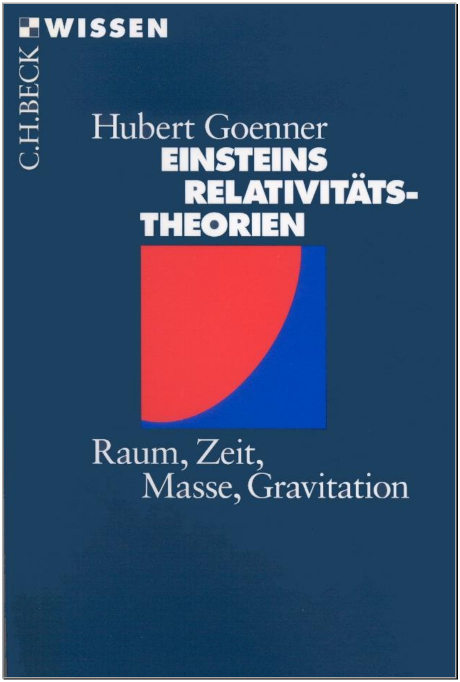
C.H.BECK
WWW.CHBECK.DE

Unverkäufliche Leseprobe



Hubert Goenner
Einsteins Relativitätstheorien
Raum, Zeit, Masse, Gravitation

2016. 110 S., mit 9 Abbildungen
ISBN 978-3-406-45669-5

Weitere Informationen finden Sie hier:
https://www.chbeck.de/11708

„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 verfolgbaren Linie. Das Aufgeben gewisser bisher als fundamental behandelter 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

Originalausgabe

Satz, Druck u. Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen
Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München
Printed in Germany
ISBN 978 3 406 45669 5

www.chbeck.de

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. Ebensowenig 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* vermitteln 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 Kubikzentimeter 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.

Was heißt es denn genau, einen Abstand zwischen oder die Entfernung von zwei (Massen-)Punkten zu bestimmen? Wir verlangen, daß das Abstandsmaß Null ist, wenn sich die Punkte beliebig nahe kommen, und daß es nicht von der Reihenfolge der Punkte abhängt, zwischen denen gemessen wird. Schließlich noch, daß die sog. Dreiecksungleichung für das Abstandsmaß gilt. Das bedeutet, daß, wenn Abstände zwischen je zwei von *drei* Punkten betrachtet werden, die Summe von zwei aneinander angrenzenden Abständen immer größer als der dritte Abstand ist oder höchstens ihm gleich. Ein Abstandsmaß, das diese Bedingungen erfüllt, ist der *Euklidische* Abstand d. Für zwei Massenpunkte mit den Koordinaten*differenzen* Δx_1, Δx_2, Δx_3 berechnet er sich (in Analogie zum Satz des Pythagoras in der ebenen Geometrie) aus $d^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + (\Delta x_3)^2$. Wenn die Koordinatendifferenzen beliebig klein werden, nennen wir die Koeffizienten vor ihnen in der Abstandsfunktion, also hier 1, 1, 1, „Komponenten“ der Euklidischen „Metrik“ (vgl. Mathematischer Anhang).

Ein starrer Stab kann als gegenständliche Realisierung der Abstandsfunktion, d.h. als ein Instrument zu ihrer Messung dienen. Starr heißt, daß seine Länge sich in dem Zeitraum, über den wir ihn benutzen wollen, nicht verändert. Wie das nachzuprüfen ist? Eigentlich nur durch Vergleich mit anderen möglichen Maßstäben. Wahrscheinlich haben viele Menschen schon mit der Idee gespielt, daß sie nichts davon merkten, wenn sich alle Abstände in der Welt im selben Maße verkleinern oder vergrößern würden. Um einen möglichen Effekt, der eine Abstandsänderung bewirkt, wie eine Kraft auf einen *unelastischen* Körper (etwa zusammengedrückte Knete), festzustellen, muß es eben festere Körper geben (etwa die Tischfläche, auf die sie gedrückt wird). Dies wird wichtig werden, wenn wir uns den Gravitationswellen (Kapitel 11) oder dem Hubble-Fluß (Kapitel 12) zuwenden.

Die *Maßeinheit* für die Abstandsmessung, die Längeneinheit, ist eine Konvention, da sich bisher keine „natürliche“ Längeneinheit angeboten hat. Namen für ältere Längeneinheiten wie Fuß, Elle, Zoll zeugen von Versuchen in dieser Richtung. Auch der 1799 entstandene Vorschlag, die Längeneinheit als den vierzigmillionsten Teil des Erdumfanges zu definieren, ist nicht besonders überzeugend und mißglückt. Das *Meter*, das daraus hervorging und das als Prototyp mit x-förmigem Querschnitt in Paris als international verbindlicher Standard aufbewahrt wird, ist heute über die Wellenlänge einer Spektrallinie des Kryptonatoms festgelegt (^{86}Kr, Übergang $5d_5 \rightarrow 2p_{10}$): ein Meter ist dann das 1 650 763,73-fache dieser Wellenlänge. Aus der Mikrophysik (quantenhafte Erscheinungen) gibt es Andeutungen, daß die oben beschriebene Kontinuumsstruktur des Raumes in dem Sinne verletzt sein könnte, daß eine „kleinste" Länge existiert. Aus den Naturkonstanten Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum c, Plancksche Konstante h und Newtonsche Gravitationskonstante G läßt sich eine Größe von der Dimension einer Länge bilden, die zu Ehren von Max Planck (1858–1947) *Planck-Länge* genannt wird: $(\frac{h \cdot G}{2\pi c^3})^{1/2}$. Sie beträgt $1{,}616 \cdot 10^{-33}$ cm, ist also unvorstellbar klein.[1] Im Vergleich dazu ist die Ausdehnung eines Elektrons von der Größenordnung 10^{-13} cm riesig. Heute können Längen bis zu 10^{-17} cm direkt, indirekt bis 10^{-22} cm gemessen werden. Was unterhalb der Skala einer Planck-Länge passiert, weiß noch niemand.