

■ WISSEN

C.H.BECK

Hubert Goenner
**EINSTEINS
RELATIVITÄTS-
THEORIEN**



Raum, Zeit,
Masse, Gravitation

„Man kann wohl sagen, daß die Relativitätstheorie zum großartigen Gedankengebäude Maxwells und Lorentz' eine Art Abschluß geliefert hat, indem sie versucht, die Feldphysik auf alle Erscheinungen, die Gravitation eingeschlossen, auszudehnen. Indem ich mich dem eigentlichen Gegenstand der Relativitätstheorie zuwende, liegt es mir daran, hervorzuheben, daß diese Theorie nicht spekulativen Ursprungs ist, sondern daß sie durchaus nur der Bestrebung ihre Entdeckung verdankt, die physikalische Theorie den beobachteten Tatsachen so gut als nur möglich anzupassen. Es handelt sich keineswegs um einen revolutionären Akt, sondern um eine natürliche Fortentwicklung einer durch Jahrhunderte verfolgbar Linie. Das Aufgeben gewisser bisher als fundamental behandelte Begriffe über Raum, Zeit und Bewegung darf nicht als freiwillig aufgefaßt werden, sondern nur als bedingt durch beobachtete Tatsachen.“

Albert Einstein: Rede vor der Royal Society of London 1921.

Hubert Goenner war Professor für Theoretische Physik an der Universität Göttingen mit Hauptarbeitsgebiet Relativistische Theorien der Gravitation. Er schrieb Lehrbücher wie *Einführung in die Kosmologie* (1994), *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie* (1996), *Spezielle Relativitätstheorie und die klassische Feldtheorie* (2004). Bei C.H.Beck erschienen von ihm *Einstein in Berlin 1914–1933* (2005) und *Albert Einstein* (C.H.Beck Wissen, 2015).

Hubert Goenner

EINSTEINS RELATIVITÄTSTHEORIEN

Raum, Zeit, Masse, Gravitation

Verlag C.H.Beck

Mit 9 Abbildungen

1. Auflage. 1997
- 2., verbesserte Auflage. 1999
- 3., aktualisierte Auflage. 2002
- 4., aktualisierte Auflage. 2005
5. Auflage. 2005

6., überarbeitete Auflage. 2016
© Verlag C.H.Beck oHG, München 1997
Umschlaggestaltung: Uwe Göbel, München

ISBN Buch 978 3 406 45669 5
ISBN eBook 978 3 406 70357 7

Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im Buchhandel
sowie versandkostenfrei auf unserer Website

www.chbeck.de.

Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele weitere
Informationen.

Inhalt

Vorbemerkung	7
1. Raum, Zeit, Materie	9
1.1 Ausdehnung und Abstandsmaß	10
1.2 Veränderung und Zeitmaß	13
1.3 Materie und Masse	17
1.4 Newtonsche Mechanik	19
2. Die Relativität der Bewegung	23
2.1 Relativitätsprinzip der Mechanik	23
2.2 Spezielle Relativitätstheorie	27
2.3 Raum-Zeit-Diagramm	29
3. Gleichzeitigkeit und Kausalität	33
3.1 Uhrenvergleich	34
3.2 Kausalität	36
4. Folgen für die Physik	38
4.1 Längenkontraktion und Zeitdilatation	38
4.2 Dopplereffekt und Zwillingsparadoxon	40
4.3 Masse und Energie	43
5. Empirische Belege für die Spezielle Relativitätstheorie	46
6. Die Geometrie der Raum-Zeit	50
6.1 Der Minkowski-Raum	51
6.2 Anwendungen der Raum-Zeit-Formulierung	53
7. Trägheit und Schwere	56
7.1 Die Machsche Idee	57
7.2 Das Potential von Schwere und Trägheit	58

8. Gravitation und Geometrie	60
8.1 Verallgemeinerung der Minkowski-Metrik . . .	60
8.2 Riemannsche Geometrie	62
9. Krümmung und Materie	65
9.1 Äußere und innere Krümmung	65
9.2 Krümmung und Energie der Materie	69
10. Beobachtungen im Planetensystem	72
10.1 Gravitationsrotverschiebung	72
10.2 Lichtablenkung	73
10.3 Merkurperiheldrehung	76
10.4 Weitere beobachtbare Effekte	77
11. Relativistische Astrophysik	78
11.1 Schwarze Löcher	78
11.2 Gravitationswellen	82
12. Milchstraßen und Kosmologie	87
12.1 Was wir vom Kosmos erfahren	88
12.2 Grundannahmen der kosmologischen Modellbildung	94
12.3 Das Standardmodell	95
12.4 Ausblick	99
13. Symbole und Abkürzungen	101
14. Mathematischer Anhang	102
15. Weiterführende Literatur	106
16. Register	108

