



Dr. Annette Schlemm - Physikerin und Philosophin

Online: <http://philosophenstuebchen.wordpress.com>

<http://www.thur.de/philo>

Mail: [contact@zw-jena.de](mailto:contact@zw-jena.de)

---

# Die vermessene Raum-Molluske

## Der Raum als Erkenntnismittel und -objekt

Die Raumvorstellung – fundamental und doch so unbestimmt.....	2
In- oder Homogenität? .....	2
Sein oder Schein? .....	3
Eleaten und Atomisten.....	3
René Descartes.....	3
Absolut oder relativ? .....	4
Isaac Newton .....	4
Gottfried Wilhelm Leibniz.....	7
Empirisch oder a priori? .....	8
Nichtklassische Vorstellungen zur Geometrie des Raumes .....	10
Nichteuklidische und mehrdimensionale Geometrien .....	10
Zum Verhältnis zwischen Mathematik und Physik .....	12
Physikalische Räume im 19. Jahrhundert.....	13
Die Räume der Relativitätstheorien.....	13
Relativitätsprinzipien – Invarianzen - Raumvorstellungen.....	13
Vor Galilei und Newton.....	13
Galilei-Newton.....	14
Spezielle Relativitätstheorie.....	14
Allgemeine Relativitätstheorie.....	16
Relativistische Raumkonzepte.....	17
Wie viele Dimensionen hat die Welt?.....	17
Zur Interpretation der Einsteinschen Feldgleichung der allgemeinen Relativitätstheorie .....	19
Die Raummolluske .....	21
Die Messbarkeit im Riemannschen Raum.....	21
Was ist real?.....	24
Kosmologie .....	25
Die Aufhebung des Raumes im Machschen Prinzip .....	25
Geometrodynamik – alles ist Raum .....	28
String- und Looptheorien .....	29
Stringtheorie .....	29
Prägeometrische Looptheorie.....	29
Philosophie der Raumzeit .....	31
Mathematik-Physik-Welt.....	31
Physik als Erkundung der Veränderbarkeit .....	32
Der Doppelcharakter des Raums als Erkenntnisobjekt und –mittel.....	33
Der Raum als passives und aktives Prinzip .....	36
Die Raumzeit als Struktur von Bewegungsmöglichkeiten .....	38

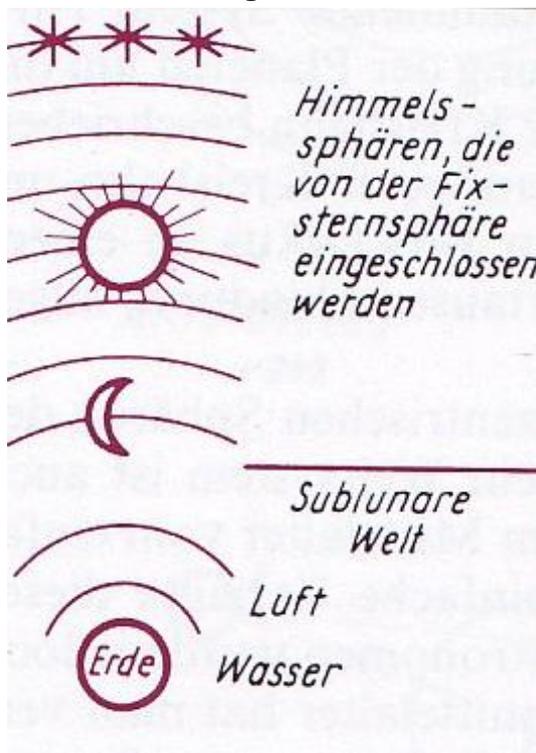
Ausblick.....	39
Literatur .....	39

## Die Raumvorstellung – fundamental und doch so unbestimmt

Die Raumvorstellung ist für jede Person fundamental, denn seit sie sich als Baby von ihrer Umgebung zu unterscheiden gelernt hat, gibt ihr der jeweilige Umgebungsraum ihre Bewegungsmöglichkeiten vor. Spätestens in der Schule lernt sie dann, dass nicht alle Raumwahrnehmungen den „wirklichen Raum“ wiedergeben. Sie lernt, ein Maßband zu verwenden und stellt erstaunt fest, dass 10 m auf einer horizontalen Strecke in die Ebene hinaus viel kürzer erscheinen als dieselbe mit dem Maßband gemessene Strecke in die Tiefe. Bei einem Adler ist es übrigens umgekehrt – seine Wahrnehmung verkürzt die Höhenmeter im Vergleich zur gleich langen horizontalen Strecke (nur verwirrt ihn das weniger, denn er benutzt kein Maßband).

Das menschliche Wesen jedoch wächst in eine Kultur hinein, in der es eine bestimmte Raumvorstellung quasi mit der Muttermilch aufnimmt. Nicht nur die angeborene gehirnphysiologische Wahrnehmungsverarbeitung im Gehirn bestimmt seinen Raumeindruck, sondern vor allem die kulturell konstituierte und vermittelte Vorstellung vom Raum.

### In- oder Homogenität?



So war es für die Mitmenschen von Aristoteles völlig selbstverständlich, zwischen dem natürlichen und dem himmlischen Raum sauber zu unterscheiden. Während in der himmlischen Welt vollkommene Ordnung und Harmonie, sichtbar in vollkommenen Kreisbewegungen, herrscht, war die irdische Welt von Veränderung und Bewegung gekennzeichnet, wobei hier zwischen „natürlichen Bewegungen“ (schwere Körper nach unten, leichte Körper nach oben) und „naturwidriger“, d.h. erzwungener Bewegung unterschieden wurde.

Abbildung 1: Zweiwelten-Vorstellung des Aristoteles (aus: Simoni 2001: 84)

Nur wer wenigstens ansatzweise die frühere Selbstverständlichkeit dieser Vorstellung nachfühlt, kann die Leistung des Nicolaus von Cues würdigen, der dem gesamten Raum erstmalig Einheitlichkeit und Gleichartigkeit, d.h. Homogenität zusprach. Als sich dann Wissenschaftler daran machten, die Bewegung von Planeten zu erklären, veränderte sich die Raumvorstellung jeweils mit den Erklärungsansätzen. Magnetische Kraftwirkungen bei Kepler oder mechanische Wirbel bei Descartes füllten dabei den Raum.

### **Sein oder Schein?**

Dabei blieb es in der Debatte auch oft unbestimmt, in welcher Weise der Raum überhaupt real sein könnte. Eine wichtige Ausgangsfrage war die nach dem Widerspruch der Bewegung:

Das Bewegte bewegt sich weder in dem Raume, in dem es sich befindet, noch in dem es sich nicht befindet. (Zenon nach Diels 1922: 175).

### **Eleaten und Atomisten**

Die Eleaten zogen aus den Zenonschen Paradoxa der Bewegung den Schluss, dass es Bewegung gar nicht wirklich gibt. Bewegungen im Raum sind nur Schein, denn wenn es sie gäbe, würde das Denken in Widersprüche geführt. Für Heraklit, der im Gegensatz dazu in der Realität nur Bewegtheit sah, war Bewegung zwar wahrhaft real, aber dafür nicht erkennbar. Im Atomismus wurde ein anderer Ausweg aus der Widersprüchlichkeit der Bewegung gefunden: Wenn neben den sich bewegenden Atomen noch ein leerer Raum als real existierend angenommen wird, wird die Bewegung widerspruchsfrei denkbar.

Alle Natur, wie sie ist an sich, muß also bestehen  
aus zwei Dingen allein. Denn Körper nur gibt es und Leeres,  
welches die Körper umfängt und Bahn schafft jeder Bewegung. (Lukrez, Natur: 34)

Auf diese Begründung der Existenz des Raumes als Bedingung der Möglichkeit der Bewegung verweist später auch Einstein, denn „... über Bewegung kann man nur in Relation zu einem Bezugskörper sprechen“ (Einstein 1919a: 13f.). Auch die Newtonsche Physik beruht auf diesem Gedanken. Vorher sei jedoch kurz daran erinnert, dass einer der anderen Hauptbegründer des neuzeitlichen Denkens eine völlig andere Raumvorstellung vertrat.

### **René Descartes**

Für René Descartes waren Raum, bzw. Ausdehnung und Körper, bzw. Materie identisch (Descartes Prinz. II: 4). Aufgrund dieser Identifizierung von Raum und Materie gibt es keinen „leeren“ Raum außerhalb des Körpers. Das verwirrt vielleicht diejenigen, die meinen, unsere gewohnte Vorstellung von Bahnbewegungen im als ansonsten leer anzusehenden „cartesischen Koordinatensystem“ entspräche tatsächlich der Raumvorstellung des Descartes.

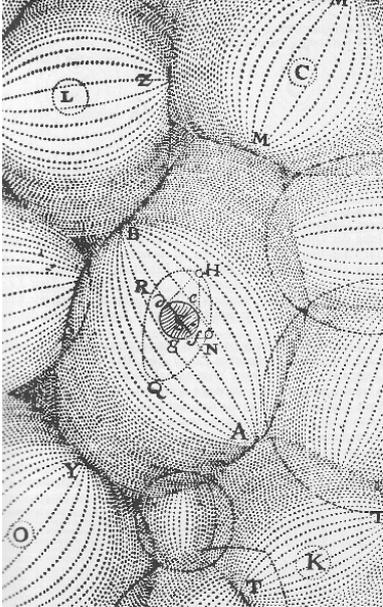


Abbildung 2: Die Weltwirbel nach Descartes (aus: Simoni 2001: 220)

Descartes lehnte den Gedanken eines leeren Raumes übrigens nicht primär aus physikalischen Gründen ab, sondern er wollte mit dem leeren Raum den okkulten Kräften und animistischen Vorstellungen ihren Platz und Rückzugsort nehmen (Lojacono 2001: 47).

Diese Ablehnung des Wunderglaubens verführte Descartes dazu, überall mechanische Ursachen und Wirkungszusammenhänge zu sehen und nachweisen zu wollen. Nur direkte Wirkungen von Körpern auf Körper (Stöße) in einem körperlichen Medium sollten wirklich sein. Descartes versuchte mit dieser Vorstellung eine allgemeine hydromechanische Wirbel-Welterklärung zu begründen.

### Absolut oder relativ?

Die Frage nach der realen Existenz eines leeren Raumes neben den materiellen Körpern stellt sich auch beim Konflikt zwischen Newton und Leibnitz, bei dem Newton als Vertreter eines absoluten und Leibniz als Vertreter des relationalen Raumbegriffs betrachtet werden.

#### Isaac Newton

Für Newton ist es wichtig, zwischen nur scheinbaren Bewegungen und wahren Bewegungen unterscheiden zu können. Als wahre Bewegungen sah er nur jene an, die eine Bewegung gegenüber dem absoluten Raum zeigen:

Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußern Gegenstand stets gleich und unbeweglich. (Newton Prinz.: 94)

Newton folgt damit dem atomistischen „Trick“, Bewegungen widerspruchsfrei denken zu können. Allerdings unterscheidet sich sein Begriff eines Körpers in entscheidender Weise vom Atombegriff des frühen Atomismus. Während Atome als gegeneinander isolierte (bzw. isolierbare) Körperchen vorgestellt wurden, sind Newtons Körper nicht ohne ihre Wechselwirkungsfähigkeit denkbar. Außerdem beruht Newtons Theorie auf dem *Trägheitsgesetz*<sup>1</sup>, dessen erste Darstellung Galilei zugesprochen wird. Der Bewegungszustand wird immer in Bezug zu einem Bezugsgegenstand bestimmt, der im

<sup>1</sup> Körper verharren ohne die Einwirkung äußerer Kräfte in ihrem Bewegungszustand (der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung).

Vergleich zum sich bewegenden Gegenstand als ruhend angesehen wird. Am einfachsten wäre es nun, für den Bezugsgegenstand die Geschwindigkeit Null zu fordern. Stöße mit dem Impuls  $mv$  würden dann den Bewegungszustand ändern (also dem Körper mit der Ruheschwindigkeit Null eine Geschwindigkeit ungleich Null verleihen). Mit einer solchen Vorstellung der Stoßmechanik gelang es jedoch weder Descartes noch Leibniz (und auch keinem Späteren), eine geschlossene Theorie mechanischer Bewegungen aufzustellen. Die Entwicklung einer solchen Theorie gelang erst Newton – aber auf der Grundlage einer anderen Unterscheidung von „Standardbewegung“ und „wahrer Bewegung“, nämlich jener des Trägheitsgesetzes. Dieses geht aus von der Beobachtung, dass eine Bewegung in oder auf einem sich geradlinig-gleichförmig bewegenden Körper sich so verhält, als befände er sich in einem ruhenden Raum. Galilei erwähnte die Erfahrung, dass ein vom Mast eines Schiffes herunterfallender Gegenstand exakt am Fuß des Mastes aufkommt und nicht das Schiff während dessen unter dem fallenden Gegenstand davon fährt. Heutzutage denken wir z.B. eher an eine Fliege im fahrenden Auto, die nicht an die Rückwand gequetscht wird. Als „Standard“ wird ein Bewegungszustand angesehen, bei dem die Geschwindigkeit selbst konstant bleibt (d.h., es findet auch keine Richtungsänderung statt), aber nicht Null sein muss. Bewegungen entsprechend dem „Standard“ bedürfen dabei keiner weiteren Erklärung – erst wenn sich der Bewegungszustand so ändert, dass eine Beschleunigung (zahlen- oder richtungsgemäße Geschwindigkeitsänderung) auftritt, wird dies als Wirkung von Kräften angesehen.

Diese Sichtweise fragt nicht mehr nur nach einer angemessenen Beschreibung der Bewegungen, wie sie beispielsweise bei der Auswahl verschiedener mathematischer Koordinatensysteme eine Rolle spielt. Für die Darstellung rotierender Bewegungen mögen Kugelkoordinaten sinnvoller sein als geradlinige. Befürworter einer relativistischen Sichtweise behaupten sogar, die geozentrische und die heliozentrische Darstellung des Planetensystems sei eigentlich gleichwertig<sup>2</sup> – es komme nur auf die Bequemlichkeit bei der Vereinfachung von Berechnungen an. Hier ist aber zu unterscheiden zwischen den *mathematischen Koordinatensystemen*, bei denen diese Neutralität gegenüber der Realität tatsächlich gegeben ist, und den *physikalisch bedeutsamen Bezugssystemen*. Es geht um die Unterscheidung von sinnlich wahrgenommenen (und mathematisch formal beliebig darstellbaren) Bewegungen und den Bewegungen, die „wahr“ in dem Sinne sind, dass sie mit wirklichen Wirkfähigkeiten, d.h. Kräften in der Natur verbunden sind. Die Physik ist damit nicht mehr nur eine (geometrisch- kinematisch) beschreibende Wissenschaft, sondern eine, die sich (dynamisch) auf Kräfte als Bewegungsursachen bezieht. Das physikalische Bezugssystem („Standard“) ist dann das

---

<sup>2</sup> So formulierte beispielsweise Ernst Mach, „daß das Weltsystem uns nur *einmal* gegeben, die ptolemäische oder kopernikanische Auffassung aber *unsere* Interpretation, aber beide gleich wirklich sind“ (Mach 1921: 222). Zu Mach siehe von Borzeszkowski, Wahsner 1989: 49ff..

(kräftefreie) Vergleichssystem, auf das kraftverursachte, d.h. die „wahren“ Bewegungen bezogen werden. Weil das kräftefreie Bezugssystem nicht wirklich existiert (wo wären alle Kraftwirkungen ausgeschaltet?), ist die Vorstellung eines solchen natürlich eine Abstraktion, aber sie ist eine „objektive Abstraktion“ (Wahsner 1978: 42), weil sie sich auf objektive Wirkungsfähigkeiten, d.h. Kräfte bezieht.<sup>3</sup> Bereits Newton erkannte, dass die Physik nur dann angemessen physikalische Phänomene erklären kann, wenn sie einerseits dynamische Kraftwirkungen untersucht (die er als „aktive Prinzipien“ bezeichnete), dass diese aber andererseits auf passive Prinzipien wie die Trägheit bezogen sein müssen (Newton Opt.: 165). Diese Unterscheidung von aktiven (Kraft-) und passiven (den „Standard“ bestimmenden) Prinzipien zeigt sich speziell in der Unterscheidung von physikalischen Wechselwirkungen (Dynamik) und der Raum-Zeit-Struktur, die von Borzeszkowski und Wahsner (1989) „Dualismus“ nennen. Dabei ist jeweils das, was das Bezugssystem ausmacht (passives Prinzip) nicht selbst Gegenstand der dynamischen Theorie, sondern ihr vorausgesetzt. Die in der Erkenntnis gesuchte Übereinstimmung von Theorie und Wirklichkeit ist dann jeweils nicht nur für die Theorie allein, sondern immer im Zusammenhang mit ihren Voraussetzungen zu überprüfen.

