

Die Relativität des Raumes und der Zeit. Stürzte Einstein das Newtonsche Weltbild?

Renate WAHSNER

Recibido: 1 de marzo de 2005
Aceptado: 10 de mayo de 2005

Abstrakt

Die weit verbreitete Auffassung, Einstein habe das Newtonsche Weltbild gestürzt, gründet in der unberechtigten Gleichsetzung der von Newton begründeten physikalischen Theorie *Mechanik* mit der philosophischen Rezeption dieser Naturwissenschaft im mechanistischen Weltbild. Die Newtonsche Mechanik bildet jedoch die Basis der modernen Physik. Die Entwicklung von der Newtonschen zur Einsteinschen Raum-Zeit-Theorie reduzierte den quasi-apriorischen Anteil der Physik und ließ die Funktion des physikalischen Raumes erkennen, den Kantschen Raum-Apriorismus im Zusammenhang damit in einem neuen Licht erscheinen.

Keywords: Raum, Zeit, Relativitätsprinzipien, Physik - Geometrie, Kantscher Apriorismus, Naturwissenschaft - Philosophie.

Abstract

The widespread perception, according to which Einstein brought down the Newtonian worldview, is based on the inadmissible identification of physical theory *Mechanics* founded by Newton with the philosophical interpretation of this science by the mechanistic worldview. However, Newtonian mechanics is the basis of modern physics. The evolution from Newtonian to Einsteinian space-time theory reduced the quasi-apriori part of physics and exhibited the function of physical space. As a result of this, Kantian space apriorism appears in a new light.

Keywords: Space, Time, Relativity Principles, Physics - Geometry, Kantian Apriorisms, Science - Philosophy.

Es gilt weithin als ausgemacht, daß Einstein das Newtonsche Weltbild gestürzt resp. daß die Einsteinsche Theorie die Newtonsche widerlegt habe. Beispielshalber liest man in einem von einem Philosophen verfaßten Buch: "So sagt zum Beispiel die relativistische Raum- und Zeit-Auffassung etwas über das ('objektive') Widerspiegelungsverhältnis der in einer Lage zueinander befindlichen Systeme aus, die Newtonsche Auffassung, obwohl (oder vielmehr *weil*) sie ein An-sich-sein von Raum und Zeit annimmt, hingegen stellt eine ('subjektive') Erkenntnisbeziehung dar, sie ist Korrelat eines Mess-Systems. Kant hat das, meine ich, richtig gesehen, wenn er die Absolutheit von Raum und Zeit von Newton (als 'Sensorium Gottes') in die Apriorität von Raum und Zeit als transzendente Anschauungsformen verwandelte. Kants *erkenntnistheoretischer* Idealismus erweist sich auf dem wissenschaftsgeschichtlichen Stand der Naturerkenntnis (also historisch relativ) als *wissenschaftstheoretischer* Realismus - denn er zerstört Newtons quasi-theologische Illusion vom metaphysischen Charakter der Absolutheit von Raum und Zeit und reduziert diese Absolutheit kritisch auf einen transzendentalen Charakter, also auf die (nun allerdings selbst wieder absolut gesetzte) Position des anschauenden, beobachtenden Subjekts."¹ Dieses Zitat wurde ausgewählt (zahlreiche vergleichbare wären möglich), weil es alle das Verhältnis des Raum-Zeit-Verständnisses von Newton und Einstein betreffende Mißverständnisse in sich vereint - wobei man zumeist gegenüber Kant weniger Milde walten läßt.

Nun steht fest: Die einstige Hoffnung, alles durch die klassische Mechanik erklären zu können, hat sich nicht erfüllt, und niemand glaubt heute noch an eine Lösung aller physikalischen Probleme auf dieser Grundlage. Und trotzdem - so Einstein - ist das Denken unserer modernen Physiker in hohem Maße durch Newtons fundamentale Begriffe bedingt. Es gelang bisher noch nicht wieder, die Newtonsche einheitliche Vorstellung vom Universum durch eine ebenso einheitliche verständliche Konzeption zu ersetzen. Aber was wir soweit gewonnen haben, wäre unmöglich gewesen ohne Newtons klares System².

Diese Einsteinschen Worte - gesprochen anläßlich des 300. Geburtstages von Newton - widersprechen deutlich der eingangs zitiertem Sicht sowie der verbreiteten Mystifizierung der Relativitätstheorie, derzufolge ihr Begründer die Wiederkehr vergangener Ereignisse, die Möglichkeit, durch schnelles Reisen jung zu bleiben, überhaupt die Relativität von allem bewiesen hätte, daß er also Selbstverständlichkeiten einer rationalen Weltsicht ins Wanken gebracht und damit das überkommene Weltbild gestürzt habe.

¹ H.H. Holz, *Dialektik und Widerspiegelung*, Köln 1983, S. 103. In einer Fußnote zu dieser Passage verweist der Autor in partiell unzutreffender Rezeption auf: H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, *Die Notwendigkeit der Philosophie für die Naturwissenschaft*, in: *Dialektik 1*, Köln 1980, S. 65 ff.; R. Wahsner, *Das Aktive und das Passive. Zur erkenntnistheoretischen Begründung der Physik durch den Atomismus - dargestellt an Newton und Kant*, Berlin 1981, S. 63, 130 ff.

² Vgl. A. Einstein, *Isaac Newton*, in: *Aus meinen späten Jahren*, Berlin 1990, S. 212 f.

1. Die Prinzipien der Relativitätstheorie oder Die Relativitätsprinzipien

Was Einsteins Werk wirklich enthält, ist oftmals dargelegt worden und sei hier - soweit es die Relativitätstheorie betrifft - kurz zusammengefaßt:

Eine der berühmten drei Arbeiten, die im Jahre 1905 in den *Annalen der Physik* erschienen, die Arbeit "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", enthielt die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie.³ Diese Theorie beseitigte den Dualismus, der seit der Begründung der Elektrodynamik in den Grundlagen der Physik bestanden hatte. Mit ihr gelang es, klassische Mechanik und Elektrodynamik zu vereinen, und zwar durch Abänderung der Lehre von der physikalischen Raum-Zeit-Struktur.

Zunächst hatte man versucht, die Maxwellsche Theorie der Elektrodynamik auf die Gesetze der Newtonschen Mechanik zurückzuführen und damit auf der Basis mechanischer (nicht mechanizistischer) Vorstellungen zu einer einheitlichen physikalischen Theorie zu gelangen. (Da man die Thermodynamik hatte mechanisch interpretieren können, wurde die Hoffnung gefördert, daß dies gelingen könnte.) Doch das erwies sich als nicht möglich. Die angestrebte Synthese gelang erst durch die Abänderung der Mechanik, eben durch die Abänderung der physikalischen Raum-Zeit-Struktur.

Ohne diese Änderung wäre es nicht möglich gewesen, zwei empirisch stark gestützte Prinzipien der bisherigen Physik miteinander zu vereinbaren. Das eine Prinzip stammt aus der Newtonschen Mechanik und besagt: Jedes mechanische Naturgesetz, das in bezug auf ein Bezugssystem K gilt, muß auch unverändert gelten in bezug auf ein Bezugssystem K' , das sich relativ zu K geradlinig und gleichförmig bewegt (*Galileisches Relativitätsprinzip*). Das zweite ergab sich aus der Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik und postuliert die Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, d.h. die Unabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Geschwindigkeit seiner Quelle. Die angestrebte Synthese erforderte, das Galileische Relativitätsprinzip so zu verallgemeinern, daß es für *jedes* Naturgesetz gilt, daß also auch für die elektromagnetischen Gesetze gelten sollte, was bisher nur für die mechanischen gefordert wurde. Dies war - wie sich herausstellte - nicht ohne weiteres möglich, sondern eben erst, als Einstein sich entschloß, die mechanischen Grundbegriffe *Raum* und *Zeit* neu zu bestimmen.⁴

³ Allein im Jahre 1905 erschienen in den *Annalen der Physik* drei Artikel Einsteins, und jeder von ihnen hatte für die Entwicklung der Wissenschaft Bedeutung. Im ersten Beitrag stellte Einstein eine neue Lichttheorie auf, die grundsätzlich neue Gesichtspunkte in die Diskussion des Strahlungsproblems brachte und zusammen mit Plancks Arbeiten zum Ausgangspunkt der Quantenmechanik wurde. Hierfür erhielt Einstein 1921 den Nobelpreis. Der zweite Artikel behandelte die Brownsche Bewegung. Die dritte und bekannteste Abhandlung enthält die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie.

⁴ Vgl. z.B. A. Einstein, Was ist Relativitätstheorie?, in: Mein Weltbild, Frankfurt a.M.-Berlin 1989, S. 129.

Das heißt: Einstein besann sich darauf, daß diese Begriffe von uns selbst gemacht sind und für jede neue Theorie erneut überprüft werden müssen - ebenso wie Newton das für die seine getan hatte.⁵

Aus der für die Synthese von Mechanik und Elektrodynamik notwendigen Neudefinition ergab sich die sog. Raum-Zeit-Union, ergab sich, daß die Aussage, zwei Ereignisse seien gleichzeitig, nur bezogen auf ein bestimmtes Bezugssystem physikalische Bedeutung haben kann, daß die Ganggeschwindigkeit von Uhren, die Länge von Maßstäben, die Masse der Körper von ihrem Bewegungszustand bezogen auf ein Bezugssystem abhängen müssen. Die auffallendste Veränderung war ein neues Bewegungsgesetz für sehr schnell sich bewegende Massenpunkte. Im Zusammenhang damit verlor der Satz von der Erhaltung der Masse seine Selbständigkeit und verschmolz mit dem Satz von der Erhaltung der Energie. Als Formel $E = mc^2$ ist diese Konsequenz der Speziellen Relativitätstheorie allgemein bekannt.

