

## Newton, die Trägheitskraft und die absolute Bewegung.

### I

Das Newton-Bild der Wissenschaft ist in Bewegung geraten, seit in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts Newtons Nachlass unveröffentlichter Manuskripte gesichtet wurde. John Maynard Keynes, der das unternahm, brachte sein Ergebnis 1946 auf die Formel: Newton war nicht der Herold der Aufklärung. Er war vielmehr der letzte der Magier, der letzte der Babylonier und Sumerer, der letzte umfassende Geist, der die sichtbare und die geistige Welt mit denselben Augen betrachtete wie diejenigen, die vor etwas weniger als 10 000 Jahren den Grund unseres geistigen Erbes zu legen begannen<sup>1</sup>. Zwar wandert Newton noch immer als angeblicher Vater des mechanistischen Weltbildes durch die in Mode gekommenen populären Bücher, die sich die Kritik des Mechanizismus zur Aufgabe stellen<sup>2</sup>. Aber die ernsthafte Newton-Forschung zeichnet längst ein viel differenzierteres Bild. Besonders die Erforschung der umfangreichen alchemischen Schriften Newtons hat in den letzten Jahren dazu beigetragen, ganz neues Licht auf diesen Mann, auf sein Werk und auf seine Naturphilosophie zu werfen<sup>3</sup>. Die amerikanische Newton-Expertin Betty J. T. Dobbs sieht, ganz im Gegensatz zur mechanistischen Weltansicht, Newtons Universum als von aktiven Naturkräften belebt<sup>4</sup>, und sie ist überzeugt, dass Newton niemals daran dachte, ein totes, mechanistisches System der Welt vorzustellen, wie es im Lauf des 18. Jahrhunderts in sein Werk hineininterpretiert wurde<sup>5</sup>. Paolo Casini hat diesen historischen Vorgang eine "positivistic interpretation" genannt<sup>4</sup>. Vor diesem Hintergrund liegt die Frage nahe, ob und inwiefern diese positivistische Interpretation die mathematischen Grundlagen der Newtonschen Naturphilosophie verändert hat, die Newton erstmals 1687 in seinem Hauptwerk vorstellte, das unter dem Namen *Principia* bekannt ist<sup>7</sup>. Ich habe eine erste Antwort auf diese Frage mit einer Arbeit zu geben versucht, die 1985 in dieser Zeitschrift publiziert worden ist<sup>8</sup>. Jene Untersuchung soll hier im Hinblick auf das newtonische Konzept der Trägheitskraft vertieft werden.

### II

Es muss heute als gesichertes wissenschaftliches Erkenntnis gelten, dass zwischen dem, was wir die Newton'sche Mechanik nennen, und der wirklichen Bewegungslehre Newtons erhebliche begriffliche, mathematisch fassbare Unterschiede bestehen; darauf hat wohl E. J. Dijksterhuis als Erster aufmerksam gemacht<sup>9</sup>. 1956 schrieb Max Jammer<sup>10</sup>, dass Newtons Kraftbegriff

weniger unserer Formel "Kraft gleich Masse mal Beschleunigung", als vielmehr dem Konzept entspricht, das einem aus der Aufeinanderfolge gleichförmiger, endlicher Bewegungszuwächse entstehenden, eher diskontinuierlichen als stetigen Beschleunigungseffekt zuzuordnen ist. Brian D. Ellis meinte 1962, dass das zweite Newton'sche Bewegungsgesetz richtig durch die Formel "Kraftstoß  $I$  proportional zu Bewegungsänderung  $\Delta(mv)$ " wiederzugeben wäre<sup>11</sup>. 1966 fasste als Erster J. Bernard Cohen all diese Überlegungen in die Formel