Spätestens auf dieser Stufe der Untersuchungen haben wir uns auch von der rein individuellen Wahrnehmung entfernt. Dass wir das Trägheitsprinzip als „Bewegungsstandard“ verwenden, kann zwar auch individuell im Gedankenexperiment nachvollzogen werden (der Stein, der vom Mast des fahrenden Schiffes fällt; die Fliege im Auto), aber die daraus entstehenden Grundbegriffe der Physik (z.B. Inertialsystem, Bestimmung von Größen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung) sind gesellschaftlich erzeugte Erkenntnismittel, die darauf verweisen, dass die *physikalische Erfahrung* nicht primär individuelle Sinnlichkeit betrifft, sondern Moment *gesellschaftlicher Praxis* ist.

Schauen wir uns nun das Bezugssystem als Voraussetzung für die Newtonsche Mechanik genauer an. Der Ausgangspunkt ist das Trägheitsgesetz: Körper verharren ohne die Einwirkung äußerer Kräfte in ihrem Bewegungszustand (der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung). Der dementsprechende Raum ist der dreidimensionale euklidische Raum:

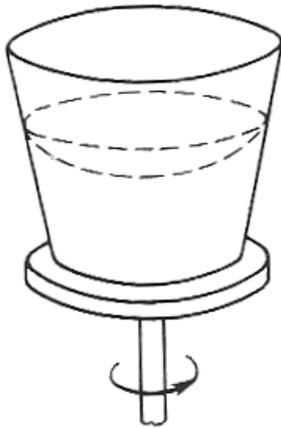
Dieser Raum kann als spezifisch präparierter Körper angesehen werden, der es gestattet, die geradlinig gleichförmige Bewegung meßgerecht zu definieren. (von Borzeszkowski, Wahsner 1989: 34).

Diese Begründung liegt also dem absoluten Raum bei Newton zugrunde, den Bloch bildhaft kennzeichnet als „erzstabile[n] Weltkoffer, worin die einzelnen Dinge, ob bewegt oder ruhend, eingepackt sind“ (Bloch EM: 108).

---

<sup>3</sup> Außerdem kann gezeigt werden, dass alle anderen Unterscheidungen – oder der Verzicht darauf – nicht zu einer funktionsfähigen physikalischen Mechanik ausgearbeitet werden können (vgl. von Borzeszkowski, Wahsner 1989: 28; Koyré 1968: 12). Vgl. auch den Abschnitt zu Leibniz hier.

Newton selbst schrieb diesem absoluten Raum durchaus eine reale Wirkungsfähigkeit zu.



Dazu verwendete er das mentale Modell eines rotierenden Eimers, in dem sich die Wasseroberfläche wölbt (Newton Prinz: 99). Die auftretenden Fliehkräfte versteht er als wirkende Ursachen und die Wölbung zeigt die wahre Bewegung des Wassers an. In dieser Weise zeigt Newton die objektive Zusammengehörigkeit von absolutem Raum (bzw. Trägheitskräften) und der Beschleunigung (hier: Rotation). Beschleunigung ist so gegen das Raumganze definiert, wie es auch der Erfahrung entspricht.

Abbildung 3: Der Eimerversuch nach Newton (aus: Simoni 2001: 269)

Ernst Mach setzte dieser Überlegung von Newton den Gedanken entgegen, dass die beschriebene Wölbung nicht durch die Trägheit gegenüber dem absoluten Raum hervorgerufen sei, sondern durch ferne Himmelskörper verursacht sei (Mach 1883/1921: 227). Allerdings setzt eine solche Verursachung eine neue Art von Fernwirkungskräften voraus, was eine äußerst problematische und nicht bestätigte Annahme ist.

### **Gottfried Wilhelm Leibniz**

Neben dem bekannten Streit um die Priorität bei der Ausarbeitung neuer mathematischer Methoden zwischen Newton und Leibniz entstanden auch scharfe Auseinandersetzungen um das Weltbild. Leibniz verteidigte weiterhin die Wirbeltheorie nach Descartes, die von Huygens weiter entwickelt worden war. Allerdings gelang es Leibniz und seinen Mitstreitern nicht, alle drei Keplerschen Gesetze in ihre Physik einbauen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Leibnizens Argumente nicht primär physikalisch, sondern philosophisch waren. Nicht, weil ein Weltbild mit leerem, absolutem Raum nicht der Wirklichkeit entspräche, oder falsche Erkenntnis produzieren würde, lehnte er es ab – sondern weil das Übermaß an Leeren gegenüber der Materie den in der Materie wirkenden Gott zu gering schätzen würde. Ganz explizit schließt Leibniz den Gedanken aus, dass der absolute Raum für die Messung, bzw. Feststellbarkeit von Bewegung notwendig sei. Er denkt nicht über die Physik als Mittel zur Mess- und Denkbarekeit von physikalischen Bewegungen nach, sondern über den Standpunkt Gottes, für den es lächerlich wäre anzunehmen, dass „Gott, der Ursprung aller Dinge, ein Sensorium nötig hätte“ (zit. in Simoni 2001: 271). Hier vertritt Leibniz eine philosophische Sichtweise. Eine andere seiner Vorlieben ist die Bevorzugung der mathematischen Sichtweise, die nicht mehr nach einem erfahrungsmäßigen Bezug zur Wirklichkeit fragt, sondern aus einem perfekten Kalkül heraus selbstständig alle

Wahrheiten ableiten will. Die physikalischen Überlegungen von Leibniz beruhen stets auf einer Verbindung von philosophischen und mathematischen Überlegungen und schließen das Moment der Erfahrung und der Messbarkeit systematisch aus, wodurch für ihn die darauf bezogene Funktion des absoluten Raumes verzichtbar wird.

Wie wir sahen, kann man die Frage nach dem Raum (passives Prinzip) nicht unabhängig von der Dynamik (aktives Prinzip) behandeln. Wenn wir Leibnizens Weltsicht physikalisch interpretieren, so bestehen wesentliche Unterschiede gegenüber Newton darin, dass Leibniz keine Fernwirkungen zuließ, dass er aufgrund seines Kontinuitätsprinzips keine plötzlichen, un stetigen Geschwindigkeitsveränderungen durch Stoß anerkannte und dass er annahm, die Größe  $mv^2$  (Energie) bliebe erhalten und nicht  $mv$  (Impuls).<sup>4</sup> All diese Annahmen führten dazu, dass es keine erfolgreiche „Leibnizsche Mechanik“ gibt, obgleich Leibnizens Kritik an der absoluten Raumvorstellung von Newton geschichtlich immer wieder aufgegriffen und über viele Irrungen und Missverständnisse hinweg produktiv weiter geführt wurde.

### **Empirisch oder a priori?**

In der Philosophie von Immanuel Kant bekam die alte Fragestellung nach der Wirklichkeit oder Scheinhaftigkeit des Raumes eine neue Fassung. Kant verallgemeinerte dabei den Status des Raumes aus den atomistischen und newtonschen Vorstellungen als Bedingung der Denk- und Vorstellbarkeit von Bewegung.

Kants Philosophie geht davon aus, dass die Dinge der Welt uns nicht „an sich“, nicht in ihrem Wesen, sondern nur in ihren Erscheinungen, zugänglich sind. Das bedeutet, dass wir sie immer nur nach Maßgabe unserer Erkenntnisfähigkeit erfassen können, niemals „so, wie sie ohne unsere Erkenntnis sind“.<sup>5</sup> Auch die räumlichen Beziehungen sind demnach nicht primär Eigenschaften der „Welt außer uns“, sondern die Raumvorstellung ist eine in uns selbst liegende Voraussetzung, empirische Erscheinungen überhaupt wahrnehmen zu können. In diesem Sinne ist der Raum eine „notwendige Vorstellung a priori<sup>6</sup>, die allen äußeren Anschauungen zu Grunde liegt“ (Kant KrV: 67, A 24).

---

<sup>4</sup> Leibniz hielt den Ausdruck  $mv^2$  für den Ausdruck für die Kraft; Descartes den Ausdruck  $mv$ . Erst im Newtonschen Begriffssystem kann der Leibnizsche als Ausdruck der Energie und jener von Descartes als Impuls verstanden werden, während bei Newton die Kraft die zeitliche Ableitung des Impulses ist (die Kraft ist hier nicht „Masse mal Geschwindigkeit“, sondern „Masse mal Beschleunigung“).

<sup>5</sup> Auch im dialektischen Materialismus wird der Erkenntnisprozess als niemals abgeschlossen angenommen, also niemals die „absolute Wahrheit“ (Lenin MuE: 116), das wäre die Erkenntnis der Dinge „an sich“, erreichbar. Er betont allerdings in optimistischerer Weise die Möglichkeit der „unendlichen Annäherung“, während bei Kant Agnostizismus folgen kann.

<sup>6</sup> a priori: vor aller Wahrnehmung (Kant KrV: 69, B 41).

Man kann sich niemals eine Vorstellung davon machen, daß kein Raum sei, ob man sich gleich ganz wohl denken kann, daß keine Gegenstände darin angetroffen werden. (ebd.)

Die Vorstellung des Raumes ist für alle möglichen äußerlichen Erfahrungen objektiv notwendig – insofern ist sie auch „real“. Aber ihr liegt nichts zugrunde, was mit den Dingen selbst zu tun hat, – insofern ist sie „ideal“ (ebd.: 72). Der Raum ist damit „a priori objektiv“ (ebd.: 72, A 28). Den Raum als a priori Form der Anschauung zu verstehen wendet sich einerseits gegen die Empiristen, die meinen, direkt aus der Erfahrung Kenntnis über die „Welt an sich“ (d.h. auch über den Raum an sich) erreichen zu können wie auch gegen die Rationalisten, die das Wissen von der Erfahrung abtrennen wollen (hier hätte die Raumvorstellung nichts mit wirklichen Verhältnissen zu tun).<sup>7</sup>

Kants Sichtweise erlaubt gar keine Fragestellung danach, ob es den Raum unabhängig von unserer Wahrnehmung gäbe. Er wird deshalb nicht aufgefasst als (ontologisch) real existierendes Behältnis aller Erscheinungen, sondern als epistemologische Bedingung des Wahrnehmens und Erkennens. Trotzdem ist die Raumvorstellung auch nicht beliebig willkürlich oder subjektiv, denn obwohl sie uns „a priori im Gemüte gegeben“ ist, enthält sie „Prinzipien der Verhältnisse“ der Gegenstände. (ebd.: 70) Erscheinungen sind Erscheinungen *von etwas* und dies geht in die Vorstellungen ein.<sup>8</sup>

Der Neukantianer Ernst Cassirer macht darauf aufmerksam, inwiefern diese a priori Voraussetzung die Grundlage der Newtonschen Physik ist. Leeres wird gebraucht, damit Bewegung denkbar wird.

Die Bewegung verlangt zu ihrer Darstellung das *Leere*: der leere Raum selbst aber ist kein sinnlich gegebenes, keine dingliche Wirklichkeit. (Cassirer 1910/1990: 221)

Damit entschlüsselt sich die Unterscheidung von Materie und Raum als Ermöglichung der Denkbarkeit der (widersprüchlichen) Bewegung.

---

<sup>7</sup> Die Frage, ob zuerst die Raumzeitvorstellung Erfahrung ermöglicht (Kant) oder ob die Raumzeitvorstellung selbst aus der Erfahrung stammt (Helmholtz, vgl. Hörz 1971: 268f.) erinnert ein wenig an die Henne-und-Ei-Frage. Seit wir wissen, dass die Raumzeitvorstellung eng mit den jeweiligen sich bewegenden Gegenständen verbunden ist, lässt sich die Einheit von angemessener Raumzeitvorstellung und konkret untersuchter Bewegungsform nicht mehr auftrennen in ein zeitliches oder logisches Nach- bzw. Nebeneinander.

<sup>8</sup> siehe vorige Fußnote: Raum und Zeit sind in modernen Theorien insofern a priori, als sie nicht direkt aus den dynamischen Grundgesetzen ableitbar sind, aber sie sind auch nicht willkürlich, sondern es müssen gerade solche Raumzeitkonzepte sein, die eine konkrete physikalische Erfahrung in diesem Gegenstandsbereich ermöglichen.

## Nichtklassische Vorstellungen zur Geometrie des Raumes

### Nichteuklidische und mehrdimensionale Geometrien

Bis ins 19. Jahrhundert hinein wurde die aus dem Altertum bekannte Bestimmung einer dreidimensionalen Geometrie nach Euklid als Beschreibung des realen Raums anerkannt. Euklids Axiomatik hatte nur einen kleinen Schönheitsfehler. Seine Geometrie wird durch ein Regelsystem definiert, bei dem 4 Axiome – die als selbstverständlich angesehen werden – vorausgesetzt werden müssen. Das 5. Axiom, das Parallelenaxiom, ließ sich aber nicht aus den anderen 4 Axiomen ableiten und lässt sich auch nicht so einfach als selbstverständlich annehmen. Das Parallelenaxiom ist auch äquivalent mit der Aussage, dass in einem Dreieck innerhalb dieser Geometrie die Summe aller Winkel  $180^\circ$  beträgt (wie im ersten Bild der Abbildung 4a gezeigt).

Bereits Ptolemäus hatte erkannt, dass drei Kreisbögen auf der Oberfläche einer Kugel Winkel zueinander bilden, deren Summe größer als  $180^\circ$  ist und bei der die Winkelsumme mit der Flächengröße des Dreiecks ansteigt (wie im zweiten Bild der Abbildung 4a). Aber diese Erkenntnis wurde nicht in das Fachgebiet der Geometrie eingeordnet, und deshalb nicht grundlegend diskutiert.

Im 19. Jahrhundert jedoch kamen unabhängig voneinander drei Mathematiker in unterschiedlichen Teilen Europas auf neue Gedanken: Carl Friedrich Gauß, Janós Bolyai und Nikolai I. Lobatschewski. Sie erkannten, dass das 5. Axiom der Euklidischen Geometrie, das Parallaxenaxiom, Alternativen besitzt. Während das Euklidische Parallelenaxiom fordert, dass es für jeden beliebigen Punkt, der nicht auf einer gegebenen Geraden liegt, genau eine Gerade durch diesen Punkt gibt, die die gegebene Gerade nicht schneidet, kann es in der hyperbolischen Geometrie für einen beliebigen Punkt, der nicht auf einer gegebenen Geraden liegt, unendlich viele Geraden geben, die diese Gerade nicht schneiden. Wie kann man sich nun ein Objekt vorstellen, für das eine solche Geometrie gilt? Gauß und auch Helmholtz nutzten eine Analogie: Stellen wir uns ein zweidimensionales Wesen vor, das sich jeweils auf der Oberfläche dieses Objekts bewegen und auch Kurvenlängen und Winkel messen kann. Dann wird ein solches Wesen auf der Oberfläche einer Kugel eine Winkelsumme ermitteln, die größer als  $180^\circ$  ist und auf der Oberfläche eines hyperbolischen Objekts eine Winkelsumme, die kleiner als  $180^\circ$  ist.

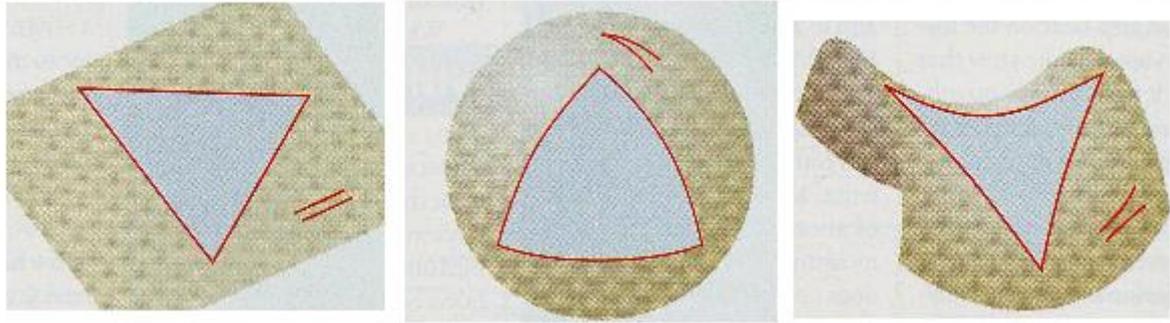


Abbildung 4a: Euklidische, elliptische<sup>9</sup> und hyperbolische Geometrie (auch Bucher, Sperger 2001: 38)

Bereits Gauß vermutete, dass unser Raum nicht unbedingt der Euklidischen Geometrie entsprechen müsse; er konnte es aber nicht praktisch klären und er veröffentlichte diese Gedanken deshalb nicht.



Abbildung 4b: Euklidische, elliptische und hyperbolische Raumvorstellungen (ebd.)

Eine andere Frage, die gleichzeitig von Mathematikern in die Debatte gebracht wurde, war die Frage der Dimensionalität. Diese Frage ist nicht mehr auf die Metrik einer Geometrie bezogen, sondern ist eine topologische Frage.

All diese neuen Ansätze, einerseits die Frage der Veränderung des Parallaxenaxioms und andererseits die einer möglichen Vieldimensionalität, untersuchte schließlich Bernhard Riemann in einer allgemeinen Theorie der n-dimensionalen Mannigfaltigkeit. Als Abstand zweier Punkte in solchen Räumen bestimmte er die **Metrik**, die sich aus der Verallgemeinerung des Satzes von Pythagoras vorstellen lässt. Für den dreidimensionalen Raum mit den Raumkoordinaten  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  gilt beispielsweise für die Metrik  $ds^2$ :

<sup>9</sup> Die elliptische Geometrie unterscheidet sich von der Oberfläche einer Kugel, weil in ihr das erste Euklidische Axiom gilt (vgl. Banchoff 1991: 187).

