

Philosophie der Physik

Herausgegeben
von Michael Esfeld
suhrkamp taschenbuch
wissenschaft

suhrkamp taschenbuch
wissenschaft 2033

Seit ihren Anfängen bei den Vorsokratikern sind Philosophie und Physik eng miteinander verbunden. Kappt man diese Verbindung, gibt man die Kernaufgabe der Physik – zu Wissen über die Natur zu gelangen – ebenso auf wie die der Philosophie, die grundlegenden Charakteristika der Welt zu erforschen. Dieser Band soll die Vielfalt und Lebendigkeit der philosophischen Auseinandersetzung mit der Physik im deutschsprachigen Raum heute aufzeigen. Er setzt den Schwerpunkt auf die Interpretation der fundamentalen physikalischen Theorien, also die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie, einschließlich der Quantengravitation und der Quantenfeldtheorie.

Philosophie der Physik

Herausgegeben von
Michael Esfeld

Suhrkamp

6. Auflage 2026

Erste Auflage 2012

suhrkamp taschenbuch wissenschaft 2033

Originalausgabe

© Suhrkamp Verlag GmbH, Berlin, 2012

Alle Rechte vorbehalten. Wir behalten uns auch
eine Nutzung des Werks für Text und Data Mining
im Sinne von § 44b UrhG vor.

Umschlag nach Entwürfen

von Willy Fleckhaus und Rolf Staudt

Druck: Libri Plureos GmbH, Hamburg

Printed in Germany

ISBN 978-3-518-29633-2

Suhrkamp Verlag GmbH

Torstraße 44, 10119 Berlin

info@suhrkamp.de

www.suhrkamp.de

Inhalt

Vorwort	7
I. Raumzeit	
1. <i>Martin Carrier</i> Die Struktur der Raumzeit in der klassischen Physik und der allgemeinen Relativitätstheorie	13
2. <i>Andreas Bartels</i> Der ontologische Status der Raumzeit in der allgemeinen Relativitätstheorie	32
3. <i>Dennis Lehmkuhl</i> Super-Substanzialismus in der Philosophie der Raumzeit	50
II. Quantenmechanik	
4. <i>Carsten Held</i> Die Struktur der Quantenmechanik	71
5. <i>Michael Esfeld</i> Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung	88
6. <i>Detlef Dürr und Dustin Lazarovici</i> Quantenphysik ohne Quantenphilosophie	110
III. Teilchen und Felder	
7. <i>Manfred Stöckler</i> Demokrits Erben. Der Atomismus zwischen Philosophie und Physik	137
8. <i>Brigitte Falkenburg</i> Was sind subatomare Teilchen?	158
9. <i>Matthias Egg</i> Was bewirken Neutrinos? Eine Fallstudie zu Kausalität und Realismus in der Teilchenphysik	185
10. <i>Meinard Kuhlmann</i> Interpretationen der Quantenfeldtheorie	203

II. <i>Adrian Wüthrich</i>	
Zur Anwendung und Interpretation der Feynman-Diagramme	227

IV. Quantengravitation und Kosmologie

12. <i>Claus Beisbart</i>	
Können wir wissen, wie das Universum beschaffen ist? Echte und vermeintliche Erkenntnisprobleme der Kosmologie	247
13. <i>Claus Kiefer</i>	
Quantengravitation	267
14. <i>Reiner Hedrich</i>	
Hat die Raumzeit Quanteneigenschaften? – Emergenztheoretische Ansätze in der Quantengravitation	287
15. <i>Christian Wüthrich</i>	
Die allgemeine Relativitätstheorie als Ausgangspunkt einer Theorie der Quantengravitation	306

V. Statistik, Symmetrien und Gesetze

16. <i>Roman Frigg</i>	
Grundprobleme der Statistischen Mechanik	325
17. <i>Michael Stöltzner</i>	
Das Prinzip der kleinsten Wirkung	342
18. <i>Holger Lyre</i>	
Symmetrien, Strukturen, Realismus	368
19. <i>Andreas Hüttemann</i>	
Ceteris-paribus-Gesetze in der Physik	390
20. <i>Mathias Frisch</i>	
Kausalität in der Physik	411