$$\text{"Kraft"} = k \times \Delta(mv) \quad (1)$$

(d.h. die Kraft ist der endlichen Bewegungsänderung  $\Delta(mv)$  proportional;  $k$  ist der Proportionalitätsfaktor). Sie gibt eines von mehreren Kraftkonzepten wieder, welche Newton in den *Principia* verwendet<sup>12</sup>. Richard S. Westfall zeigte 1971<sup>13</sup> anhand des erst 1962 zum ersten Mal publizierten Manuskripts aus Newtons Nachlass, dem man den Titel "De gravitatione et aequipondio fluidorum" gegeben hat - inzwischen liegt eine schöne deutsche Übersetzung davon vor<sup>14</sup> -, dass Newton dort die Bewegungskraft dem *Impetus* gleichsetzt. Nun ist der Impetus traditionell jene Kraft, die die gleichförmig-geradlinige Bewegung aufrechterhält<sup>15</sup>, so dass er als Bewegungskraft durch die Beziehung

$$\text{"Kraft"} = k \times (mv) \quad (2)$$

gegeben ist. J. Mittelstrass identifiziert dieses Kraftmaß, das er die "vorneuzeitliche Bestimmung des Kraftbegriffs" nennt<sup>16</sup>, bei Galilei, und Westfall findet es noch in Newtons zeitlich unmittelbar vor den *Principia* entstandenen Manuskript "De motu"<sup>17</sup>.

Man sollte sich nach alledem nicht scheuen zu sehen, dass Newton *auch* in den *Principia*, *auch* unter Verwendung des Begriffs *Impetus*, eine solche Kraft vorstellt: er nennt sie "vis insita", die der Materie eingepflanzte Kraft, oder auch "vis inertiae", die Kraft der Trägheit, oder eben "Impetus"<sup>18</sup>. Daran, dass Newton diese (passive, innere, der Materie eingepflanzte) Kraft als *Ursache der gleichförmig-geradlinigen Bewegung* eines Körpers ansieht, ist kein Zweifel. Denn er sagt, dass eine bewegungsändernde (aktive, äußere, der Materie eingedrückte) Kraft (die "vis impressa") nur während der Einwirkung selbst auftritt und danach nicht in dem bewegten Körper verbleibt; vielmehr verharrt dieser in seinem dann angenommenen Bewegungszustand "allein durch die Kraft der Trägheit"<sup>19</sup>.

## III

Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmig-geradlinigen Bewegung, sofern er nicht durch eingedrückte Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird. Das ist das erste Newton'sche Axiom der Bewegung, das auch Trägheitsgesetz genannt wird<sup>20</sup>. In den Händen d'Alemberts, Lagranges und des Pierre Simon de Laplace, die W. Kuhn zu Recht für die positivistische Umdeutung der Lehre Newtons verantwortlich gemacht hat<sup>21</sup>, wurde aus der offenbar transzendenten, weil der unmittelbaren sinnlichen Erfahrung nicht zugänglichen newtonischen Trägheitskraft die bloße *Trägheit als Materie-eigenschaft*<sup>22</sup>, das Grundaxiom der analytischen Mechanik. Auch Euler und Kant haben das ihre zu dieser Entwicklung beigetragen<sup>23</sup>, die jenes allgemeine Bestreben der nach-Newton'schen positivistischen Mechanik mit zum Ausdruck bringt, das darauf abzielte, Newtons Kräfte der Natur (als vermeintliche Relikte animistischer Naturauffassung) aus der exakten Wissenschaft zu entfernen, wie Max Jammer gesagt hat<sup>24</sup>.

In formalmathematischer Hinsicht kommt diese Veränderung der Grundlage der Bewegungslehre dadurch zum Ausdruck, dass die Gleichung (2) auf den Impulssatz reduziert wird. Es wird also nicht mehr eine Kraft beschrieben, die zur Bewegungsgröße *mv proportional ist*, sondern zur Beschreibung der gleichförmig-geradlinigen Bewegung genügt nun der Ansatz

