeradlinige Bewegung erklärt und durch die eingedrückte Kraft die beschleunigte Bewegung. Da die Bewegungen entweder gleichförmig-

---

<sup>17</sup> „Ut si corpus A incidebat in corpus B quiescens cum novem partibus motus, & amissis septem partibus pergebat post reflexionem cum duabus; corpus B resiliebat cum partibus istis septem“ (S. 23).

geradlinig oder beschleunigt sind, folgt, daß durch die zwei Arten von Kräften alle Bewegungen erklärt werden. Auf diese Weise wird die Beziehung Kraft-Bewegung spezifiziert, die die Theorie voraussetzt, wie schon aus der zu Beginn erwähnten Aufgabe der Philosophie hervorgeht.

## I. § 2 Eulers *Mechanik*

Die *Mechanica sive motus scientia analytice exposita*, 1736 veröffentlicht, wird wie eine mathematische Abhandlung dargestellt: Sie besteht aus Lehrsätzen, Beweisen, Korollarien, Erklärungen, Aufgaben etc. Gegenstand der Mechanik ist die Bewegung, worauf der Titel schon hinweist; sie bildet auch den Schwerpunkt in der Strukturierung des Werkes. Die zwei Teile, aus denen es besteht, beruhen auf der Unterscheidung zwischen freier und nicht-freier Bewegung, und die einzelnen Kapitel, aus denen die Teile bestehen, befassen sich mit den verschiedenen Arten der beiden Bewegungstypen. Ein Überblick über das Ganze läßt sich aus der vorausgesetzten mechanischen Konzeption gewinnen.

Euler geht davon aus, daß ein Körper für sich in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung verharrt (Kap. I). Eine Veränderung eines dieser Zustände wird auf eine Kraft zurückgeführt (Kap. II). Wenn Kraft und bewegter Körper dieselbe Richtung haben, betrifft die Veränderung nur dessen Geschwindigkeit, die Bewegung wird eine geradlinige (Kap. III und IV), wenn nicht, dann wird sie eine krummlinige (Kap. V und VI). Beide Veränderungen werden zuerst im Vakuum (*in vacuo*) und anschließend im widerstehenden Mittel untersucht, weshalb jeder zwei Kapitel gewidmet werden.

Im zweiten Teil wird ebenfalls zuerst die nicht-freie Bewegung im allgemeinen betrachtet, und zwar im 1. Kapitel, wo auch die Zerlegung der Kräfte behandelt wird. Das 2. und 3. Kapitel befassen sich mit der durch eine Linie konditionierten Bewegung im Vakuum bzw. im widerstehenden Mittel. Im letzten Kapitel wird die durch eine Oberfläche konditionierte Bewegung behandelt.

### ZUM KRAFTBEGRIFF

In der *Mechanik* treten zwei Arten von Kräften auf: die Potenz und die Trägheitskraft. Durch Potenz wird der Begriff *Potentia* wiedergegeben, und

durch Trägheitskraft *vis inertiae*. In der Definition von Potenz liest man, Potenz sei Kraft, wobei durch Kraft der Begriff *vis* wiedergegeben wird. Zur Trägheitskraft sagt Euler, sie sei keiner anderen Potenz gleichartig.<sup>18</sup> Deshalb und aufgrund der Beziehung von Potenz und Trägheit zum Begriff *vis* kann von zwei Arten von Kräften in der *Mechanik* die Rede sein. Die Stellung, welche jede in der Theorie einnimmt, ist jedoch sehr unterschiedlich, die Trägheitskraft ist darin nebensächlich.

Wenn der Leser auf die Definition der Trägheitskraft stößt (Bd. I., § 74), weiß er schon, daß ein Körper für sich in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung verharre, wenn er daran nicht durch eine äußere Ursache gehindert werde. Diese These folgt aus drei Lehrsätzen (Bd. I., §§ 56, 63, 65), in denen die Beibehaltung der Ruhe<sup>19</sup>, der Gleichförmigkeit<sup>20</sup> bzw. der Geradlinigkeit der Bewegung<sup>21</sup> ausgesprochen werden und deren Formulierungen Beweise folgen, wie dies für solche Sätze üblich ist. Indem aus diesen drei Sätzen folgt, ein Körper für sich allein verharre in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung, spielt die Trägheitskraft in der Theorie eine Nebenrolle, denn das, was bei Newton durch sie erklärt wird, ist bei Euler schon ohne sie nachgewiesen. Hingegen ist die Potenz ein Grundelement der Theorie.

