

Martin Carrier
Raum-Zeit



Grundthemen Philosophie

Herausgegeben von
Dieter Birnbacher
Pirmin Stekeler-Weithofer
Holm Tetens

Walter de Gruyter · Berlin · New York

Martin Carrier
Raum-Zeit



Walter de Gruyter · Berlin · New York

© Gedruckt auf säurefreiem Papier,
das die US-ANSI-Norm über Haltbarkeit erfüllt.

ISBN 978-3-11-017694-0

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

© Copyright 2009 by Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, D-10785 Berlin

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne
Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für
Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung
und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany

Umschlaggestaltung: Martin Zech, Bremen

Umschlagkonzept: +malsy, Willich

Satzherstellung: vitaledesign, Berlin | www.vitaledesign.com

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik GmbH,
Kempten

Inhaltverzeichnis

Einleitung	1
1. Naturphilosophie, Wissenschaft und menschliche Erfahrung	1
2. Thematische Gliederung	4
1. Zeitordnung als Kausalordnung: Die kausale Theorie der Zeit	8
1.1 Die klassische Form der kausalen Zeittheorie: Leibniz und Kant	9
1.2 Die Raum-Zeit-Struktur in der speziellen Relativitätstheorie	17
1.2.1 Die Konzeption der Speziellen Relativitätstheorie und die Tradition der Elektrodynamik	17
1.2.2 Die spezielle Relativitätstheorie als Theorie der Raum-Zeit	28
1.3 Zeitfolge und Gleichzeitigkeit in der Minkowski-Raum-Zeit	39
1.4 Kausalstruktur und Minkowski-Raum-Zeit	42
1.5 Kausalität und Anisotropie der Zeit	48
1.5.1 Kausalordnung und Zeitfolge	48
1.5.2 Die Gabelungsasymmetrie	49
2. Sein und Werden: Reversibilität, Irreversibilität und die Richtung der Zeit	58
2.1 Die Zeitlosigkeit der Welt	59
2.1.1 Dynamik des Wandels versus Unveränderlichkeit des Seins	59
2.1.2 Die Zenonschen Paradoxien	60
2.1.3 Die Reversibilität der Fundamentalprozesse und das statische Blockuniversum	67
2.2 Irreversibilität und statistische Mechanik	71
2.2.1 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	72
2.2.2 Boltzmanns mechanische Begründung des Zweiten Hauptsatzes	75

2.2.3	Der Maxwellsche Dämon	84
2.2.4	Der Zweite Hauptsatz als Anthropomorphismus	89
2.2.5	Irreversibilität bei Nicht-Gleichgewichtssystemen	92
2.2.6	Die philosophische Tragweite faktischer (nicht-nomologischer) Irreversibilität	95
2.2.7	Physikalische Grundlagen des Zeitpfeils	98
2.3	Nomologische Irreversibilität: Der Zeitpfeil der schwachen Wechselwirkung	103
2.4	Wandel oder Werden: Die Zeitlichkeit der Welt	106
2.4.1	Die Relativität des „Jetzt“ und der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft	107
2.4.2	Der Fluss der Zeit und der Unterschied von Wandel und Werden	109
3.	Geometrie und Wirklichkeit: Erkenntnisprobleme beim Ausmessen von Raum und Zeit	113
3.1	Die empirische Ermittlung der physikalischen Geometrie	114
3.1.1	Nicht-Euklidische Geometrien	114
3.1.2	Das Ausmessen der Raum-Zeit	123
3.1.3	Die empirische Unterbestimmtheit der physikalischen Geometrie	126
3.1.4	Hohlwelttheorie und geometrischer Konventionalismus	131
3.1.5	Reichenbachs universelle Kräfte und die Gravitation	134
3.2	Die Grundzüge der allgemeinen Relativitätstheorie	137
3.2.1	Einsteins „drei Prinzipien“	137
3.2.2	Lichtstrahlen, Uhren, Maßstäbe und Bewegung im Gravitationsfeld	144
3.2.3	Die Geometrisierung der Gravitation	147
3.2.4	Grenzen der Geometrisierung	154
3.3	Die erkenntnistheoretische Stellung der physikalischen Geometrie	158
3.3.1	Universelle Kräfte in der allgemeinen Relativitätstheorie	158
3.3.2	Die Feldinterpretation der physikalischen Geometrie und die Konventionalitätsthese	161
4.	Raum-Zeit und Materie: Die Naturphilosophie von Raum und Zeit	168
4.1	Raum und Zeit in der klassischen Physik	169

Inhaltverzeichnis	VII
4.1.1 Newtons absolute Position: intrinsische Strukturen von Raum und Zeit	170
4.1.2 Leibniz' relationale Interpretation: der Raum als Anordnung von Körpern	174
4.1.3 Raum-Zeit und Kräfte: Die Behandlung der Rotation und die Leibniz-Clarke-Kontroverse . . .	179
4.1.4 Machs Kritik an Newtons Argument und sein relationaler Gegenentwurf	182
4.2 Die Struktur der Raum-Zeit in der allgemeinen Relativitätstheorie	190
4.2.1 Absolute Eigenschaften der Raum-Zeit	190
4.2.2 Das Machsche Prinzip und die allgemeine Relativitätstheorie	195
4.3 Substanzialismus und Relationalismus	204
4.3.1 Die Unterscheidung zwischen Raum und Materie . . .	204
4.3.2 Substanzialismus und Loch-Argument	206
4.4 Der Strukturenrealismus in der Raum-Zeit-Philosophie	212
4.4.1 Epistemischer Strukturenrealismus	214
4.4.2 Ontologischer Strukturenrealismus: Objekte als Relationen	216
Schluss	222
Anmerkungen	225
Literatur	227

Einleitung

1. Naturphilosophie, Wissenschaft und menschliche Erfahrung

Die philosophische Beschäftigung mit Raum und Zeit blickt auf eine lange Geschichte zurück. Dieses anhaltende Interesse stammt nicht zuletzt daraus, dass Raum und Zeit die Grundlage von Bewegung bilden, welche eben räumliche und zeitliche Bestimmungen in sich schließt. Daran knüpft die historisch früheste Problemstellung der Raum-Zeit-Philosophie an, die Frage nämlich nach der Wirklichkeit von Bewegung. Bei den Vorsokratikern findet sich die erste Kontroverse der Raum-Zeit-Philosophie, welche sich gerade auf die Streitfrage richtet, ob die Natur ihrem Wesen nach statisch und unveränderlich ist, oder ob sie Neuartiges aus sich hervorbringt. Nach der ersten Auffassung ist der Wechsel in der Sinnenwelt trügerisch; in Wirklichkeit gibt es keinen Wandel. Nach der alternativen Meinung bilden Veränderung und Voranschreiten ein Wesensmerkmal der Wirklichkeit.