$$p = mv \quad (3)$$

für den Impuls  $p$ . Zuweilen findet man dafür in Lehrbüchern wohl auch den Begriff *Kraftstoß*, der als Zeitintegral aus dem analytischen Kraftbegriff  $F = d(mv)/dt$  hervorgehen soll. Jedoch ändert der andere Name nichts an der Sache; und so definiert das Lexikon der Physik unter *Kraftstoß* richtig: "s.v. Impuls". Dass damit die gleichförmig-geradlinige Bewegung zu einem "kausalen Paradoxon" wurde, was C. F. v. Weizsäcker bemerkt hat<sup>25</sup>, nahm man in Kauf. Und so ist heute gerade das Trägheitsprinzip das signifikanteste Beispiel für die substantielle, den mathematischen Formalismus der Mechanik betreffende Veränderung, die Newtons Lehre im 18. Jahrhundert erfuhr.

## IV

Ist "Trägheit" - nämlich die Fähigkeit materieller Körper, bei Abwesenheit äußerer, bewegungsändernder Kräfte ihren jeweiligen Bewegungszustand unverändert beizubehalten - tatsächlich eine *Eigenschaft* der Materie, oder hatte Newton Recht, der darin das Wirken einer (passiven, inneren, der Materie eingepflanzten) Kraft von eigenem ontologischem Status sah? Die Physik gibt sich gern den Anschein, als seien Fragen wie diese im Lauf ihrer Entwicklung empirisch, d.h. aufgrund experimenteller Erfahrung entschieden worden. Unser Beispiel zeigt, dass dieser Anschein zuweilen trügt. Die Reduzierung der Newton'schen Trägheitskraft auf eine bloße Materieeigenschaft war nichts anderes, als die Frucht einer Ideologie: ein Resultat der im 18. Jahrhundert gefallenen *philosophischen Entscheidung*, transzendente, der unmittelbaren sinnlichen Erfahrung nicht zugängliche *Ursachen* oder "Kräfte" aus der rationalen Mechanik zu entfernen oder *zu verbannen*, wie es d'Alembert so treffend formuliert hat<sup>26</sup>. Die Newton'schen Naturkräfte waren keineswegs etwa experimentell widerlegt, sondern sie waren *nicht mehr erwünscht* und wurden allein aus diesem Grund aus der reinen Lehre eliminiert. Die Ideologie, die dahinter steckte, ist oben schon mehrfach als positivistisch bezeichnet worden. Jedoch trifft auf sie das Etikett *materialistisch* ebenso zu, wenn man unter Materialismus jene Philosophie versteht, die die Realität immaterieller Substanzen (wie eben der Newton'schen Kräfte) leugnet. Nicht weniger aufschlussreich und zutreffend ist aber das Beiwort *relativistisch*, wie im Folgenden gezeigt wird.

## V

Newton hatte eine Bewegungslehre vorgestellt, der der Begriff der *absoluten*, d.h. der *wirklichen* Bewegung in Raum und Zeit zugrunde lag. In den *Principia* hatte er nach seiner eigenen Überzeugung nachgewiesen, "wie man die wahren Bewegungen aus ihren Ursachen, ihren Wirkungen und ihren scheinbaren Unterschieden ... ermitteln kann ... Denn zu diesem Zweck" , so fährt er fort, "habe ich die folgende Abhandlung verfasst"<sup>27</sup>. Ganz im Gegensatz hierzu beruht die analytische Mechanik unbestritten auf dem *Relativitätsprinzip* der Bewegung, d.h. auf der Annahme, dass die Bewegung eines Körpers immer nur *relativ zu anderen Körpern* festgestellt werden könne; von absoluter Bewegung, d.h. von einer Bewegung "an sich" oder autonom in Raum und Zeit, unabhängig von der Lage und/oder Existenz von "Bezugskörpern" könne nicht gesprochen werden, konstatieren Konversationslexika apodiktisch.<sup>28</sup> Die Urheber dieser Behauptung waren in neuerer Zeit Christiaan Huygens und