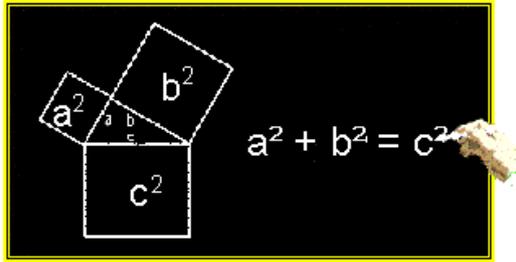


Abbildung 5:  
Der Satz des Pythagoras

Die Metrik  $ds^2$  ist eine allgemeine Struktureigenschaft jedes (Riemannschen) Raumes, durch die Abstände und Winkel gemessen werden können. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Raumeigenschaften im Infinitesimalen euklidisch sind.

Wir werden bei der Diskussion des Raums der allgemeinen Relativitätstheorie den Begriff der **Krümmung** benötigen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Krümmung einer Fläche im dreidimensionalen Raum, bei der die (skalare) Abweichung der Fläche von der Ebene bestimmt wird und der Krümmung als Abweichung der Geometrie des riemannschen Raumes von der des euklidischen Raums, die durch den Riemann-Christoffelschen-Krümmungstensor bestimmt wird. Bedeutsam ist, dass in Riemannschen Räumen an jedem Punkt andere Maß- und Krümmungsverhältnisse vorliegen können. Dabei ist es aber möglich, an jedem Punkt eine Tangentialebene zu betrachten und die Menge aller Tangentialebenen „hüllt“ den gekrümmten Raum ein.

Der euklidische, der elliptische und der hyperbolische Raum sind Spezialfälle des Riemannschen Raums.

### Zum Verhältnis zwischen Mathematik und Physik

Albert Einstein erarbeitete revolutionäre Einsichten in neue physikalische Zusammenhänge und damit auch neue Raum-Zeit-Vorstellungen. Er beschäftigte sich immer wieder mit dem Verhältnis von Mathematik und Physik. Er stellte beispielsweise fest:

Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit. (Einstein 1921/1953: 157)

Damit meint Einstein die Mathematik bzw. die Geometrie in ihrer reinen Form. Um aber Physik treiben zu können, unterschied Einstein von dieser reinen Form die praktische (ebd.: 159), bei der es um die „Möglichkeiten der relativen Lagerung gewisser Naturkörper zueinander“ geht (ebd., vgl. auch Einstein 1930). Wenn es also um Raumkonzepte in der Physik geht, kann von der Möglichkeit der Messung mit wirklichen Körpern nicht mehr abgesehen werden, denn „der Physiker hat ja nicht nur die Aufga-

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \quad (1)$$

oder allgemeiner:

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^n g_{ik}(x_1, \dots, x_n) dx_i dx_k. \quad (2)$$

be, eine in sich konsistente Theorie aufzubauen, sondern eine Theorie, die auch zutreffen muß.“ (Treder 1999: 49)

Auf diese Weise unterscheiden sich mathematische *Koordinatensysteme* von physikalischen *Bezugssystemen*. (Einstein 1919a: 13; vgl. dazu auch Treder 1974: 283; Kanitscheider 1991: 169). Obwohl auch die physikalischen Bezugssysteme nur Idealisierungen von real nicht verwirklichtbaren idealen Messanforderungen sind, ist ihre Festlegung nicht beliebig oder nur der Bequemlichkeit geschuldet, sondern notwendig für Messungen innerhalb der jeweils verwendeten physikalischen Theorie. Poincaré, für den die Festlegung der Geometrie nur eine Sache der Konventionen war, verkannte diesen wesentlichen Unterschied. Die jeweiligen Längen- und Zeitbegriffe innerhalb der physikalischen Raumvorstellung besitzen eine jeweils genau bestimmte physikalische Bedeutung.

### **Physikalische Räume im 19. Jahrhundert**

Der absolute Raum Newtons beinhaltet eine innere Problematik. Einerseits soll er als „starres Gerippe“ (Einstein 1930: 182) gelten, andererseits zeigt das Eimerexperiment, dass er eine trägheitsbestimmende Wirkung ausübt; dass er also insoweit „real“ ist, als ihm gegenüber Beschleunigungen messbar sind.

Eine weitere Entwicklung der Raumvorstellungen in der Physik ergab sich mit neuen physikalischen Theorien. Die Feldtheorien des Lichts, bzw. des elektromagnetischen Feldes beruhten auf der Äthervorstellung, bei dem ein den ganzen Raum durchdringendes Medium, der Äther, als Träger der elektromagnetischen Phänomene gedacht wurde. Mechanische Erklärungen des Äthers gelangen nicht.

Hendrik A. Lorentz kam schließlich auf den Gedanken, dass der Äther identisch mit dem Raum sein könnte. Damit wurde der Raum zum Träger für Feldphänomene und er wurde seine vorherige Starrheit los.

## **Die Räume der Relativitätstheorien**

### **Relativitätsprinzipien – Invarianzen - Raumvorstellungen**

#### **Vor Galilei und Newton**

Wie bereits am Anfang dieses Textes gezeigt, gab es bereits im 15. Jahrhundert eine entscheidende Veränderung in der Raumvorstellung. Der inhomogene, in irdische und kosmische Bereiche unterteilte Raum wurde abgeschafft und dem Raum wurde Homogenität (kein Ort ist ausgezeichnet) und Isotropie (Gleichberechtigung der Richtungen) zugeschrieben. Diese Symmetrieforderung bedeutet: „Ein physikalischer Körper läßt sich im dreidimensionalen Raum beliebig verlagern, d.h. er ist einer beliebigen

Ortsveränderung fähig und kann beliebig gedreht werden.“ (Treder 1968: 10) Das bedeutet auch, dass sich physikalische Gesetze nicht ändern – d.h. sie sind invariant – wenn sich die Körper in dieser Weise verschieben oder drehen. Dies kann man als Cusanisch-Kopernikanisches Relativitätsprinzip verstehen.

### Galilei-Newton

Für die Galilei-Newtonsche Physik muss zusätzlich das Trägheitsgesetz berücksichtigt werden. Hier gilt das Galileische Relativitätsprinzip: *Für geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegte Inertialsysteme sind mechanische Bewegungsabläufe gleich.* Als Inertialsystem wird ein Bezugssystem verstanden, in dem die Trägheitskräfte verschwinden und das sich frei und unbeschleunigt bewegt. Diesem Relativitätsprinzip entspricht die Galilei-Invarianz der mechanischen Gesetze: Alle Gesetze müssen invariant gegenüber der Galilei-Transformation sein. Diese Transformation entspricht einer Verschiebung in  $x$ -Richtung, wobei die  $y$ -, die  $z$ - und die Zeitkomponente konstant bleiben und sich für die  $x$ -Koordinaten im transformierten System  $x'$  die Beziehung (3) ergibt:

$$x' = x - vt \quad (\text{mit } v: \text{konstante Geschwindigkeit}) \quad (3)$$

Die Raumzeit, in dem diese Beziehung gilt, ist die sog. Galilei-Newtonsche Raumzeit, bei der die Raumkoordinaten mit der dreidimensionalen euklidischen Geometrie darstellbar sind. Das Relativitätsprinzip ist dabei Ausdruck der Symmetrieeigenschaften des physikalischen Raumes (Wahsner, Griese 1972: 204).

### Spezielle Relativitätstheorie

Unter Berücksichtigung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Relativität der Gleichzeitigkeit müssen die Transformationsgesetze, die den Übergang eines physikalischen Systems von einem Inertialsystem in ein dagegen bewegtes anderes Inertialsystem verändert werden (Einstein 1920d: 254f.).<sup>10</sup> Es entstehen die Lorentz-Transformationen:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (4)$$

---

<sup>10</sup> Weitere Voraussetzungen sind die Homogenität und Isotropie des Raums sowie die Unabhängigkeit der Maßstäbe und Uhren von ihrer Bewegungs-Vorgeschichte, wie Einstein aufgrund von Debatten mit Hermann Weyl (s.u.) ausdrücklich erwähnt (Einstein 1920d: 257).

Wir sehen, dass die  $x$ -Raumkomponente mit der Zeit und die Zeit mit der  $x$ -Komponente verknüpft ist. Wenn die Geschwindigkeit sehr viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist, geht die Lorentz-Transformation in die Galilei-Transformation über.

Die Gesetze der Elektrodynamik ändern ihre Form nicht, wenn sie diesen Lorentz-Transformationen unterworfen werden. Wenn auch die Masse ein entsprechendes Korrekturglied erhält, genügt auch die so veränderte Mechanik der Forderung nach Kovarianz der Gesetze bezüglich der Lorentztransformation. Auf diese Weise gilt das Spezielle Relativitätsprinzip für elektro-magnetische und mechanische (mit veränderlicher Masse) Gesetze:

*Für geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegte Inertialsysteme sind alle (nicht nur die mechanischen) Bewegungsabläufe gleich.*

Poincaré und Minkowski erkannten, dass diese Lorentz-Transformationen, bei denen die räumliche und die zeitliche Veränderung in neuer Weise verwoben werden, eine neue Raumvorstellung erforderten.

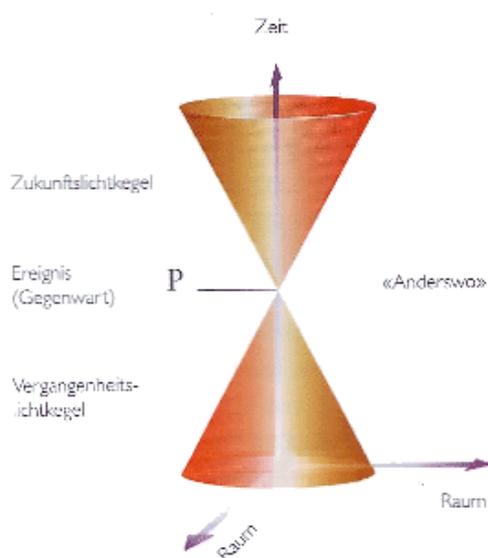


Abbildung 6: Minkowskische Raumzeit als Doppelkegel (Quelle: Hawking 2001: 36)

Poincaré erkannte, dass die Lorentz-Transformation mathematisch einer Drehung in einem Raum, der aus den drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension besteht, entspricht und Minkowski entwickelte aus der Einbeziehung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit den bekannten Doppelkegel (vgl. Gleichung (8) weiter unten). Bewegungen mit einer Geschwindigkeit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit können nur innerhalb des Kegels stattfinden, das Licht bewegt sich gerade auf dem Rand.

Diese Minkowskische Raumzeit ermöglicht gerade jene Bewegungssymmetrien, die das spezielle Relativitätsprinzip fordert.

Nach Einstein haben die räumlichen Koordinaten und die Zeit in der Minkowskischen Raumzeit „noch insofern absoluten Charakter, als sie unmittelbar durch starre Uhren und Körper meßbar sind.“ (Einstein 1953: 174; vgl. dazu auch Einstein 1954-Anhang 5: 96f.). Allerdings kann eine Gleichzeitigkeit nur für je ein Inertialsystem bestimmt wer-

den und um eine Übertragbarkeit über kosmische Räume hinweg gewährleisten zu können, müssen Homogenität und Isotropie des Raums sowie die Unabhängigkeit der Maßstäbe und Uhren von ihrer Bewegungsvorgeschichte angenommen werden (Einstein 1920d: 257).

### **Allgemeine Relativitätstheorie**

Das spezielle Relativitätsprinzip hatte die Beschränkung der Geltung von mechanischen Gesetzen für Inertialsysteme aufgehoben. In der speziellen Relativitätstheorie gelten alle Gesetze der Physik für alle gleichförmig-geradlinig sich bewegende Inertialsysteme. Diese Einschränkung der Bezugssysteme auf Inertialsysteme ist jedoch wiederum eine Einschränkung, die dazu herausfordert, über ihre Aufhebung nachzudenken (vgl. Einstein 1953: 170). Dies war die Motivation für das Allgemeine Relativitätsprinzip: *Alle Gesetze der Physik gelten für beliebig bewegte Bezugssysteme.*

Es geht also auch um relativ zueinander beschleunigte Bezugssysteme. Wegen der Äquivalenz von träger und schwerer Masse sind Beschleunigungen (d.h. das Auftreten von Trägheitskräften) der Wirkung von Gravitationsfeldern äquivalent.

„In einem homogenen Gravitationsfeld gehen alle Bewegungen so vor sich, wie bei Abwesenheit eines Gravitationsfeldes in bezug auf ein gleichförmig beschleunigtes Koordinatensystem.“ (ebd.: 178)

Als mentales Modell für diese Vorstellung gilt das sog. „Aufzugs“- oder Kastenmodell, bei dem ein in einen Kasten eingeschlossener Mensch nicht unterscheiden kann, ob mechanische Trägheitskräften oder die Gravitationskraft wirken.<sup>11</sup>

Über viele Umwege (vgl. Renn 2006) gelangte Einstein schließlich zur Feldgleichung für die Gravitation, wobei er voraussetzte, dass eine neue Formulierung des Trägheitsgesetzes „im Falle des Fehlens eines wirklichen „Gravitationsfeldes bei Anwendung eines Inertialsystems als Koordinatensystem in die Galileische Formulierung des Trägheitsprinzips überging“ (ebd: 179). Dies gelang dadurch, dass er den Riemannschen Raumbegriff verwendete, der die Krümmung im Gravitationsfeld darstellt, aber gleichzeitig die korrespondenzmäßige Beziehung zur Physik schwacher Gravitationsfelder ermöglicht. Es gibt eine Fülle von Belegen für die Bedeutung dieser korrespondenzmäßigen Beziehung bei Einstein, so z.B. die Aussage:

Erhebt man die Äquivalenz aller Koordinatensysteme für die Formulierung der Naturgesetze zum Prinzip, so gelangt man zur allgemeinen Relativitätstheorie, wenn man am Satz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, bzw. an der Hypothese von der objektiven Bedeutung der Euklidischen Metrik wenigstens für unendlich kleine Teile des vierdimensionalen Raumes festhält. (Einstein 1953: 191)

---

<sup>11</sup> Auch das Fallgesetz erklärt sich nun als Folge der Tatsache, dass für frei fallende Körper die Gravitationskraft lokal aufgehoben vorgestellt werden kann (Einstein 1920d: 265).

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die Relativitätsprinzipien, die Invarianzen der Gesetze und die Raum-Zeit-Konzepte der für die Bewegung makroskopischer Körper wesentlichen Gebiete der Physik.

<b>Galilei-Newton</b> (gilt für relativ zu $c$ kleine Geschwindigkeiten und schwache Gravitationsfelder)	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b> (gilt für schwache Gravitationsfelder)	<b>Allgemeine Relativitätstheorie</b>
Galileisches Relativitätsprinzip: Für geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegte Inertialsysteme sind mechanische Bewegungsabläufe gleich.	Spezielles Relativitätsprinzip:  Für geradlinig-gleichförmig gegeneinander bewegte Inertialsysteme sind alle Bewegungsabläufe gleich.	Allgemeines Relativitätsprinzip:  Alle Gesetze der Physik gelten für beliebig bewegte Bezugssysteme.
Galilei-Invarianz:  Alle (mechanischen) Gesetze müssen invariant gegenüber der Galilei-Transformation.	Lorentz-Invarianz:  Alle (mechanischen und elektrodynamischen) Gesetze müssen invariant gegenüber der Lorentz-Transformation.	allgemeine Kovarianz der physikalischer Gesetze:  Invarianz aller Gleichungen gegen beliebige Koordinatentransformationen
Galilei-Newtonsche Raum-Zeit	Minkowskische Raumzeit	(gekrümmte) Riemannsche Raumzeit

Tabelle 1: Galilei-Newtonsche, speziell und allgemein relativistische Relativitätsprinzipien, Invarianzen und Raum-Zeitkonzepte

## Relativistische Raumkonzepte

### Wie viele Dimensionen hat die Welt?

Die Frage der Dimensionen der Raumzeit wurde seit der Entdeckung des Minkowskiraums akut. Man kann die Gleichung für den Kegelschnitt (siehe Abbildung 6) auf folgende Weise herleiten:

Zuerst nennen wir die allgemeine Formel für die Metrik, die sich aus der Anwendung des Satz des Pythagoras (1) für drei Dimensionen ergibt:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \quad (6).$$

Unter der Voraussetzung, dass das Licht in der Zeit  $dt$  die Strecke  $ds$  mit der konstanten Geschwindigkeit  $c$  zurücklegt, gilt für den Weg mit  $ds=cdt$ :

$$ds^2 = c^2 dt^2 \quad (7).$$

Wir können nun (6) und (7) gleichsetzen, umstellen und erhalten dann

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - (cdt)^2 = 0 \quad (8).$$

Die unterschiedliche Qualität der räumlichen und der zeitlichen Koordinate bleibt hier durch das unterschiedliche Vorzeichen sichtbar.

