ALBERT
EINSTEIN

Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie

Springer

ALBERT EINSTEIN

Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie

ALBERT EINSTEIN

Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie

24. Auflage

Springer

Das Umschlagbild zeigt *Albert Einstein* im Alter von etwa 29 Jahren.
Das Photo entstand an Einsteins Arbeitstisch im Patentamt in Bern. Abdruck aus A. Pais, „Raffiniert ist der Herrgott … ". Albert Einstein. Eine wissenschaftliche Biographie (Vieweg, Braunschweig, 1986). – Das Original befindet sich im Einstein-Archiv.

Unter dem gleichen Titel ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH

24. Auflage 2009
Mit 4 Abbildungen

ISBN 978-3-540-87776-9 e-ISBN 978-3-540-87777-6

DOI 10.1007/978-3-540-87777-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

Vorwort

Das vorliegende Büchlein soll solchen eine möglichst exakte Einsicht in die Relativitätstheorie vermitteln, die sich vom allgemein wissenschaftlichen, philosophischen Standpunkt für die Theorie interessieren, ohne den mathematischen Apparat[1]) der theoretischen Physik zu beherrschen. Die Lektüre setzt etwa Maturitätsbildung und – trotz der Kürze des Büchleins – ziemlich viel Geduld und Willenskraft beim Leser voraus. Der Verfasser hat sich die größte Mühe gegeben, die Hauptgedanken möglichst deutlich und einfach vorzubringen, im ganzen in solcher Reihenfolge und in solchem Zusammenhange, wie sie tatsächlich entstanden sind. Im Interesse der Deutlichkeit erschien es mir unvermeidlich, mich oft zu wiederholen, ohne auf die Eleganz der Darstellung die geringste Rücksicht zu nehmen; ich hielt mich gewissenhaft an die Vorschrift des genialen Theoretikers L. BOLTZMANN, man solle die Eleganz Sache der Schneider und Schuster sein lassen. Schwierigkeiten, die in der Sache begründet liegen, glaube ich dem Leser nicht vorenthalten zu haben. Dagegen habe ich die empirischen

---

[1]) Die mathematischen Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie findet man in den bei B.G. Teubner in der Monographiensammlung „Fortschritte der mathematischen Wissenschaften" unter dem Titel „Das Relativitätsprinzip" erschienenen Originalabhandlungen von H. A. LORENTZ, A. EINSTEIN, H. MINKOWSKI, sowie in M. LAUEs ausführlichem Buche „Das Relativitätsprinzip" (Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig). Die allgemeine Relativitätstheorie nebst den zugehörigen mathematischen Hilfsmitteln der Invariantentheorie ist in der Broschüre des Verfassers „Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie" (Joh. Ambr. Barth, 1916) behandelt; diese Broschüre setzt einige Vertrautheit mit der speziellen Relativitätstheorie voraus.

physikalischen Unterlagen der Theorie absichtlich stiefmütterlich behandelt, damit es dem der Physik ferner stehenden Leser nicht ergehe wie dem Wanderer, der vor lauter Bäumen keinen Wald sieht. Möge das Büchlein manchem einige frohe Stunden der Anregung bringen!

Dezember 1916. A. EINSTEIN

Inhaltsverzeichnis

Erster Teil
Über die spezielle Relativitätstheorie

Zweiter Teil
Über die allgemeine Relativitätstheorie

Betrachtungen über die Welt als Ganzes

Anhang

Erster Teil
Über die spezielle Relativitätstheorie

§ 1 Physikalischer Inhalt geometrischer Sätze

Gewiß hast auch du, lieber Leser, als Knabe oder Mädchen mit dem stolzen Gebäude der Geometrie EUKLIDS Bekanntschaft gemacht und erinnerst dich vielleicht mit mehr Achtung als Liebe an den stolzen Bau, auf dessen hohen Treppen du von gewissenhaften Fachlehrern in ungezählten Stunden umhergejagt wurdest. Gewiß würdest du kraft dieser deiner Vergangenheit jeden mit Verachtung strafen, der auch nur das abgelegenste Sätzchen dieser Wissenschaft für unwahr erklärte. Aber dies Gefühl stolzer Sicherheit verließe dich vielleicht sogleich, wenn dich einer fragte: „Was meinst du denn mit der Behauptung, daß diese Sätze wahr seien?" Bei dieser Frage wollen wir ein wenig verweilen.