Der Übergang vom Galileischen zum *speziellen Relativitätsprinzip* provozierte den Wunsch nach einer noch stärkeren Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips. Warum sollte die Unabhängigkeit physikalischer Gesetze vom Bewegungszustand des Bezugssystems nicht für *beliebig* zueinander bewegte Systeme zu fordern sein, sondern nur für geradlinig gleichförmig bewegte? Eine derartige Erweiterung wurde zudem nahegelegt durch die experimentell (für kleine makroskopische Körper) bestätigte Äquivalenz von träger und schwerer Masse. Wollte man diese Erfahrung zu einem Prinzip verschärfen und beide Prinzipien für gültig erklären (also das Äquivalenzprinzip und das angestrebte allgemeine Relativitätsprinzip), so hätten im Falle eines relativ zu einem Inertialsystem beschleunigten Bezugssystems die dabei auftretenden Trägheitskräfte auch als Gravitationskräfte und das beschleunigte Bezugssystem als ruhend angesehen werden müssen, denn beide Kräfte sind der Masse der Körper proportional. Die Gravitationstheorie der Newtonschen Mechanik ließ jedoch eine solche Identifizierung nicht zu. Die angestrebte

⁵ Um darauf hinzuweisen, merkte Newton am Anfang seiner *Principia* an: "Zeit, Raum, Ort und Bewegung als allen bekannt, erkläre er nicht. Ich bemerke nur, daß man gewöhnlich diese Größen nicht anders als in bezug auf die Sinne auffaßt und so gewisse Vorurteile entstehen, zu deren Aufhebung man sie passend in absolute und relative, wahre und scheinbare, mathematische und gewöhnliche unterscheidet." (I. Newton, *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, hg. von J.Ph. Wolfers, Berlin 1872, Anmerkung zu den "Erklärungen".) Newton spricht also ausdrücklich vom Vorurteil der Sinne und führt neben der relativen (scheinbaren, gewöhnlichen) Zeit und dem relativen Raum den Begriff der absoluten (wahren, mathematischen) Zeit und des absoluten Raumes ein. Diese absolute Zeit und dieser absolute Raum sind nicht durch die Sinne gegeben; sie sind in der und durch die Theorie der Newtonschen Mechanik bestimmt. Newton hebt ausdrücklich hervor, daß man in der Naturlehre über die Sinne hinausgehen muß. Die absolute Zeit und der absolute Raum sind konstruktive Elemente der Newtonschen Theorie, die es möglich machen, die dynamischen Grundgesetze dieser Theorie zu formulieren.

Verallgemeinerung zum *allgemeinen Relativitätsprinzip* war erst möglich, als man die euklidische Geometrie als der Physik *a priori* vorgeschriebene Raum-Zeit-Struktur aufgeben und die erforderliche Geometrie mit dem Gravitationsfeld *lokal* identifizieren konnte. Das geometrische Verhalten von Körpern und der Gang von Uhren hängen nunmehr in der Allgemeinen Relativitätstheorie lokal vom Gravitationsfeld ab, das seinerseits von den Massen erzeugt wird.

2. Newton - der Begründer der (neuzeitlichen) Physik

Diese geometrische Gravitationstheorie Einsteins weicht nach der eigenen Aussage ihres Begründers in prinzipieller Hinsicht von der Theorie Newtons bedeutend ab. Und dennoch - so betonte Einstein - möge man nicht glauben, Newtons großes Werk könne durch die Allgemeine Relativitätstheorie oder durch irgendeine andere Theorie verdrängt werden. Denn auf der von Newton entwickelten Grundlage fußt die gesamte Physik.⁶ - Wie kam Einstein zu diesem schon eingangs zitierten Urteil?

Mit der klassischen Mechanik wurde die Physik als Naturwissenschaft überhaupt begründet (als Naturwissenschaft im neuzeitlichen Sinne). Newton entwickelte als erster - auf der Grundlage von Kepler und Galilei - tragfähige Prinzipien und Grundbegriffe der Physik. Er begründete die Physik in Polemik zur scholastischen Qualitätenphysik, die *das* Wesen eines jeden Dinges aus ihm inhärenten (occulten) Qualitäten erklären wollte, und in Ablehnung der cartesischen Vorstellung, daß ein einheitliches Naturbild durch die Reduktion aller Naturprozesse auf geometrische Beziehungen und kinematische Bewegungen zu erhalten sei. Er begründete sie als empirische mathematisch formulierte Dynamik, die auf bestimmten erkenntnistheoretischen und geometrischen Voraussetzungen beruht - eingehend in ihre sog. *passiven Prinzipien* - und auf den in den Grundgleichungen der Theorie erfaßten dynamischen Wechselwirkungen, die die sog. *aktiven Prinzipien* der Physik darstellen.

Da diese Zweiteilung von grundlegender Bedeutung ist - kurz dazu ein paar Worte: Um die Möglichkeit objektiver Naturgesetze zu begründen, berief sich Newton auf den Atomismus (denn *physikalisch erklären* bedeutete vor und zu Newtons Zeiten: Zurückführung auf die den Atomen zugeschriebenen Eigenschaften). In der 31. jener der *Optik* angefügten Fragen formuliert er: "Es scheint mir wahrscheinlich zu sein, daß Gott am Anfang die Materie in soliden, massiven, harten, undurchdringlichen, beweglichen Teilchen von solcher Größe und Gestalt und mit solchen weiteren Eigenschaften und in solchem Verhältnis zum

⁶ Vgl. A. Einstein, Was ist Relativitätstheorie?, a.a.O., S. 130 f.

Raume erschuf, wie sie am besten dem Zweck entsprechen, für den er sie geschaffen hatte; ... solange die Teilchen bestehenbleiben, können sich aus ihnen Körper ein und derselben Natur und Struktur zu allen Zeiten zusammensetzen. Sollten sie aber zerstört werden oder in Stücke brechen, würde sich die Natur der Dinge, die von ihnen abhängen, verändern. ... Damit also die Natur beständig ist, können die Veränderungen der körperlichen Dinge nur in verschiedenen Trennungen und neuen Vereinigungen und Bewegungen dieser beständigen Teilchen bestehen.”⁷ - “Gott” heißt hier nur: die von Newton begründete Mechanik kann das für jedes Konzept, das nicht Philosophie ist, notwendige Irreduzible oder Elementare nicht begründen, sondern muß es als quasi-apriorische Bestimmung einführen.

Diese den Teilchen als einzelnen oder an ihnen selbst zugeschriebenen *A-priori*-Bestimmungen bezeichnete Newton als *passive Prinzipien*, die allein aber noch keine Physik ausmachen. Er begründete die Physik dadurch, daß er - auf dem vom antiken Atomismus entwickelten *Prinzip physikalischen Denkens* aufbauend - den Begriff der *aktiven Prinzipien* einführte. Die zitierte Worte fortsetzend schreibt Newton: “Es scheint mir ferner, daß diese Teilchen nicht nur eine *Vis inertiae* besitzen und damit den aus dieser Kraft ganz natürlich entspringenden passiven Bewegungsgesetzen unterliegen, sondern daß sie auch von aktiven Prinzipien bewegt werden, wie es das der Gravitation ist und das, welches die Gärung verursacht und die Kohäsion der Körper. Diese Prinzipien betrachte ich nicht als occulte Qualitäten, die aus der spezifischen Form der Dinge hervorgehen sollen, sondern als allgemeine Naturgesetze, durch die die Dinge selbst gebildet werden.”⁸

Die Grundeinsicht in diese beiden Arten von Prinzipien wurde zunächst anhand der Gravitation diskutiert. Es ergab sich: Die Gravitation ist nicht physikalisch zu erklären, indem man sie aus Berührungskräften ableitet, aus den inhärenten Eigenschaften der postulierten elementaren Teilchen, sondern die Gravitation ist ein Verhalten, das sich erst in der Beziehung der Massen zueinander konstituiert. Die Körper sind nur *gegeneinander* schwer. Die spezielle Gestalt dieser Wechselwirkung ist im Newtonschen Gravitationsgesetz fixiert.

Diese Zweiteilung kann man auch so formulieren, daß die Physik ein Bewegungsetalon bestimmt (in der Mechanik ist dies die geradlinig gleichförmige Bewegung) und die Abweichung davon in ihren Wechselwirkungsgesetzen beschreibt. (Derartige Abweichungen sind in der Mechanik die beschleunigten Bewegungen, die aber noch durch einen Kraftterm spezifiziert werden.)

Physikalisch erklären bedeutete somit nicht mehr: Zurückführung der Erscheinungen auf die primären, den Atomen *a priori* zugeschriebenen

⁷ I. Newton, *Opticks*, with a foreword by Albert Einstein, an introduction by Sir Edmund Whittaker, a preface by I. Bernhard Cohen, Dover 1952, S. 400.

⁸ I. Newton, *Opticks*, a.a.O., S. 401.

Eigenschaften, sondern: Zurückführung auf physikalische Naturgesetze, die das gegenseitige Aufeinanderwirken (besser: den funktionalen Zusammenhang) verschiedener Verhalten beschreiben und eben dadurch den Begriff des physikalischen Körpers bestimmen.⁹ Hierbei erwies sich die Mathematik als Sprache der Physik. (Der neuzeitliche Umbruch ermöglichte dieses neue Verhältnis von Mathematik und Naturlehre.¹⁰)

3. Die Evolution der Physik oder Der Raum-Materie-Dualismus

Diese Grundsätze hat Einstein keineswegs umgestoßen. Im Gegenteil: Nur weil er auf ihnen aufbaute, konnte er die Physik revolutionieren, d.h. vervollkommen. Und umgekehrt ist die moderne Physik nur auf der Grundlage der klassischen Physik zu verstehen.¹¹

Zur Veranschaulichung des Entwicklungsganges der Physik schrieb Einstein einmal: "Vergleichsweise können wir sagen, daß die Aufstellung einer neuen Theorie nicht dem Abriß einer alten Bretterbude entspricht, an deren Stelle dann ein Wolkenkratzer aufgeführt wird; sie hat vielmehr eher etwas mit einer Bergbesteigung gemeinsam, bei der man immer wieder neue und weitere Ausblicke genießt und unerwartete Zusammenhänge zwischen dem Ausgangspunkt und seiner reichhaltigen Umgebung entdeckt,"¹² Demzufolge charakterisierte er die moderne Physik als ein Theoriengefüge, das Fragen stellt und löst, die die gesamte bisherige Physikgeschichte durchzogen haben. "Unser Wissen" - liest man in seiner gemeinsam mit Leopold Infeld verfaßten Schrift *Die Evolution der Physik* - "erscheint im

⁹ Ausführlicher dazu: H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, Newton und Voltaire. Zur Begründung und Interpretation der klassischen Mechanik, Berlin 1980.