Wenn wir jedoch die bekannte Eigenschaft der imaginären Zahl  $i$  als

$$i^2 = -1 \quad (9) \text{ verwenden,}$$

können wir (8) umformen zu:

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + (icdt)^2 = 0 \quad (10).$$

Damit bekommt die zeitliche Koordinate formal ( $(icdt)^2 = dx_4^2$ ) die gleiche Qualität wie die Raumkoordinaten.

Die Schreibweisen (8) oder (10) implizieren unterschiedliche Vorstellungen über die Raumzeit, speziell ihre Dimensionalität. (8) impliziert ein zeitlich dynamisches Verhalten in einem weiterhin dreidimensionalen Raum; (10) geht von 4 Dimensionen in einer statischen, rein räumlichen, geometrischen Vorstellung aus. 1920 verwendet Einstein die Darstellung (10) (Einstein 1920a: 82f.), geht jedoch in einer Schrift von 1936 zur Form von (8) über (Einstein 1936: 331).

Die neuen Ideen aus der Physik fanden eine rasche Aufnahme bei vielen Künstlern. Ich möchte für beide raumzeitlichen Vorstellungswelten ein Beispiel vorstellen:

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - (cdt)^2 = 0$$

Hier werden dreidimensionale Objekte so dargestellt, dass sie den Eindruck erwecken, sie würden sich bewegen; die Bewegungskomponente ist qualitativ von der Raumdimensionalität unterschieden:

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + (icdt)^2 = 0$$

Die Raumzeit wird als vierdimensionaler Raum dargestellt, in dem auf den Trick zurück gegriffen wird, dass z.B. dreidimensionale Objekte in den zweidimensionalen Raum hinein gefaltet werden können. Die 4. Dimension kann man derart in aufgefalteter Form im dreidimensionalen Raum andeuten – es entsteht ein sog. Hyperkubus (vgl. Banchoff 1991: 105ff.).

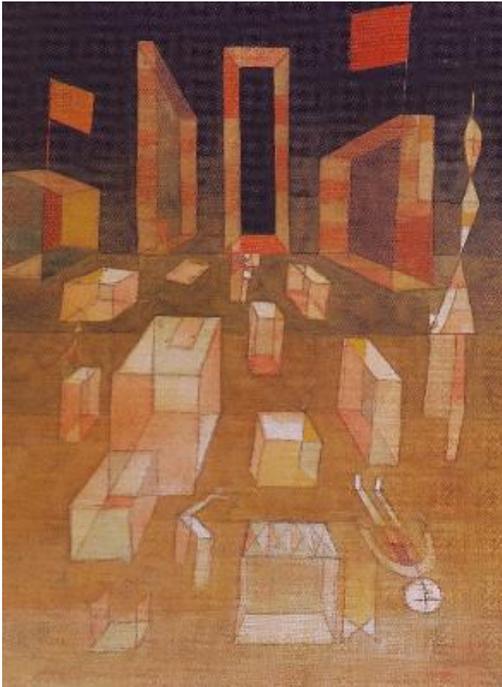


Abbildung 7 : Paul Klee: „Nichtcomponiertes im Raum“ 1929 (aus Müller (o.J.), S. 65)

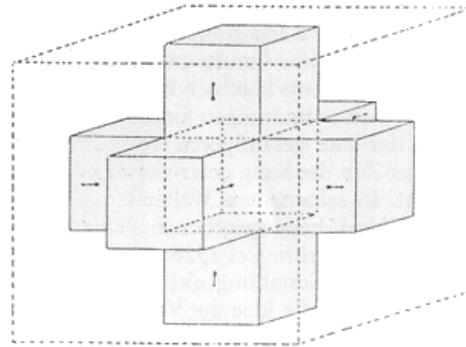


Abbildung 8 : Theo van Doesburg 1925 (aus Müller (o.J.), S. 60)

Gegen die Gleichstellung der 4 Dimensionen wie in (10) sprechen allerdings einige physikalische Argumente<sup>12</sup>, wie die Inkongruenz der linken und der rechten Hand sowie das Auftreten von Dunkelheit nach dem Löschen eines Lichts (vgl. Kanitscheider 1991: 426).

## Zur Interpretation der Einsteinschen Feldgleichung der allgemeinen Relativitätstheorie

Die Einsteinsche Feldgleichung der allgemeinen Relativitätstheorie ((5), mit  $\kappa$ : Konstante) erfasst komplexe Zusammenhänge:

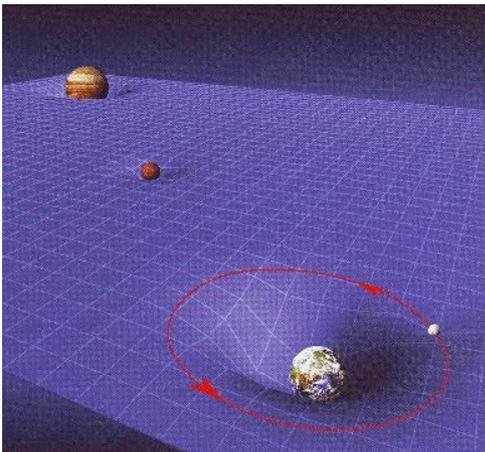
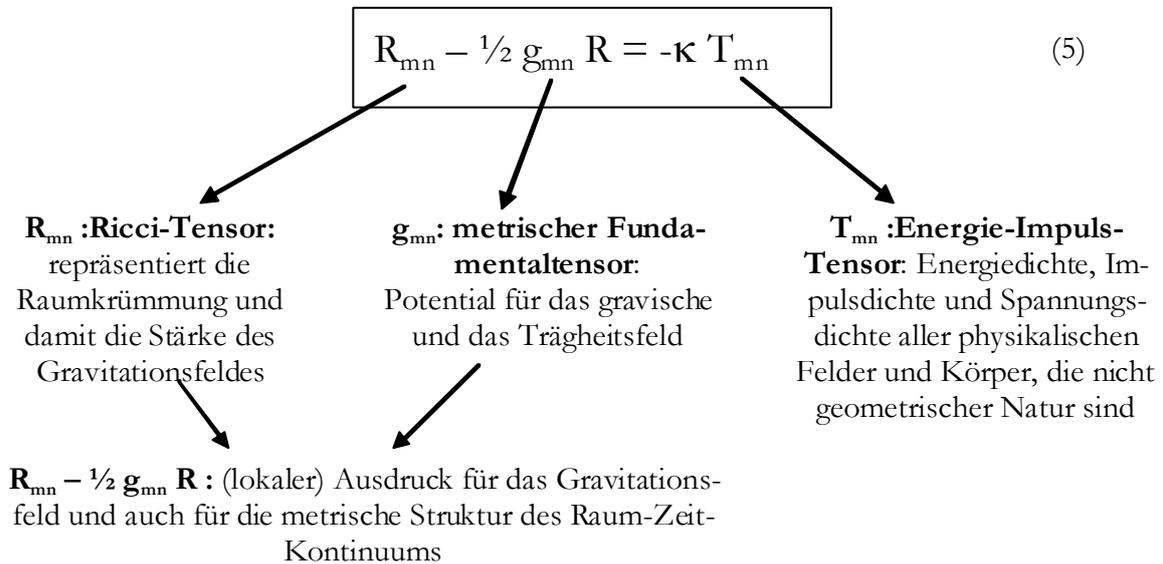
- I. Das Gravitationsfeld und die metrische Struktur des Raumzeitkontinuums sind miteinander unauflösbar verbunden (linke Seite der Gleichung).
- II. Die Krümmung/Gravitationswirkung (linke Seite) ist der Wirkung der nichtgeometrischen Materiefaktoren (rechte Seite) äquivalent.

Die mathematische Äquivalenz in II. sagt erst einmal nichts über eine kausale Verursachung. Die Form der Gleichung wurde aber bewusst in Anlehnung an die Poissonsche Feldgleichung der klassischen Physik<sup>13</sup> gewählt. Die Energie-Impulsdichte gilt dabei

<sup>12</sup> Einstein betont, dass die Gleichwertigkeit der Zeitkoordinate eine formale, aber keine physikalische ist (Einstein 1920d: 263f.)

<sup>13</sup> Die Poissonsche Gleichung besagt für die klassische Physik, „daß das Gravitationsfeld durch die Dichte  $\rho$  der ponderablen Materie erregt wird.“ (Einstein 1922/1979: 81)

als Quelle der Erregung eines Gravitationsfeldes (Gleichheitszeichen), das in unserem Fall eng mit der metrischen Struktur der Raumzeit verbunden ist (linke Seite). Das Feld bestimmt dann wiederum die Bewegungsmöglichkeiten von Objekten.



Der Zusammenhang von nichtgeometrisierter Materie (rechte Seite) und Gravitation und Metrik (linke Seite) ist nichtlinear: Raum und Zeit werden „durch das Schwerefeld bestimmt, während das Schwerefeld seinerseits von der Verteilung der Massen im Universum abhängt.“ (Renn 2006: 200)

Abbildung 9: Abhängigkeit des Schwerefelds und der Raumzeitmetrik von der Masseverteilung (Quelle: Bublat 1999: 39)

Das Raumzeitkontinuum ist eng verknüpft mit den Eigenschaften der Materie – einerseits (auf der linken Seite der Gleichung) mit der gravitativen Wirkung, andererseits auch mit den anderen Materieformen (den nicht gravitativen, nicht geometrisierten auf der rechten Seite der Gleichung). Einstein fasste zusammen:

Trägheit, Gravitation und metrisches Verhalten der Körper und Uhren wurden auf eine einheitliche Feldqualität zurückgeführt, dies Feld selbst wieder als von den Körpern abhängig gesetzt [...]. Damit waren Raum und Zeit zwar nicht ihrer Realität entkleidet, wohl aber ihrer kausalen Absolutheit (beeinflussend, aber nicht beeinflusst). (Einstein 1953: 206)

Einstein selbst war bis zuletzt nicht zufrieden mit der Uneinheitlichkeit von gravitativer (linke Seite) und nicht geometrisierter Materie (rechte Seite). Die möglichen Mate-

rie-Energie-Tensoren sind nicht theoretisch bestimmbar; als physikalisch sinnvoll erwiesen sich nur wenige der theoretisch möglichen. Einstein verglich seine Formel deshalb mit einem „Gebäude, dessen einer Flügel aus vorzüglichem Marmor (linke Seite der Gleichung), dessen anderer Flügel aus minderwertigem Holz gebaut ist (rechte Seite der Gleichung)“ (Einstein 1936: 335). Einstein versuchte bis zuletzt, aus dem Holz ebenfalls Marmor zu machen, d.h. die gravitative und die elektromagnetische Wechselwirkung zu vereinen – mit der Quantentheorie konnte er in dieser Beziehung wenig anfangen (vgl. ebd.: 336).

## Die Raummolluske

In der allgemeinen Relativitätstheorie gilt, dass der Raum<sup>14</sup> nicht mehr ein „starrer Bezugskörper“ ist, sondern seine Metrik vom lokalen Gravitationsfeld abhängt. Diese Folge des allgemeinen Relativitätsprinzips beschreibt Einstein auch mit dem Wort „Bezugsmolluske“ (Einstein 1920a: 67). Bloch paraphrasiert dies später:

Ein vierdimensionaler Riemannscher Raum liegt der allgemeinen Relativitätstheorie zugrunde, der nirgends mehr metrische Starre zeigt, sondern, nach Einsteins Ausdruck, „nachgiebig ist wie ein Mollusk“. (Bloch EM: 110)

Trotzdem bleibt hier zu berücksichtigen, dass die Metrik der Raumzeit nicht völlig äquivalent mit den Materiewirkungen geworden ist. Es bleibt ein „Rest“ übrig:

Die Metrik ist zur Beschreibung der Materie notwendig und deswegen durch die Materie selbst nicht festlegbar.“ (Kiefer 2003: 103)

Das bedeutet, dass die oben genannte Äquivalenz in II. nicht ganz uneindeutig ist. Zwar kann man aus der Raum-Zeit-Metrik die Materieverteilung im Kosmos ermitteln, aber die Materieverteilung bestimmt die Weltmetrik nicht eindeutig (vgl. Treder 1998: 31).

So wie für jeden gewölbten Körper innerhalb des dreidimensionalen Raumes an jedem Punkt eine Tangentialebene konstruiert werden kann, deren Menge den Körper „einhüllt“, so kann die „Raummolluske“ durch jeweils entsprechend der Stärke des Gravitationsfeldes geneigte Minkowskische Lichtkegel vorgestellt werden.

In schwachen Gravitationsfeldern und in lokalen Bereichen kann der pseudo-euklidische Minkowskiraum als Näherung verwendet werden (vgl. Treder 1968: 7).

## Die Messbarkeit im Riemannschen Raum

Es stellt sich heraus, dass auch in der allgemeinen Relativitätstheorie die Raumzeit nicht vollständig in der materiellen Dynamik aufgehoben ist, sondern es eine Dualität

---

<sup>14</sup> Der „Raum“ meint auch im Weiteren immer die „Raumzeit“.

von raumzeitlicher Metrik, die auch als Gravitationsfeld darstellbar ist (dem „Gravitationsäther“<sup>15</sup>) und nicht geometrisierbarer Materie gibt.

Eine weitere Fragestellung ergibt sich, wenn wir bedenken, dass wir nicht über irgend welche abstrakten Materieformen bzw. Raumzeiten sprechen, sondern dass wir Physik betreiben, also „eine Theorie, die auch zutreffen muß.“ (Treder 1999: 49) Es geht also darum, die physikalischen Bewegungsformen, die wir untersuchen, nicht nur spekulativ in einer mathematischen Form darzustellen – sondern diese Darstellung muss auf ihren Wahrheitsgehalt hin überprüfbar sein. Soweit es um raumzeitliche Bewegung geht, muss in Raum und Zeit gemessen werden können.

Dabei gilt stets der Grundsatz, dass die Berechtigung eines physikalischen Begriffes ausschließlich in seiner klaren und eindeutigen Beziehung zu den erlebbaren Tatsachen besteht. (Einstein 1921: 430)

In der speziellen Relativitätstheorie ist die Definition der Gleichzeitigkeit immer nur für ein Inertialsystem möglich. Trotzdem, so hatten wir bereits gesehen, lassen sich Raum- und Zeitkoordinaten noch unmittelbar messen.

Diese unmittelbare Interpretation der Raum- und Zeitkoordinaten durch Maßstäbe und Uhren geht in der allgemeinen Relativitätstheorie verloren. Aber die Messbarkeit war für Einstein so wichtig, dass er den korrespondenzmäßigen Anschluss an die Messbarkeit im euklidischen Raum zur Richtschnur bei der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie verwendet hatte (vgl. Renn 2006: 271).

Jene Verallgemeinerung der Metrik [...] beruht im Wesentlichen darauf, daß die Metrik der speziellen Relativitätstheorie für kleine Gebiete auch im allgemeinen Fall noch Gültigkeit beanspruchen kann.“ (Einstein 1953: 175; vgl. auch Einstein 1920d: 276)

Peter Mittelstaedt behauptet, Einsteins Forderung nach Messbarkeit sei eine „Konsequenz der von Einstein vertretenen methodischen Forderung, daß eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen enthalten darf“ (Mittelstaedt 1989: 76). Heisenberg berichtet jedoch, dass das in dieser Form nicht stimmt:

„Aber Sie glauben doch nicht im Ernst“, entgegnete Einstein, „daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann.“

„Ich dachte“, fragte ich erstaunt, „daß gerade Sie diesen Gedanken zur Grundlage Ihrer Relativitätstheorie gemacht hätten? Sie hatten doch betont, daß man nicht von absoluter Zeit reden dürfe, da man diese absolute Zeit nicht beobachten kann.“[...]

„Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie benützt“, antwortete Einstein, „aber sie ist trotzdem Unsinn [...]. Vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in Wirklichkeit ganz genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.[...]

---

<sup>15</sup> Zum Unterschied dieses Begriffes „Äther“, das auch Einstein (1920b) verwendet, siehe Weyl (1922: 324).

Nur die Theorie, das heißt die Kenntnis der Naturgesetze, erlaubt uns also, aus dem sinnlichen Eindruck auf den zugrunde liegenden Vorgang zu schließen“ (Heisenberg 1988: 79-80).

Der Zusammenhang zwischen Messbarkeit und Darstellung objektiver raumzeitlicher Strukturen ist also komplizierter.

„Wie bestimmt man die Gleichförmigkeit der Bewegung eines Körpers? Wir benötigen dazu Inertialmaßstäbe und Inertialuhren. Woher haben wir solche? Aus diesen aufgeworfenen Fragen wird eine Grundsatz-Problematik der modernen Physik deutlich, nämlich die Problematik des Meßprozesses [...]

Das Messen kann nicht mehr so einfach wie im vorigen Jahrhundert als bloßes Vergleichen des Meßobjekts mit einem Maßstab gesehen werden, sondern es müssen darüber hinaus noch genau die Bedingungen des Messens fixiert werden. Dazu bedarf es aber einer eigenen Theorie des Meßprozesses [...]