Die Geometrie geht aus von gewissen Grundbegriffen, wie Ebene, Punkt, Gerade, mit denen wir mehr oder minder deutliche Vorstellungen zu verbinden imstande sind, und von gewissen einfachen Sätzen (Axiomen), die wir auf Grund jener Vorstellungen als „wahr" hinzunehmen geneigt sind. Alle übrigen Sätze werden dann auf Grund einer logischen Methode, deren Berechtigung wir uns anzuerkennen genötigt fühlen, auf jene Axiome zurückgeführt, d.h. bewiesen. Ein Satz ist dann richtig bzw. „wahr", wenn er in der anerkannten Weise aus den Axiomen hergeleitet ist. Die Frage nach der „Wahrheit" der einzelnen geometrischen Sätze führt also zurück auf die Frage nach der „Wahrheit" der Axiome. Längst aber ist es bekannt, daß die letztere Frage nicht nur durch die Methoden der Geometrie nicht beantwortbar, sondern überhaupt an sich ohne Sinn ist. Man kann nicht fragen, ob es wahr sei, daß durch zwei

Punkte nur *eine* Gerade hindurchgeht. Man kann nur sagen, daß die euklidische Geometrie von Gebilden handelt, die sie „Gerade" nennt, und denen sie die Eigenschaft beilegt, durch zwei ihrer Punkte eindeutig bestimmt zu sein. Der Begriff „wahr" paßt nicht auf die Aussagen der reinen Geometrie, weil wir mit dem Worte „wahr" in letzter Linie stets die Übereinstimmung mit einem „realen" Gegenstande zu bezeichnen pflegen; die Geometrie aber befaßt sich nicht mit der Beziehung ihrer Begriffe zu den Gegenständen der Erfahrung, sondern nur mit dem logischen Zusammenhang dieser Begriffe untereinander.

Daß wir uns trotzdem dazu hingezogen fühlen, die Sätze der Geometrie als „wahr" zu bezeichnen, erklärt sich leicht. Den geometrischen Begriffen entsprechen mehr oder weniger exakt Gegenstände in der Natur, welch letztere ohne Zweifel die alleinige Ursache für die Entstehung jener Begriffe sind. Mag die Geometrie, um ihrem Gebäude die größtmögliche logische Geschlossenheit zu geben, hiervon Abstand nehmen; die Gewohnheit, beispielsweise in einer Strecke zwei markierte Stellen auf *einem* praktisch starren Körper zu sehen, steckt tief in unseren Denkgewohnheiten. Wir sind ferner gewohnt, drei Orte als auf einer Geraden befindlich anzunehmen, wenn wir ihre scheinbaren Sehorte durch passende Wahl des Beobachtungsortes bei einäugigem Sehen zusammenfallen lassen können.

Wenn wir nun, der Denkgewohnheit folgend, den Sätzen der euklidischen Geometrie den einzigen Satz zufügen, daß zwei Punkten eines praktisch starren Körpers stets die nämliche Entfernung (Strecke) entspreche, was für Lagenänderungen wir auch mit dem Körper vornehmen mögen, so werden aus den Sätzen der euklidischen Geometrie Sätze über die mögliche relative Lagerung praktisch starrer Körper[1]. Die so ergänzte Geometrie ist dann als ein

1 Damit ist auch der geraden Linie ein Naturobjekt zugeordnet. Drei Punkte eines starren Körpers A, B, C liegen dann in einer Geraden, wenn bei gegebenen Punkten A und C der Punkt B so gewählt ist, daß die Summe der Entfernungen $\overline{AB}$ und $\overline{BC}$ möglichst gering wird. Diese lückenhafte Andeutung mag in diesem Zusammenhang genügen.

Zweig der Physik zu behandeln. Jetzt kann mit Recht nach der „Wahrheit" so interpretierter geometrischer Sätze gefragt werden, denn es kann gefragt werden, ob jene Sätze zutreffen für diejenigen realen Dinge, welche wir den geometrischen Begriffen zugeordnet haben. Etwas ungenau können wir also sagen, daß wir unter der „Wahrheit" eines geometrischen Satzes in diesem Sinne sein Zutreffen bei einer Konstruktion mit Zirkel und Lineal verstehen.