¹⁰ Vgl. hierzu die Schriften von Hermann Cohen, Kurd Lasswitz und Ernst Cassirer, z.B.: H. Cohen, Jubiläums-Betrachtungen, Philosophische Monatshefte, 24(1888), 257-291; K. Lasswitz, Geschichte der Atomistik, Hamburg-Berlin 1890; ders., Zum Problem der Continuität, Philosophische Monatshefte, 24(1888), 9-36; E. Cassirer, Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik, Darmstadt 1990; ders., Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit, Darmstadt 1994, insbes. Bd. I, S. 18-61; siehe auch: R. Wahsner, Zur Kritik der Hegelschen Naturphilosophie. Über ihren Sinn im Lichte der heutigen Naturerkenntnis, Frankfurt a.M.-Berlin-Bern-NewYork-Paris-Wien 1996, S. 11-19, 54-60, 116-121, 217-221; dies., Naturwissenschaft, Bielefeld 2002, S. 12-15; H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, Die Natur technisch denken? Zur Synthese von *tevcnh* und *fuvsj* in der Newtonschen Mechanik oder das Verhältnis von praktischer und theoretischer Mechanik in Newtons Physik, in: Wiener Jahrbuch für Philosophie XXXV/ 2003, hg. von H.-D. Klein, Wien 2004, insbes. S. 145-149, 153-167; dies., Infinitesimalkalkül und neuzeitlicher Bewegungsbegriff oder Prozeß als Größe, in: Jahrbuch für Hegelforschung 2002/2003, hg. von H. Schneider, Sankt Augustin 2004, S. 197-271.

¹¹ Ausführlicher hierzu siehe: H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, Physikalischer Dualismus und dialektischer Widerspruch, Darmstadt 1989.

¹² A. Einstein und L. Infeld, Die Evolution der Physik, Hamburg 1987, S. 139.

Vergleich zu dem der Physiker des neunzehnten Jahrhunderts beträchtlich erweitert und vertieft, doch gilt für unsere Zweifel und Schwierigkeiten das gleiche".¹³

Die Behauptung, daß sich bestimmte Grundfragen - so die nach der Beziehung von Raum und Materie - durch die gesamte Physik hindurchziehen, bedeutet nicht, daß die Physik auf der Stelle tritt. Denn jede Antwort impliziert neue Probleme. So sucht die heutige Physik *aufgrund* der mit der Relativitätstheorie gegebenen Antwort auf jahrhundertelange quälende Fragen nach einer Synthese der Theorien über die Relativität und Kontinuität des Raumes und der Zeit einerseits und atomistischen Konzeptionen andererseits, also nach einer Vereinigung von Gravitationsfeld- und Quantentheorie. Denn gerade die Allgemeine Relativitätstheorie nährte die Hoffnung, daß es möglich sein könnte, nicht nur das Gravitationsfeld, sondern alle Felder zu geometrisieren (d.i mit dem Raum, der Raum-*Struktur* zu identifizieren), die Teilchen (also die Materie) als Feldverdichtungen darzustellen und so zu einer unitären physikalischen Theorie zu gelangen bzw. den sich durch die Physikgeschichte ziehenden Raum-Materie-Dualismus aufzuheben.

Damit die Bedeutung dieses Dualismus verständlicher wird, sei noch einmal in der Geschichte zurückgegangen.

Um die klassische Mechanik begründen zu können, mußte Newton die cartesische Identifizierung von Materie und Ausdehnung, von Materie und Raum, also die Reduktion des physikalischen Körpers auf einen geometrischen verwerfen. Denn diese Identifizierung bedeutete, den Naturkörpern bzw. der Materie ihre Wirkfähigkeit abzuspochen. Auf einer solchen Basis konnte eine empirisch fundierte Dynamik nicht aufgebaut werden. Newton nahm gegenüber diesem Weltbild eine, aber eben nur eine Unterscheidung vor, die *Unterscheidung von Raum und Materie*. (Er griff damit - nebenbei gesagt - in physikalisch fruchtbarer Weise den atomistischen Grundgedanken wieder auf, den Gedanken, zwischen Raum und Materie zu differenzieren und alles auf diese beiden Entitäten zu reduzieren, damit die Bewegung denkbar wird.¹⁴)

Es wäre nun jedoch falsch, würde man nicht erkennen, daß Descartes mit seiner Identifizierung von Raum und Materie zugleich auch entscheidende Voraussetzungen für die Begründung der klassischen Mechanik erarbeitet hat. Sein Anliegen war es, die prinzipielle Möglichkeit einer universellen mechanischen Naturerklärung zu erweisen, in der es nichts als sich bewegende Materie gibt. Deshalb war seine physikalische Welt nur aus der ausgedehnten Substanz, dem Geometrie und Materie vereinenden Äther, errichtet. Spezielle Theorien konnten verschieden sein, wenn sie nur alles auf reine Ortsveränderung der Ätherteilchen zurückführten, also die Erscheinungen kinematisch erklärten. Doch wegen der Identifizierung der Materie mit der Ausdehnung konnte sich Descartes die Einwirkung der Körper aufeinander nur mittels direkter Berührung vorstellen.

¹³ Ebd., S. 139.

¹⁴ Vgl. R. Wahsner, *Das Aktive und das Passive*, a.a.O.

Obzwar Descartes mit seinem Ansatz nicht zur Physik gelangte, entwickelte er gerade durch diesen Ansatz erste Elemente eines physikalisch-mathematisch konstruktiven Raumbegriffs. Denn wenn ein Körper keine andere Eigenschaft hat als die, ausgedehnt zu sein, wie kann er dann als einzelner Körper gefaßt werden? Wo liegen die Unterschiede in den Eigenschaften, die den Übergang von einem Körper zu einem anderen kennzeichnen? Worin ist das ständige unveränderliche Prädikat zu sehen, das es möglich macht, den Körper zu identifizieren, wenn er seine Stellung im Raum verändert - das Prädikat, das den Begriff der Stellung im Raum physikalischen Sinn verleiht? Da Descartes gemäß seiner Konzeption Raum und Körper nicht unterscheiden konnte, fand er folgende Lösung: Er führte das *Koordinatensystem* ein, das jeden Raumpunkt durch seine Koordinaten beschreibt.

Damit vervollkommnete Descartes die euklidische Geometrie für die Belange der Physik, die Geometrie, die von der klassischen Mechanik ja als notwendige Raumstruktur vorausgesetzt wird. Denn die Geometrie Euklids hatte den Begriff des Raumes als eines realen Dinges nicht gekannt, sondern sie hatte sich ausschließlich mit den Begriffen *Objekt* (Punkt, Ebene, Gerade, Strecke) und *Lagebeziehungen zwischen Objekten* beholfen.¹⁵ Alle Lagebeziehungen waren auf solche der Berührung ("schneiden von", liegen auf") zurückgeführt. Der Raum als Kontinuum kam in diesem Begriffssystem nicht vor und brauchte es nicht.

Mit seinem Begriff vom Raum als Kontinuum schuf Descartes eine wesentliche Voraussetzung für die Newtonsche Mechanik. Denn diese hatte wie Einstein hervorhebt "das Raumganze im Sinne Descartes' unbedingt nötig". Die Dynamik kommt mit den Begriffen *Massenpunkt* und zeitlich *variable Entfernung zwischen Massenpunkten* nicht aus, da der Beschleunigungsbegriff, der in den Newtonschen Bewegungsgleichungen eine zentrale Rolle spielt, durch zeitlich variable Punktabstände allein nicht definiert werden kann. Die Beschleunigung ist in der klassischen Mechanik nur als Beschleunigung gegen das Raumganze zu bestimmen. Und so schlußfolgerte Einstein: "Zur geometrischen Realität der Raumbegriffe trat also eine neue, trägheitsbestimmende Funktion des Raumes hinzu. Wenn Newton den Raum als absolut erklärte, so meinte er wohl diese reale Bedeutung des Raumes, die es für ihn mit sich brachte, daß er seinem Raum einen ganz bestimmten Bewegungszustand zuschreiben mußte. ... Absolut war dieser Raum allerdings noch in einem zweiten Sinne gedacht: seine trägheitsbestimmende Wirkung war selbständig, d.h. unbeeinflußbar durch irgendwelche physikalischen Umstände gedacht; er wirkte auf die Massen, aber nichts wirkte umgekehrt auf ihn ein."¹⁶

Einstein meinte, daß aus soeben zitiertem Grunde Newton seinen absoluten

¹⁵ Vgl. A. Einstein, Das Raum-, Äther- und Feldproblem der Physik, in: Mein Weltbild, a.a.O., S.141.

¹⁶ Ebd., S.141 f.