Zitierte Literatur	427
Über die Autorin und die Autoren	455
Glossar	459
Namenregister	471
Sachregister	477

Vorwort

Seit ihren Anfängen bei den Vorsokratikern sind Philosophie und Physik eng miteinander verbunden. Denn Metaphysik oder Erste Philosophie im Sinne des Erforschens der fundamentalen Charakteristika der Welt kann man nur betreiben, indem man sich damit auseinandersetzt, was die grundlegenden physikalischen Theorien über die Welt aussagen. Diese Theorien bedürfen ihrerseits der Interpretation, so dass der Austausch zwischen Physik und Metaphysik wechselseitig ist. Kappt man diese Verbindung, gibt man die Kernaufgabe der Physik – zu Wissen über die Natur zu gelangen – ebenso auf wie die der Philosophie. Diese Verbindung ist offensichtlich bei Platon und Aristoteles in der Antike, in der frühen Neuzeit bei Descartes, Hobbes, Leibniz oder Kant sowie im 20. Jahrhundert in den Debatten um das Verständnis der Relativitätstheorien und der Quantenphysik. Eine eindeutige Grenze zwischen Philosophie und Physik lässt sich dabei nicht ziehen: René Descartes und Gottfried Wilhelm Leibniz sind ebenso Naturwissenschaftler wie Philosophen, und es gibt keinerlei sachlichen Grund, nicht auch Albert Einstein und John Bell zu den bedeutenden Philosophen des 20. Jahrhunderts zu zählen.

Der vorliegende Band soll die Vielfalt und Lebendigkeit der heutigen philosophischen Auseinandersetzung mit der Physik im deutschsprachigen Raum aufzeigen. Um den Umfang des Bandes mit nicht mehr als zwanzig Artikeln lesbar zu halten, musste ich eine Auswahl treffen. Ich habe mich dabei an den folgenden Kriterien orientiert: inhaltlich den Schwerpunkt auf die Interpretation der fundamentalen physikalischen Theorien zu setzen, also die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie, und dabei den philosophisch bisher wenig bearbeiteten, aber an der Forschungsfront der Physik stehenden Gebieten wie der Quantenfeldtheorie und der Quantengravitation besondere Beachtung zu schenken; bei den Autorinnen und Autoren auch deutschsprachige Philosophen der Physik im Ausland zu berücksichtigen und mindestens zwei Beiträge von Personen aufzunehmen, die nicht in einem philosophischen Institut arbeiten.

Der Band ist inhaltlich in fünf Teile gegliedert: Teil I ist Raum

und Zeit gewidmet, mit Beiträgen von Martin Carrier zur Struktur der Raumzeit in der vorrelativistischen Physik und in der allgemeinen Relativitätstheorie, von Andreas Bartels zum ontologischen Status der Raumzeit in der allgemeinen Relativitätstheorie und mit einem Plädoyer von Dennis Lehmkuhl für den Super-Substantzialismus – der Position, dass letztlich nur die Raumzeit existiert. Hierauf folgen in Teil II drei Beiträge zur Philosophie der nichtrelativistischen Quantenmechanik: Carsten Held stellt die Struktur dieser Theorie dar, Michael Esfeld das Messproblem und Detlef Dürr und Dustin Lazarovici die Bohm'sche Antwort auf die Frage, worauf in der Welt sich der Formalismus der Quantenmechanik bezieht. Teil III geht dann auf das Thema von Teilchen und Feldern mit Bezug auf die Quantenfeldtheorie ein: Manfred Stöckler zeichnet die Argumente für den Atomismus nach, Brigitte Falkenburg stellt die verschiedenen Weisen dar, in der heute in der fundamentalen Physik von Teilchen die Rede ist, Matthias Egg diskutiert den experimentellen Nachweis subatomarer Teilchen anhand des Neutrinos, Meinard Kuhlmann gibt einen Überblick über die Interpretation der Quantenfeldtheorie, und Adrian Wüthrich geht der Frage nach, wie man die Feynman-Diagramme verstehen soll. Teil IV ist der Kosmologie und der Quantengravitation gewidmet: Claus Beisbart fragt, inwieweit kosmologisches Wissen möglich ist, Claus Kiefer gibt einen Überblick über die wesentlichen Ansätze in der Quantengravitation, Reiner Hedrich geht der Frage nach, ob und gegebenenfalls in welchem Sinne die Raumzeit selbst emergent in Bezug auf eine fundamentale Quantenebene der Natur sein könnte, und Christian Wüthrich betrachtet die Quantengravitation im Ausgang von der allgemeinen Relativitätstheorie. Teil V schließlich behandelt allgemeine Themen: Roman Frigg Wahrscheinlichkeiten in der statistischen Mechanik, Michael Stöltzner das Prinzip der kleinsten Wirkung, Holger Lyre Strukturen und Symmetrien, Andreas Hüttemann Ceteris-paribus-Gesetze und Mathias Frisch Kausalität in physikalischen Theorien. Erhard Scheibe konnte zu diesem Band leider keinen Beitrag mehr leisten, verwiesen sei auf den Nachruf von Brigitte Falkenburg (2011).