Man setzt die Existenz von Inertialmaßstäben und Inertialuhren als Standard-Basis in unendlicher Entfernung von den gravitierenden Massen voraus und operiert mit diesen Meßmitteln. (Schmutzer 1981: 28f.)

Die Wahl der für die Theorie angemessenen Raumzeitstruktur hat einerseits das konstruktive Element, dass z.B. die Riemannsche Geometrie nicht unmittelbar aus den Tatsachen geschlossen werden kann, andererseits muss die gewählte Geometrie physikalische Erfahrung, also raumzeitliche Messungen, ermöglichen. Der „Dualismus“ zwischen Raumzeit und materieller Dynamik ist kein trennender, sondern ein die Unterschiede bewahrender, verbindender.

Hermann Weyl hatte versucht, diesem Dualismus zu entkommen, indem er auch den Längenmaßstab selbst mit veränderte (vgl. Weyl 1921: 224). Dem widersprach jedoch Einstein. In der Rezension eines Buches von Weyl schrieb er:

Ferner möchte ich im Interesse der Vollkommenheit der Darstellung vom Standpunkte des Physikers wünschen, daß die physikalische Bedeutung des Abstandes (als unmittelbares Ergebnis der mit Maßstäben und Uhren zu gewinnenden Messungen) in der zweiten Auflage etwas mehr in den Vordergrund gestellt werde. (Einstein 1918c: 373).

Oder noch deutlicher:

Die zeit-räumlichen Abstände sind mit Hilfe von Maßstäben und Uhren physikalisch definiert. Betrachte ich zwei Gebilde (Maßstäbe bzw. Uhren), so ist ihre Gleichheit erfahrungsgemäß unabhängig von ihrer Vorgeschichte. Hierauf beruht die Möglichkeit, zwei benachbarten Weltpunkten eine Zahl *ds* zuzuordnen, welche physikalische Bedeutung besitzt. Indem die Weylsche Theorie auf diese empirisch begründete Zuordnung verzichtet, beraubt sie die Theorie einer ihrer solidesten Stützen und Prüfungsmöglichkeiten. (Einstein 1920c: 351; vgl. Weyl 1918: 40))

Dass diese messtheoretische Zuordnung eines starren Maßstabes nicht lediglich subjektive Willkür ist, sondern der raumzeitlichen Struktur der objektiven Realität auch entspricht, zeigt Einstein daran, dass es in allen Lichtbotschaften aus dem All scharfe

Spektrallinien gibt. Das bedeutet, dass die Eigenfrequenzen desselben chemischen Elements überall gleich sind und als Standard für zeitliche Abstände gelten können (Einstein 1953: 163). Das lässt sich dann über die Lichtausbreitung auch auf die räumlichen Koordinaten übertragen.

Mit diesem Zustand des Dualismus von Raumzeit und Materiedynamik war Einstein letztlich nicht zufrieden:

Es ist eine logische Schwäche der Relativitätstheorie in ihrem heutigen Zustande, daß sie Maßstäbe und Uhren gesondert einführen muß, statt sie als Lösungen von Differentialgleichungen konstruieren zu können. (Einstein 1920c: 353)

## Was ist real?

Bisher wurde meist angenommen, so etwas wie physikalische Teilchen, Kräfte oder Felder könne man als real existierend annehmen, beim Raum gab es Streitigkeiten, ob es ihn real gibt oder ob er lediglich eine ideelle Denkvoraussetzung sei. Jetzt erweist sich ein Teil der Wirklichkeit, das Gravitationsfeld und die Metrik als ineinander umwandelbar, als wesensgleich.

Wenn wir als „real“ das definieren, was invariant ist, so würde das Gravitationsfeld bzw. die Metrik diese Zuschreibung durch die Allgemeine Relativitätstheorie verlieren. Wir erwähnten bereits das mentale Modell des Menschen in einem frei fallenden Kasten („Aufzug“), bei dem durch die Fallbewegung die Wirkung des Gravitationsfeldes gerade aufgehoben wird. Wenn wir also ein mitbewegtes Bezugssystem wählen, haben wir das Gravitationsfeld „wegtransformiert“, es ist nicht invariant, also nicht „real“ (vgl. Kanitscheider 1991: 175). Bei dieser Sichtweise bleibt ein anderes Moment der Gravitation real: die Gravitationsgezeitenkraft.

In einem homogenen Gravitationsfeld besagt das Äquivalenzprinzip, dass es für einen Menschen in einem geschlossenen Kasten („Aufzug“) nicht möglich ist zu unterscheiden, ob er Trägheitskräften oder der Gravitation unterliegt. Als mentales Modell hierfür dient auch die Vorstellung, dass in einem frei fallenden Aufzug die Gravitationskraft durch die Trägheitskraft aufgehoben wird. Insofern kann die Trägheitsbewegung in eine Gravitationsbewegung umtransformiert werden (bzw. umgekehrt).



In einem nicht homogenen Gravitationsfeld (wie in Abbildung (10)) fallen die Massenpunkte nicht entlang paralleler Geodäten, sondern die Bahnen konvergieren. Diese Bewegung „aufeinander zu“ kann in keinem Bezugssystem wegtransformiert werden. und ist Ausdruck der durch die Gravitation veränderten Geometrie der Raumzeit.

Abbildung 10: Gravitations-Gezeitenkräfte (aus Bublath 1999: 91)

Legen wir jedoch eine andere Bestimmung von „Realität“ zugrunde, nämlich diejenige, nach der real ist, was wirkt, so erhalten wir eine andere Sichtweise. Ian Hacking sagte über die Realität von Quarks: „If you can spray them, then they are real“ (Hacking 1994: 22). In diesem Sinne wäre der sog. „Gravitationsäther“, also die Einheit Gravitationsfeld/Metrik durchaus real, denn er bestimmt das physikalische Geschehen mit (vgl. Einstein 1920b: 317).

## **Kosmologie**

Die Feldgleichung der allgemeinen Relativitätstheorie macht lediglich lokale Aussagen. Sie hat auch nicht nur eine Lösung, sondern als System von zehn nichtlinearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung für  $g_{\mu\nu}$  können sehr viele verschiedene Lösungen berechnet werden, von denen nicht alle physikalisch sinnvoll interpretierbar sind. Wie diese Grundgleichung sich im realen, globalen Weltraum auswirkt, ist eine zusätzliche Fragestellung (vgl. Einstein 1951/1979: 109). Weil die Feldgleichungen allein keine Aussagen über das großräumige Universum machen, lassen sich durch die Einbeziehung unterschiedlicher zusätzlicher Annahmen (z.B. über die Homogenität und Isotropie der Materieverteilung) verschiedene Lösungen errechnen, die dann mit der Wirklichkeit verglichen werden müssen. Einstein hatte zuerst eine Lösung gefunden, die für ein statisches Weltall sprach, wie er es auch erwartete. Jedoch fand der sowjetische Physiker Alexander Friedmann 1922 eine andere Lösung für einen nicht-stationären Kosmos. Später wurde die Expansion des Weltalls auch experimentell bestätigt. Dabei gilt weiterhin, dass es 1. keine eindeutige Beziehung zwischen dem Materie-Energie-Tensor und der Raummetrik gibt und 2. die globalen Eigenschaften sowie die Topologie des Raums sich daraus auch nicht ergeben. Durch die Einbeziehung von weiteren Zusatzannahmen ergeben sich vielfältige Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen.

Hans Jürgen Treder entwickelte in den 90er Jahren eine Kritik an diesem Vorgehen. Er folgte darin Ernst Mach, für den es keine Trennung zwischen Grundgleichungen und kontingenten Anfangs- und Randbedingungen geben darf.

Das Weltsystem ist uns nur einmal gegeben mit allen seinen allein bestimmbaren Relativbewegungen. (Mach, zit. bei Treder 1998: 23, vgl. Mach 1983/1921: 222)

Das Ziel bestand also für Treder darin, eine Physik zu finden, in der es nur eine einzige exakte Lösung aller physikalischen Gleichungen gibt.

## **Die Aufhebung des Raumes im Machschen Prinzip**

In einer historischen Darstellung der Entwicklung der Relativitätstheorie ist dem sog. Machschen Prinzip eine große Bedeutung zuzuschreiben. Es war ein wichtiges heuristisches Prinzip für Einstein, obwohl es in seiner Theorie letztlich nicht gänzlich ver-

wirklicht werden konnte. Die Debatte um das Machsche Prinzip beinhaltet gerade die Frage nach dem Verhältnis von physikalischer Materie und Raumzeit.

Ernst Mach hatte sich, wie viele andere, am absoluten Raum von Newton gestört. Er meinte: „Bleibt man auf dem Boden der Tatsachen, so weiß man bloß von *relativen* Räumen und Bewegungen.“ (Mach 1883/1921: 226). Er versuchte das Newtonsche Eimerexperiment (siehe Abbildung 3) auf eine alternative Weise zu erklären. Newton sah darin die Wirkung des absoluten Raumes realisiert. Mach wollte diese aus seiner Sicht abstrakte Konstruktion unnötig machen und verwies auf die Möglichkeit, die Trägheitsbewegung des Wassers im Eimer durch die Wirkung von Kräften aus dem gesamten Universum zu erklären. Die Trägheitskräfte sollen nicht durch Beschleunigung gegenüber dem absoluten Raum, sondern gegenüber den Hintergrundmassen im Universum zustande kommen. „Wenn wir daher sagen, daß ein Körper seine Richtung und Geschwindigkeit im *Raum* beibehält, so liegt darin nur eine kurze Anweisung auf die Beachtung der *ganzen Welt*.“ (ebd.: 227) Einstein reihte das „Machsche Prinzip“ als dritten Haupt Gesichtspunkt seiner Theorie neben dem Relativitäts- und dem Äquivalenzprinzip ein (Einstein 1918b: 241). Dieses Prinzip bedeutet, „daß das G-Feld<sup>16</sup> durch den Energietensor der Materie bedingt und bestimmt sei (ebd.: 242), d.h. auch: „Das wahre metrische Feld  $g_{\alpha\beta}$  muß ganz durch die Materie der Welt bestimmt sein“ (Einstein 1922/1979: 66), d.h. die Metrik muss in eindeutiger Weise aus Energie und Impuls der Materie im Universum hervorgehen. Der Dualismus von Raumzeit und Dynamik wäre dann aufgehoben. Nach Kanitscheider (1991: 170) kann das für die Feldgleichung Verschiedenes bedeuten:

- in Abwesenheit von Materie ( $T_{\alpha\beta} \rightarrow 0$ ) ist kein Gravitationsfeld möglich (d.h. die Metrik degeneriert  $g_{\alpha\beta} \rightarrow 0$ )<sup>17</sup>
- in Abwesenheit von Materie wird die Metrik minkowskisch ( $g_{\alpha\beta} \rightarrow \eta_{\alpha\beta}$ )<sup>18</sup>,
- in Abwesenheit der Materie verschwindet die Krümmung ( $R^{\alpha}_{\gamma\beta\delta} \rightarrow 0$ ) oder
- es gibt keine Vakuumgleichungen.

Keine dieser verschiedenen Varianten ist in der allgemeinen Relativitätstheorie erfüllt.<sup>19</sup> Die Metrik wird nicht eindeutig von der Materie bestimmt, aber beeinflusst. Das Machsche Prinzip gilt nur unter Einbeziehung zusätzlicher Randbedingungen.

Bis ca. 1920 meinte Einstein noch, seine 1915 gefundene Feldgleichung würde der Machschen Forderung entsprechen. Seine 1917 veröffentlichte erste kosmologische

---

<sup>16</sup> Als G-Feld bezeichnet Einstein den durch den Fundamentaltensor (der die metrischen Eigenschaften des Raumes sowie die Gravitationswirkungen bestimmt) Raumzustand (Einstein 1918b: 141).

<sup>17</sup> So formuliert es Einstein: Es darf „kein G-Feld möglich sein ohne Materie“ (ebd.: 142).

<sup>18</sup> vgl. Schmutzer 1981: 106.

<sup>19</sup> Nur wenn das kosmologische Glied hinzugefügt wird, gilt die erste Variante (ebd.).

Lösung stimmt noch mit Machs Grundannahme überein, dass alle Trägheitseigenschaften der Raumzeit durch die Masseverteilung bestimmt sind (Einstein 1917). Unter Verwendung einer Gleichung mit dem kosmologischen Glied  $\lambda$  konnte Einstein einen geschlossenen, statischen Kosmos mit gleichmäßiger Materieverteilung ableiten. Sogar als de Sitter zeigte, dass auch die um  $\lambda$  ergänzte Feldgleichung eine weitere Lösung besitzt, in der es zwar keine Materie, aber Trägheitseigenschaften gibt – was dem Machschen Prinzip widerspricht – widersprach Einstein.

Bestände die de Sittersche Lösung überall zu Recht, so würde damit gezeigt sein, daß der durch die Einführung des „ $\lambda$ -Gliedes“ von mir beabsichtigte Zweck nicht erreicht wäre. Nach meiner Meinung bildet die allgemeine Relativitätstheorie nämlich nur dann ein befriedigendes System, wenn nach ihr die physikalischen Qualitäten des Raumes allein durch die Materie *vollständig* bestimmt werden. (Einstein 1918a: 271)

Im Jahr 1919 begründet Einstein seine Skepsis gegen weitere kosmologische Modelle immer noch mit dem Machschen Prinzip – aber für ihn wird die Fragestellung der Besonderheit des elektromagnetischen Felds gegenüber dem Gravitationsfeld bedeutsamer (Einstein 1919b). Im September 1920 verwendet Einstein in einer Diskussion die Machsche Argumentation, nach welcher das Gravitationsfeld durch ferne Massen induziert wird (Einstein 1920c: 354), obwohl er im Mai bereits gegen Mach argumentiert hatte weil dessen Erregung der Trägheitswirkung durch kosmische Massen eine neue Art Fernwirkung voraussetzen würde (Einstein 1920b: 316). In diesem Zusammenhang spricht Einstein nun sogar von einem physikalisch wirksamen Raum und gibt ihm den Namen „Äther“, der von der Materie mitbedingt wird.

Ungeachtet dieser Divergenz spricht er 1921 in London wieder davon, dass er von einer räumlich geschlossenen Welt ausgeht, weil in seiner Theorie „die physikalischen Eigenschaften des Raumes durch die ponderable Materie beeinflusst sind.“ (Einstein 1921: 433) Das Insistieren auf der Geschlossenheit scheint für eine weitere Verteidigung seines Standpunkts von 1917 zu stehen, obgleich die Wortwahl vorsichtiger geworden ist. Er spricht davon, dass die Raumeigenschaften von der Materie „beeinflusst“ sind, nicht mehr „allein“ oder „vollständig“ wie früher. Im Manuskript der Leidener Rede (1920b) fällt eine nachträgliche Änderung auf: Zuerst stand dort: „Nach dieser Theorie [der allgemeinen Relativitätstheorie, A.S.] sind die metrischen Eigenschaften des Raum-Zeit-Kontinuums in der Umgebung der einzelnen Raum-Zeitpunkte verschieden und bedingt durch die außerhalb des betrachteten Gebietes vorhandene Materie“, wobei das hier hervorgehobene Wort „bedingt“ verändert wurde in „mitbedingt“ (ebd.: 317, siehe Anmerkung 20 auf S. 322).

Noch 1922 verteidigte er seinen statischen Kosmos, indem er meinte, in der Lösung von Alexander Friedmann, die einen dynamischen Kosmos bedeutet, Fehler nachweisen zu können. Er sah schnell ein, dass er sich irrte (siehe Einstein 1954 -Anhang 4). 1929 schließlich konnte Hubble nachweisen, dass das Weltall tatsächlich expandiert.

Einstein erfuhr 1931 von diesem Ergebnis und es wurde klar, dass damit das Machsche Prinzip nicht mehr aufrecht zu erhalten war.

1930 hat Einstein sogar den ursprünglichen Inhalt des Machschen Prinzips umgekehrt. Während bei Mach der Raum auf rein (physisch) materielle Körpereigenschaften zurückgeführt werden sollte, nahm Einstein jetzt an, dass die physische Materie nur eine Folge räumlicher Eigenschaften sei.

Der Raum, ans Licht gebracht durch das körperliche Objekt, zur physikalischen Realität erhoben durch Newton, hat in den letzten Jahrzehnten den Äther und die Zeit verschlungen und scheint im Begriffe zu sein, auch das Feld und die Korpuskeln zu verschlingen, so daß er als alleiniger Träger der Realität übrig bleibt. (Einstein 1930: 180)

Dass er sich auch später durchaus eindeutig gegen ein Festhalten am Machschen Prinzip ausgesprochen hat, zeigen zwei weitere Belege:

In einem Brief an Felix Pirani im Jahr 1954 erklärte Einstein, „daß er es inzwischen nicht mehr einleuchtend finde, daß das Gravitationsfeld durch den Energieimpulstensor der Materie vollständig bestimmt sein solle, wie es das Machsche Prinzip fordert.“ (zit in Renn 2006: 298)

Denn eine solche Bestimmung ist ja nur dann möglich, wenn zuvor die Verteilung der Materie in der Raumzeit gegeben ist. Dies aber setzt bereits Wissen über eine gegebene Raumzeit voraus, was wiederum die Kenntnis der Metrik verlangt, die doch durch die Feldgleichung erst bestimmt werden soll. (ebd.)