Vorbemerkung

Begriffe wie Raum, Zeit, Masse, Energie, Relativität, Schwerkraft, um die es in dem hier vorgestellten Wissensgebiet geht, sind Teil unserer alltäglichen Erfahrung. Wir spüren die Erdanziehung und die Fliehkraft, wir kalkulieren mit Energiewerten, wir erleben die Standpunktabhängigkeit unserer Wahrnehmung nicht nur beim Reisen. Das ist eine gute Voraussetzung zum Verständnis der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins. Allerdings führt die Verwendung ein und derselben Worte in Alltagssprache und Wissenschaft auch zu Mißverständnissen. Etwa zur ungerechtfertigten Übertragung des Relativitätsbegriffs der Physik im Sinne von „Alles ist relativ“ auf Ethik und geisteswissenschaftliche Bereiche der Kultur wie die Kunst. In einer Nummer der Zeitschrift des Expressionismus *Die Aktion* von 1917 verstieg sich der Chemiker Hatvani zu der unsinnigen Bemerkung, daß infolge der „psychozentrierten Orientierung“ der Relativitätstheorie, sich „das denkende Ich selbst in den Bewußtseinsinhalt ‚Gravitation‘“ auflöst. Ebenso wenig läßt sich das individuelle Zeitgefühl auf den in der Physik verwandten Zeitparameter übertragen.

Während die Spezielle Relativitätstheorie die Grundlagen der raum-zeitlichen Beschreibung physikalischer Vorgänge, insbesondere der mit hohen Geschwindigkeiten ablaufenden, liefert, ist die Allgemeine Relativitätstheorie eine Theorie der Gravitation. In beiden Theorien sind neben der auf die Beobachter bezogenen Relativität nach wie vor absolute geometrische Größen enthalten. Die folgende Darstellung will deutlich machen, welch unverzichtbaren Zuwachs zum Naturverständnis und auch zu nützlichen technischen Entwicklungen die Einsteinschen Theorien gebracht haben. Erstes Gebot beim Schreiben war Klarheit, das zweite Anschaulichkeit. Der mathematische Apparat ist auf wenig Nötiges und aus der Schule Bekanntes beschränkt; bei diesem Thema auf jede Formel zu verzichten, würde in einer Reihe, die *Wissen* ver-

mitteln soll, auf eine Täuschung des Lesers hinauslaufen. Der mathematische Anhang ist als Ergänzung für Leser mit stärkerem Interesse an mathematischen Formulierungen gedacht. Im Prinzip können die einzelnen Kapitel in beliebiger Reihenfolge gelesen werden, obgleich spätere Abschnitte Definitionen und Erklärungen verwenden, die in früheren gegeben sind.

Nach seiner freundlichen Aufnahme durch die Leser konnte der Text im wesentlichen beibehalten werden. Für die Zuschriften bedanke ich mich sehr. Einige Verbesserungen und Ergänzungen habe ich ebenso eingefügt wie notwendige Aktualisierungen aufgrund der fortschreitenden Entwicklung und neuere Literaturhinweise.

Göttingen, im Mai 2016

Hubert Goenner

1. Raum, Zeit, Materie

Die Begriffswelt, in der wir leben

Der Blick schweift über die Reling, dem gekräuselten Spiegel des Meeres folgend; erst der Horizont hält ihn auf. Aber daß dahinter auch noch etwas ist, Meer und Himmel, Wasser und Wolken: erfüllter Raum, wissen wir. Zwar verdeckt uns jede Wolke die Sicht, aber der auf sie gerichtete Blick müßte im Prinzip hindurch und immer weiter gehen können, bis er an irgend etwas undurchdringlichem, einem Planeten oder Stern anlangt, davon sind wir überzeugt. Wirklich? Ist die Welt nirgendwo „mit Brettern vernagelt“, endet abrupt? Könnte ein Lichtstrahl nicht zu uns zurückkehren wie der Weltumsegler nach einer Umrundung des Globus? Was ist das eigentlich: der Raum? Wir sehen doch nur Gegenstände *im Raum*, nie den Raum selber.

Mit diesen müßigen Gedanken eines Schiffsreisenden sind wir mitten in einem Grundproblem der Naturbeschreibung gelandet. Es gibt verschiedene Auffassungen vom Raum: eine, daß er schon immer da ist vor allem anderen und wie ein Behälter die Dinge in sich aufnimmt; eine weitere, daß erst die Körper in ihrer gegenseitigen Beziehung den Raum „aufspannen“. Ohne Körper auch kein Raum. Die erste Grundposition wurde in der griechischen Naturphilosophie etwa durch Aristoteles (384–322 v. Chr.) vertreten und in der Neuzeit dann durch Isaak Newton (1642–1727); die zweite durch Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) und die ihm nachfolgenden Gedankenschulen. Die Newtonsche Auffassung hat sich in der mathematischen Beschreibung der Natur durchgesetzt, obgleich die Leibnizsche die physikalisch einleuchtendere ist. Die Eigenschaften, die wir dem Raum zuschreiben – unabhängig von Körpern und Beobachtern –, nennen wir in der mathematischen Formulierung *geometrische*. Im folgenden werden wir die Raum, Zeit und Materie verbindende „Geometrie“ kennenlernen.