Der Band richtet sich an Philosophen und philosophisch interessierte Physiker und Mathematiker. Die Beiträge sind ohne Spezialkenntnisse in Philosophie und Physik verständlich; dies ist jedoch kein Einführungsbuch. Eine gewisse Vertrautheit mit den Themen,

die man durch das Studium einschlägiger Einführungen erwerben kann, wird vorausgesetzt. Auch handelt es sich nicht um neutrale Darstellungen des Forschungsstandes; diese findet man in den einschlägigen Enzyklopädien. Die Autoren argumentieren vielmehr für bestimmte Positionen, so wie es in der Philosophie üblich ist.

Mein Dank gilt Eva Gilmer für den Vorschlag, einen Band zur Philosophie der Physik herauszugeben, ihr und Jan-Erik Strasser vom Suhrkamp Verlag für die hervorragende verlegerische Betreuung, den Autorinnen und Autoren für die Zusammenarbeit – insbesondere denjenigen, die an der internen Begutachtung mitgewirkt haben, und vor allem Holger Lyre für wertvolle Ratschläge zur Gestaltung des Bandes – sowie meinem Mitarbeiter Jakob Sprickerhof für die Hilfe beim Erstellen der Gesamtdatei des Bandes und insbesondere der Register.

Lausanne, November 2011

Michael Esfeld

I. Raumzeit

I.

Martin Carrier

Die Struktur der Raumzeit in der klassischen Physik und der allgemeinen Relativitätstheorie

1.1 Einleitung

Das neuzeitliche Denken über Raum und Zeit wird von dem Gegensatz durchzogen, ob Raum und Zeit selbständig neben den Körpern existieren oder bloß Inbegriff räumlicher und zeitlicher Beziehungen zwischen Körpern sind. Entsprechend steht in dieser Frage eine *absolute* gegen eine *relationale* Sicht. Ich stelle die einschlägige Debatte zunächst vor dem Hintergrund der klassischen Physik vor und anschließend im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Abschließend erörtere ich, ebenfalls in diesem Rahmen, die Tragfähigkeit einer Verschärfung der absoluten Position zu einem Substanzialismus. Eine vertiefte Darstellung und weitere Einzelheiten enthält das vierte Kapitel meiner *Raum-Zeit* (Carrier 2009).

1.2 Raum und Zeit in der klassischen Physik

Die absolute Interpretation wurde in starkem Maße von Isaac Newton (1643-1727) geprägt. Nach ihr bleiben Raum und Zeit gänzlich unbeeinflusst von allen Körpern und Ereignissen in ihnen. Raum und Zeit bilden gleichsam ein festes *Behältnis*, in dem die Ereignisse ihren Platz haben, das aber ganz unabhängig von diesen Ereignissen besteht. Die *relationale* Gegenposition geht vor allem auf Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) und Ernst Mach (1838-1916) zurück. Nach ihr sind Raum und Zeit nichts anderes als Beziehungen zwischen Körpern und Ereignissen. Raum- und Zeitpunkte ergeben sich aus Relationen zwischen Ereignissen. In absoluter Sicht zeigen räumliche und zeitliche Beziehungen zwischen Ereignissen deren Raum- und Zeitverhältnisse an; Maßstäbe