Auch in seinen autobiographischen Notizen bekräftigt er diese Abwendung vom Machschen Prinzip mit dem Argument: „In eine konsequente Feldtheorie passt ein solcher Lösungsversuch nicht hinein...“ (zit. in Renn 2006: 299). Trotzdem ist es auch eins der Ziele dieser weiter entwickelten Feldtheorie bei Einstein, die Forderung der Messbarkeit in einer letztlich vollständigen Theorie nicht mehr zu benötigen (Einstein 1949: 509)

## **Geometrodynamik – alles ist Raum**

Wie schon erwähnt, war Einstein unzufrieden mit der Dualität der linken und der rechten Seite seiner Feldgleichung (5). Der weitere Weg wurde von ihm und auch nach seinem Tod von anderen Wissenschaftlern in weiteren Vereinigungsversuchen gesehen. Eins dieser Programme war die Geometrodynamik nach Wheeler in den 60er Jahren (Wheeler 1962). Das Machsche Prinzip hatte die Vereinheitlichung von Raumzeit und dynamischer Materie durch die Abschaffung der Raumzeit versucht – in der Geometrodynamik sollte die Materie auf die Geometrie zurückgeführt werden. Es wurde vermutet, dass alle nichtgeometrischen Materieformen aus der Krümmung einer geeigneten Geometrie abgeleitet werden können. Dies war der Versuch, die „materielle Welt aus leerem gekrümmten Raum aufzubauen“ (Kanitscheider 1991: 429). Da Vereinheitlichungen in der physikalischen Theorie bedeuten, in vorher getrennten Berei-

chen ein gemeinsames Wesen aufzufinden, wurde bereits spekuliert, dass „in den geometrischen Strukturen [...] das Wesen physikalischer Prozesse zutage [tritt].“ (Griese 1966: 76) Innerhalb der Geometrie ergäbe sich jedoch auch hier eine Art Dualismus, und zwar jener zwischen Metrik und Topologie (Von Borzeszkowski, Wahsner 1979: 215).

In den 70er Jahren erwies sich dieses Projekt in dieser Weise als nicht realisierbar. Neue Theorien wie die String- und die Looptheorie entstanden, wobei sich neue Ideen und Begriffe entwickelten, die nicht mehr einfach in das alte Konzept einzuordnen waren. Die Loop-Theorie ist dabei eine Art „Erbe“ der Geometrodynamik.

## **String- und Looptheorien**

### **Stringtheorie**

Die derzeit aktuellsten Kandidaten für eine neue Theorie, die alle bekannten physikalischen Wechselwirkungen vereinigt, sind die String- und die Looptheorie. In der Stringtheorie wird angenommen, dass die kleinsten Objekte, aus denen sich die Elementarteilchen aufbauen, nicht punktförmige Objekte, sondern Wellen auf linienförmigen Objekten, nämlich den „strings“ (auf dt.: Schnur, Saite) sind. Diese Theorie erfordert nicht nur die bekannten 4 Dimensionen, sondern 10 und in ihrer weiter entwickelten Form als M-Theorie 11 Dimensionen. Genau so, wie die Anzahl der prognostizierten Elementarteilchen immer weiter zunahm, so entstehen auch in der Stringwelt immer neue Konzepte von Objekten, so z.B. auch zweidimensionale „Brane“ (von „Membrane“). Obwohl wir selbst nur auf einer Membran leben und auch Licht und alle physikalischen Wechselwirkungen außer der Gravitation für uns auf diese eine Membran beschränkt sind, könnte die Gravitation zwischen den Branen wirken. Daraus lassen sich Experimente mit Messungen ableiten, die aber noch nicht genau genug durchgeführt werden können, um diesen eventuellen Einfluss zu messen. Um Effekte der zusätzlichen Dimensionen entdecken zu können, wird auf Teilchenbeschleunigerentdeckungen gesetzt.

Die Strings und Brane bewegen sich nach wie vor in einer voraus zu setzenden Raumzeit, auch wenn diese nun 11-dimensional ist. Lediglich eine von Hawking entwickelte Variante könnte auf einen „Außenraum“ verzichten (Hawking 2003: 207).

### **Prägeometrische Looptheorie**

Seit Ende der 80er Jahre wurden alte Gedanken von Wheeler und Penrose aufgegriffen und ein anderes Konzept einer erweiterten Theorie vorangetrieben. Es ist die Theorie der Quantengeometrie, auch Loop Quantum Gravity (Loop: Schleife) genannt. John Wheeler hatte in den 60er Jahren bereits vorgeschlagen, die Raumzeit in den kleinsten Bereichen als „schaumförmig“ anzusehen, d.h. den Raum als ebenso gequantelt wie die Materie zu betrachten. Roger Penrose entwickelte in den 70ern sog. „Spin-Netze“,

die als Grundlage für eine Art „Raumzeit-Staub“ zu verstehen waren. Raum und Zeit gelten dabei nicht mehr als vorauszusetzendes Medium, sondern sie werden als Folge des Aufeinanderwirkens der Elemente in „Spin-Netzwerken“ erklärt (vgl. Zimmermann 1991: 46ff.). Raum und Zeit entstehen aus quantenphysikalischen Überlagerungen aller möglichen Zustände im Geflecht des Spin-Netzwerks. Solch ein Netzwerk kann es schon „vor“ dem Urknall gegeben haben und aus ihm heraus entstand „beim“ Urknall erst unser raumzeitliches Universum („Initialemergenz“). Mittlerweile wurden bereits die mathematischen Voraussetzungen weit entwickelt, um Bewegungen und Kräfte zu beschreiben, ohne eine Hintergrundmetrik zu benötigen (basierend auf der mathematischen Knotentheorie).

Demnach besteht die tiefste Fundierung unserer Welt auf einem nicht raumzeitlichen Netzwerk von bestimmten Größen, die auch als „Twistoren“<sup>20</sup> bezeichnet werden; daraus entsteht eine raumzeitliche Geometrie. Als physikalische Materie bilden sich Anregungen in dieser Geometrie heraus (vgl. Geometrodynamik). Da Geometrie und auch Materie quantisiert sind, können sich Geometrie- und Materiequanten auch ineinander umwandeln, was für Schwarze Löcher angenommen wird. In diesen Konzepten werden ebenfalls Aussagen über beobachtbare Folgen der diskreten Raumzeit gemacht, vor allem bei der Beobachtung von Gammastrahlen-Ausbrüchen (Smolin 2004: 62).

Rainer E. Zimmermann geht – die philosophischen Konzepte von Spinoza und Schelling sowie die physikalischen Ideen von Wheeler und Penrose präzisierend – davon aus, dass nur die mit Massen, Längen und Zeiten bestimmbaren Objekte als „Welt“ zu verstehen sind. Das bedeutet, dass die Überlegungen zur Grundlegung von Raum und Zeit keine Themen innerhalb der Welt darstellen, sondern zu ihrem Grund, den er mit Spinoza und Schelling Substanz nennt. (Zimmermann 2004: 447, 476) Die Vereinigung von allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie erfolgt also nicht innerhalb der Welt, sondern außerhalb, wobei der Grund selbst raum- und zeitlos ist (ebd.: 266ff.). Es geht also hier um eine „Prä-Geometrie“ (ebd.: 310), die diskontinuierlich und ohne Metrik ist. „Der Kosmos wird dabei beschreiben als eine bloße lokale Verwerfung des globalen Netzwerks, an der Initialsingularität auftauchend, in der Zeit seiend, und – möglicherweise – in einer Endsingularität wieder in die Raum-Zeitlosigkeit verschwindend.“ (Eisenhardt, Kurth 1993: 24) Aus den prägeometrischen Strukturen heraus entstand unsere Welt aus einer „Initialemergenz“, die als „Brechung der Zusammenhangsstruktur eines Vorzustands“ (Kurth 1997: 270) beim Übergang in die raumzeitliche Existenz unseres Universums zu verstehen ist. Dabei sind mathematische Strukturen und Operationen in der Diskussion, die diesen Prozess nachzeichnen sollen, und es wird durchaus nach der „ontischen Referenz“ dieser mathematischen Grö-

---

<sup>20</sup> Twistoren berücksichtigen im Unterschied zu Spinoren weitere „realistische“ Parameter wie Bahndrehimpuls und Translation sowie die Relativistik der Bewegungen (vgl. Zimmermann 1991: 49).

ßen gefragt (Eisenhardt, Kurth 1993: 38), aber in dem Sinne, dass uns bewusst ist dass wir sie nicht wahrnehmen oder messen können (Zimmermann 2004: 494, 497).

Wir Menschen sind in diesem Konzept Teil der Welt, aber nicht ihres Grundes, der Substanz. Wir erleben die Welt in Raum und Zeit, innerhalb dieser betreiben wir die empirische Physik, die unserer experimentellen Erfahrung zugänglich ist. Darüber hinaus erfordert jedoch die tiefere Begründung von weltlicher Materie, Raum und Zeit eine andere Art Physik, eine fundamentale Physik, die gleichzeitig als spekulative Philosophie (im Sinne Schellings) zu verstehen ist. (ebd.: 518). Trotzdem gibt es keine absolute Trennung zwischen Welt und Grund, empirischer Physik und fundamentaler Physik bzw. spekulativer Philosophie. Worin besteht der Zusammenhang? Spin-Netzwerke gehören noch zur welthaften Physik, sie sind quasi ihr „Rand“. Der Zusammenhang zu ihrem nicht mehr welthaften, d.h. nicht mehr physikalisch erkennbaren substantiellen Grund ist eben in dieser Begründung zu sehen: Die den Grund erfassende spekulative Phantasie muss Bezug auf das nehmen, was über die Welt mindestens bereits gewusst wird (ebd.: 483).

## **Philosophie der Raumzeit**

### **Mathematik-Physik-Welt**

Gerade mit der Frage von Raum und Zeit befinden wir uns im Verflechtungspunkt von verschiedenen möglichen Sichtweisen. Auf der einen Seite sprechen wir von Räumen in einem vollkommen abstrakten mathematischen Sinn. Geordnete Punktmengen mit definiertem Abstand oder Mannigfaltigkeiten mit Metrik und Topologie haben hier ihren Platz. Auf der anderen Seite haben wir unsere reale, wirkliche Welt, über deren Strukturen und Bewegungsformen wir in der Wissenschaft Aussagen machen wollen. Aber es gilt nicht nur die Beziehung von wirklichen räumlichen Beziehungen und ihren mathematischen Darstellungen zu diskutieren, denn „kein Physiker mißt mit Geräten, die in einem abstrakten Raum aufgestellt sind.“ (Treder 1966: 565)

Wir müssen also Räume in der Wirklichkeit, der Mathematik und der Physik unterscheiden und jeweils ihre Beziehungen untersuchen. In der Physik werden mathematischen Parametern physikalische Bedeutungen zugeordnet. Schon für Einstein war es wichtig, zwischen der reinen Geometrie als Bereich der Mathematik, bei der die fehlerlose Ableitung aus Axiomen das Wesentliche ist, und einer Geometrie, deren Grundbegriffen Naturobjekte zugeordnet werden, zu unterscheiden. (Einstein 1922/1979: 11f.; vgl. auch Einstein 1920d: 250) Diese Differenzierung zeigt sich auch in der Unterscheidung (mathematischer) Koordinatensysteme und (physikalischer) Bezugssysteme.

Die raumzeitliche Beschreibung eines physikalischen Geschehens bedeutet die Benutzung eines räumlichen Bezugssystems mit drei eindeutigen unabhängigen räumlichen

Koordinaten und einer Uhr, deren Anzeige eindeutig einer zeitlichen Koordinate zugeordnet werden kann. Die benutzten vier Koordinaten fungieren dabei als Parameter, denen im Zusammenhang mit der Definition eines physikalischen Längenbegriffs und eines physikalischen Zeitbegriffs ein physikalischer Sinn gegeben werden muß. (Schmutzer 1989: 254)

Gerade die Berücksichtigung der besonderen Rolle der physikalischen Bedeutungen für raumzeitliche Parameter wird häufig vernachlässigt. Das sog. „Meßproblem“ in der Quantentheorie ist allgegenwärtig in den Diskussionen um diese Theorie. Für die Relativitätstheorien oder gar die Klassische Physik wird diese Problematik häufig vernachlässigt. Aber auch hier kommt der Frage nach der spezifischen Art der physikalischen Erfahrung, die – zumindest seit 1840<sup>21</sup> – mit der Messung von Grundgrößen zusammen hängt, eine große Rolle zu.

### **Physik als Erkundung der Veränderbarkeit**

Aus den wirklichen, den unendlich komplexen, widersprüchlich miteinander verflochtenen Momenten der realen Welt lösen wir in unserer Erkenntnis Teile heraus, um sie in einer Art und Weise zu erfassen, die sich aus unserer Lebensweise ergibt. Menschen verändern die Bedingungen ihres Lebens maßgeblich und bewusst durch gesellschaftliche Arbeit – Wissenschaft hat als Moment dieser umfassenden Prozesse die Aufgabe, die objektiven Veränderungsmöglichkeiten der Wirklichkeit zu erkunden (vgl. Laitko 1979: 84, Bloch PH: 286). Veränderbarkeit bedeutet, dass sich in einem Wirklichkeitsbereich etwas in Bezug auf etwas anderes verändert. Die Form, in der speziell in der Physik Aussagen über die Veränderbarkeit ihrer Gegenstände, der physikalischen Bewegungsformen gemacht werden, sind die physikalischen Naturgesetze. Die Frage nach der Veränderbarkeit lässt sich auch umformulieren in die Frage, welche Bewegungsmöglichkeiten die Gegenstände haben. In diesem Sinne erfasst jedes Naturgesetz die Bewegungsmöglichkeiten unter gegebenen Bedingungen. 1. gibt das Gesetz für den Gegenstand nicht direkt seine konkrete Bewegungsweise vor, sondern lediglich die für ihn gegebenen Bewegungsmöglichkeiten<sup>22</sup> (das Keplersche Gesetz sagt dem Planeten  $P$  nicht, wo er sich zum Zeitpunkt  $t$  genau aufzuhalten hat, sondern es gibt die mögliche Bahn für vor, auf denen sich ein Planet auf seinem Weg um den Zentralstern bewegen kann. 2. unterliegt jedes Gesetz Existenz- und Wirkungsbedingungen und u.U. (z.B. in der Technik) können diese Bedingungen verändert werden und deshalb kann beeinflusst werden, welches Gesetz zur Wirkung kommt.

Da qualitativ unterschiedliche Strukturniveaus der Bereiche der Welt zu berücksichtigen sind und in einer Naturwissenschaft niemals die Gesamtheit der Welt erfasst wird, gibt es für bestimmte qualitativ vergleichbare Gegenstände Gesetze und diese Gesetze

---

<sup>21</sup> vgl. Kuhn 1977: 294.

<sup>22</sup> Zu einem das Möglichkeitsfeld berücksichtigenden Gesetzesbegriff siehe Hörz 1974: 365/366.

bilden für zusammen gehörige Gegenstandsbereiche systematische Zusammenhänge in Form von Theorien.

Es zeigt sich, dass jeweils für bestimmte Theorien dazu passende Raumzeitkonzepte gehören, und diese hängen selbstverständlich vom Objektbereich ab<sup>23</sup>.

Die mathematischen Strukturen, die zur Beschreibung der physikalisch wesentlichen Eigenschaften von Raum und Zeit in der Physik einzuführen sind, hängen von der raumzeitlichen Größenordnung der betrachteten physikalischen Systeme ab. (Treder 1968: 7)

So unterscheidet Kanitscheider (1991: 157), weitgehend Treder folgend, den mesokosmischen Bereich, in dem die pseudo-euklidische Minkowski-Raumzeit gilt, während in astronomischen Bereichen, in denen das Gravitationsfeld eine Rolle spielt, die Riemannsche Geometrie verwendet werden muss. Im mikroskopischen Bereich (unter  $10^{15}$ ...  $10^{-33}$ cm) findet die Anwendbarkeit glatter Mannigfaltigkeiten ihr Ende (ebd.: 165).

Wenn bisher von Gegenständen und Theorien gesprochen wurde, so war darin eine Unterscheidung zwischen Erkenntnisobjekten und Erkenntnisresultaten vorausgesetzt. Im Erkenntnisprozess sind jedoch weitere Momente wesentlich: Erkenntnis ist eine Tätigkeit von Erkenntnissubjekten und diese Subjekte begegnen ihren Objekten nicht unmittelbar, sondern sie erzeugen und verwenden gegenständliche und auch theoretische Erkenntnismittel.

### **Der Doppelcharakter des Raums als Erkenntnisobjekt und –mittel**

Wir hatten festgestellt, dass der Status des Raumes auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie noch nicht komplikationslos feststeht. Der Raumzeitbegriff ist komplexer geworden. Uns begegnet der Raum als „Gravitationsäther“, der trotz seiner lokalen Bestimmung durch das Gravitationsfeld im Infinitesimalen eine minkowskische Struktur hat (und damit starre Messkörper ermöglicht) und deren kosmisch-globale Struktur sich ebenfalls nicht direkt aus der Feldgleichung ergibt, sondern weitere Zusatzannahmen erfordert.