G.W. Leibniz<sup>29</sup>; der Letztere hat diesen seinen relativistischen Standpunkt in der Korrespondenz von 1715/1716 mit dem Newtonianer Samuel Clarke begründet und verteidigt<sup>30</sup>, der entschieden für die absolute Bewegung eintrat. Von einem Relativitätsprinzip der Newton'schen Bewegungslehre, das manche im Corollar V zu den Bewegungsaxiomen in Newtons *Principia* sehen wollen<sup>31</sup>, war dabei keine Rede; vielmehr benützte Clarke gerade das von Newton im Corollar V behandelte Beispiel der "Bewegung auf einem Schiff, ob dieses nun still steht oder ob es sich gleichförmig geradeaus bewegt"<sup>32</sup> zum Beweis der allen auf dem Schiff befindlichen Gegenständen ebenso wie dem Schiff selbst gleichsinnig eingepflanzten Kraft, durch die bei einer Bewegungsänderung des Schiffes etwa ein Passagier in der Kajüte gegen die Kajütenwand geschleudert wird<sup>33</sup>, woran die absolute Eigenbewegung des Passagiers erkennbar wird. Ganz ebenso argumentiert schon Galilei in seinem Dialogo von 1632, wo er an mehreren Beispielen zeigt, dass "die Bewegung ohne Einfluss auf das gegenseitige Verhalten solcher Dinge ist, denen sie gemeinsam zukommt"<sup>34</sup>. In der Tat geht es bei diesen Beweisführungen um den Nachweis, dass gerade die sinnlich nicht wahrnehmbare gemeinsame Bewegung des Schiffes und der darauf befindlichen Dinge dafür sorgt, dass z.B. der von der Mastspitze nach unten fallende Stein am Fuß des Mastes auftrifft und nicht etwa um eine Strecke zum Heck hin verschoben, die der Vorwärtsbewegung des Schiffes während des Falls des Steines entspräche. Diese sinnlich nicht wahrnehmbare gemeinsame Bewegung von Schiff und Stein ist aber die gemeinsame *Absolutbewegung*. Es kann deshalb keine Rede davon sein, dass - wie Z. B. Kanitscheider behauptet - "nach Galilei Translationen keinen absoluten Sinn" besäßen, und Galilei "eine Relativität der Geschwindigkeit" gelehrt habe<sup>35</sup>. Wer sagt, es gebe so etwas wie "Newtons Galileisches Prinzip der Relativität"<sup>36</sup> tut Newton wie Galilei gleichermaßen Unrecht, vermutlich deshalb, weil er dem Irrtum erliegt, dass jene Methode der Koordinatentransformation in der relativistischen Bewegungslehre, für die Philipp Frank 1909 den Namen "Galilei-Transformation" geprägt hat<sup>37</sup>, tatsächlich mit Galilei zu tun habe. Indessen brauchte man sich nur daran zu erinnern, dass Galilei für die Lehre von der wirklichen Bewegung der Erde vor der Inquisition gestanden hat, um einen solchen Fehler zu vermeiden.

Richtig bleibt trotz alledem, dass nicht etwa erst Albert Einstein eine Relativitätstheorie der Bewegung formuliert hat, sondern dass bereits die klassische analytische Mechanik auf dem Relativitätsprinzip der Bewegung beruht; Einsteins Leistung bestand, wie er selbst gesagt hat, nur darin, dieses Prinzip mit dem empirischen Befund der konstanten Lichtgeschwindigkeit zu verknüpfen<sup>38</sup>.