und Uhren messen unabhängig bestehende räumliche und zeitliche Beziehungen. Für die relationale Position gibt es hingegen keine solchen unabhängigen Beziehungen: Vielmehr sind räumliche und zeitliche Beziehungen nichts anderes als Beziehungen zwischen Körpern und Ereignissen. Die zentrale Begründung für den Relationalismus ist erkenntnistheoretischer Natur und nimmt ihren Ausgang von der Behauptung, dass nur Beziehungen zwischen Körpern oder Ereignissen, nicht aber Beziehungen der Körper zum Raum oder zur Zeit der Erfahrung zugänglich sind. Entsprechend ist auch alle wahrnehmbare Bewegung relative Bewegung.

Newton gab der absoluten Position in seinen 1687 erschienenen *Mathematischen Prinzipien der Naturlehre* ihre maßgebliche Gestalt. Für ihn besitzen Raum und Zeit innere Wesensmerkmale, zu denen unter anderem Orte im Raum, Gleichheit von Zeitintervallen und Ruhe zählten. Wahre Unbeweglichkeit kennzeichnet den *absoluten Raum*; wahre Bewegung ist Bewegung in ihm. Die Beschreibung von Bewegungen vom Standpunkt des absoluten Raums aus ist als einzige wirklichkeitsgetreu. Allerdings spricht das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik die Gleichberechtigung aller geradlinig-gleichförmig bewegten Bezugssysteme (der so genannten Inertialsysteme) aus, so dass der behauptete Zustand absoluter Ruhe gar nicht ermittelt werden kann. Dieses für den Relationalismus tragende Bedenken will Newton mit seinem berühmten *Eimerversuch* zerstreuen. In diesem ging es ihm um den Aufweis wahrer Rotationsbewegung; solche Bewegungen sollten also unabhängig vom Bezug auf andere Körper nachweisbar sein. Newtons Argument lautete, dass die bei Rotationen auftretenden Zentrifugalkräfte keine Folge von Relativbewegungen sein können und entsprechend als Folge absoluter Rotation gedeutet werden müssen.

Füllt man einen Eimer mit Wasser und hängt ihn an einem verdrillten Seil auf, so befinden sich Wasser und Eimer zunächst in relativer Ruhe, und der flache Wasserspiegel verrät das Fehlen von Zentrifugalkräften (Stadium 1). Versetzt danach das verdrillte Seil den Eimer in Drehung, so bleibt der Wasserspiegel zunächst flach. Das Wasser rotiert also relativ zum Eimer, aber Zentrifugalkräfte treten weiterhin nicht auf (Stadium 2). Durch die Reibung an den Eimerwänden beginnt das Wasser mit der Zeit ebenfalls zu rotieren. Der Wasserspiegel nimmt dabei unter dem Einfluss

von Zentrifugalkräften eine konkave Gestalt an. Zentrifugalkräfte machen sich hier demnach bei relativer Ruhe zwischen Eimer und Wasser bemerkbar (Stadium 3). Hält man endlich die Drehung des Eimers an, so rotieren Eimer und Wasser gegeneinander, während der Wasserspiegel seine konkave Form behält. Hier also beobachtet man zugleich relative Rotation und die Wirkung von Zentrifugalkräften (Stadium 4). Das Experiment zeigt damit sämtliche möglichen Kombinationen zwischen den relativen Bewegungszuständen von Wasser und Eimer und dem Auftreten von Zentrifugalkräften. Folglich kann deren Auftreten nicht auf die betrachteten Relativbewegungen zurückgeführt werden.