Diese Kontroverse über die Realität des Wandels findet sich auch in der neuzeitlichen Philosophie – wenn auch in veränderter Form. Diese Mitte des 19. Jahrhunderts einsetzende und bis in die Gegenwart andauernde Debatte zielt auf den Stellenwert der alltäglichen Erfahrung von Veränderlichkeit im Vergleich zu den Grundlagen der einschlägigen wissenschaftlichen Theorien. In dieser Erfahrung nämlich spielt die Unterscheidung zwischen vergangen, gegenwärtig und zukünftig eine zentrale Rolle. Aber weder lässt sich im Lehrgebäude der Wissenschaften ein herausgehobener Ort der jeweiligen Gegenwart finden, noch erschließt sich ohne weiteres der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. Die Schwierigkeit wurzelt letztlich darin, dass sämtliche Grundgesetze der Physik keine Zeitrichtung auszeichnen. Andererseits laufen einige Prozesse in der Erfahrung ohne Zweifel gerichtet und einsinnig statt. Noch niemals ist die Beobachtung berichtet worden, dass Zucker, der in heißem Kaffee aufgelöst wurde, spontan in seiner früheren würfelförmigen Gestalt auf dem Boden der Tasse auskristallisierte. Und niemand hat die Erfahrung mitgeteilt, dass

auf einem See spontan ringförmige Wellen entstanden sind, die auf einen Mittelpunkt zulaufen und dort einen Stein aus dem Wasser schleudern. Die Zeitumkehrung bestimmter Prozesse findet sich offenbar in der Natur nicht. Die Frage ist dann aber, was die Basis einer solchen Irreversibilität oder Einsinnigkeit von Prozessen ist, und ob ein Zusammenhang mit der „Gerichtetheit der Zeit“ besteht (vgl. Kapitel 2).

Eine weitere traditionelle Fragestellung lautet, ob die Beschaffenheit von Raum und Zeit unabhängig von der Natur der Gegenstände in ihnen festliegt, oder ob Raum und Zeit durch diese Gegenstände überhaupt erst gebildet werden. Kontrovers ist, ob Raum und Zeit eine Art „Behälter“ oder „Arena“ für die Ereignisse bilden, die sich in ihnen abspielen, und von diesen Ereignissen entsprechend unabhängig oder ihnen vorgeordnet sind, oder ob Raum und Zeit umgekehrt erst aus den Beziehungen zwischen diesen Ereignissen entstehen und diesen entsprechend nachgeordnet sind. Nach dieser zweiten Vorstellung ist der Raum nichts anderes als die Gesamtheit der relativen Lagebeziehungen zwischen Objekten (vgl. Kapitel 4).

Eines der Kennzeichen der neuzeitlichen Diskussion besteht darin, die Klärung der betreffenden Fragen auf der Grundlage einschlägiger wissenschaftlicher Theorien anzustreben und sie entsprechend im Rahmen der *Wissenschaftsphilosophie* zu behandeln. Ziel ist dann nicht, die Eigenschaften von Raum und Zeit aus der Analyse der Alltagserfahrung oder durch Rekurs auf die einschlägigen Empfindungen zu ermitteln. Vielmehr bilden Naturprozesse und die zugehörigen wissenschaftlichen Theorien die Grundlage der Untersuchungen. Es geht zunächst um den Zeitverlauf in der Natur oder um die „Zeit der Welt“, nicht hingegen um die „Zeit des Bewusstseins“.

Allerdings sollte die Kluft zwischen der menschlichen Erfahrungswirklichkeit in Sachen Raum und Zeit und ihrer naturphilosophischen Deutung nicht auf Dauer bestehen bleiben. Der Mensch ist ein Naturwesen, so dass menschliche Zeiterfahrung am Ende mit Naturprozessen in Verbindung zu bringen ist. Die Zeit des Menschen sollte sich auf die Zeit der Natur zurückführen lassen, jedenfalls wenn die physiologischen und psychologischen Verarbeitungsmechanismen in die Betrachtung einbezogen werden. Es zählt zu den Stärken der Wissenschaft der vergangenen anderthalb Jahrhunderte, dass sie sich zunehmend der Komplexität der Erfahrungswelt stellt, statt sich auf idealisierte Fälle zu konzentrieren.

Auf diese Weise rückt auch die Alltagswelt in wachsendem Maß in den Anwendungsbereich wissenschaftlicher Theorien. Die Wissenschaftsphilosophie schreitet auf dem gleichen Weg voran. So stellt sich etwa die Philosophie des Geistes der Herausforderung, verständlich zu machen, was es für ein Naturwesen wie den Menschen heißt, nach Gründen zu handeln, wie sich also der Mensch als rationale und semantische Maschine denken lässt. Mit ähnlicher Stoßrichtung, wenn auch inhaltlich ganz anders angelegt, muss auch die menschliche Erfahrung von Zeit und Veränderung ihren Platz in der Naturordnung finden – wenn auch unter Umständen eher in der Psychologie des Menschen als in der Physik des Universums.