Raum auch anders, z.B. "Äther" hätte nennen können. Denn - so fährt er fort - "wesentlich ist ja nur, daß neben den beobachtbaren Objekten noch ein anderes, nicht wahrnehmbares Ding als real angesehen werden muß, um die Beschleunigung bzw. die Rotation als etwas Reales ansehen zu können."¹⁷

Die Gesetze der Mechanik können also nur unter Benutzung eines Koordinatensystems formuliert werden. Sollte der cartesische Gedanke vom Raum als Kontinuum für die Physik jedoch verwendbar sein, so mußte der Raum als *leerer* Raum gedacht werden, als Untergrund für die Bewegung der Materie. Aus dem cartesischen Raum mit nur kinematischen Eigenschaften wurde der Newtonsche Raum mit dynamischen Eigenschaften. Gegen Ende des 19. Jh. wurde dann *explizit* erkannt, daß dieser *Newtonsche Raum als Gesamtheit der Inertialsysteme* zu begreifen ist.¹⁸

Der Newtonsche Raum ist jedenfalls aus rein physikalischen Gründen und in einem genau bestimmten *physikalischem* Sinne absolut. Sein Charakter hat nichts mit dem "Sensorium Gottes" zu tun (was Newton nachgewiesenermaßen auch nie formuliert und gemeint hat)¹⁹ und kann nicht mit *philosophischen* Gründen aufgehoben oder abgelehnt werden.

Der absolute Newtonsche Raum wurde durch die Spezielle Relativitätstheorie eliminiert. Es trat nun an die Stelle des absoluten euklidischen Raums der klassischen Mechanik die absolute Raum-Zeit der Minkowski-Welt, die *Raum-Zeit-Union*. Der *Dualismus von Raum bzw. Raum-Zeit und Materie* wurde auf dieser Stufe jedoch noch nicht aufgehoben, da der speziell-relativistische Raum zwar in seiner Struktur gegenüber dem Newtonschen so verändert worden war, daß er mit dem elektromagnetischen Feld Maxwells kompatibel war, dennoch aber einen relativ starren Untergrund für die Bewegung der Materie bildete. Erst der Raum der Allgemeinen Relativitätstheorie, der mit der Materie in echter Wechselwirkung steht, bietet die Möglichkeit, den scharfen Dualismus von Raum und Materie abzubauen (abzubauen, nicht aufzuheben). Es gelang dies, weil durch die nicht-euklidische Geometrie die Möglichkeit gegeben war, geometrische Strukturen zu finden, derart, daß in wesentlichen Hinsichten die physikalische *Raum-Zeit-Struktur* vom Gravitationsfeld nicht zu unterscheiden ist. In diesem Sinne ist der Raum mit physikalischen Qualitäten ausgestattet.²⁰ Aber er ist nicht vollständig physikalisierbar. Zu dieser Einsicht kam Einstein um 1920 (Leidener Rede) und gelangte damit zu

¹⁷ A. Einstein, Äther und Relativitätstheorie, Berlin 1920, S. 11 (Hervorhebung - R.W.).

¹⁸ Vgl. C. Neumann, Über die Principien der Galilei-Newtonschen Theorie Leipzig 1870; L. Lange, Die geschichtliche Entwicklung des Bewegungsbegriffs und ihr voraussichtliches Endergebnis. Ein Beitrag zur historischen Kritik der mechanischen Prinzipien, Leipzig, 1886.

¹⁹ Siehe, R. Wahsner und H.-H. v. Borzeszkowski, Anmerkung 12, in: Voltaire, Elemente der Philosophie Newtons/ Verteidigung des Newtonianismus/ Die Metaphysik des Neuton, hg. und mit Anmerkungen versehen von R. Wahsner und H.-H. v. Borzeszkowski, Berlin 1997, S. 360-363.

²⁰ Vgl. A. Einstein, Äther und Relativitätstheorie, a.a.O., S. 15.

dem Schluß, daß seine Allgemeine Relativitätstheorie das sogenannte Machsche Prinzip nicht realisiert (was er zunächst geglaubt hatte).²¹

Die Diskussion der durch die Allgemeine Relativitätstheorie erzielten Fortschritte hatte deutlich gemacht, daß sie keine *totale* Identifizierung von Geometrie und Physik ermöglicht. Sie führt nicht zu einer Bestimmung der Geometrie schlechthin, sondern nur eines *Teiles* der Geometrie, der Metrik (der Maßverhältnisse), aber nicht zu einer Bestimmung der Topologie (der Zusammenhangsverhältnisse).

Zur Erläuterung des Unterschieds von *Topologie* und *Metrik* stelle man sich einen Luftballon vor, genauer: eine Luftballonoberfläche. Sie ist beliebig verformbar. Durch die Verformung verändert sie ihre Metrik, behält aber die gleiche Topologie. Erst wenn man versucht, diese Fläche auf eine Ebene abzubilden, werden Zusammenhänge zerrissen (an den Rändern, an den Polen). Eine Luftballon- oder Kugeloberfläche ist auf eine Ebene nicht eindeutig abbildbar. Ersetzt man nun den Luftballon durch einen Torus und vergleicht geschlossene Kurven auf der Ebene und auf dem Torus, so ergibt sich eine veränderte Reihenfolge dieser Kurven, infolgedessen eine veränderte Zeitfolge von Ereignissen, daher eine veränderte Kausalfolge und Raumordnung. Hieran ist erkennbar, daß eine Veränderung der Geometrie eine veränderte Formulierung der Naturgesetze zur Folge hat.²²

Soviel ganz kurz zu dieser Unterscheidung. Gesagt wurde zuvor: nur die Metrik sei physikalisch. Zudem muß aber von dieser Metrik im Unendlichkleinen gefordert werden, daß sie euklidisch bzw. minkowskisch ist.

Die Notwendigkeit dieser Forderung ergibt sich daraus, daß nur im euklidischen bzw. quasi-euklidischen Raum als einem Raum mit starren Strukturen starre Einheitsmaßstäbe und Einheitsuhren (Etalons) definiert werden können, Maßstäbe, die für jede Messung unabdingbar sind. Messen aber muß man, Meßmöglichkeiten müssen gegeben sein, um physikalische Aussagen machen zu können. Um diese Möglichkeit zu gewährleisten, muß darüber hinaus der globale Raum so strukturiert sein, daß die durch die Einheitsmaßstäbe und Einheitsuhren gemessenen raumzeitlichen Abstände unabhängig von ihrem Ort und ihrer Richtung untereinander verglichen werden können. Die geochronometrische Struktur der Raum-Zeit muß also so beschaffen sein, daß es möglich ist, die erwähnten Etalon zu definieren, und ihr Zustand unabhängig ist von dem Weg, den sie genommen haben (überhöht gesagt: von ihrer Vorgeschichte). Anderenfalls wären die untersuchten physikalischen Prozesse nicht reproduzierbar.

²¹ Vgl. H.-H. v. Borzeszkowski and R. Wahsner, Mach's Criticism to Newton and Einstein's Reading of Mach: The Stimulating Role of Two Misunderstandings, in: Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity, ed. by J.B. Barbour and H. Pfister, Einstein Studies, vol. 6, Boston-Basel-Berlin, 1995.

²² Ausführlicher hierzu: H. Reichenbach, Die Philosophie der Raum-Zeit, in: Hans Reichenbach, Gesammelte Werke in neun Bdn., hg. von A. Kamlah und m. Reichenbach, Bd. 2, Braunschweig 1977, S. 75-99 (§ 12).

Der verbleibende nicht physikalisierte Bestandteil der Geometrie besteht mithin aus der Voraussetzung, daß die Minkowskische Geometrie im Unendlichkleinen gültig ist, und aus der Notwendigkeit, die topologische Struktur durch Randbedingungen im Großen und im Kleinen festzulegen. Somit geht der Kosmos in seiner Globalstruktur als Randbedingung im Großen und die Struktur der Teilchen als Randbedingung im Kleinen in die Allgemeine Relativitätstheorie ein. Gerade dadurch, daß man in dieser Weise Kosmos und Teilchen als Randbedingungen setzte, wurde der durch die geometrische Gravitationstheorie erzielte Fortschritt möglich, der sich unter anderem darin zeigt, daß aus den Feldgleichungen die Bewegungsgleichungen der Teilchen abgeleitet werden können.

Die Erfolge der Allgemeinen Relativitätstheorie provozierten nun die Frage, ob es möglich ist, die Materie, die elementaren Teilchen, als Verdichtung des Gravitationsfeldes darzustellen. Man fragte also wieder, ob es möglich ist, Raum und Materie zu identifizieren und so ein einheitliches physikalisches System ohne jeglichen Dualismus zu erhalten. Das Bemühen, hierauf eine Antwort zu erhalten, schlug sich in Einsteins Programm einer einheitlichen geometrischen Feldtheorie nieder.

Es ist dies keinesfalls als Rückfall in die vor-Newtonsche Naturphilosophie zu verstehen, sondern als Versuch, die große Idee des Descartes von einem einheitlichen physikalischen Naturbild auf der Grundlage der von Newton bis Einstein entwickelten Prinzipien der Physik fruchtbar zu machen. Es ist auch keine Zurücknahme der gewonnenen Einsicht, daß die Allgemeine Relativitätstheorie Raum-Zeit und Materie nicht total identifiziert, sondern bedeutet die Suche nach einer geeigneten Modifizierung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Wenn sich dieses Programm verwirklichen ließe, so müßte der Gegensatz von Raum und Materie verblassen und die Physik als ganze zu einem geschlossenen Gedankensystem werden.

Einstein glaubte daran, daß sein Programm grundsätzlich realisierbar wäre. Dennoch war er der schärfste Kritiker konkret vorgeschlagener unitärer Theorien (seine eigenen eingeschlossen). Er war dies, weil er wußte, wann eine Theorie ihren Charakter als Physik verliert. So widerlegte er (1918) in einer Diskussion mit Hermann Weyl dessen Vorschlag einer solchen Theorie mit dem Einwand, diese Theorie berücksichtige nicht, daß der Raum so strukturiert sein muß, daß er die o.g. Meßanforderungen erfüllt.