Ist also die analytische Mechanik eine relativistische Bewegungslehre, während Galilei und Newton die absolute Bewegung gelehrt haben, so darf wiederum gefolgert werden, dass die analytische Mechanik keineswegs identisch ist mit der galilei-newtonischen Bewegungslehre. Der Unterschied wird in dem Konzept der Trägheitskraft oder es *Impetus* (wie Galilei und Newton sie übereinstimmend nennen) im Vergleich zum Trägheitsprinzip der analytischen Mechanik manifest. Betrachtet man nämlich die Trägheitsbewegung als kräftefrei, so lässt sich in der Tat die Behauptung aufstellen, dass diese Bewegung ohne Veränderung des Bewegungsgesetzes in jedes beliebige, gegenüber dem ursprünglichen raumzeitlichen Koordinatensystem gleichförmig-geradlinig bewegte andere Bezugssystem transformiert werden kann; und auf dieser ganz irreführend so genannten "Galilei-Transformation" beruht ja die relativistische Bewegungslehre<sup>39</sup>. Erkennt man aber mit Galilei und Newton den der gleichförmig-geradlinigen Bewegung innewohnenden *Impetus* an, den die Erfahrung beweist (er schleudert den Passagier bei der Bewegungsänderung des Schiffes in Richtung seiner Absolutbewegung gegen die Kajütenwand), so kennzeichnet eben dieser *Impetus* die absolute Bewegung, und er zeichnet zugleich dasjenige raumzeitliche Koordinatensystem, in dem die Bewegung entsprechend dem *Impetus* und in seiner Richtung geradlinig-gleichförmig stattfindet, als bevorrechtigtes Bezugssystem aus, als das wahre Bezugssystem der wirklichen Inertialbewegung. Es liegt auf der Hand, dass dieses raumzeitliche Bezugssystem der absoluten Bewegung nichts anderes sein kann, als die im absoluten (d.h. wirklichen) Raum und in der absoluten (d.h. wirklichen) Zeit erschaffene wirkliche Welt, in der wir leben. Natürlich ist Newtons bekannte Lehre vom absoluten Raum und von der absoluten Zeit<sup>40</sup> keine willkürliche Zutat zu seiner Bewegungslehre, sondern sie ist eine unerlässliche Bedingung und ein notwendiger Bestandteil der Lehre von der absoluten Bewegung, um die es Newton erklärtermaßen ging<sup>41</sup>.

## VI

Schon Immanuel Kant hat zu Recht betont, dass ein vollständiges Bewegungsgesetz das Koordinatensystem mit angeben muss, in dem es gelten soll, weil Bewegung immer nur in Bezug auf ein solches raumzeitliches System definiert werden kann<sup>42</sup>. Ist dieses System mit Newton der absolute, unveränderliche, wirkliche Raum und die absolute, unveränderliche, wirkliche Zeit, so müssen dieser Raum und diese Zeit sich irgendwie im Gesetz der gleichförmig-geradlinigen Bewegung formal geltend machen, als konstante Rahmenbedingungen dieser Bewegung. Der relativistische Impulssatz der Gleichung (3) enthält keine solche Kon-

stante; anders das Maß der "Kraft" oder des *Impetus*, das oben in Gleichung (2) vorgestellt wurde. Dieses Bewegungsgesetz enthält eine Konstante  $k$ , die aus der Proportionalität zwischen Bewegungskraft (Impetus) und Bewegung hervorgeht; ich habe sie andernorts die *Newtonische Konstante* genannt<sup>43</sup> und mit dem Buchstaben  $c$  bezeichnet. Die Formel

$$\text{"Kraft"} = (mv) \times c \quad (4)$$

erscheint als aussichtsreicher Kandidat zur Beschreibung des wirklichen Newton'schen Gesetzes der absoluten oder realen gleichförmig-geradlinigen Bewegung im realen raumzeitlichen Bezugssystem. Die Vermutung wird zur Gewissheit, nachdem gezeigt werden konnte, dass die Konstante  $c$  die geometrische Dimension "Raum durch Zeit" oder  $[L/T]$  aufweist<sup>44</sup>. Sie ist also ein Quotient aus konstanten Elementen des Raumes (gekennzeichnet durch eine elementare Länge  $L$ ) und der Zeit (gekennzeichnet durch eine elementare Zeit  $T$ ) und erweist sich damit als jener *Parameter der Newton'schen Raumzeit*, der ihre Metrik bestimmt und als "außerlogische Konstante" im Sinne Max Jammers<sup>45</sup> den mathematischen Impulssatz zum vollständigen kausalen Bewegungsgesetz ergänzt. Das so bestimmte formale Gesetz der Trägheitskraft oder des Impetus erweist sich zugleich als das newtonische *Gesetz der absoluten Bewegung*.