Die Raum-Zeit-Philosophie zeichnet sich entsprechend durch eine Wissenschaftsorientierung aus: sie reflektiert die allgemeinen oder grundlegenden Merkmale von Raum und Zeit wie sie von unterschiedlichen Formen der wissenschaftlichen Durchdringung von Raum und Zeit nahegelegt werden. Konkret stellt sich die Raum-Zeit-Philosophie in einer solchen wissenschaftsgestützten Betrachtungsweise als eine der beiden zentralen Themenstellungen der *Philosophie der Physik* dar, dem historisch ältesten Vertreter einer „Philosophie spezieller Wissenschaften“. Eine solche Philosophie einer Wissenschaftsdisziplin zielt auf die Klärung inhaltlicher oder begrifflicher Besonderheiten spezifischer Theorien ab. Dabei gibt man für ein philosophisches Problem eine Übersetzung in die Begrifflichkeit der jeweils einschlägigen wissenschaftlichen Theorien an und interpretiert die Resultate als Antwort auf das ursprüngliche philosophische Problem. Charakteristisch für einen solchen wissenschaftsphilosophisch geprägten Zugang ist, dass man – im Gegensatz zur Naturphilosophie traditionellen Zuschnitts – nicht gleichsam vortreibt und als philosophische Antwort präsentiert, was die Wissenschaft nicht oder noch nicht zu sagen vermag. Eine solche vorwitzige, auf die Kraft der Spekulation vertrauende Strategie hat in der Geistesgeschichte nur zu oft Schiffbruch erlitten. Bei der wissenschaftsphilosophischen Explikation orientiert man sich stattdessen am vorfindbaren Bestand des Wissens und sucht in dessen Licht nach einer Klärung und Interpretation der einschlägigen Sachverhalte. Die Wissenschaftsphilosophie arbeitet in systematischer Ordnung und begrifflicher Klarheit heraus, von welcher Beschaffenheit die Natur ist, wenn die betreffenden Theorien wahr sind.

Als ein philosophisch relevanter Aspekt gilt dabei, was von Bedeutung für das grundlegende Verständnis der betreffenden Sache

ist. Dazu gehören sicher die vorgenannten Beispiele: Was macht Veränderung in der Natur aus, und woraus ergibt sich die Richtung der Zeit – sofern die Zeit der Welt eine Richtung hat? Treten Raum und Zeit neben die Materie, oder ist eines von beiden (oder ein drittes) grundlegend? Fragen dieser Art haben zunächst einmal nichts mit dem Ziel der technischen Beherrschung von Phänomenen zu tun, sondern sind auf Naturverständnis gerichtet. Eine wissenschaftsphilosophische Behandlung solcher Fragen ist dadurch charakterisiert, dass sie diejenigen Facetten einer wissenschaftlichen Theorie ins Zentrum rückt, die Aufschluss zu geben vermögen über das Naturbild, das sich in ihr ausdrückt. Naturphilosophie in diesem Verständnis legt die allgemeinen und wesentlichen Charakteristika der Wirklichkeit auseinander, wie sie bestünden, wenn die betreffenden Theorien uneingeschränkt zuträfen (Bartels 1996, 12).

2. Thematische Gliederung

Im Folgenden stehen also Konzeptionen der Raum-Zeit im Zentrum, wie sie in der Raum-Zeit-Philosophie zum Gegenstand der Analyse gemacht werden. Im Einzelnen kommen vier große Themenblöcke zur Sprache, die den Kapiteln des Buches entsprechen. Es geht um die *kausale Theorie der Zeit*, (2) die *physikalische Grundlage der Gerichtetheit der Zeit*, (3) die *erkenntnistheoretischen Probleme der Ermittlung der Raum-Zeit-Struktur* und (4) das *Verhältnis von Raum und Zeit zu Körpern und Ereignissen*.

Bei der *kausalen Theorie der Zeit* geht es darum, Zeitverhältnisse aus Beziehungen von Ursache und Wirkung abzuleiten. Insbesondere sollen Zeitfolge und Gleichzeitigkeit auf die Kausalordnung zurückgeführt werden. Die klassischen Vertreter dieses Ansatzes sind Leibniz und Kant. Auf diesem Felde ist durch Einsteins Formulierung der speziellen Relativitätstheorie eine grundlegende Wendung herbeigeführt worden. Ich skizziere in diesem Zusammenhang die wichtigsten Merkmale dieser relativistischen Raum-Zeit-Struktur und erläutere dann eine für die zugehörige Raum-Zeit-Struktur geeignete Version der kausalen Zeittheorie. Abschließend kommen neuere Versuche zur Sprache, auch die Gerichtetheit der Zeit auf die Kausalordnung zurückzuführen.

Diese Bemühungen um eine *physikalische Grundlegung der Gerichtetheit der Zeit* rücken im zweiten Kapitel ins Zentrum. De-

ren Ziel ist es, über die zeitliche Ordnung von Phänomenen hinaus auch für den Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft eine physikalische Grundlage aufzuweisen. Während die Richtungen im Raum gleichberechtigt sind, verläuft die Zeit gerichtet. Bestimmte Prozesse sind nicht umkehrbar, bestimmte Ereignisse stehen in eindeutiger Folge. Diese Wahrnehmung der gerichteten Zeit wird durch die Metapher des „Zeitpfeils“ ausgedrückt, derzufolge bestimmte Ereignissequenzen objektiv nach „früher“ und „später“ geordnet sind.

Die herkömmliche physikalische Grundlage der Asymmetrie der Zeit bildet der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, welcher so genannten irreversiblen Prozessen eine Vorzugsrichtung zuschreibt: Temperaturunterschiede oder Konzentrationsunterschiede gleichen sich aus und entstehen nicht spontan. Jedoch unterliegt der Zweite Hauptsatz Geltungseinschränkungen, die ihn als physikalische Basis der gerichteten Zeit zweifelhaft machen. Das Bedenken stützt sich dabei auf den Umstand, dass der Zweite Hauptsatz nur bei Vorliegen spezifischer Sachumstände einsinnig gerichtete Prozesse auszeichnet und entsprechend den Zeitpfeil nicht auf eine rein naturgesetzliche Grundlage zu stellen vermag. Die philosophisch relevante Frage dieses Kapitels ist, welche Naturumstände die Asymmetrie der Zeit objektiv fassbar werden lassen.