Die Potenz wird aufgrund der eigenen Zustände eines Körpers definiert: „Potentia est vis corpus vel ex quiete in motum perducens vel motum eius alterans“ (Bd. I, § 99). Als Beispiel für eine Potenz wird die Schwere angeführt; sie sei eine Kraft der definierten Art, so Euler, denn nach der Entfernung der Hindernisse fange der Körper an zu sinken, und die Geschwindigkeit steige beim Fallen.<sup>22</sup> Diese Erklärung weist auf, daß die Schwere die in

---

<sup>18</sup> „Neque vero vis inertiae homogenea est cum ulla potentia“ (Bd. I, § 144).

<sup>19</sup> „Corpus absolute quiescens perpetuo in quiete perseverare debet, nisi a causa externa ad motum sollicitetur“ (Bd. I, § 56).

<sup>20</sup> „Corpus absolutum habens motum aequabiliter perpetuo movebitur, et eadem celeritate iam antea quovis tempore fuit motum, nisi causa externa in id agat aut egerit“ (Bd. I, § 63).

<sup>21</sup> „Corpus absoluto motu praeditum progredietur in linea recta, seu spatium, quod describit, erit linea recta“ (Bd. I, § 65).

<sup>22</sup> „Huiusmodi vis ideoque et potentia est gravitas; per eam enim corpora, remotis impedimentis, ex quiete deorsum delabuntur, motusque ipse descensus ab ea continuo acceleratur“ (Bd. I, § 99).

der Definition ausgedrückten Bedingungen erfüllt, um als Potenz betrachtet werden zu können. Das Korollarium zu dieser Definition macht dann die zwei Schritte der Eulerschen Systematisierung explizit:

1. ein sich selbst überlassener Punkt verharre entweder in Ruhe oder bewege sich gleichförmig und geradlinig fort;
2. immer wenn dies nicht stattfindet, sei die Ursache einer Potenz zuzuschreiben, denn das, was den Zustand eines Körpers zu stören vermöge, nenne er eine Potenz.<sup>23</sup>

Hieraus folgt, wie aus der Definition von Potenz, daß die Kraft, um zur Verwendung des heutigen des Begriffs überzugehen, als das konzipiert wird, was den eigenen bzw. den natürlichen Zustand eines Körpers verändert. In Übereinstimmung mit dieser Konzeption wird die Zerlegung der Kräfte durchgeführt.

Bei der Behandlung der mechanischen Aufgaben verfährt Euler in bezug auf die Zerlegung der Kräfte in ähnlicher Weise wie zuvor, d.h., es lassen sich auch hier die vorherigen zwei Schritte erkennen. Wenn es sich um eine Bewegung auf einer Ebene handelt, dann, so Euler, könnten alle Kräfte in Tangential- und Normalkraft zerlegt werden.<sup>24</sup> Die Tangentialkraft habe keine andere Wirkung, als den sich bewegenden Körper zu beschleunigen oder zu verlangsamen,<sup>25</sup> und die Normalkraft bewirke, daß der Körper eine Kurve zurücklege.<sup>26</sup> Die zwei Komponenten der Kraft haben also die Veränderung der Gleichförmigkeit bzw. der Geradlinigkeit der Bewegung zur Folge. Die Zerlegung der Kräfte wird also aufgrund der Eigenschaften der

---

<sup>23</sup> „Omne corpus sibi relictum vel in quiete perseverat vel motu aequabili in directum progreditur. Quoties igitur evenit, ut corpus liberum, quod quiescebat, moveri incipiat aut motum vel non aequabiliter vel non in directum progrediatur, causa est potentiae cuidam adscribenda: quicquid enim corpus de statu suo deturbare valet, potentiam appellamus“ (Bd. I, § 100).

<sup>24</sup> „Si corpus in eodem plano moveatur in eoque etiam positae sint potentiarum sollicitantium directiones, singulae potentiae resolvi possunt in binas, quarum altera sit normalis, altera tangentialis“ (Bd. I, § 550).

<sup>25</sup> „Vis igitur tangentialis in corpus, dum elementum  $Mm$  percurrit, alium effectum non exerit, nisi quod motum eius vel acceleret vel retardet“ (Bd. I, § 544).