Wir kommen damit weder zu der positivistisch-naiven Annahme, dass die Raumzeit uns einfach sinnlich gegeben sei, noch können wir mit Kant annehmen, die Raumvorstellung sei uns Menschen ein für allemal vor aller Erfahrung in unveränderlicher Weise gegeben. Wir kommen nicht umhin, die Komplexität des Erkenntnisprozesses in seiner Einheit von Erkenntnissubjekt, Erkenntnismittel und Erkenntnisobjekt in Betracht zu ziehen.

---

<sup>23</sup> Dies gilt auch über die Physik hinaus: „Materielle Systeme verschiedener Entwicklungsstufen haben ihre eigenen raumzeitlichen Strukturen“ (Hörz 1971: 261; vgl. auch Gehlhar, Röseberg 1996: 777).

Wir sahen, dass es in der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie notwendig war, für die durch das Gravitationsfeld „gekrümmte“ Raumzeit eine Beschreibungsweise zu finden, die trotz dieser lokalen Krümmung die Definition starrer Einheitsmaßstäbe ermöglicht. Diese Einschränkung hatte messtheoretische Gründe. Einstein verteidigte die Notwendigkeit dieser Voraussetzung beispielsweise gegen Hermann Weyl (s.o.). Für die Newtonsche Theorie war noch die gesamte absolute Raumgeometrie notwendig als „Etalon“, um ihr gegenüber Kraftwirkungen bestimmen zu können. Die allgemeine Relativitätstheorie reduzierte den messtheoretischen Anteil der Geometrie, indem sie deren Metrik „physikalisierte“. Trotzdem bleiben Anteile der Geometrie, „die durch Meßgründe bedingt sind,[und] niemals aus der Dynamik (Feld- bzw. Bewegungsgesetz) der jeweiligen physikalischen Theorie abgeleitet werden können, sondern ihr vorausgesetzt werden müssen.“ (von Borzeszkowski, Wahsner 1980: 685)<sup>24</sup> Dabei sind physikalische Theorie und voraussetzende messtheoretische Raumzeitvorstellungen niemals unabhängig voneinander, sondern die Dynamik für den entsprechenden Gegenstandsbereich entscheidet mit, welche Raumzeitvorstellung angemessen ist. Die „Konstruktion“ der voraussetzenden Raumzeit ist nicht beliebig, sondern da sie gerade wegen der Messung notwendig ist, sichert gerade sie die objektive Erkenntnis realer raumzeitlicher Strukturen. Wir werden darauf noch zurückkommen.

Für Einstein schienen solche Erkenntnismittel nur zeit- und übergangsweise notwendig zu sein:

Der Begriff des Meßkörpers [...] findet in der wirklichen Welt kein ihm exakt entsprechendes Objekt. [...] Aber es ist meine Überzeugung, daß diese Begriffe beim heutigen Entwicklungsstadium der theoretischen Physik noch als selbständige Begriffe herangezogen werden müssen... (Einstein 1953: 161)

Tatsächlich verschieben sich im Verlaufe des Erkenntnisfortschritts die Anteile des Voraussetzenden, das Apriorischen. Was vorher a priori war, wird in folgenden Theorien in die Dynamik einbezogen.

Diese Entwicklung stellt sich als immer schärfere Bestimmung dessen dar, was notwendig ist, um Messung zu ermöglichen. (von Borzeszkowski, Wahsner 1980: 695)

Kant hat also insofern Recht, als jede Erkenntnis Voraussetzungen (Erkenntnismittel) benötigt, die nicht direkt aus der Theorie (dem Erkenntnisresultat) selbst folgen: das sind Voraussetzungen „vor der Erfahrung“ (a priori). Allerdings ist jedes a priori selbst relativ in Bezug auf den Gegenstandsbereich und die ihn erfassenden Theorie.

Bei der Interpretation von Kant wird meist nur auf das Vorausgesetztsein der Raumvorstellung verwiesen, aber vergessen, dass auch bei Kant voraus gesetzt war, dass in dieser Raumvorstellung die „Prinzipien der Verhältnisse“ der Gegenstände (Kant KrV:

---

<sup>24</sup> vgl. dazu auch: von Borzeszkowski 1992 und Wahsner 1992.

70) enthalten sind. Die Raumvorstellung ist also nicht beliebig, sondern gebunden an die Verhältnisse der Gegenstände selbst. Auf diese Weise sind Erkenntnismittel und Erkenntnisobjekte voneinander abhängig und nicht voneinander trennbar.

Renate Wahsner arbeitete heraus, dass physikalische Messgrößen grundsätzlich erkenntnistheoretisch gesehen Erkenntnismittel, physikalisch gesehen jedoch Erkenntnisobjekte der Physik sind. (Wahsner 1996: 121) Wir untersuchen objektive räumliche Lageveränderungen mittels Vergleich von Längen mit starren Maßstäben, die es so in der Natur nicht gibt. Trotzdem erfolgt die Herstellung unserer Erkenntnismittel, hier der starren Maßstäbe, nicht willkürlich und beliebig, sondern entsprechend den in der objektiven Realität vorhandenen Verhältnissen. Wir sahen das in der Einsteinschen Argumentation (gegen Weyl) über die Möglichkeit der Idealisierung von Längen und konstanter Zeitabstände wegen der Existenz scharfer Spektrallinien. Nach von Borzeszkowski und Wahsner sind Messgrößen „auf der Basis real vorhandener Gleichheiten konstruierte Gedankendinge, mit deren Hilfe man das eigentliche Erkenntnisobjekt, die Wirklichkeit [...]erkennt“ (Von Borzeszkowski, Wahsner 1989: 156). Diese Größen können nicht mit dem Objekt identifiziert werden, aber sie erfassen jeweils eine wesentliche Verhaltensweise der Objekte. Gerade weil keine Größe allein mit einem Objekt identifizierbar ist, werden zur Beschreibung der Bewegungsmöglichkeiten von Objekten jeweils geeignete Kombinationen von verschiedenen Größen benötigt. Physik geht nie in reine Mathematik, bei der die Qualität der Größen keine Rolle zu spielen braucht, über.

Im Miteinander von Erkenntnissubjekt, Erkenntnismittel und Erkenntnisobjekt bestimmen sich diese Momente gegenseitig. Bestimmte Zusammenhänge der objektiven Realität werden vom Erkenntnissubjekt unter Verwendung bestimmter Erkenntnismittel zu Erkenntnisobjekten. Diese Erkenntnisobjekte, d.h. die untersuchten Gegenstände sind nicht die Naturbeziehungen „an sich“, sondern als Objekte unserer Erkenntnis, Gegenstände „für uns“. Auch wenn die modernere Naturwissenschaft immer mehr die Eigenaktivität natürlicher Gegenstände untersucht, untersucht sie diese doch in Form des Objekts (vgl. von Borzeszkowski, Wahsner 1992: 17) und nicht ernsthaft als Mit-Subjekt. Das Subjekt der Erkenntnis bestimmt sich auch im Erkenntnisprozess selbst. Wissenschaftliche Erkenntnis vollzieht sich zwar wie alle gesellschaftliche Tätigkeiten nur im Tun von menschlichen Individuen, aber im Erkenntnissubjekt wird die menschliche Sinnlichkeit, das subjektive Empfinden jeweils methodisch umgearbeitet in einer Weise, dass die Erkenntnisse intersubjektiv gelten können und verallgemeinerbare, für alle gesellschaftlich tätigen Menschen – nicht nur das subjektiv empfindende bzw. konkret-sinnlich wahrnehmende – geltende Ergebnisse entstehen. Der naturwissenschaftliche Standpunkt negiert nicht das Subjekt sondern, „unterstellt nur eine Art von Subjekt, womit das ihm entgegenstehende Objekt eindeutig bestimmt ist. Er hält ver-

schiedene Subjekte nicht für möglich und darf es nicht.“ (von Borzeszkowski, Wahsner 1987: 1114)

Der Raum (bzw. die Raumzeit) kann in dieser Weise verstanden werden als physikalisches Erkenntnisobjekt, das sich philosophisch wenigstens zum Teil als Erkenntnismitel verstehen lässt. Das Erkenntnissubjekt (d.h. die erkennende Menschheit) entwickelt praktische und Denkmittel, die es ihm ermöglichen, die Bewegungsweise ihrer Untersuchungsgegenstände immer umfassender und genauer zu verstehen. Der Gegenstand der Untersuchung ist die Bewegung und Bewegung vollzieht sich gegenüber einem relativ dazu unbewegten „Etalon“ – beide Momente müssen im Prozess der Bewegung erfasst werden. Wie wir sahen, verändert sich der Inhalt dessen, was als Bewegung und was als jeweils gegebene Voraussetzung zu verstehen ist, mit der Entwicklung jeweils neuer, die alten umfassenden Theorien. Die Unterscheidung zwischen direktem Erkenntnisobjekt und dementsprechend angemessenen Erkenntnismitteln bleibt jedoch eine allgemeine Eigenschaft der erkennenden Beziehung von Menschen gegenüber der Welt.

### **Der Raum als passives und aktives Prinzip**

Newtons Grundlegung der Physik lehnte die frühere Unterscheidung von Dingen und ihren spezifischen („okkulten“) Qualitäten ab. Er unterschied stattdessen Körper und Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Die Kräfte werden durch die Beziehung der Körper zueinander konstituiert. Während Newton die Körper, die durch Härte oder Trägheit charakterisiert sind, als passive Prinzipien seiner Physik versteht, bezeichnet er die Kräfte wie die Gravitation oder so etwas wie Kohäsionskraft oder Gärungsursachen als aktive Prinzipien (Newton Opt.: 168, vgl. Wahsner 1981: 60f.). Kräfte sind nicht den einzelnen Körpern inhärent (wie Eigenschaften), sondern existieren nur in der Beziehung der Körper aufeinander. Damit ist eine mechanistische Sichtweise, die in Körpern voneinander isolierte Dinge sehen, ausgeschlossen. Allerdings werden Dinge und Kräfte auch nicht ununterscheidbar miteinander vermischt, sondern auf spezifische Weise, nämlich in der Unterscheidung passiver und aktiver Prinzipien als Momente der Bewegung darstellbar gemacht.

Diese Unterscheidung von passiven und aktiven Prinzipien wurde von Newton zuerst in der Form der Unterscheidung von Körpern und den zwischen ihnen wirkenden Kräften gemacht. Diese Unterscheidung zeigt sich aber auch in der Form, dass zwischen Gesetzen (als aktiven Prinzipien) und ihren Wirkungs- und Existenzbedingungen (als passive Prinzipien) unterschieden wird und ebenfalls in der Form, dass es einerseits Gesetze für die realen Bewegungsmöglichkeiten der Gegenstände gibt und dass sich andererseits diese Bewegung in unserer Erkenntnis durch reproduzierbare Messungen abbilden lassen muss. Für die raumzeitliche Bewegung ergibt sich die Unterscheidung von Bewegungsdynamik und messtheoretisch vorauszusetzender Raum-

zeit mit starren, vergleichbaren Längenmaßstäben und gleichmäßig gehenden, vergleichbaren Uhren. Wir erkennen die physikalische Bewegung (z.B. die beschleunigte Ortsveränderung) immer nur im Verhältnis zu einem „Standard“ (z.B. der geradlinig-gleichförmigen Bewegung als Trägheitsbewegung). Erkenntnis ist nie nur das Verhältnis von Erkenntnissubjekt und der Welt „an sich“, sondern der Prozess des Erfassens der Erkenntnisgegenstände (z.B. der physikalischen Bewegung) unter der Bedingung ihrer physikalischen Reproduzierbarkeit, d.h. der Messbarkeit (d.h. der Verwendung starrer Maßstäbe und einer entsprechenden Geometrie als Erkenntnismittel). Das jeweils als zweites genannte Moment der Erkenntnis muss zwar dem Gegenstand angemessen sein (er muss wirkliche Verhaltensweisen des Gegenstandes zu messen erlauben), aber er muss selbständig entwickelt und zur Verfügung gestellt werden, also „vor der Erfahrung“ (a priori).

Im Fortschritt der Wissenschaft wird der jeweilige a priori-Bereich immer mehr reduziert. Während die Newtonsche Physik den gesamten (euklidischen) Raum voraussetzen musste, übernahm die allgemeine Relativitätstheorie die Metrik des (Riemannschen) in die Dynamik des physikalischen Gravitationsfelds. Dieser Raum muss aber wenigstens im Infinitesimalen die Definition starrer Körper und gleichmäßiger Uhren ermöglichen – hier hat der Riemannsche Raum tatsächlich eine quasi-euklidische, minowskische Struktur. Andererseits gilt die Äquivalenz von Krümmungsmetrik und Gravitation nur lokal und für globale, kosmische Aussagen müssen weitere Annahmen vorausgesetzt und durch astrophysikalische Untersuchungen plausibel gemacht werden. In diesen Formen, die die Raumzeit in der allgemeinen Relativitätstheorie annimmt, zeigen sich Anteile des Raums in den aktiven Prinzipien (die Metrik) und in den passiven Prinzipien (das messtheoretische notwendige Infinitesimale).

Wie wir sahen, war für Einstein diese Situation noch kein Endzustand. Er suchte weiterhin nach einer vereinheitlichten Theorie, bei der es möglichst keine a priorischen Teile geben sollte. Ob dieses Vereinheitlichungsstreben tatsächlich zu einem Abschluss gelangen kann?

Ein Ziel der weiteren Geschichte der Physik ist es [...] herauszufinden, ob die Aufspaltung nicht auch anders vollzogen werden kann (z.B. so, daß weniger „apriorische“ Bestimmungen erforderlich sind) oder ob sie nicht generell vermieden werden kann (worin die Zielstellung der unitären Theorien bzw. einheitlicher Feldtheorien bestehen). (von Borzeszkowski, Wachsner 1989: 30)

An anderer Stelle schrieben diese beiden Autoren jedoch: „Ein „apriorischer Anteil“ ist – so zeigt sich – für die Einzelwissenschaft Physik unabdingbar. Gerade das unterscheidet sie von der Philosophie.“ (von Borzeszkowski, Wachsner 1979: 222, vgl. Wachsner 1981: 166) Renate Wachsner bekräftigte diese Ansicht später:

Das absolute Ganze ist uns nie gegeben – aber stets aufgegeben. (Wachsner 1998: 13)

Demnach werden Physikerinnen und Physiker immer wieder davon motiviert sein, eine endgültige Vereinheitlichung aller Momente zu finden – und immer wieder wird sich herausstellen, dass sich auf der Basis des neuen Wissens erneut Momente zeigen, die nicht voraussetzungslos in der einen „Weltformel“ enthalten sind, sondern ihr als passives Prinzip, also a priori, vorausgesetzt werden müssen...

### **Die Raumzeit als Struktur von Bewegungsmöglichkeiten**

Wir hatten den Doppelcharakter der Raumzeit als Erkenntnisobjekt und Erkenntnis-  
mittel, als Bestandteil der aktiven und der passiven Prinzipien kennen gelernt. Die  
Raumzeit, bzw. andere passive Prinzipien sind als Voraussetzung von Messungen, d.h.  
der physikalischen Erfahrung, *Bedingung der Möglichkeit der Erkenntnis von in sich wider-  
sprüchlicher Bewegung*. Zumindest in den gegenwärtig diskutierten Theorieformen der  
Einzelwissenschaft Physik ist es nicht möglich, die Widersprüchlichkeit der Bewegung  
(vgl. Zenon) allein in Bewegungs- bzw. Feldgleichungen zu erfassen, sondern die Er-  
fassung der Bewegung (aktives Prinzip) erfordert eine Bezugnahme auf einen relativ  
gegenüber den Feld/Kraftwirkungen unbeeinflussten „Standard“. Im Fortschritt der  
Wissenschaft werden immer mehr Anteile des vorher a priorischen Anteils als physi-  
kalisches bedingt erkannt, die Physik erfasst immer mehr Momente der realen Wider-  
sprüchlichkeit. Insofern vertieft jede neue Einheit von aktiven und passiven Momen-  
ten, von dynamischen Gesetzen und aus vorausgesetzten a priori- Anteilen das Ver-  
ständnis der wirklichen Widersprüchlichkeit. Obwohl all diese Erkenntnisresultate  
Resultate „für uns“ sind, also lediglich relative Wahrheiten (Lenin MuE: 116), erschlie-  
ßen wir uns mit jeder der aufeinander folgenden Theorien weitere Bereiche der Wirk-  
lichkeit und es entstehen neue Gegenstandsbereiche, in denen sich eine neue Form der  
Widersprüchlichkeit zeigt, die wir innerhalb der vorhergehenden Theorie gar nicht  
erahnen konnten. Das, was als objektive Grundlage der Raumvorstellung zugrunde  
liegt, ist quasi immer ein „Platzhalter“ für noch nicht erkannte tiefer liegende widersprüchli-  
che Strukturen der Welt.