Der dritte Themenblock ist den *erkenntnistheoretischen Herausforderungen bei der Ermittlung der Raum-Zeit-Struktur* gewidmet. Es geht um den Freiraum, den die Tatsachen bei der Bestimmung der geometrischen Beschaffenheit der Welt lassen. Dieses Problem verdichtet sich zu der These der *Konventionalität der physikalischen Geometrie*, die über Jahrzehnte hinweg das wichtigste Thema der Raum-Zeit-Philosophie darstellte. Der Aufweis nicht-Euklidischer Geometrien warf die Frage auf, welche dieser unterschiedlichen mathematischen Ansätze die Beschaffenheit der wirklichen Raum-Zeit wiedergibt. Das philosophische Problem in diesem Zusammenhang entsteht aus der Analyse der zugehörigen Erkenntnissituation. Die Raum-Zeit sollte sich ausmessen lassen, was jedoch Maßstäbe unveränderter Form voraussetzt. Um aber festzustellen, ob ein Maßstab beim Transport seine Gestalt verändert, ist selbst ein Maßstab unveränderter Form erforderlich. Hier scheint sich eine grundsätzliche Zirkularität im Messverfahren aufzutun, in deren Folge die Behauptung der Konventionalität der physikalischen Geometrie formuliert wurde. Die Annahme einer

besonderen Theorie der physikalischen Geometrie ist dann zwar durch die Tatsachen beschränkt, aber nicht eindeutig festgelegt.

Andererseits ist es eine der zentralen Konsequenzen der von Einstein 1915 formulierten allgemeinen Relativitätstheorie, dass die Raum-Zeit eine spezifische, von der Euklidischen Form abweichende Struktur besitzt, die durch die Masse-Energie-Verteilung des Universums festgelegt ist. Dadurch entsteht ein Gegensatz zwischen der erkenntnistheoretischen Behauptung der Konventionalität auf der einen Seite und der physikalischen Behauptung einer besonderen, nicht-Euklidischen Beschaffenheit der Raum-Zeit auf der anderen. Neben die konventionalistische Deutung treten daher alternative Zugangsweisen, die die geometrische Struktur der Welt auf ähnliche Weise durch die Tatsachen fixiert sehen wie andere theoretische Größen der Physik.

Der vierte Block behandelt das *Verhältnis von Raum und Zeit zu Körpern und Ereignissen*. Im Kern geht es darum, ob eine so genannte absolute oder eine relationale Auffassung angemessen ist. Hier findet etwa die zuvor angedeutete Frage ihren Platz, ob die Raum-Zeit sinnvoll als eine Art „Behälter“ der Ereignisse aufgefasst werden kann oder ob die Raum-Zeit nichts anderes ist als die Gesamtheit der Ereignisse aus einem bestimmten Blickwinkel betrachtet. Zunächst stelle ich die klassischen, an der Newtonschen Mechanik orientierten Positionen dar, insbesondere die Leibniz-Clarke-Debatte über die Natur des Raums und die Kritik Machs an der Newtonschen Position. In diesem Zusammenhang kommt auch der notorische „absolute Raum“ zur Sprache, der den unveränderlichen Rahmen der wechselnden Ereignisse bilden soll. Durch die allgemeine Relativitätstheorie hat sich die einschlägige Sachlage erheblich verändert. Daher gehe ich nachfolgend darauf ein, wie sich das Problem der Beschaffenheit der Raum-Zeit vor deren Hintergrund darstellt. Diese Problematik stellt eines der aktuellen Themen der Raum-Zeit-Philosophie dar.

Kontext und Voraussetzungen

Wilfrid Sellars hat einmal hervorgehoben, dass das „Problem der Zeit“ und ebenso – wie ich ergänzen möchte – das Problem der Raum-Zeit dem Leib-Seele-Problem darin gleicht, dass seine Behandlung unausweichlich alle wichtigen Anliegen der Philosophie

ins Spiel bringt (Savitt 1996, 366). Sellars hat recht. Die Raum-Zeit-Philosophie umgreift in der Tat ein weites Spektrum und schließt eine Reihe von Themen ein, die auf den ersten Blick mit Raum und Zeit wenig zu tun haben. Es geht um Kausalität und um Wahrscheinlichkeit, um den Urknall und den Wärmetod. Es geht um den Zugriff von Logik und Erfahrung auf die Gestalt des Systems des Wissens. Es geht um Achilles und die Schildkröte sowie um Maxwells Dämon. Und schließlich geht es darum, ob sich die Dinge in der Welt letztlich in Strukturen auflösen. Wenn man sich mit Raum und Zeit befasst, befasst man sich eben bei Weitem nicht nur mit Raum und Zeit.

Die Behandlung setzt keineswegs ein abgeschlossenes Physikstudium voraus. Im Gegenteil. Alle einschlägigen physikalischen Sachverhalte werden auf möglichst untechnische und anschauliche Weise entwickelt. Insbesondere werden die einschlägigen Grundzüge sowohl der Speziellen wie der Allgemeinen Relativitätstheorie erklärt. Dabei wird nicht die Meisterung des zugehörigen Formalismus angestrebt. Einige Abschnitte sind daher als Beiträge zu der Textgattung „Physik für Philosophen“ zu verstehen. Gleichwohl handelt es sich keineswegs um einen populärwissenschaftlichen Text. Im Vordergrund stehen Fragen des Naturverstehens, die sich aus den entsprechenden Theorien ergeben. Hinter den Gleichungen stehen stets allgemeine Ideen und Vorstellungen, und es sind diese, und kaum jemals die kalkulatorischen Einzelheiten, an denen die philosophische Diskussion ansetzt.