1.1 Ausdehnung und Abstandsmaß

Alle Dinge unserer Erfahrung haben eine *Ausdehnung*. Ein nach seiner Definition ausdehnungsloser Punkt kann nur näherungsweise, etwa durch eine feine Spitze, realisiert werden. Es ist ein gedachter Grenzprozeß, der hinter dem Begriff „Massenpunkt“ der Physik steckt: vom Billardball über den Stecknadel- oder Streichholzkopf zum winzigsten, gerade noch sichtbaren Ende eines Haares. „Ausdehnung“ ist eine mit dem Raumbegriff verknüpfte Grunderfahrung. Dennoch gibt diese keinen Hinweis darauf, welche der beiden geschilderten Raumauffassungen die richtige ist. Wahrscheinlich ist es nicht sinnvoll, die Komplexität der „Außenwelt“ in ein Entweder-Oder-Schema zu pressen.

Ausdehnung scheint ebenso eine definierende Eigenschaft der Materie zu sein wie des Raumes. Das war jedenfalls die Meinung des Philosophen René Descartes (1596–1650). Für ihn besteht der Raum durchgehend und bis in immer kleiner werdende Bereiche aus materiellen Teilchen, die aufeinander einwirken, Kräfte übertragen. Diese Verteilung von Materiepartikeln nannte er „Äther“. Interessant ist dabei die angenommene *kontinuierliche* Verteilung der Materie: Es soll keine Lücken im Äther der Teilchen geben. Die von ihnen gebildete Kontinuumsstruktur können wir uns als beliebig dehnbare Gummihaut vorstellen; im Unterschied zu den feinen Häutchen der Seifenblasen läßt sie sich beliebig auseinanderziehen, ohne je weniger „glatt“ zu werden oder zu zerreißen. Ebenfalls denkbar wäre die Vorstellung vom Raum als einer Art feinmaschigen Siebs oder „Netzes“, wenn auch mit sehr unregelmäßigen Maschen. Die Fäden des Netzes entsprächen den Körpern, der Materie. In den „Zwischenräumen“ gäbe es nichts, was mit dem Begriff der Ausdehnung belegt werden sollte. Aber so richtig einsehen können wir das nicht. Frühere Generationen schrieben der Natur einen Abscheu vor dem Vakuum (*horror vacui*) zu. Zwischen den greifbaren Dingen „muß“ noch etwas sein! Und wenn es nur ein dünnes Gas wie die Luft oder die wenigen Atome pro Ku-

bikzentimeter im Raum zwischen den Sternen und Sternsystemen sind. Im Begriff „Schwarzes Loch“, der in Kapitel 11.1 eingeführt werden wird, scheint so etwas wie ein „Loch“ im Raum aufzutauchen. Wir werden aber sehen, daß das nur eine Sprechweise ist. Die Kontinuumsstruktur des materieerfüllten Raumes bleibt erhalten.

Wesentlicher ist da schon, daß erfahrbare Ausdehnung durch drei voneinander unabhängige Richtungen ausgelotet werden kann: Länge, Breite, Höhe. Wir sagen: Der Raum ist dreidimensional. Um einen Ort im Raum festlegen zu können, brauchen wir also drei Zahlen, die *Orts-Koordinaten* genannt werden. Als einfachste Möglichkeit bietet sich ein Achsenkreuz aus drei aufeinander paarweise senkrechtstehenden Achsen an, auf die wir einen Punkt projizieren können. Die sich ergebenden Abschnitte auf den Achsen sind dann seine *kartesischen* Koordinaten.

Die Ausdehnung wird mit Hilfe dieser Koordinaten durch ein *Abstandsmaß* quantifiziert. Verschiedene Personen schätzen eine vorgegebene Strecke als kürzer oder länger ein. Entscheidend ist, daß wir uns auf ein Abstandsmaß für die Ausdehnung *einigen*, etwa auf die Verwendung eines geeichten Kilometerzählers. Schwieriger wird es, wenn größere Bereiche, die nicht der alltäglichen Meßerfahrung mit Maßband oder Meßlatte zugänglich sind, in ihrer Ausdehnung bestimmt werden sollen. Nehmen wir die Entfernung zum Mond, nächsten Stern oder zum Zentrum unserer Milchstraßen-„Scheibe“. Innerhalb des Planetensystems senden wir einen Radar- oder Lichtpuls zum fernen Objekt, hoffen, daß er dort reflektiert wird bzw. denken uns einen Radarreflektor oder einen Spiegel angebracht, wie auf dem Mond seit den menschlichen Besuchen von 1969 bis 1971 geschehen. Dann wird das zwischen Abgang und Wiedereintreffen des Signals verstrichene Zeitintervall Δt gemessen. Unter der Annahme, daß die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum c richtungsunabhängig ist, setzen wir als Entfernung die Hälfte der mit der (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit multiplizierten Laufzeit, also $1/2 \cdot c \cdot \Delta t$, an.