Der Begründer der Allgemeinen Relativitätstheorie hob - wie wohl kein anderer - den konstruktiven Sinn des sich durch die Geschichte der Physik ziehenden Materie-Raum-Dualismus (oder: Materie-Raum/Zeit-Dualismus) hervor. Versucht man, die Funktion dieses Dualismus mit Einsteins Augen zu sehen, so erweist sich *der Raum als das notwendige Zweite*, das neben der ponderablen Materie als phy-

sikalische Realität postuliert werden mußte - und zwar aus Gründen der Messung, deren Erfordernisse die gesamte Begriffs- und Theorienbildung der Physik prägt (nicht einzelne Meß-Handlungen).²³

4. Notwendiger physikalischer Raum-Materie-Dualismus und Raum-Zeit-Apriorismus

Die Notwendigkeit des Zweiten in einer physikalischen Theorie oder allgemeiner einer rechnenden und messenden Naturwissenschaft hat noch einen anderen Aspekt, den der Apriorität des Raumes und der Zeit.²⁴ Weithin wird die Relativitätstheorie (in der der Raum - wie Einstein sagt - nicht mehr wie in der Newtonschen Physik "ausschließlich das passive Gefäß allen Geschehens ist, das am physikalischen Geschehen selbst keinen Anteil" hat)²⁵ als naturwissenschaftliche Widerlegung des Kantschen Raum-Zeit-Apriorismus angesehen.

Das ist insofern gerechtfertigt, als - wie gesagt - diese Theorie Metrik und Gravitationsfeld lokal identifiziert und dadurch Eigenschaften der Raum-Zeit physikalisch bestimmt, also nicht vorab festlegt. Zudem folgt in ihr die Bewegung der Teilchen (Materie) aus der Struktur des Feldes. In der Maxwell'schen Theorie hingegen, war es noch so, daß die Feldgleichungen *und* die Bewegungsgleichungen gesetzt werden mußten.

Doch insofern die Relativitätstheorie keine totale Identifizierung von Geometrie und Physik ermöglicht, hebt sie die Apriorität des Raumes und der Zeit nicht völlig auf, sondern relativiert sie nur. Dennoch ist es berechtigt, in Anlehnung an Kant, hier von Apriorismus zu sprechen. Es ist - das sei explizit bemerkt - ein *funktionales* (kein genetisches) Apriori und ein Apriori bezogen auf die jeweilige Theorie.²⁶ Ihr wird etwas vorausgesetzt, das nicht aus ihren dynamischen Gleichungen abgeleitet werden kann, sondern das als *Mittel* der Erkenntnis fungiert. Es ist nicht denknotwendig (das war es für Kant auch nicht), aber *meßnotwendig*. (Man könnte es "naturwissenschaftliche Sinnlichkeit" nennen.)

²³ Vgl. hierzu: R. Wahsner und H.-H. v. Borzeszkowski, Die Wirklichkeit der Physik. Studien zu Idealität und Realität in einer messenden Wissenschaft, Frankfurt a.M.-Berlin-Bern-NewYork-Paris-Wien 1992.

²⁴ Vgl. zum folgenden: H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, Erkenntnistheoretischer Apriorismus und Einsteins Theorie. Einstein in seiner Beziehung zu Newton und Kant, Dt. Zs. für Philosophie 27(1979), 213-222; H.-H. v. Borzeszkowski, Kantscher Raumbegriff und Einsteins Theorie Dt. Zs. für Philosophie 40(1992), 36-42; R. Wahsner, Erkenntnistheoretischer Apriorismus und die neuzeitliche Physik, Dt. Zs. für Philosophie 40(1992), 24-35; dies., Das notwendige Dritte, in: Proceedings of the Eighth International Kant Congress. Memphis, 1995, Volume II, Part 1, ed. by H. Robinson, Milwaukee 1995, pp 389-396.

²⁵ Vgl. A. Einstein, Das Raum- Äther- und Feldproblem der Physik, a.a.O., S. 142.

²⁶ Siehe auch Anm. 34.

Die Newtonsche Physik erfüllte die Bedingung, daß die Raum-Zeit-Struktur so beschaffen sein muß, daß raum-zeitliche Maßstäbe definiert und die mit ihnen gemessenen Abstände verglichen werden können, evidenterweise, da sie die euklidische Geometrie global für den ganzen Raum *voraussetzte* - was man ja zumeist auch als Apriorität der Geometrie deutete. Nun zeigte sich aber nach der Begründung der Gauß-Riemannschen Geometrie, daß nur *bestimmte* Eigenschaften der euklidischen Geometrie gegeben sein müssen, um die o.g. Bedingungen zu erfüllen. Helmholtz war der erste, der dies bemerkte. Er zeigte, daß es nur darauf ankommt, eine Geometrie, eine Raumstruktur, zu wählen, in der sich die Körper ohne Veränderung ihrer Form und ihres Rauminhalts frei verschieben lassen.²⁷ Hiernach sind auch nicht-euklidische Räume denkbar, wenn in ihnen nur ein starrer Körper genau so frei (ohne Deformation) bewegt werden kann wie im euklidischen Raum. Das heißt: zugelassen sind alle Räume konstanter Krümmung. (Die Krümmung muß nicht wie im euklidischen Raum Null sein.) Doch mit der Begründung der Allgemeinen Relativitätstheorie, d.h. mit der dort möglichen Identifizierung von Gravitationsfeld und Krümmungsverhältnissen (Metrik), wurde nun offensichtlich, daß Räume *beliebiger* (d.h. von Weltpunkt zu Weltpunkt sich ändernder) Krümmung zugelassen werden müssen. Die o.g. Meßforderung wird dennoch erfüllt, nämlich dadurch, daß die Riemannsche Geometrie (nicht alle nicht-euklidischen Geometrien) im Unendlichkleinen quasi-euklidisch, d.i. Minkowskisch ist *und* daß sie eine Prozedur anzugeben gestattet, die einen Vergleich von Abständen an verschiedene Raum-Zeit-Punkten ermöglicht.

Die Allgemeine Relativitätstheorie baut also das Vorauszusetzende ab, liquidiert es aber nicht total. Sie hebt also den Raum-Zeit-Apriorismus keineswegs völlig auf, zeigt aber seinen Hintergrund (zumindest in einer gewissen Hinsicht.) Desgleichen verwirft sie nicht schlechthin das Newtonsche Raum-Zeit-Konzept.

Darüber hinaus ist noch einen bislang außer acht gelassenen Aspekt zu nennen: Außer den Gravitationsfeldern gibt es ja auch nicht-gravitative Materie. Mit dieser sind die Gravitationsfelder so gekoppelt, daß im Infinitesimalen nicht nur die Maßverhältnisse der quasi-euklidischen Geometrie gelten, sondern auch alle dynamischen Gleichungen der Speziellen Relativitätstheorie erfüllt sind. Es wird also gerade vorausgesetzt, daß hier das Gravitationsfeld keine Rolle spielt. Elementare Teilchen (Materie) können damit nicht durch eine Anhäufung gravitativer Feldenergie modelliert werden, denn diese müßten schließlich von der Größenordnung der erwähnten Einheitsmaßstäbe und Einheitsuhren sein, die ja nur durch physikalische Teilchen realisiert sein können. Teilchen und deren Struktur müssen also vorausgesetzt, apriorisch bestimmt werden. Um Teilchen aus Feldern

²⁷ Vgl. H. v. Helmholtz, Über den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome, in: Hermann von Helmholtz. Populäre wissenschaftliche Vorträge, Drittes Heft Braunschweig 1876, 21-54.

aufbauen zu können, müßte die Allgemeine Relativitätstheorie modifiziert werden (woran man arbeitet). Vorerst jedoch muß man Teilchen als Fremdkörper in die gravitative Feldtheorie einführen, d.i. als Gebiete, in denen die (reinen) Feldgleichungen nicht gelten.

Der Dualismus von Raum-Zeit und Materie oder Feld und Materie erscheint somit in der Theorie als Zweiteilung in Feldgleichungen und Randbedingungen. Diese Tatsache wird auch nicht durch die vor Jahren stark diskutierte Geometrodynamik aufgehoben. Man kann zwar - wegen der Unterscheidung von Metrik und Topologie diese "Fremdkörper" durch Löcher, Kanäle oder Schläuche in der Topologie darstellen. Aber Weyl bemerkte schon 1921, daß dennoch für die Physik die Aufgabe bestehenbleibt, "neben der Eigengesetzlichkeit des Feldes auch die Gesetze zu studieren, nach denen die Materie die Feldwirkungen auslöst ...".²⁸

Solange diese Aufgabe nicht gelöst ist, die Teilchen resp. die Randbedingungen nicht aus den Feldgleichungen folgen, müssen sie zusätzlich vorgegeben werden, sind sie also insofern - bezogen auf die Theorie - apriorisch. Dies schlägt sich - um es zu wiederholen - in Einsteins geometrischer Gravitationstheorie so nieder, daß nur die Metrik durch die Feldgleichungen bestimmt wird, nicht die Topologie, die daher durch Zusatzbedingungen festgelegt werden muß.

Doch diese Aufteilung ermöglichte zugleich die Fortschritte, die durch die Allgemeine Relativitätstheorie erzielt wurden. Durch diese Aufteilung gelang es, aus der Geometrie jenen Teil herauszuziehen, der mathematisch von derselben Struktur ist wie die Funktionen, mit denen physikalische Felder beschrieben werden, eben die Metrik. Nachdem (das kommt noch hinzu) Einstein erkannt hatte, daß aufgrund des Prinzips von träger und schwerer Masse die Metrik mit dem Gravitationsfeld lokal identifiziert werden kann, war es ihm möglich, Gravitationsgleichungen als Bestimmungsgleichungen für die Metrik aufzustellen.