Diese Funktion des „Platzhalters“ übernehmen in vielen Theorien, sogar noch in der  
allgemeinen Relativitätstheorie, zumindest (die passiven, d.h. die messtheoretisch  
notwendigen) Teile der Raumzeit. Deren Spezifik besteht darin, mit „Bahnkurven und  
Lagebeziehungen“ verbunden zu sein (Hörz 1971: 327), bzw. mathematisch als „vier-  
dimensionale Mannigfaltigkeit, auf der eine Metrik gegeben ist“ (Kanitscheider 1991:  
165) darstellbar zu sein.

In ontologisierender Sprechweise wird der Raum auch charakterisiert als „Struktur  
eines Systems“ (Hörz 1971: 327) bzw. als „Gesamtheit aller möglichen Ereignisse“ (Ka-  
nitscheider 1991: 165). Damit unterscheiden sich das dynamische Gesetz (aktives Prin-  
zip) und der Raum (passives Prinzip) durch die Art der Möglichkeit, die in ihnen eine  
Rolle spielt. Im Gesetz wird die reale Möglichkeit der jeweils konkret erfassten Er-

kenntnisgegenstände erfasst, während der Raum als (abstrakter) „Platzhalter“ für jeweils noch nicht erfasste Momente steht.

## Ausblick

Es ist zu vermuten, dass immer wieder das Bestreben existiert, eine endgültig einheitliche, nicht mehr dualistisch in aktive und passive Momente unterschiedene Wissenschaft zu erhalten – dass eine solche aber niemals erreicht werden wird.

Zumindest wäre für jeden Kandidaten einer solchen Einheitstheorie sehr sorgfältig zu überprüfen, inwieweit die Überprüfung ihrer Angemessenheit gegenüber der wirklichen Welt neue messtheoretische a priori erfordert. Wahrscheinlich ist die bewusste Suche nach solchen den neuen Fragestellungen angemessenen Erkenntnismitteln statt ihrer Leugnung ein wichtiger Schritt in der Entwicklung neuer Theorien. Der Fortschritt der Wissenschaften verläuft nicht nur über die Aufeinanderfolge der Theorien, sondern vor allem über die Entwicklung der Erkenntnismittel. Die Entstehung neuer Theorien ist kein Akt unerklärlicher Genialität, sondern Ergebnis der Erarbeitung neuer Denk- und Erkenntnismittel, wie an der Entwicklung der Einsteinschen Theorien besonders deutlich gesehen werden kann (vgl. Renn 2006).

## Literatur

- Banchoff, Thomas F. (1991): *Dimensionen. Figuren und Körper im geometrischen Raum. Spektrum der Wissenschaft*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Bloch, Ernst (EM): *Experimentum Mundi. Frage, Kategorien des Herausbringens, Praxis*. Werkausgabe Band 15. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag. 1985.
- Bloch, Ernst (PH): *Das Prinzip Hoffnung, 3 Bände*. (1959) Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Bublath, Joachim (1999): *Geheimnisse des Universums*. München: Th. Knaur Nachf.
- Bucher, Martin A., Spergel, David N. (2001): *The geometry of the universe*. Scientific American. Cosmos the once and future.
- Cassirer, Ernst (1910/1990): *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfrage der Erkenntniskritik*.(1910). Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Descartes, René (Prinz.): *Prinzipien der Philosophie*. In: René Descartes' philosophische Werke. Übersetzt, erläutert und mit einer Lebensbeschreibung des Descartes versehen von J. H. von Kirchmann, Abt. III, Berlin: L. Heimann, 1870 (Philosophische Bibliothek, Bd. 25/26).
- Diels, Hermann (1922): *Die Fragmente der Vorsokratiker*. Griechisch und Deutsch von Hermann Diels. Vierte Auflage, 1. und 2. Band. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung.
- Einstein, Albert (1917): *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte: 142-152.

- Einstein, Albert (1918a): *Kritisches zu einer von Hrn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen*. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte: 270-271.
- Einstein, Albert (1918b): *Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie*. Annalen der Physik (44) 5: 241-244.
- Einstein, Albert (1918c): *Review of Hermann Weyl, Space-Time-Matter: Lectures on General Relativity*. In: Die Naturwissenschaften 6 (1918). S. 373.
- Einstein, Albert (1919a): *Time, Space and Gravitation*. In: The Times (London), 28. November 1999. pp. 13-14.
- Einstein, Albert (1919b): *Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?* Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte: 349-356.
- Einstein, Albert (1920a): *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*. Braunschweig: Vieweg & Sohn. (Die Anhänge siehe unter Einstein, Albert (1954).)
- Einstein, Albert (1920b): *Äther und Relativitätstheorie*. In: The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 7. Princeton University Press. 2002. S. 308-323.
- Einstein, Albert (1920c): *Discussions of Lectures in Bad Nauheim*. In: The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 7. Princeton University Press. 2002. S. 350-357.
- Einstein, Albert (1920d): *Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt*. In: The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 7. Princeton University Press. 2002. 246-281.
- Einstein, Albert (1921): *King's College Lecture*. In: The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 7. Princeton University Press. 2002. S. 431-433.
- Einstein, Albert (1921/1953): *Geometrie und Erfahrung*. In: Mein Weltbild. Zürich, Stuttgart, Wien: Europa Verlag. 1953. S. 156-166.
- Einstein, Albert (1922/1979): *Grundzüge der Relativitätstheorie*. Berlin: Akademie-Verlag. (= Princeton-Lectures. Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie. 1921.)
- Einstein, Albert (1930): *Das Raum-, Äther- und Feldproblem der Physik*. In: Forum Philosophicum I. Dec. 1930. 173-180.
- Einstein, Albert (1936): *Physik und Realität*. Journal of The Franklin Institute. 221 (1936) No.3. S. 212-347.
- Einstein, Albert (1949): *Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten*. In: Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Hrsg. von P.A. Schilpp. Stuttgart: Kohlhammer Verlag. S. 493-511.
- Einstein, Albert (1951/1979): *Anhang I: Zum „kosmologischen Problem“*. In: Grundzüge der Relativitätstheorie (1979). Berlin: Akademie-Verlag.
- Einstein, Albert (1953): *Mein Weltbild*. Zürich, Stuttgart, Wien: Europa Verlag. 1953.
- Einstein, Albert (1954-Anhang 4): *Die Struktur des Raumes im Zusammenhang mit der allgemeinen Relativitätstheorie*. Anhang 4 in: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Braunschweig: Vieweg & Sohn. (17. Auflage 1954). S. 84-85.

- Einstein, Albert (1954-Anhang 5): *Relativität und Raumproblem*. Anhang 5 in: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Braunschweig: Vieweg & Sohn. (17. Auflage 1954). S. 85-102.
- Eisenhardt, Peter; Kurth, Dan (1993): *Emergenz und Dynamik. Naturphilosophische Grundlagen einer Nichtstandard Topologie*. Cuxhaven: Junghans-Verlag.
- Gehlhar, Fritz; Röseberg, Ulrich (1996): *Stichpunkt „Raum“*. In: Philosophie und Naturwissenschaften. Wörterbuch. Hrsg. von H. Hörz, H. Liebscher, R. Löther, E. Schmutzer, S. Wollgast). Wiesbaden: Fourier. S. 772-777.
- Griese, Anneliese (1966): *Philosophische Raum-Zeit-Problematik und moderne Geometrodynamik*. Sonderheft Deutsche Zeitschrift für Philosophie.
- Hacking, Ian (1994): *Representing and Intervening*. (1983) Cambridge: Cambridge University Press.
- Hawking, Stephen (2001): *Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit*. Reinbek: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Hawking, Stephen (2003): *Das Universum in der Nußschale*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag.
- Heisenberg Werner (1988): *Der Teil und das Ganze*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag dtv 1988.
- Hörz, Herbert (1971): *Materiestruktur. Dialektischer Materialismus und Elementarteilchenphysik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hörz, Herbert (1974): *Marxistische Philosophie und Naturwissenschaften*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Kant, Immanuel (KrV): *Kritik der reinen Vernunft*. Nach der ersten und zweiten Orig.-ausg. Hrsg. von Raymond Schmidt. Hamburg: Felix Meiner Verlag 1993.
- Kiefer, Claus (2003): *Gravitation*. Frankfurt am Main: S.Fischer Verlag GmbH.
- Koyre, Alexandre (1968) : *Metaphysics and Measurement. Essays in Scientific Revolution*. London: Chapman & Hall.
- Kuhn, Tomas S. (1977): *Die Funktion des Messens in der Entwicklung der physikalischen Wissenschaften*. In: Thomas S. Kuhn: Die Entstehung des Neuen. Frankfurt am Main. S. 254-307.
- Kurth, Dan (1997): *Von der Prägeometrie zur Komplexität*. In: Die Erfindung des Universums? Neue Überlegungen zur philosophischen Kosmologie. Hrsg. von Walter Saltzer, Peter Eisenhardt u.a. Frankfurt am Main: Insel Verlag. S. 247-293.
- Laitko, Hubert (1979): *Wissenschaft als allgemeine Arbeit Zur begrifflichen Grundlegung der Wissenschaftswissenschaft*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Lenin, Wladimir I. (MuE): *Materialismus und Empirio-kritizismus*. Werke Band 14. Berlin: Dietz-Verlag (1975)
- Lojacono, Ettore (2001): *René Descartes. Von der Metaphysik zur Deutung der Welt*. Spektrum der Wissenschaft. Biographie.
- Lukrez (Natur): *Über die Natur der Dinge*. Aus dem Lateinischen übersetzt von Hermann Diels. Berlin: Aufbau-Verlag. 1957 (Philosophische Bücherei, Bd. 12).

- Mach, Ernst (1883/1921): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch kritisch dargestellt*. Leipzig: F.A. Brockhaus.
- Mittelstaedt, Peter (1989): *Philosophische Probleme der modernen Physik*. (Erstauf. 1966) Mannheim, Wien, Zürich: Wissenschaftsverlag.
- Müller, Ulrich (o.J.): *Albert Einstein und die moderne Kunst*. In: Deutsches Museum: Einsteins Relativitätstheorien in Wissenschaft, Technik und Kunst. S. 57-69.
- Newton, Isaac (Prinz.): *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*. In: Borzeszkowski, Horst-Heino von; Wahsner, Renate: Newton und Voltaire. Zur Begründung und Interpretation der klassischen Mechanik. Berlin: Akademie-Verlag. 1980. S. 81-133.
- Newton, Isaac (Opt.): *Optik oder Abhandlung von den Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und den Farben des Lichts*. In: Borzeszkowski, Horst-Heino von; Wahsner, Renate: Newton und Voltaire. Zur Begründung und Interpretation der klassischen Mechanik. Berlin: Akademie-Verlag. 1980. S. 135-172.
- Okasha, Samir (2002): *Philosophy of Science. A very short introduction*. New York: Oxford University Press.
- Renn, Jürgen (2006): *Auf den Schultern von Riesen und Zwergen. Einsteins unvollendete Revolution*. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag.
- Schmutzer, Ernst (1981): *Relativitätstheorie – aktuell. Ein Beitrag zur Einheit der Physik*. Leipzig: BSB B.B. Teubner Verlagsgesellschaft.
- Schmutzer, Ernst (2004): *Projektive Einheitliche Feldtheorie mit Anwendungen in Kosmologie und Astrophysik*. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH.
- Simonyi, Károly (2001): *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Smolin, Lee, S. (2004): *Quanten der Raumzeit*. In SPEKTRUM der Wissenschaft. März 2004. S. 54-63. S. 62.
- Stephani, Hans (1980): *Allgemeine Relativitätstheorie. Eine Einführung in die Theorie des Gravitationsfeldes*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Treder, Hans-Jürgen (1968): *Relativität und Kosmos. Raum und Zeit in Physik, Astronomie und Kosmologie*. Berlin: Akademieverlag.
- Treder, Hans-Jürgen (1974): *Philosophische Probleme des physikalischen Raumes. Gravitation, Geometrie, Kosmologie und Relativität*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Treder, Hans-Jürgen (1998): *Einmaligkeit der Welt. Zum Machschen Prinzip*. In: Treder, Hans-Jürgen: Über die Unvollendbarkeit der menschlichen Erkenntnis. Vorträge zu philosophischen Problemen der Physik. Berlin: Leibniz-Arbeitskreis Berlin e.V. S. 23-33.
- Treder, Hans-Jürgen (1999): *Die Unvollendbarkeit der menschlichen Erkenntnis*. In: Treder, Hans-Jürgen: Über die Unvollendbarkeit der menschlichen Erkenntnis. Vorträge zu philosophischen Problemen der Physik. Berlin: Leibniz-Arbeitskreis Berlin e.V. S. 39-59.
- von Borzeszkowski, Horst-Heino; Wahsner, Renate (1979): *Erkenntnistheoretischer Apriorismus und Einsteins Theorie. Einstein in seiner Beziehung zu Newton und Kant*. Deutsche Zeitschrift für Philosophie 27 (1979), S. 213-222.

- von Borzeszkowski, Horst-Heino; Wahsner, Renate (1980): *Zur Beziehung von experimenteller Methode und Raumbegriff*. Deutsche Zeitschrift für Philosophie 28 (1980), S. 685-696.
- von Borzeszkowski, Horst-Heino; Wahsner, Renate (1987): *Erwin Schrödingers Subjekt- und Realitätsbegriff*. In: Deutsche Zeitschrift für Philosophie 35 (1987) 12, S. 1109-1118.
- von Borzeszkowski, Horst-Heino; Wahsner, Renate (1989): *Physikalischer Dualismus und dialektischer Widerspruch. Studien zum physikalischen Bewegungsbegriff*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- von Borzeszkowski, Horst-Heino (1992): *Kantscher Raumbegriff und Einsteins Theorie*. Deutsche Zeitschrift für Philosophie 40 (1992), S. 36-41.
- Wahsner, Renate (1978): *Einleitung*. In: Mensch und Kosmos – die copernicanische Wende. Berlin: Akademie-Verlag. S. 7-90.
- Wahsner, Renate (1981): *Das Aktive und das Passive. Zur erkenntnistheoretischen Begründung der Physik durch den Atomismus – dargestellt an Newton und Kant*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Wahsner, Renate (1992): *Erkenntnistheoretischer Apriorismus und neuzeitliche Physik*. Deutsche Zeitschrift für Philosophie 40 (1992), S. 23-35.
- Wahsner, Renate (1996): *Einleitung: Hegels Naturphilosophie und das Erkenntnisproblem der Neuzeit*. In: Wahsner, Renate (1996): *Zur Kritik der Hegelschen Naturphilosophie. Über ihren Sinn im Lichte der heutigen Naturerkenntnis*. In: HEGELIANA. Studien und Quellen zu Hegel und zum Hegelianismus. Herausgegeben von Helmut Schneider. Band 7. Frankfurt am Main, Berlin, Bern, New York, Paris, Wien. Peter Lang. S. 3-123.
- Wahsner, Renate (1998): *Bibliothek dialektischer Grundbegriffe. Naturwissenschaft*. Bielefeld: Aisthesis-Verlag.
- Wahsner, Renate; Griese, Anneliese (1972): *Raum, Zeit und Gesetz*. In: Gesetz - Erkenntnis - Handeln, Berlin : Dietz-Verlag, S. 195-219.
- Weyl, Hermann (1918): *Gravitation und Elektrizität*. In: Hermann Weyl: *Gesammelte Abhandlungen Band 2*. Hermann Weyl: *Gesammelte Abhandlungen Band 2*. Berlin: Springer Verlag. 1980. S. 29-42.
- Weyl, Hermann (1921): *Das Raumproblem*. In: Hermann Weyl: *Gesammelte Abhandlungen Band 2*. Berlin: Springer Verlag. 1980. S. 212-228.
- Weyl, Hermann (1922): *Die Relativitätstheorie auf der Naturforscherversammlung*. In: Hermann Weyl: *Gesammelte Abhandlungen Band 2*. Berlin: Springer Verlag. 1980.S. 315-327.
- Wheeler, John A. (1962): *Geometrodynamics*. New York: Academic Press.
- Zimmermann Rainer E. (1991): *Selbstreferenz und poetische Praxis*. Entwurf zur Grundlegung einer axiomatischen Systemdialektik. Cuxhaven: Junghans-Verlag.
- Zimmermann, Rainer E. (2004): *System des transzendentalen Materialismus*. Paderborn: mentis.

---

Eine Kurzfassung dieser Arbeit wurde veröffentlicht:  
*Die vermessene Raum-Molluske. Der Raum als Erkenntnismittel und -objekt.*  
In: Vorschein Nr. 29. Jahrbuch 2007 der Ernst-Bloch-Assoziation (Hrsg.: Doris Zeilinger). Nürnberg : ANTOGO Verlag 2007. S. 26-38.

---

Er steht auch online unter <http://www.thur.de/thur/project/raum.htm> (HTML)  
und [http://wiki.zw-jena.de/images/e/e8/2007\\_Die\\_vermessene\\_Raummolluske.pdf](http://wiki.zw-jena.de/images/e/e8/2007_Die_vermessene_Raummolluske.pdf) (PDF)

---

Dieses Dokument steht unter der Creative Commons Lizenz BY.NC-SA 3.0 DE  
(<http://creativecommons.org/licenses/>)

---