Newton zog den Schluss, dass Zentrifugalkräfte als Ausdruck echter Rotationsbewegungen zu deuten sind und entsprechend als Folge der Rotation im absoluten Raum. Wenn aber Bewegungen im absoluten Raum beobachtbar sind, dann muss der absolute Raum existieren (Newton 1726, S. 29-30). Newtons antirelationales Argument lautet daher, dass durchaus nicht allein relative Bewegungen zwischen Körpern empirisch nachgewiesen werden können, sondern auch zumindest einige Bewegungen gegenüber dem absoluten Raum.

Newtons zeitgenössischer Widerpart in naturphilosophischen Fragen war Leibniz, der auch zu Raum und Zeit abweichende Ansichten vertrat. Im Rückgriff auf Denkansätze bei René Descartes stellt sich der Raum für Leibniz als Gesamtheit der relativen Lagen und Anordnungen der Körper dar. Der Raum ist die »Ordnung des Nebeneinanderbestehens« und entsprechend keine eigenständige Größe neben den Körpern. »Räumliche Anordnung« wird dabei durch die beiden Merkmale der gleichzeitigen Existenz und des Absehens von besonderen Existenzweisen näher bestimmt. Der Begriff des Raums bezieht sich auf die mögliche Anordnung von Objekten, die zur selben Zeit existieren und bei denen alle besonderen Bestimmungen außer Acht gelassen werden (der Bewegungszustand oder die Wechselwirkung mit anderen Objekten wären solche besonderen Bestimmungen). Danach sind diejenigen Beziehungen räumlich, die aus der generellen Beschaffenheit der Körper stammen und nicht aus deren spezifischen Eigenschaften und Verhältnissen. Zeitbeziehungen werden durch die Kausalität gestiftet: Wirkungen sind später als ihre Ursachen. Eine Zeitfolge wird also durch eine Kausalkette definiert und konstituiert. Es

gibt keinen Raum und keine Zeit über solche Beziehungen hinaus (Leibniz III 4, in: Schüller 1991, S. 37-38).

In der Leibniz-Clarke-Kontroverse von 1715/16, einem Briefwechsel zwischen Leibniz und Samuel Clarke (1675-1729), einem engen Vertrauten Newtons, prallen beide Denkweisen aufeinander. Dabei gesteht Leibniz Clarke letztlich den entscheidenden Punkt zu, dass wahre Bewegungen unter Umständen anhand der mit ihnen verbundenen Kräfte erkannt und von einer bloß relativen Änderung der Lage mit Bezug auf andere Körper unterschieden werden können. Leibniz vermochte entsprechend Newtons Argument zugunsten der Erkennbarkeit absoluter Bewegung, und damit der Existenz des absoluten Raums, letztlich nichts Überzeugendes entgegenzusetzen.

Allerdings lenkte Leibniz zu Recht die Aufmerksamkeit auf den Umstand, dass sich Newton durch seine Festlegung auf den absoluten Raum und die absolute Bewegung auf die Verschiedenheit von Zuständen verpflichtet, die gerade der Newton'schen Mechanik zufolge nicht unterschieden werden können (Friedman 1983, S. 219). Das klassische Relativitätsprinzip ist Bestandteil der Newton'schen Mechanik, aber auf seiner Grundlage ist es ausgeschlossen, absolute geradlinig-gleichförmige Bewegungen verschiedener Geschwindigkeit oder verschiedene absolute Orte voneinander zu unterscheiden. Der Eimerversuch kann allenfalls die Wirklichkeit beschleunigter Bewegung demonstrieren, aber Newtons These bezieht sich auf beliebige Bewegungen. Daher übersteigen Newtons naturphilosophische Festlegungen die legitimen Schlussfolgerungen seiner Argumentation.

In moderner Rekonstruktion macht Leibniz gegen Newton geltend, dass die klassische Mechanik die Äquivalenz bestimmter Zustände beinhaltet und dass dieser Umstand für die Raumzeit-Philosophie von Belang ist. Im Einzelnen spricht das klassische Relativitätsprinzip die grundsätzliche Ununterscheidbarkeit verschiedener Punkte im Raum und verschiedener geradlinig-gleichförmiger Bewegungen aus, und Leibniz drängt darauf, solche niemals nachweisbaren Unterschiede aufzugeben oder ihnen jedenfalls nicht – wie Newton – eine wichtige Rolle bei der Interpretation von Raum und Zeit einzuräumen. Leibniz zielt entsprechend darauf, solche Zustände als äquivalent einzustufen, die im Rahmen der betreffenden Theorie prinzipiell ununterscheidbar sind. Dieser

Gedanke hat in der Gegenwart unter anderem im so genannten *Loch-Argument* eine Aufnahme und Weiterführung erfahren (s. u., Abschn. 1.6).