Durch die Aufspaltung in Topologie und Metrik wurde die Geometrie insofern relativiert, als verschiedene Geometrien der Physik zugrundegelegt werden konnten, so sie nur die o.g. Bedingungen erfüllten. (Man erinnere sich an die oben erwähnten je nach Wahl der Topologie unterschiedlichen Zeit- und Kausalfolgen.)²⁹

Diese Differenzierung führte zu dem, was Einstein die Poincarésche Summe nannte.³⁰ Sie besagt, erst die Geometrie G zusammen mit den physikalischen Gesetzen P macht Aussagen über das Verhalten physikalischer Objekte, so daß nur die Summe ($G+P$) mit der *Erfahrung* unterliegt. Im Prinzip könnte man also so vor-

²⁸ H. Weyl, Feld und Materie, in: Hermann Weyl. Gesammelte Abhandlungen, Bd. 2, Berlin-Heidelberg-NewYork 1968, S. 255.

²⁹ Ausführlich über diesen Sachverhalt siehe: H. Reichenbach, Die Philosophie der Raum-Zeit, a.a.O.

³⁰ Vgl. H. Poincaré, Wissenschaft und Hypothese, Leipzig 1906, S. 51 f.; A. Einstein, Geometrie und Erfahrung, in: Mein Weltbild, a.a.O., S. 122 f.

gehen, daß man G oder P (genauer gesagt: Teile von P) frei wählt und dann jeweils nur den anderen Summanden so bestimmen muß, daß die Summe $G+P$ mit der Erfahrung übereinstimmt. Es ist daher nicht möglich, wie Reichenbach wollte, vor der Physik die Geometrie herauszufinden, die auf die Wirklichkeit paßt, und dann die daraus folgende Physik zu ermitteln.³¹

Verallgemeinert besagt die *Poincarésche Summe*, daß eine empirisch bestätigte naturwissenschaftliche Theorie nur mit Einschluß ihrer Voraussetzungen Aussagen über die Wirklichkeit macht. Gegenteilig zu denken, die Voraussetzungen einer Theorie zu vergessen oder abzuschneiden und nur ihre Lösungen als Wirklichkeitsaussagen zu nehmen, heißt, diese Theorie ontologisch zu verfälschen. Es war dies ein Problem für Helmholtz bei der Bestimmung des Verhältnisses von Philosophie und Naturwissenschaft sowie von Geometrie und Wirklichkeit. Auch heute geht man noch oftmals irrtümlich davon aus, daß die Voraussetzungen oder Axiome für sich genommen gerechtfertigt sein müßten (sei es durch logischen Zwang oder durch Erfahrung), nicht aber versteht man sie als das Vorausgesetzte bezüglich einer bestimmten Theorie, auf dessen Grundlage die dynamischen Erklärungen dieser Theorie (wenn es sich z.B. um Physik handelt) bzw. deren Gesetze möglich sind. Derartige Voraussetzungen können durchaus nur gesetzt sein. Ihre "Richtigkeit" erweist sich an der Gültigkeit (experimentellen Bestätigung) der Gesamtheorie.

In der Newtonschen Physik wurde die Geometrie G total in der Form des euklidischen Raumes vorgegeben. Da man keine andere als diese Geometrie kannte, erschien sie als absolute Denknötwendigkeit, als absolutes Apriori. Durch die Möglichkeit, die Geometrie in Topologie und Metrik aufzuspalten, konnte man Teile der Geometrie abspalten und in die Physik einbeziehen. Die Geometrie hat also in der Allgemeinen Relativitätstheorie einen weniger apriorischen Charakter.

Der Fortschritt der Physik zeigt sich in der schrittweisen Reduktion ihres quasi-apriorischen Anteils, nicht jedoch in seiner Liquidierung. Der durch die Feldphysik erreichte Fortschritt muß durchaus u.a. danach beurteilt werden, in welchem Maße es gelingt, Eigenschaften der Teilchen (Bestimmungen der Materie) auf Eigenschaften der Felder (Bestimmungen der Raum-Zeit,) zurückzuführen. Zugleich wurde aber klar, daß dies niemals vollständig erreicht werden kann. *Eine totale Auflösung der Physik in aktive Prinzipien bedeutete ihre absolute Vollendung und damit ihr Ende. Die Beseitigung der passiven Prinzipien ist eine Aufgabe, deren Erfüllung der Physik nie gegeben, aber stets aufgegeben ist.* Diese schon von Kant gewonnene Einsicht sollte man stets vor Augen haben, wenn man die philosophische Relevanz naturwissenschaftlicher Erkenntnisse beurteilt.

³¹ Vgl. A. Einstein, Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten, in: Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, hg. von P.A. Schilpp, Braunschweig-Wiesbaden 1979, S. 493-511.

Kant selbst kam zu dieser Überzeugung, nachdem er zunächst von der entgegengesetzten Position ausgegangen war. In seinen Frühschriften war er bestrebt, die Eigenschaften der elementaren Teilchen vollständig auf Kräfte, d.h. auf aktive Prinzipien, zu reduzieren und die Newtonsche Mechanik zur Kosmologie zu erweitern. Diese Erweiterung glaubte er unter der einzigen Voraussetzung durchführen zu können, daß Materie vorhanden sei. Diese Materie stellte er sich aus Atomen bestehend vor, denen die Newtonschen Gesetze eingeprägt sind. Sobald sich Kant jedoch des *Problems* bewußt wurde, wie der Mensch zu Gesetzen kommt, gab er sein Ziel auf, alle passiven Prinzipien in aktive aufzulösen, und gelangte zu seinem *Raum-Zeit-Apriorismus*.

Obwohl Kant irrtümlicherweise meinte, der Raum-Zeit-Apriorismus beziehe sich auf die gesamte menschliche Erkenntnis, zeigte er, indem bei seiner Konstruktion des menschlichen Erkenntnisprozesses stets die klassische Mechanik als Modell vor Augen hatte, den "Rhythmus der Erkenntnis" dieser Mechanik auf. Da sich nun aber die Newtonsche Mechanik in dem Sinne als Protophysik erwies, daß man immer wieder auf ihre ursprünglichen Fragestellungen und Grundbegriffe zurückgreifen muß, hat Kant mit seinem Raum-Zeit-Apriorismus eine grundlegende Aussage über den physikalischen Erkenntnisprozeß getroffen. Kant hat - um mit Hegel zu sprechen - "den Rhythmus der Erkenntnis, der wissenschaftlichen Bewegung, als ein allgemeines Schema vorgezeichnet".³² Er hat - wie Hegel sagt - darauf aufmerksam gemacht, "daß die Physik Gedankenbestimmungen ohne deren weitere Untersuchung gebraucht, welche die wesentlichen Grundlagen ihrer Gegenstände ausmachen". "Er hat die Grundbegriffe und die Grundprinzipien dieser Wissenschaft zu bestimmen versucht und zu einer sogenannten *dynamischen* Naturlehre die Veranlassung gegeben."³³

Damit hat Kant die Notwendigkeit des philosophischen Denkens neben dem naturwissenschaftlichen begründet. Aber er hat nicht begründet, woher die von der Physik ohne weitere Untersuchung gebrauchten Gedankenbestimmungen kommen. (Herkunft ist hier nicht, nicht nur, historisch, sondern vor allem systematisch bzw. funktional gemeint. Bezüglich der Apriorität des Raumes und der Zeit muß zwischen aposteriorischer Genese und apriorischer Funktion unterschieden werden.³⁴)

³² G.W.F. Hegel, Vorlesungen über die Geschichte der Philosophie III, in: Werke, auf der Grundlage der Werke von 1832-1845 neu edierte Ausgabe, Frankfurt a. M. 1986, Bd. 20, S. 385.

³³ Ebd., S. 364.

³⁴ Siehe R. Wahsner, Apriorische Funktion und aposteriorische Herkunft. Hermann von Helmholtz' Untersuchungen zum Erfahrungsstatus der Geometrie, in: Universalgenie Helmholtz. Rückblick nach 100 Jahren, hg. von L. Krüger, Berlin: 1994, S. 245-259. Zur Erläuterung: Nimmt man die Geometrie nicht in ihren historischen Erfahrungsformen, sondern in ihrer axiomatisierten Form, dann ist sie ein Meßmittel und insofern keine Naturwissenschaft, keine Objektwissenschaft. Beide Sichten auf die Geometrie, die Objekt- und die Mittelsicht, miteinander zu vermengen bringt keine Lösung. Man muß zwischen Herkunft und Funktion, zwischen der aposteriorischen Genesis und der apriorischen Funktion der euklidischen Geometrie unterscheiden.

Kant sah, wenn er von Erfahrung sprach, auf die *wissenschaftliche Erfahrung*, unterschied aber nicht zwischen Alltags- und wissenschaftlicher Erfahrung und der zu denkenden Einheit beider.

Weil Kant den Ursprung der vorausgesetzten Gedankenbestimmungen nicht aufzeigte, war - da mit der Allgemeinen Relativitätstheorie das vorgebliche Argument von der Denknötwendigkeit der euklidischen Geometrie zusammenbrach - die Möglichkeit gegeben, Kants Philosophie subjektivistisch oder ontologistisch zu verabsolutieren. Wenn Kant sich auf die apriorisch im Gemüt bereitliegende euklidische Raumvorstellung berief, um so über den Raum als Form der reinen Anschauung Sinnlichkeit und Verstand miteinander zu verknüpfen, so bezog er - obwohl das seinem Anliegen gar nicht entsprechen konnte - *implizit* die gesamte Menschheitsgeschichte und den menschlichen Erkenntnisprozeß in seiner Totalität ein, deren Produkt die euklidische Geometrie, einschließlich ihrer sogenannten Denknötwendigkeit objektiv ja war. Als sich aber erwies, daß die euklidische Geometrie weder die einzig denkbare noch die einzig physikalisch bedeutsame ist, war diese den historischen und spekulativen Aspekt implizit enthaltende Verbindung nicht mehr gegeben, und der Mangel der Kantschen Philosophie wurde für das erkenntnistheoretische Verständnis der Physik unmittelbar wirksam. Es wäre jetzt erforderlich gewesen, den Zusammenhang von Geometrie und Erfahrung *explizit* darzustellen und erkenntnistheoretisch zu begründen. (Anderenfalls kann das Ergebnis der Relativitätstheorie so erscheinen, als sei die Geometrie nur ein per rationaler Willkür festgelegtes Ordnungsschema oder als sei sie eine totale Widerlegung der Apriorität.)