<sup>26</sup> „In hoc vero eius effectus consistit [...] ut corporis tantum directionem immutet et efficiat, ut corpus, quod per se in recta esset progressurum, in linea curva promoveatur“ (Bd. I, § 549).

eigenen Bewegung des Körpers vorgenommen. Dieselbe Verfahrensweise läßt sich auf die nicht-freie Bewegung übertragen.<sup>27</sup>

Im allgemeinen Fall, d.h., wenn das, was die Bewegung konditioniert, eine Oberfläche ist, so Euler, könne immer eine Zerlegung in drei Kräfte vorgenommen werden:

- eine erste Kraft, deren Richtung zur Oberfläche normal sei, übe keine Wirkung auf die Bewegung des Körpers aus, sie betreffe nur den Druck gegen die Oberfläche;
- eine zweite Kraft, deren Richtung zur Oberfläche tangential sei und zur Richtung des bewegenden Körpers normal liege, verändere nicht die Geschwindigkeit, sondern nur dessen Richtung, d.h., sie lenke ihn von der kürzesten Linie ab, die er sonst zurücklegen würde;
- eine dritte Kraft, deren Richtung mit der des sich bewegenden Körpers zusammenfalle, verändere nur die Geschwindigkeit des Körpers.<sup>28</sup>

Die erste Kraft ist ein Charakteristikum der nicht-freien Bewegung, denn sie muß vorhanden sein, wenn die Bewegung keine freie ist. Die anderen Kräfte können hingegen bestehen oder nicht. Sind sie nicht vorhanden, führt der Körper eine Bewegung aus, die als die eigene Bewegung für einen nicht-freien Körper angesehen werden kann, denn Bahn und Geschwindigkeit werden dabei vorausgesetzt. Sind die erwähnte zweite und dritte Kraft

---

<sup>27</sup> Findet die Bewegung nicht auf einer Ebene, sondern im Raum statt, sind die Kräfte in drei Komponenten zu zerlegen, so Euler, von denen eine zur Richtung des Körpers tangential ist, während die beiden anderen normal sind. Er schreibt z.B.: „Ex capite praecedente satis intelligitur omnes potentias absolutas resolvi posse in duas vires, tangentialem et normalem, si quidem motus fit in eodem plano. At si corpus non in eodem movetur plano, tum tres vires aequivalentes assignari possunt loco quotcunque potentiarum sollicitantium, quarum una est tangentialis et duae normales“ (Bd. I, § 860).

<sup>28</sup> „Prima potentia M, cuius directio in superficiem est normalis, nullum habebit effectum in immutando corporis motu, sed tota impendetur in pressionem superficiei. [...] Secunda potentia N, quia eius directio in ipsa superficie est posita et normalis in directionem corporis, corporis directionem tantum immutabit celeritatem neque augendo neque minuendo. Haec vis igitur corpus a linea brevissima deducet facietque, ut non amplius in plano ad superficiem normali moveatur [...] Tertia potentia T, quia in directione corporis est posita, celeritatem tantum vel auget vel diminuit“ (Bd. II, § 79).

vorhanden, verursachen sie eine Veränderung der eigenen Richtung bzw. der eigenen Geschwindigkeit eines Körpers. Es läßt sich also folgern, daß die Kraft als Ursache der Störung der eigenen Bewegung eines nicht-freien Körpers erfaßt wird. Folglich besteht eine deutliche Parallele zwischen der Kraft im Rahmen der freien und der nicht-freien Bewegung, sie wird bei beiden als Ursache der Störung einer eigenen Bewegung aufgefaßt. Gehen wir zur Beziehung des Begriffes der Kraft zur Erfahrung über.

In einem Scholium zur zuvor zitierten Definition der Kraft wird die Frage nach der Ursache der Kräfte berührt, zu der sich Euler aber nicht äußert. Es reiche hin, sagt er, daß die Kräfte vorhanden seien, und dies sei durch deren Wirkungen evident.<sup>29</sup> Im zweiten Teil des Werkes taucht die Frage wieder auf, und zwar in einem Scholium zu demjenigen Satz, nach dem der sich bewegende Körper eine Kraft auf den konditionierenden Körper ausübt.<sup>30</sup> Wenn der sich bewegende Körper einen Druck ausübt, gebe es, so Euler, eine Kraft, die aus der Bewegung stamme. Dies bildet den Grund für die Frage, ob die Kraft aus der Bewegung herrührt oder, umgekehrt, die Bewegung aus der Kraft. Seine Argumentation läßt sich folgendermaßen darlegen: In der Natur finde man Kräfte und Bewegungen; während aber für sich bestehende Kräfte schwierig annehmbar seien, könnten die einmal bestehenden Bewegungen erhalten bleiben; aus den Bewegungen könnten Kräfte herrühren, wohingegen diese ohne jene schwierig vorstellbar seien; den Körpern ein innewohnendes Bestreben zuzuschreiben schein ihm kei-