1. Zeitordnung als Kausalordnung: Die kausale Theorie der Zeit

Die zeitliche Anordnung von Ereignissen erfolgt durch die Beziehungen „früher“ und „später“ bzw. „gleichzeitig“, also „weder früher noch später“. Zeitliche Beziehungen dieser Art sind sicher tief in der Erfahrungswirklichkeit verankert; gleichwohl hat sich nicht erst die neuere Philosophie der Physik, sondern bereits herkömmliches philosophisches Denken der Herausforderung gestellt, diese Beziehungen auf noch basalere Begriffe und Vorstellungen zu gründen. Die kausale Theorie der Zeit strebt eine Rückführung von Zeitrelationen auf Kausalrelationen an. Danach ist die Beziehung der Verursachung fundamentaler als die Beziehungen der Abfolge und der Gleichzeitigkeit. Dieser Denkansatz ist traditionell vor allem von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) und Immanuel Kant (1724–1804) verfolgt worden und hat in der Gegenwart im Zusammenhang der Formulierung der Speziellen Relativitätstheorie, im Folgenden kurz SRT, vor allem durch Hans Reichenbach (1891–1953) erneut Auftrieb erhalten.

Die kausale Theorie der Zeit bildet einen Gegensatz zu der auf David Hume (1711–1776) zurückgehenden Regularitätstheorie der Kausalität, in deren Rahmen gerade umgekehrt Verursachung unter anderem anhand der Zeitfolge gekennzeichnet wird. Ich stelle kurz diesen humeschen Hintergrund vor und gehe dann auf die kausale Zeittheorie bei Leibniz und Kant ein. Allerdings führt die SRT zu einer erheblichen Veränderung in den Grundlagen und den Ansprüchen der kausalen Theorie der Zeit, wobei sie dem kausalen Anliegen entgegenkommt. Tatsächlich beginnt mit der Annahme der SRT eine Wiederbelebung und Reformulierung der kausalen Theorie. Daher entwickle ich im zweiten Abschnitt die Grundzüge der SRT und führe die Merkmale der zugehörigen Raum-Zeit-Struktur vor Augen. Im dritten und vierten Abschnitt skizziere ich die Umsetzung der kausalen Theorie im Rahmen der SRT. Dabei geht es um Versuche, die Raum-Zeit-Struktur allein auf der Grundlage der Beziehungen der kausalen Verknüpfbarkeit zu rekonstruieren. Im fünften Abschnitt stehen die modernen Ansätze zu einer

kausalen Begründung temporalen Beziehungen im Zentrum. Die Abschnitte 1.4 und 1.5 sind thematisch anspruchsvoller als der Rest des Buches und für ein Verständnis der nachfolgenden Argumentation nicht unabdingbar.

1.1 Die klassische Form der kausalen Zeittheorie: Leibniz und Kant

Humes Regularitätstheorie sieht eine Kausalbeziehung durch drei Merkmale gekennzeichnet:

- (1) *Kontiguität*: Räumliche Nachbarschaft von Ursache und Wirkung.
- (2) *Asymmetrie*: Zeitliche Priorität der Ursache vor der Wirkung.
- (3) *Regularität*: Beständiges gemeinsames Auftreten von Ursache und Wirkung (Hume 1739, 229-235).

Die Kontiguitätsbedingung der räumlichen Nachbarschaft beschränkt alle Kausalprozesse auf Nahwirkungen. Wenn zwei entfernte Ereignisse kausal miteinander verbunden sind, so muss es eine dazwischenliegende, verbindende Kette von Ursachen und Wirkungen geben, zwischen denen jeweils eine Nahwirkungsbeziehung besteht. Die Asymmetriebedingung legt zunächst fest, dass Ursache und Wirkung nicht vertauschbar sind. Die Ursache bringt die Wirkung hervor, nicht aber die Wirkung die Ursache. Diese Asymmetrie stellt den wesentlichen Unterschied zu Beziehungen der Wechselwirkung dar. Als Kriterium für diese Unterscheidung zwischen Ursache und Wirkung wird die Zeitfolge eingeführt. Die Nicht-Vertauschbarkeit von Ursache und Wirkung ergibt sich daraus, dass die Ursache der Wirkung zeitlich vorangeht. Die zentrale Bestimmung kausaler Beziehungen besteht in der Regularität, der Beständigkeit des gemeinsamen Auftretens von Ursache und Wirkung; ein besonderes „Vermögen“, kraft dessen die Ursache die Wirkung erzeugt, ist dagegen nicht aufweisbar. Nach Humes Ansicht ist entsprechend Kausalität durch die genannten drei Bedingungen erschöpfend charakterisiert.

Für die kausale Theorie der Zeit stellt sich die Problematik in ganz anderer Weise dar. Es geht nicht um eine Explikation der Kausalität; der Begriff der Verursachung wird vielmehr als grundlegend aufgefasst. Ziel ist stattdessen, auf diesen zeitliche Ordnungsbeziehungen zu gründen. Relevant sind zunächst Zeitfolge und

Gleichzeitigkeit; in modernen Fassungen wird der Einbezug von Zeitdauern (oder eigentlich Raum-Zeit-Intervallen) angestrebt. Die zentrale Festlegung der kausalen Zeittheorie lautet: Wenn Ereignis *A* dazu beiträgt, Ereignis *B* hervorzubringen, dann ist *A* früher als *B*.

Leibniz: Zeitfolge und zureichender Grund

Leibniz vertrat eine *relationale Theorie* von Raum und Zeit, derzufolge Raum und Zeit keine selbstständig existierenden Größen sind, sondern einen spezifischen Typus von Beziehungen zwischen Ereignissen zum Ausdruck bringen (s.u. 4.1.2). Entsprechend ergab sich für Leibniz die Frage, von welcher Art diese zeitlichen Beziehungen zwischen Ereignissen sind; und seine Antwort lautete, dass es sich um Verursachungsbeziehungen handelt. Das Prinzip des zureichenden Grundes soll Ereignisse zu einer zeitlichen Folge ordnen. „Wenn einer von zwei nicht-gleichzeitigen Zuständen den Grund für den anderen enthält, dann ist ersterer früher und letzterer später“ (Leibniz, in: Mehlberg 1935, 46). Diese Bedingung erlaubte für Leibniz die Bestimmung der Zeitfolge aller nicht-gleichzeitigen Ereignisse, da er eine universelle Wechselwirkung zwischen ihnen annahm (Mehlberg 1935, 46).¹

Kant: Zeitfolge und Kausalität

Kants Beitrag zur kausalen Zeittheorie konzentriert sich demgegenüber auf eine kausale Definition der Gleichzeitigkeit. Gleichzeitige Ereignisse sind dadurch charakterisiert, dass zwischen ihnen eine *Wechselwirkung* besteht. Diese Definition stellt das genaue Gegenteil der modernen Festlegung dar; danach sind gleichzeitige Ereignisse umgekehrt dadurch gekennzeichnet, dass zwischen ihnen keine Wechselwirkung vorliegen kann. Ich stelle zunächst Kants modifizierte Übernahme der Leibnizschen Theorie der Zeitfolge dar und skizziere dann die neuartige Bestimmung der Gleichzeitigkeit.