Der beste Ansatz, um das Verhältnis von Geometrie und Erfahrung zu bestimmen, um das bislang weitgehend Versäumte nachzuholen, ist m.E. die Newtonsche Feststellung, daß die Geometrie ihre Basis in der praktischen Mechanik (der antiken Statik) hat und derjenige Teil der allgemeinen (also der klassischen) Mechanik ist, der die Kunst, genau zu messen, aufstellt und beweist.³⁵

Um diesen Passus zu verstehen, bedarf es der Einsicht, daß die Newtonsche Mechanik eine Synthese von *téchne* und *fýsis*“ darstellt,³⁶ mithin nur als eine auf

³⁵ Vgl. Newton, Mathematische Prinzipien der Naturlehre, a.a.O., S. 2 (Vorwort an den Leser).

³⁶ Vgl. H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, Die Natur technisch denken? Zur Synthese von *téchne* und *fýsis*“ in der Newtonschen Mechanik oder das Verhältnis von praktischer und theoretischer Mechanik in Newtons Physik, in: Wiener Jahrbuch für Philosophie XXXV/ 2003, Wien 2004, hg. von H.-D. Klein, Wien 2004, S. 135-168. - Zur Erklärung der Termini *téchne* und *fýsis*“: Nach Aristoteles ist von dem, was ist, das eine von Natur aus, das andere aus anderen Gründen, und der wichtigste der “anderen Gründe” ist für ihn die *tevcnh* (Kunst, Kunstfertigkeit, Handwerk, Gewerbe, Dichtkunst, Weissagekunst). *Téchne* ist der Gegensatz zu *fýsis*“ (Natur, Charakter, Naturell, Wesen, natürlich Lage oder Beschaffenheit), beide bestimmen sich aus dem Gegensatz zu ihrem Anderen. Das naturhaft Seiende ist von sich selbst her, das technisch Seiende hat seinen Grund in einem Fremden, im es herstellenden Menschen. Das Natürliche ist das an sich selbst Gegebene, das Eigenständige; das Technische ist das Gewollte, Geplante und künstliche Gemachte. Die Wissenschaft von der Natur ist ein Wissen von den Gründen des Seins, *tevcnh* ein Wissen von den Gründen des Tuns.

dem neuzeitlichen Umbruch gründende Wissenschaft zu begreifen ist, der hier in Rede stehende Raum, sei es der Newtonsche oder der Einsteinsche, in der *neuzeitlichen Begrifflichkeit* aufzufassen ist.

5. Fazit

Zusammenfassend ergibt sich:

- Newtonscher wie Einsteinscher Raumbegriff sind als Elemente einer physikalischen Theorie bestimmt. Beide Theorien beruhen auf Relativitätsprinzipien. Sie unterscheiden sich durch die konkrete Gestalt dieser Prinzipien. Ohne Relativitätsprinzip gibt es keine Physik. Relativitätsprinzipien sind - wie Cassirer dargestellt hat - Objektivierungsprinzipien. (Klassische Mechanik und Relativitätstheorie unterscheiden sich nicht - wie im Eingangszitat behauptet - durch ihren epistemologischen Status.)
- Die Entwicklung von der Newtonschen zur Einsteinschen Raum-Theorie ist durch eine Reduktion (nicht Liquidierung) des quasi-apriorischen Anteils der Physik gekennzeichnet. Apriorität des Raumes (bezüglich einer physikalischen Theorie) heißt: Möglichkeit und Gestalt der Messung. Den physikalischen Raum als apriorisch anzusehen bedeutet, die Existenz von (*gegenständlichen* und *geistigen*) Meßmitteln als notwendige Voraussetzung der Physik zu begreifen.³⁷ (Kants Frage "Wie ist Erfahrung möglich?" muß immer, bei jedem Entwicklungsstand der Naturwissenschaft, beantwortet werden. Hieraus ergibt sich die Unterscheidung zwischen einer Objekt- und einer Mittelsicht auf die Geometrie.)
- Durch die Entwicklung von der Newtonschen zur Einsteinschen Raum-Theorie wurde der Sinn, die Funktion des physikalischen Raumes erkannt.

Trotz dieses an sich klaren Sachverhalts gibt es viele Mystifizierungen. Es liegt dies sehr weitgehend an der *Lesart physikalischer Schriften* (Newtons *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* ist ein Physikbuch), an der Lesart zum einen durch das gewöhnliche Bewußtsein, zum anderen durch Philosophen.

Zu ersterem sei hier kurz nur gesagt: Popularisierung, sei es die von Fachwissenschaften oder die eines philosophischen Konzepts, läuft immer Gefahr zu verfälschen - abhängig von der Ausrichtung des Interesses und der vermeintlichen Bekanntheit. So läßt man sich bezüglich des Elektrons oder des Energiebegriffs schon noch belehren. Aber Raum und Zeit glaubt jeder zu kennen. (Das ist auch der Grund, weshalb Planck, dessen wissenschaftliche Leistung ebenso revolutionierend war wie die Einsteins, weniger mystifiziert wird als Einstein.)

Zu zweiterem: Physikalische Texte sind nicht philologisch zu erschließen, son-

³⁷ Vgl. z.B. R. Wahsner, Erkenntnistheoretischer Apriorismus und neuzeitliche Physik, a.a.O.

³⁸ Bereits Newton hatte diese Notwendigkeit erkannt. Zu Beginn des III. Buches, des Buches

dern nur über das Verständnis des *physikalischen* Sinns und Gehalts.³⁸ Philosophen lesen im allgemeinen z.B. bei Newton das "Scholium generale" und die einleitenden Erläuterungen, entwickeln die Prinzipien aber nicht - genau wie Newton es befürchtet hat.

Wegen dieses Vorgehens besteht bis heute die Meinung, klassische Mechanik und mechanistisches Weltbild seien dasselbe. Das heißt: Man identifiziert eine physikalische Theorie und eine spezifische philosophische Rezeption dieser Theorie.

Notwendig ist jedoch das Verständnis des fachwissenschaftlichen Gehalts. Die spezifische Aufgabe der Philosophie ist die Untersuchung des epistemologischen Status der naturwissenschaftlichen Theorien.

Nun ist es - wie Reichenbach einmal schrieb - ein (oftmals allerdings auch von namhaften Fachwissenschaftlern geteilter) Irrtum, eine allgemeinverständliche Darstellung des Faches für die Philosophie des Faches zu halten oder auch den Glauben des Begründers einer fachwissenschaftlichen Theorie, wie er zu seiner Theorie gekommen ist, als die Philosophie dieser Theorie auszugeben. Der Glaube des Physikers gehört jedoch - so Reichenbach - in die Psychologie des Entdeckens. Notwendig aber ist die logische, erkenntnistheoretische, metaphysische Analyse der fertigen Theorie einschließlich der Beziehungen, die ihre Gültigkeit garantieren - und zwar unabhängig von deren Interpretation durch deren Schöpfer.³⁹

Der Philosophie obliegt es vielmehr, die Prinzipien aufzudecken, die die von den positiven Wissenschaften in stetem Zusammenhang mit der Erfahrung gefundenen Resultate voraussetzen. Diese Ergründung ist dies deshalb erforderlich, weil es nicht nur für die Wissenschaftstheorie, sondern auch für die Philosophie schlechthin kein anderes Verfahren gibt, um festzustellen, welches die in der Erkenntnis tatsächlich angewandten Prinzipien sind.⁴⁰

Wenn man Newtons oder Einsteins erkenntnistheoretische Äußerungen bewerten will, so muß man berücksichtigen, daß sie Physiker waren, nicht Philosophen.

"Über das Weltsystem" schreibt er: Ich hatte "das dritte Buch in populärer Form geschrieben, damit es von mehreren gelesen würde. Diejenigen aber, welche die vorausgesetzten Prinzipien nicht hinreichend eingesehen haben, würden die Kraft der Folgerungen nicht fassen und die Vorurteile nicht ablegen, an welche sie sich seit vielen Jahren gewöhnt haben. Aus diesem Grunde habe ich, damit die Sache nicht in einen Streit hineingezogen werde, die Summe jenes Buches nach mathematischer Weise in Sätze übertragen, damit dieselben nur von denjenigen gelesen würden, welche die Prinzipien vorher entwickelt haben." (Vgl. I. Newton, *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, a.a.O., S. 379.) Kommentierend zu dieser Problematik siehe: H.-H. v. Borzeszkowski und R. Wahsner, *Die Mechanisierung der Mechanik. Rezeption und Popularisierung der klassischen Mechanik durch Voltaire*, in: *Newton-Studien*, Berlin 1978; dies., *Newton und Voltaire*, a.a.O.; dies., *Noch einmal über das Bedürfnis der Naturwissenschaften nach Philosophie*, in: *Dialektik 5. Darwin und die Evolutionstheorie*, hg. von K. Bayertz, B. Heidtmann und H.-J. Rheinberger, Köln 1982, S. 170-179.

³⁹ Vgl. H. Reichenbach, *Die philosophische Bedeutung der Relativitätstheorie*, in: Hans Reichenbach., *Werke*, a.a.O., Bd. 3, Braunschweig 1979, S. 321.