Eine Naturkonstante der geometrischen Dimension  $[L/T]$  bestimmt seit der Zeit von Faraday und Maxwell die moderne Physik, wo sie heute als Vakuumlichtgeschwindigkeit bezeichnet wird. Besteht zwischen dieser Konstante und der oben genannten *Newtonischen Konstante* aufgrund der formalen Übereinstimmung der Dimension  $[L/T]$  eine Verbindung?

"The view that a formal identity between mathematical relations betrays the identity of the physical entities involved ... harmonizes with the spirit of modern physics ... Physical entities which satisfy identical formalisms have to be regarded as identical themselves, a result in which the mathematization of physics, started by the Greeks (Plato), has reached its logical conclusion",

sagt Max Jammer<sup>46</sup>. Wenn er Recht hat, wird man die Newtonische Konstante mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit identifizieren dürfen. Es ist klar, dass daraus weitreichende Konsequenzen für die Vereinheitlichung der theoretischen Physik resultieren könnten, auf die ich schon andernorts aufmerksam gemacht habe<sup>47</sup>.

Die analytische Schulmechanik hat sich um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert als unzulänglich erwiesen. Der Wert der wahren galilei-newtonischen Bewegungslehre wird erst noch zu erforschen sein.

#### Anmerkungen

- 1) John Maynard Keynes, Newton, the Man, in: The Royal Society Newton Tercentenary Celebrations, 15-19 July 1946, Cambridge University Press 1949, p. 27.
- 2) Z.B. Karolyn Merchant, Der Tod der Natur, München: C.H. Beck 1987, S. 263 ff.
- 3) Betty J.T. Dobbs, The Foundations of Newton's Alchemy, Cambridge: University Press 1975; Karin Figala, Newton as Alchemist, Hist. Sci. XV (1977), p. 102-137.
- 4) Betty J.T. Dobbs, op. cit. p. 210, p. 212.
- 5) Betty J.T. Dobbs, private Mitteilung.
- 6) Paolo Casini, Newton's *Principia* and the Philosophers of the Enlightenment, in: Newton's *Principia* and its Legacy, Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting, Held on 30 June 1987, London, The royal Society, p. 48.
- 7) Isaac Newton, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, London 1687, Deutsch: Isaac Newton, Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie, hrsgg. v. Ed Dellian, Hamburg: Felix Meiner Verl. 1988. Die Fundstellen, die im Nachfolgenden für Zitate aus den *Principia* angegeben werden, beziehen sich auf diese Meinersche Ausgabe.
- 8) Ed Dellian, Die Newtonische Konstante, Philos. Nat. 22 Nr. 3 (1985), S. 400 ff.
- 9) E. J. Dijksterhuis, De mechanisering van het wereldbeeld, Amsterdam: J.M. Meulenhoff, 1950, Deutsch: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin usw.: Springer verlag 1983, S. 521 ff.