1.3 Machs Kritik an Newtons Argument und sein relationaler Gegenentwurf

Im 19. Jahrhundert erhielt die relationale Position durch die Kritik Ernst Machs (1838-1916) an Newtons absolutem Raum neue Stoßkraft. Machs Argumente fanden große Beachtung und beeinflussten insbesondere Albert Einsteins (1879-1955) Ansichten von Raum, Zeit und Bewegung. Tatsächlich steht Machs relationaler Gegenentwurf hinter der Konzeption der ART – auch wenn die fertige Theorie diese Konzeption kaum mehr umsetzt. Mach bestritt, dass Newtons Eimerversuch geeignet ist, die Erkennbarkeit absoluter Bewegung zu demonstrieren. Vielmehr legt dieser nur nahe, dass die Drehung des Wassers gegen den Eimer keine Zentrifugalkräfte erzeugt. Hingegen ergeben sich solche Kräfte bei seiner Drehung gegen die Himmelskörper. Machs Vorschlag lautet, die Fixsterne oder den Schwerpunkt des Universums anstelle des absoluten Raums als Bezugsgröße zu wählen. Ein solches Bezugssystem ist durch Körper realisiert (Mach 1883, S. 222-226).

Allerdings verlangt die Umsetzung eines solchen Denkansatzes eine Revision der Mechanik. Aus relationaler Sicht sollte nämlich anhand der Beobachtungen nicht unterschieden werden können, ob die Erde in einem ruhenden Fixsternsystem rotiert oder ob sich das Fixsternsystem um eine ruhende Erde dreht. Im Rahmen der klassischen Mechanik treten aber nur im ersten Fall Zentrifugalkräfte auf der Erde auf. Dieser Variante von Newtons »vom Wassergefäß hergenommenen Argumente« (Mach 1883, S. 222) wäre also durch eine Anpassung der mechanischen Theorie Rechnung zu tragen. Mach ist sich über dieses Erfordernis im Klaren, aber sein Alternativentwurf bleibt skizzenhaft (Mach 1883, S. 227-230, 236; Reichenbach 1928, S. 246-251) und ist in seinem heutigen Verständnis durch seine Aufnahme und Weiterführung durch Einstein geprägt. Einstein präzisiert Machs Gedanken dahingehend, dass Zentrifugal- und andere Trägheitskräfte als physikalische Wechselwirkungen zu verstehen sind. Dies ist das von Einstein so genannte

Mach'sche Prinzip (Einstein 1918, S. 241-242). In dieser Interpretation strebte Mach die Einführung einer neuartigen, universellen und langreichweitigen, bei großen Abständen besonders wirksamen und daher ferne Massen bevorzugenden Wechselwirkung an, die Zentrifugalkräfte als Folge bloß relativer Bewegungen erzeugt.

Machs Denkansatz war tatsächlich von prägendem Einfluss auf Einsteins Formulierung der ART. Für Einstein schied der absolute Raum wegen seiner Unbeobachtbarkeit als Quelle von Kräften aus. Bei Newtons Eimerversuch müssen entsprechend die Zentrifugalkräfte auf Relativbewegungen zurückgehen und »ganz wesentlich durch ferne Massen mitbedingt« sein (Einstein 1916, S. 772). Leitgedanke für die Formulierung der ART war, dass einerseits erkenntnistheoretisch betrachtet alle Bewegung Relativbewegung ist, dass aber andererseits Trägheitskräfte physikalisch ohne Bezug auf andere Körper beschrieben werden. Beides ist nur durch das Mach'sche Prinzip in Einklang zu bringen, dadurch also, dass Trägheitskräfte eine Wirkung ferner Massen sind.