Immanuel Kant

Kant übernimmt Leibniz' kausale Theorie der Zeitfolge, versteht diese aber mit dem für die kantsche Philosophie charakteristischen transzendentalen Anspruch. Die „Zweite Analogie der Erfahrung“ drückt den Grundsatz aus, dass jede Erfahrung von Veränderung das Kausalgesetz voraussetzt. Diese Erfahrung nämlich erfordert eine festgelegte Verknüpfung der Wahrnehmungen, welche ihrerseits nicht durch die subjektive Zeitfolge der Wahrnehmungen bestimmt ist. Die Betrachtung der Wahrnehmungen zeigt allein, „daß meine Imagination eines vorher, das andere nachher setze, nicht daß im Objekte der eine Zustand vor dem anderen vorhergehe“ (Kant 1787, 233). Eine objektive, nicht-beliebige Zeitfolge der Wahrnehmungseindrücke wird erst durch die ordnende Kraft der Kategorie der Kausalität hergestellt. Diese soll die Transformation einer subjektiven Folge von Wahrnehmungen in eine objektive Folge von Ereignissen leisten.

Konkret läuft die Durchführung dieses Ansatzes auf die folgende Argumentation hinaus: Bei der Beobachtung eines Hauses und der Beobachtung eines Bootes, das einen Fluss herunterfährt, zeigt sich ein wesentlicher Unterschied. Im ersten Fall ist die Reihenfolge der Wahrnehmungen beliebig; man kann den Blick vom Dach zum Boden oder in umgekehrter Richtung schweifen lassen. Bei der Beobachtung des Bootes liegt hingegen eine gerichtete Abfolge

oder eindeutige Ordnung vor. Von zwei Wahrnehmungen, deren eine das Boot weiter stromaufwärts, die andere es stromabwärts erfasst, muss die erste früher als die zweite sein. Es liegt entsprechend eine objektive Folge der Erscheinungen vor. Die Grundlage dieser Einsinnigkeit kann nicht in den Wahrnehmungen selbst liegen, da es sich in beiden Fällen um subjektive Folgen handelt. Vielmehr erzeugt die Kategorie der Kausalität eine feste Ordnung unter den Erscheinungen. Diese Kategorie überführt die verschiedenen Wahrnehmungen des Bootes in eine gerichtete Erfahrung von Veränderung. Es ist der Verstand, der die verschiedenen Bootspositionen durch die Strömung des Flusses kausal miteinander verknüpft sieht und auf diese Weise die Abfolge der Wahrnehmungen des Bootes als eindeutig geordnet erfährt (Kant 1787, 234-240).

Auf Arthur Schopenhauer geht der Einwand zurück, Kants Fassung der kausalen Theorie sei zirkulär und damit untauglich: „Wie lässt sich Kants Behauptung, daß die Objektivität der Succession allein erkannt werde aus der Nothwendigkeit der Folge von Wirkung auf Ursache, vereinigen mit jener (Kr. d. r. V. p. 249), daß das empirische Kriterium, welcher von zwei Zuständen Ursach und welcher Wirkung sey, bloß die Succession sey? Wer sieht hier nicht den offenbarsten Cirkel“ (Schopenhauer 1813, 39). Für Schopenhauer muss eine kausale Theorie der Zeitordnung zwischen Ursachen und Wirkungen unterscheiden können, ohne dafür auf die Zeitfolge zurückgreifen zu müssen. Die kausale Theorie besagt, dass die Anordnung von Ereignissen dadurch festgelegt ist, dass Wirkungen später als ihre Ursachen eintreten. Damit eine solche Ansicht gehaltvoll wird, müssen Ursachen von Wirkungen anhand nicht-temporalen Eigenschaften unterschieden werden können. Aber Kant lässt sich im Gegenteil dahingehend ein, dass Zeitfolge oder die regelmäßige Verknüpfung die einzige Basis einer Unterscheidung von Ursachen und Wirkungen ist. „Demnach ist die Zeitfolge allerdings das einzige empirische Kriterium der Wirkung, in Beziehung auf die Kausalität der Ursache, die vorhergeht“ (Kant 1787, 249). Und weiter: „Vom Begriffe der Ursache würde ich (wenn ich die Zeit weglasse, in der etwas auf etwas anderes nach einer Regel folgt) in der reinen Kategorie [der Kausalität] nichts weiter finden, als dass es so etwas sei, woraus sich auf das Dasein eines anderen schließen lässt, und es würde dadurch nicht allein Ursache und Wirkung gar nicht von einander unterschieden werden können“ (ebd. 301). Danach stellte die Kategorie der Kausalität keine Grundlage für die Unterscheidung zwischen Ursache und Wirkung bereit; diese

muss vielmehr aus der Anschauungsform der Zeit stammen. Entsprechend verfehlte die Kausalität die Differenz zwischen früher und später, sie vermöchte allenfalls eine geordnete, nicht aber eine gerichtete Abfolge von Ereignissen zu erzeugen – und darauf zielt Schopenhauers Einwand ab. Ich komme auf dieses Problem aus modernem Blickwinkel zurück (s.u. 1.5.1).