- 10) Max Jammer, *Concepts of Force*, Cambridge/Mass.: Harvard University Press 1957, p. 131/1.
- 11) Brian D. Ellis, *Newton's Concept of Motive Force*, *Journ. Hist. Ideas* 23 (1962) p. 273.
- 12) I. Bernard Cohen, *Newton's Second Law and the Concept of Force in the Principia*, in: *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton 1666-1666*, by Robert Palter (ed.), Cambridge/Mass., The M.I.T. Press, 1970 p. 144/5.
- 13) Richard S. Westfall, *Force in Newton's Physics*, London: Macdonald 1971, p. 363.
- 14) Isaac Newton, *Über die Gravitation . . . .*, hrsg. V. Gernot Böhme, Frankfurt a. M.: V. Klostermann 1988.
- 15) E. J. Dijksterhuis op. cit. S. 523.
- 16) Jürgen Mittelstrass, *Neuzeit und Aufklärung* Berlin: W. de Gruyter Verl. 1970, S.285.
- 17) Richard S. Westfall, op. cit. p. 413,
- 18) *Principia*, Definition III (Meinersche Ausgabe S. 38).
- 19) *Principia*, Definition IV mit Erläuterung (Meinersche Ausgabe S. 38/39).
- 20) *Principia*, Gesetz I (Meinersche Ausgabe S. 53).
- 21) W. Kuhn, *Eine Newton-Nachlese*, *Phys. Bl.* 43 (1987) Nr. 4, S. 97; ebenso Gernot Böhme, op.cit. S. 8.
- 22) *Lexikon der Physik*, München, dtv 1970, unter "Trägheit".
- 23) Peter M. Harman, *Concepts of Inertia: Newton to Kant*, in: *Religion, Science and World-view*, Margaret J. Osler and Paul Lawrence Farber (eds.), Cambridge University Press 1985 p. 119-133.

- 24) Max Jammer, in Ritters Histor. Wörterbuch der Philosophie, Basel/Stuttgart 1971, unter "Kraft".
- 25) C. F. von Weizsäcker, Aufbau der Physik, München: Hanser 1985, S. 234, 243.
- 26) Jean d'Alembert, *Traité de Physique*, 2. Aufl. Paris 1758, S.. XII.
- 27) *Principia*, Scholium nach Definition VIII (Meinersche Ausgabe S. 52).
- 28) Brockhaus Enzyklopädie 1971 unter "Bewegung".
- 29) W. Kuhn aaO. S. 97.
- 30) H.G. Alexander, *The Leibniz-Clarke Correspondence*, Manchester: The University Press 1956; siehe auch Samuel Clarke, *Der Briefwechsel mit Leibniz von 1715/1716*, hrsgg. v. Ed Dellian, Hamburg: Felix Meiner Verlag, 1990.
- 31) Ernst Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Frankfurt a.M.: Minerva, 1982 S. 227, 23e1.
- 32) *Principia*, Corollar V (Meinersche Ausgabe S. 63).
- 33) H.G. Alexander op. cit. p. 48.
- 34) Galileo Galilei, *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme*, hrsgg. v. Roman Sexl und Karl von Meyenn, Stuttgart: B. Teubner 1982, S. 180.
- 35) Bernulf Kanitscheider, *Das Weltbild Albert Einsteins*, München: C.H. Beck 1988 S.140.
- 36) B. Kanitscheider, op.cit. S. 26.
- 37) Philipp Frank, *Die Stellung des Relativitätsprinzips im System der Mechanik und der Elektrodynamik*, Sitz.Ber..Akad.Wiss. Wien IIa (1909), S. 373, 382.

- 38) Albert Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, Ann. d. Phys. 49 (1916) S. 769, 770.
- 39) Philipp Frank aaO. S. 382.
- 40) *Principia* Scholium nach Def. VIII (Meinersche Ausgabe S. 43-52).
- 41) *Principia* Scholium nach Def. VIII (Meinersche Ausgabe S. 52).
- 42) Immanuel Kant, Neuer Lehrbegriff der Bewegung und Ruhe, 1758.
- 43) Vgl. Anm. 8.
- 44) Vgl. Anm. 8 und Anm. 47.
- 45) Max Jammer, Zu den philosophischen Konsequenzen der neuen Physik, in: G. Radnitzky und G. Anderson (Hrsg.), Voraussetzungen und Grenzen der Wissenschaft, Tübingen: J. C.B. Mohr (Paul Siebeck) 1981 S. 136.
- 46) Max Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, New York usw.: John Wiley & Sons, 1974 p. 54.
- 47) Ed Dellian, Inertia, the Innate Force of Matter ... in: P.B. Scheurer & G. Debrock (eds.). Newton's Scientific and Philosophical Legacy, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988 p. 227-237; siehe auch *Principia* (Meinersche Ausgabe), Einleitung des Herausgebers.
-