⁴⁰ Vgl. H. Reichenbach, *Relativitätstheorie und Erkenntnis a priori*, in: Hans Reichenbach, *Werke*, a.a.O., Bd. 3, a.a.O., S. 263.

Man muß ihre epistemologischen Formulierungen stets in Verbindung mit dem sehen, was sie wirklich gemacht haben. Ihr Wortgebrauch ist häufig philosophisch inkorrekt oder unsicher, aber sie meinen etwas sehr Bestimmtes und oftmals Tiefsinniges. Das aber ist eben nur in Verbindung mit der Arbeit, die sie wirklich geleistet haben und auf die sich ihre Äußerungen auch beziehen, herauszufinden.

Die hier eingeforderte Unterscheidung zwischen einer physikalischen Theorie und einer ihrer philosophischen oder weltanschaulichen Rezeptionen betrifft den Unterschied zwischen einer Tat und dem Bewußtsein dieser Tat.

Dies bedenkend wird klar: Einstein stürzte nicht das Newtonsche Weltbild, sondern er trug - im Zusammenspiel mit vielen anderen - dazu bei, die mechanistische Weltbetrachtung zu stürzen resp. ins Wanken zu bringen. Auch hat Einstein die Newtonsche Mechanik nicht überwunden oder als ungültig bzw. falsch nachgewiesen, sondern er hat - im Zusammenspiel mit anderen Entwicklungen - auf dem von ihr geschaffenen Fundament die Physik über die Mechanik hinaus weiterentwickelt.

Bibliographie

- BORZESZKOWSKI, H.-H. v. (1992): "Kantscher Raumbegriff und Einsteins Theorie", *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 40, pp. 36-42.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1978): "Die Mechanisierung der Mechanik. Rezeption und Popularisierung der klassischen Mechanik durch Voltaire", *Newton-Studien*, Berlin, Akademie-Verlag, pp. 19-57.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1979): "Erkenntnistheoretischer Apriorismus und Einsteins Theorie. Einstein in seiner Beziehung zu Newton und Kant", *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 27, pp. 213-222.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1980): *Newton und Voltaire. Zur Begründung und Interpretation der klassischen Mechanik*, Berlin, Akademie-Verlag.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1980a): "Die Notwendigkeit der Philosophie für die Naturwissenschaft", in Heidtmann (ed.), *Dialektik 1. Beiträge zu Philosophie und Wissenschaften. Orientierungen der Philosophie*, Köln, Pahl-Rugenstein, pp. 56-80.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1982): "Noch einmal über das Bedürfnis der Naturwissenschaften nach Philosophie", in Bayertz, Heidtmann und Rheinberger (eds.), *Dialektik 5. Beiträge zu Philosophie und Wissenschaften. Darwin und die Evolutionstheorie*, Köln, Pahl-Rugenstein, pp. 170-179.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., und R. Wahsner (1989): *Physikalischer Dualismus und*

- dialektischer Widerspruch*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., and R. Wahsner (1995): "Mach's Criticism to Newton and Einstein's Reading of Mach: The Stimulating Role of Two Misunderstandings", in Barbour and Pfister (eds.), *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity* (Einstein Studies, vol. 6), Boston-Basel-Berlin, Birkhäuser, pp. 58-66.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., and R. Wahsner (2004): "Die Natur technisch denken? Zur Synthese von *tevcnh* und *fuvsj*" in der Newtonschen Mechanik oder das Verhältnis von praktischer und theoretischer Mechanik in Newtons Physik", in Klein (ed.), *Wiener Jahrbuch für Philosophie XXXV/ 2003*, Wien, Braumüller, pp.135-168.
- BORZESZKOWSKI, H.-H. v., and R. Wahsner (2004a): "Infinitesimalkalkül und neuzeitlicher Bewegungsbegriff oder Prozeß als Größe", in Schneider (ed.), *Jahrbuch für Hegelforschung 2002/2003*, Sankt Augustin, Academia, pp. 197-271.
- CASSIRER, E. (1990): *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- CASSIRER, E. (1994): *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeit*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- COHEN, H. (1888): "Jubiläums-Betrachtungen", *Philosophische Monatshefte*, 24, pp. 257-291;
- EINSTEIN, A. (1920): *Äther und Relativitätstheorie*, Berlin, Springer.
- EINSTEIN, A. (1979): "Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten", in Schilpp (ed.), *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Braunschweig-Wiesbaden, Vieweg, pp. 493-511.
- EINSTEIN, A. (1989): "Geometrie und Erfahrung", in Einstein, *Mein Weltbild*, Frankfurt a.M.-Berlin, Ullstein, pp. 119-127.
- EINSTEIN, A. (1989a): "Was ist Relativitätstheorie?", in Einstein, *Mein Weltbild*, Frankfurt a.M.-Berlin, Ullstein, pp. 127-131.
- EINSTEIN, A. (1989b): "Das Raum-, Äther- und Feldproblem der Physik", in Einstein, *Mein Weltbild*, Frankfurt a.M.-Berlin, Ullstein, pp. 138-147.
- EINSTEIN, A. (1990): "Isaac Newton", in Einstein, *Aus meinen späten Jahren*, Berlin, Ullstein, pp. 208-213.
- EINSTEIN, A., and L. Infeld (1987): *Die Evolution der Physik*, Hamburg, Rowohlt.
- HEGEL, G.W.F. (1986): *Vorlesungen über die Geschichte der Philosophie III*, in Hegel, *Werke*, auf der Grundlage der Werke von 1832-1845 neu edierte Ausgabe, Frankfurt a.M., Suhrkamp, Bd. 20.
- HELMHOLTZ, H. v. (1903): Über den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome, in Helmholtz, *Vorträge und Reden*, Bd. 2, Vieweg, pp. 1-31.

- HOLZ, H.H. (1983): *Dialektik und Widerspiegelung*, Köln, Pahl-Rugenstein.
- LANGE, L. (1886): *Die geschichtliche Entwicklung des Bewegungsbegriffs und ihr voraussichtliches Endergebnis. Ein Beitrag zur historischen Kritik der mechanischen Prinzipien*, Leipzig, Engelmann.
- LASSWITZ, K. (1888): "Zum Problem der Continuität", *Philosophische Monatshefte*, 24, pp. 9-36.
- LASSWITZ, K. (1890): *Geschichte der Atomistik*, Hamburg-Berlin, L. Voss.
- NEUMANN, C. (1870): *Über die Principien der Galilei-Newtonschen Theorie*, Leipzig, Teubner.
- NEWTON, I. (1872): *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, hg. von J.Ph. Wolfers, Berlin, (Minerva).
- NEWTON, I. (1952): *Opticks*, with a foreword by Albert Einstein, an introduction by Sir Edmund Whittaker, a preface by I. Bernhard Cohen, Dover 1952, Dover Publ.
- POINCARÉ, H. (1906): *Wissenschaft und Hypothese*, Leipzig, Teubner.
- REICHENBACH, H. (1977): Die Philosophie der Raum-Zeit, in Reichenbach, *Gesammelte Werke*, Bd. 2, Braunschweig, Vieweg.
- REICHENBACH, H. (1979): "Relativitätstheorie und Erkenntnis a priori", in Reichenbach, *Gesammelte Werke*, Bd. 3, Braunschweig, Vieweg, pp. 191-302.
- REICHENBACH, H. (1979a): "Die philosophische Bedeutung der Relativitätstheorie", in Reichenbach, *Gesammelte Werke*, Bd. 3, Braunschweig, Vieweg, pp. 318-337.
- WAHSNER, R. (1981): *Das Aktive und das Passive. Zur erkenntnistheoretischen Begründung der Physik durch den Atomismus - dargestellt an Newton und Kant*, Berlin, Akademie-Verlag.
- WAHSNER, R. (1992): "Erkenntnistheoretischer Apriorismus und die neuzeitliche Physik", *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 40, pp. 24-35.
- WAHSNER, R. (1994): Apriorische Funktion und aposteriorische Herkunft. Hermann von Helmholtz' Untersuchungen zum Erfahrungsstatus der Geometrie, in Krüger (ed.), *Universalgenie Helmholtz. Rückblick nach 100 Jahren*, Berlin, Akademie-Verlag, pp. 245-259.
- WAHSNER, R. (1995): "Das notwendige Dritte", in Robinson (ed.), *Proceedings of the Eighth International Kant Congress. Memphis*, Volume II, Part 1, Milwaukee, Marquette University Press, pp 389-396.
- WAHSNER, R. (1996): *Zur Kritik der Hegelschen Naturphilosophie. Über ihren Sinn im Lichte der heutigen Naturerkenntnis*, Frankfurt a.M.-Berlin-Bern-NewYork-Paris-Wien, Lang.
- WAHSNER, R. (2002): *Naturwissenschaft*, Bielefeld, transcript.
- WAHSNER, R., und H.-H. v. Borzeszkowski (1992): *Die Wirklichkeit der Physik. Studien zu Idealität und Realität in einer messenden Wissenschaft*, Frankfurt

a.M.-Berlin-Bern-NewYork-Paris-Wien, Lang.

WAHSNER, R., und H.-H. v. Borzeszkowski (1997): "Anmerkung 12", in Voltaire, *Elemente der Philosophie Newtons/ Verteidigung des Newtonianismus/ Die Metaphysik des Neuton*, hg. und mit Anmerkungen versehen von R. Wahsner und H.-H. v. Borzeszkowski, Berlin, de Gruyter, pp. 360-363.

WEYL, H. (1968): "Feld und Materie", in Weyl, *Gesammelte Abhandlungen*, Bd. 2, Berlin-Heidelberg-NewYork, Springer, pp. 237-259.

Renate Wahsner
Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte
Wilhelmstr. 44
D-10117 Berlin, Germany
wahsner@mpiwg-berlin.mpg.de