Kant: Gleichzeitigkeit, Wechselwirkung und die instantane Ausbreitung der Gravitation

Kants kausale Theorie der Gleichzeitigkeit macht seine Originalität auf diesem Felde aus. Nach Kant besteht zwischen gleichzeitigen Ereignissen eine wechselseitige Kausalbeziehung. Die „Dritte Analogie der Erfahrung“ spezifiziert den „Grundsatz des Zugleichseins, nach dem Gesetze der Wechselwirkung oder Gemeinschaft“ (Kant 1787, 256). Dieser Grundsatz legt fest: „Alle Substanzen, so fern sie im Raume als zugleich wahrgenommen werden können“, sind in durchgängiger Wechselwirkung (ebd.). Empirisches Merkmal gleichzeitiger Zustände ist die willkürliche Anordnung der Wahrnehmungen. Bei der Betrachtung des Hauses gibt es deshalb keine ausgezeichnete Reihenfolge der Wahrnehmungen, weil die Teile des Hauses gleichzeitig existieren. Zwischen den Wahrnehmungen besteht keine objektive Zeitordnung; ihre Abfolge lässt sich durch Wechsel der Blickrichtung umkehren.

Grundlage dieser objektiven Gleichzeitigkeit ist die Kategorie der „Gemeinschaft“ oder „Wechselwirkung“, also die wechselseitige Bestimmung der Zeitverhältnisse. Da Zeitverhältnisse durch die Kausalordnung bestimmt werden, verlangt das objektive Bestehen von Gleichzeitigkeit das Vorliegen einer Wechselwirkung zwischen den betreffenden Zuständen. Diese Wechselwirkung ist der objektive Grund für die Umkehrbarkeit der subjektiven Reihenfolge der Wahrnehmungen (Kant 1787, 257-258; Watkins 1997, 419). Bei der Betrachtung des Hauses ist die Reihenfolge der Wahrnehmungen umkehrbar, weil die Teile des Hauses in Wechselwirkung miteinander stehen. Die unterschiedlichen Positionen des Bootes auf dem Fluss stehen hingegen nicht in Wechselwirkung miteinander.

Kants kausale Theorie zeitlicher Beziehungen ist entsprechend von hoher begrifflicher Homogenität (und überragt in dieser Hinsicht sowohl ihre Vorgänger wie ihre Nachfolger). Die zeitlichen

Beziehungen werden einheitlich durch ein einziges Prinzip festgelegt: „Nun bestimmt nur dasjenige dem andern seine Stelle in der Zeit, was die Ursache von ihm oder seinen Bestimmungen ist“ (Kant 1787, 259). Eine eindeutig gerichtete Folge von Wahrnehmungen mit ihren Beziehungen von „früher“ und „später“ ergibt sich aus der Verursachungsbeziehung; die Umkehrbarkeit von Wahrnehmungen entspricht der Beziehung der Gleichzeitigkeit und beruht darauf, dass die Kausalität in beide Richtungen wirkt. Der subjektiven Umkehrbarkeit liegt ein wechselseitiger Einfluss zugrunde, eine „reale Gemeinschaft (commercium) der Substanzen“ (Kant 1787, 261). Diese Konstruktion läuft demnach auf die Vorstellung hinaus, dass zwischen allen Objekten, die als gleichzeitig erfahren werden, eine durchgängige Wechselwirkung besteht (Kant 1787, 257-258).

Allerdings entsteht auch hier ein weiteres Zirkularitätsproblem. Wenn Gleichzeitigkeit auf wechselseitige kausale Einwirkung zurückführbar sein soll, dann dürfen offenbar die einschlägigen entgegengesetzt gerichteten Kausalprozesse nicht aufeinanderfolgen. Sie müssen sich gleichsam überkreuzen. Dies ist aber gleichbedeutend damit, dass diese Prozesse gleichzeitig auftreten. Damit gründete jedoch Gleichzeitigkeit nicht etwa auf dem Bestehen von Wechselwirkung, sondern von gleichzeitiger Wechselwirkung, und ihre Bestimmung geriete entsprechend in einen Zirkel (Watkins 1997, 435-437).

Zur Lösung dieses Problems ist Kants Analyse der Mitteilung der Bewegung aus den *Metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft* herangezogen worden. Diese Analyse beinhaltet, dass die Bewegung, die Körper unter beliebigen Umständen einander erteilen, stets wechselseitig ist. Solche Prozesse der Mitteilung der Bewegung weisen demnach gerade die erforderliche Art von wechselseitiger kausaler Bestimmung auf. Wenn man also ohne Bezug auf temporale Größen sicherstellen kann, dass eine Mitteilung von Bewegung vorliegt, dann erlaubt dies den Schluss auf das Bestehen von Gleichzeitigkeitsbeziehungen (Kant 1786, 544; Watkins 1997, 437).

Kants Analyse erstreckt sich zwar auf beliebige Mitteilungsprozesse, wird jedoch nur für die Mitteilung der Bewegung durch Stöße weiter ausgearbeitet. Der Bezug auf Stoßprozesse ist in der Tat geeignet, den Anwendungszirkel bei der Bestimmung der Gleichzeitigkeit aufzulösen: Stoßprozesse lassen sich ohne Voraussetzung von Gleichzeitigkeitsbeziehungen identifizieren. Zwischen stoßenden Körpern besteht demnach die geforderte Beziehung wechselseitiger Verursachung. Wenn zwei Körper aufeinandertreffen, dann existieren sie während des Zusammenpralls zur gleichen Zeit.