1.4 Die Struktur der Raumzeit in der ART

Die ART enthält ein neuartiges Verständnis der Schwerkraft, nämlich deren Geometrisierung. Danach handelt es sich bei der Gravitation nicht um eine Kraft, die Körper oder Lichtstrahlen vom geraden Wege ablenkt. Vielmehr ist die Gravitation Teil der Raumzeit und hat damit Einfluss darauf, welche Bewegungen geradestmöglich sind. Die Raumzeitstruktur wird »dynamisch«, sie ist veränderlich und wandelt sich in Abhängigkeit von der örtlichen Massen- oder Energiedichte. Umgekehrt enthält die Raumzeit die so genannte Geodätenstruktur; die Metrik bestimmt damit die Beschaffenheit von Trägheitsbewegungen und von vierdimensionalen Abständen (*Raumzeitintervallen*).

Der ART zufolge führen frei fallende Körper (genauer: Massenpunkte ohne Ausdehnung), die also allein der Gravitation unterliegen, die geradestmögliche Bewegung aus. Zwar folgen die Planeten bei ihrem freien Fall um die Sonne augenscheinlich nicht der geradestmöglichen Bahn, aber es geht nicht um räumliche Bahnen, sondern um Bewegungen und entsprechend um raumzeitliche Erstreckungen (*Weltlinien*). Außerdem beeinflusst die Masse der

Sonne die Beschaffenheit der örtlichen Geometrie und damit der Gestalt der Trägheitsbewegungen. Jedenfalls unterliegen danach die Planeten keiner Kraft, die sie von ihrer geradestmöglichen Bewegung abweichen lässt.

Der springende Punkt der Geometrisierung ist also: Die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich zu bewegen hat, und die Materie sagt der Raumzeit, welche Gestalt sie anzunehmen hat (Misner, Thorne und Wheeler 1973, S. 3-5). Dies beinhaltet, dass die Raumzeit kein Behältnis für die wechselnden Ereignisse der Erscheinungswelt bildet, sondern dem Einfluss von Materie und Energie unterworfen ist. In Abhängigkeit von der Verteilung von Massen und Feldern ändern sich die raumzeitlichen Maßverhältnisse und die Beschaffenheit von Trägheitsbewegungen. Die Geometrisierung der Gravitation spricht also gegen die absolute Sicht der Raumzeit als eines festen Rahmens für Körperbewegungen und Ereignisse. Stattdessen steht die Raumzeit in Wechselwirkung mit dem materiellen Geschehen – gerade wie es von Mach und vom Mach'schen Prinzip in Einsteins Deutung gefordert wird.

Allerdings weisen weitere Merkmale der ART-Raumzeit in eine andere Richtung. Absolute Eigenschaften im hier relevanten Sinne können nicht durch die Beziehungen zwischen Körpern oder Ereignissen ausgedrückt werden. Solche Eigenschaften sind daher von der Materie und ihrer Verteilung verschieden. Relevante Eigenschaften in der ART sind die genannte geodätische Struktur, welche die geradestmöglichen Bewegungen und damit Trägheitsbewegungen auszeichnet, und die Metrik, welche die Länge von Raumzeitintervallen angibt. Geodätische Struktur und Metrik sind in der ART Invarianten, also unabhängig vom gewählten Bezugssystem. Für alle Beobachter ergibt sich in gleicher Weise, ob ein Körper eine Trägheitsbewegung ausführt oder beschleunigt ist.

Folglich kann ein Beobachter bei Vorliegen einer Relativbeschleunigung zwischen zwei Körpern keineswegs einen der beiden Körper nach Belieben als beschleunigt betrachten. Wegen der Invarianz oder Beobachterunabhängigkeit von Beschleunigungen trifft es nicht zu, dass im Rahmen der ART das heliozentrische und das geozentrische Planetensystem gleichermaßen gültig sind, wie eine frühe Fehldeutung lautete (Reichenbach 1928, S. 251). Vielmehr führen im Rahmen der ART für alle Beobachter die Sonne und die Planeten eine verallgemeinerte Trägheitsbewegung aus, und die