---

<sup>29</sup> „Utrum huiusmodi potentiae ex ipsis corporibus originem suam habeant, an vero per se tales dentur in mundo, hic non definio. Sufficit enim hoc loco potentias in mundo revera existere, id quod vel sola vis gravitatis, qua omnia corpora terrestria deorsum delabi conantur, docet. Praeterea vero huiusmodi vires corpora sollicitantes conspiciuntur in motibus planetarum, qui nisi a quadam potentia essent affecti, uniformiter in lineis rectis progredi deberent. Similes etiam potentiae deprehenduntur in corporibus magneticis et electricis inesse, quae certa tantum corpora attrahunt“ (Bd. I, § 102).

<sup>30</sup> Es handelt sich um den „Propositio 2“ des 2. Bandes. Dessen 7. Korollarium, das dem erwähnten Scholium unmittelbar vorsteht, ist im vorliegenden Kontext angemessener, als den Satz selbst zu zitieren, und wird deshalb hierfür bevorzugt: „Ex motu ergo solo pressio oriri potest. Quamobrem, uti ex pressione seu a potentiis motus generatur, ita quoque ex motu pressio oriri potest“ (Bd. II, § 28).

neswegs vernunftgemäß. Aus diesen Gründen schließt Euler, daß alle Kräfte, die wir in der Welt wahrnehmen, aus Bewegungen hervorgehen.<sup>31</sup>

### *Schlußbemerkung*

Der Definition nach ist die Kraft das, was die eigene Bewegung des Körpers verändert. In Übereinstimmung hiermit wird die Zerlegung der Kräfte im Rahmen der freien Bewegung durchgeführt wie auch im Rahmen der nicht-freien Bewegung. Hierin gibt es zum einen die Kraft, die die freie Bewegung stört bzw. die nicht-freie Bewegung charakterisiert, und zum anderen diejenigen Kräfte, die die Bewegung stören, die der konditionierte Körper für sich ausführen würde. So wird sowohl in der freien als auch in der nicht-freien Bewegung eine eigene Bewegung des Körpers vorausgesetzt und die Kraft dabei als Ursache der Störungen derselben aufgefaßt.

Die Frage nach der Ursache der Kräfte wird bezeichnenderweise in zwei Scholien erwähnt bzw. gestellt, denn sie betrifft nicht die Theorie an sich, sondern vielmehr die Beziehung zwischen Theorie und Erfahrung. Diese Verbindung von Kraftbegriff und Erfahrung herzustellen, stellt für Euler eine Schwierigkeit dar.

### I. § 3 D'Alemberts *Abhandlung*

Der Kern des *Traité de Dynamique, dans lequel les loix de l'équilibre & du mouvement des Corps sont réduites au plus petit nombre possible, & démontrées d'une maniere nouvelle, & où l'on donne un Principe général pour trouver le Mouvement de plusieurs Corps qui agissent les uns sur les autres d'une maniere quelconque*, 1743 (<sup>2</sup>1758, <sup>3</sup>1796) veröffentlicht, liegt in einer neuen Methode für die Lösung der mechanischen Probleme. Auf

---

<sup>31</sup> „Videmus enim in mundo utrumque, potentias nempe et motum, existere; utrum igitur alterius sit causa, quaestio est tum ex ratione tum ex observationibus decidenda. Rationi quidem minime consentaneum videtur corporibus conatus insitos tribuere, multo minus potentias per se existentes statuere. Praeterea vero is phaenomenorum causas genuinas dedisse censendus est, qui omnia a motu orta demonstraverit. Motum enim semel existentem perpetuo conservari debere clare ostendimus supra (§ 63); hic vero, quemadmodum ex motu potentiae oriantur, exposuimus. Quemadmodum vero potentiae sine motu vel existere vel conservari queant, concipi non potest. Quamobrem concludimus omnes potentias, quae in mundo conspiciuntur, a motu provenire“ (Bd. II, § 29).