Andererseits ist wechselseitige Mitteilung von Bewegungen in Stößen nicht für eine umfassende Festlegung der Gleichzeitigkeit geeignet. Man benötigt einen verallgemeinerten Ansatz für die Explikation von Gleichzeitigkeitsbeziehungen zwischen entfernten Ereignissen. Tatsächlich ist Kant der Auffassung, dass sämtliche gleichzeitig existierenden Körper (also nicht allein die miteinander kollidierenden Objekte) in Wechselwirkung miteinander stehen. Alle Gegenstände in einem zeitlichen Querschnitt durch das Universum stehen in „dynamischer Gemeinschaft“. Diese Gemeinschaft kann sich offenbar nicht auf direkte Stoßeinwirkung gründen, und tatsächlich tritt für Kant neben die unmittelbare Gemeinschaft ohne Übertragungsprozess die „mittelbare“. Kants Beispiel für eine mittelbare Gemeinschaft ist das Wechselspiel der Lichtstrahlen. „Unseren Erfahrungen ist es leicht anzumerken, daß nur die kontinuierlichen Einflüsse in allen Stellen des Raumes unseren Sinn von einem Gegenstande zum anderen leiten können, daß das Licht, welches zwischen unserm Auge und den Weltkörpern spielt, eine mittelbare Gemeinschaft zwischen uns und diesen bewirkt, und dadurch das Zugleichsein der letzteren beweisen [...] kann“ (Kant 1787, 260). Bei einer mittelbaren Gemeinschaft beruht demnach die Wechselwirkung auf einem vermittelnden Prozess. Auge und Stern sind gleichzeitig, weil das Licht des Sterns das Auge erreicht, und – so muss man es wohl verstehen – weil umgekehrt das vom Auge ausgehende Licht den Stern trifft („zwischen dem Auge und den Weltkörpern spielt“). Das Bestehen einer mittelbaren Gemeinschaft ist also für die Erfahrung von Gleichzeitigkeit hinreichend.

Aber ebenso wenig wie Stoßprozesse kommt wechselseitige Beleuchtung der Körper als Grundlage einer umfassenden, das Universum umspannenden „dynamischen Gemeinschaft“ in Frage. Für eine solche Verallgemeinerung bietet sich jedoch die Vermittlung durch die Gravitation an. Ihre Eignung beruht darauf, dass sie universell und instantan wirkt. Als Folge ihrer Universalität stellt sie Kausalbeziehungen zwischen sämtlichen existierenden Körpern her, und als Folge ihrer unendlich schnellen Ausbreitung verknüpft sie diese Körper jeweils zur gleichen Zeit. Bei allen Prozessen endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit tritt die erwähnte Zirkularität auf: Man muss die Zeitpunkte der Signalausendung miteinander koordinieren und benötigt entsprechend bereits eine Gleichzeitigkeitsbeziehung. Anders hingegen bei der

Gravitation. Aufgrund der instantanen Fortpflanzung beinhaltet das bloße Bestehen einer Wechselwirkung bereits die Gleichzeitigkeit von Wirkung und Rückwirkung. Wenn Sonne und Erde in instantan übertragener gravitativer Wechselwirkung stehen, dann sind Hin- und Rückwirkung in jedem Fall gleichzeitig.

Die empirische Identifikation der einschlägigen, sich überkreuzenden Kausalprozesse ist dann ohne weiteres möglich. Die Gravitationswirkung, die der Körper A auf den Körper B zum Zeitpunkt t_0 ausübt, ist gleichzeitig mit der Gravitationswirkung, die vom Körper B auf den Körper A zum gleichen Zeitpunkt t_0 ausgeübt wird. Der Zeitpunkt der Aussendung des betreffenden Kausalprozesses vom Körper A stimmt überein mit dem Zeitpunkt des Eingangs des zugehörigen Kausalprozesses vom Körper B . Dies stellt gerade den Unterschied zu Prozessen endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit dar; bei diesen würden durch eine solche Übereinstimmung der Zeitpunkte gerade aufeinanderfolgende und damit ungeeignete Kausalprozesse ausgesondert. Durch Rückgriff auf die instantane Ausbreitung der Gravitation könnte daher die Anwendungszirkularität der kantschen Bestimmung der Gleichzeitigkeit gelöst werden. Dies begründet den wesentlichen Vorzug der Gravitation gegenüber allen anderen die gleichzeitigkeitskonstitutive Wechselwirkung vermittelnden Prozessen.

Allerdings verlangt diese Rekonstruktion, dass die Fernwirkung der Gravitation eine transzendente Tragweite besitzt. Die Gravitation zählte dann zu den Bedingungen der Möglichkeit der Erfahrung: sie macht die Erfahrung von entfernter Gleichzeitigkeit möglich. Tatsächlich legt Lehrsatz 8 des Dynamikkapitels der *Metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaften* fest, dass die „ursprüngliche Anziehungskraft“, das ist die Gravitation, eine Fernwirkung ist, was deren unendliche Ausbreitungsgeschwindigkeit beinhaltet. Allerdings wird diese Fernwirkung auf die Möglichkeit der Erfahrung von Materie, nicht auf die Erfahrung entfernter Gleichzeitigkeit gegründet (Kant 1786, 516-517); es fehlt dort jeder Bezug auf die Kategorie der Wechselwirkung oder auf die Gleichzeitigkeit. Vermutlich hat Kant das Zirkularitätsproblem der entfernten Gleichzeitigkeit nicht bemerkt und daher auch nicht die Ressourcen seiner eigenen Konzeption zu deren Bewältigung genutzt.

1.2 Die Raum-Zeit-Struktur in der speziellen Relativitätstheorie



Albert Einstein

Seit den Zeiten Kants hat sich die einschlägige wissenschaftliche Sachlage drastisch gewandelt. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Formulierung der SRT im Jahre 1905 durch Albert Einstein (1879–1955). Ich stelle zunächst die Grundzüge dieser Theorie vor und skizziere die wesentlichen Merkmale der zugehörigen Raum-Zeit-Struktur. Anschließend diskutiere ich in ihrem Rahmen Fortentwicklungen der kausalen Theorie der Zeit.

1.2.1 Die Konzeption der Speziellen Relativitätstheorie und die Tradition der Elektrodynamik

Einsteins bahnbrechende Arbeit zur „Elektrodynamik bewegter Körper“ aus dem Jahre 1905 stellt zwei Grundsätze an den Anfang, das später so genannte *spezielle Relativitätsprinzip* und die *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*. Das spezielle Relativitätsprinzip sieht vor, dass alle geradlinig-gleichförmig bewegten Beobachter in jedweder physikalischen Hinsicht gleichberechtigt sind. Dies drückt die Gleichberechtigung von sog. *Inertialsystemen* aus; danach eignen sich alle geradlinig-gleichförmig bewegten Bezugssysteme für die Beschreibung von Bewegungen in gleicher Weise.