Die Überzeugung von der „Wahrheit" der geometrischen Sätze in diesem Sinne beruht natürlich ausschließlich auf ziemlich unvollkommenen Erfahrungen. Wir werden jene Wahrheit der geometrischen Sätze zunächst voraussetzen, um dann im letzten Teil unserer Betrachtungen (bei der allgemeinen Relativitätstheorie) zu sehen, daß und inwiefern jene Wahrheit ihre Grenzen hat.

§ 2 Das Koordinatensystem

Auf Grund der angedeuteten physikalischen Interpretation des Abstandes sind wir auch in der Lage, den Abstand zweier Punkte eines starren Körpers auf Grund von Messungen festzusetzen. Dazu brauchen wir eine ein für allemal zu benutzende Strecke (Stäbchen S), welche als Einheitsmaßstab verwendet wird. Sind nun A und B zwei Punkte eines starren Körpers, so ist deren Verbindungsgerade konstruierbar nach den Gesetzen der Geometrie; hierauf kann man auf dieser Verbindungsgeraden die Strecke S von A aus so oft abtragen, bis man nach B gelangt. Die Zahl der Wiederholungen des Abtragens ist die Maßzahl der Strecke $\overline{AB}$. Hierauf beruht alles Messen von Längen[2].

Jede räumliche Beschreibung des Ortes eines Ereignisses oder Gegenstandes beruht darauf, daß man den Punkt eines starren Körpers (Bezugskörpers) angibt, mit dem jenes Ereignis koinzidiert.

2 Dabei ist allerdings angenommen, daß die Messung aufgehe, d.h. eine ganze Zahl ergebe. Von dieser Schwierigkeit befreit man sich durch die Anwendung geteilter Maßstäbe, deren Einführung keine prinzipiell neue Methode verlangt.

Dies gilt nicht nur für die wissenschaftliche Beschreibung, sondern auch für das tägliche Leben. Analysiere ich die Ortsangabe „in Berlin, auf dem Potsdamer Platz", so bedeutet sie folgendes: Der Erdboden ist der starre Körper, auf den sich die Ortsangabe bezieht; auf ihm ist „Potsdamer Platz in Berlin" ein markierter, mit Namen versehener Punkt, mit dem das Ereignis räumlich koinzidiert[3].

Diese primitive Art der Ortsangabe kennt nur Orte an der Oberfläche starrer Körper und ist an das Vorhandensein unterscheidbarer Punkte dieser Oberfläche gebunden. Sehen wir zu, wie sich der menschliche Geist von diesen beiden Beschränkungen befreit, ohne daß das Wesen der Ortsangabe eine Änderung erfährt! Schwebt beispielsweise über dem Potsdamer Platz eine Wolke, so kann der Ort dieser, bezogen auf die Erdoberfläche, dadurch festgelegt werden, daß man auf dem Platze senkrecht eine Stange errichtet, die bis zur Wolke hinaufreicht. Die mit dem Einheitsmaßstab gemessene Länge der Stange in Verbindung mit der Angabe des Ortes des Fußpunktes der Stange ist dann eine vollständige Ortsangabe. An diesem Beispiele sehen wir, auf welchem Wege eine Verfeinerung des Ortsbegriffes vor sich gegangen ist.

a) Man setzt den starren Körper, auf den sich die Ortsangabe bezieht, in solcher Weise fort, daß der zu lokalisierende Gegenstand von dem vervollständigten starren Körper erreicht wird.

b) Man benutzt zur Charakterisierung des Ortes die *Zahl* statt benannter Merkpunkte (hier die mit dem Maßstab gemessene Länge der Stange).

c) Man spricht von der Höhe der Wolke auch dann, wenn eine Stange, welche die Wolke erreicht, gar nicht errichtet ist. In unserem Falle ermittelt man aus optischen Aufnahmen der Wolke von verschiedenen Stellen des Bodens aus unter Berücksichtigung der Ausbreitungseigenschaften des Lichtes, wie lang die Stange gemacht werden müßte, um die Wolke zu erreichen.

3 Eine weitere Untersuchung darüber, was hier „räumliche Koinzidenz" bedeutet, ist hier nicht nötig; denn dieser Begriff ist insofern klar, als im einzelnen realen Falle Meinungsverschiedenheiten darüber, ob er zutreffe oder nicht, kaum auftreten dürften.