

MAX BORN
Die Relativitätstheorie Einsteins

Springer

Berlin
Heidelberg
New York
Hongkong
London
Mailand
Paris
Tokio



Max Born wurde am 11. Dezember 1882 in Breslau geboren. Studium an den Universitäten Breslau, Heidelberg, Zürich, Göttingen, Cambridge. Promotion 1907 in Göttingen. 1915 a.o. Professor für theoretische Physik an der Universität Berlin, 1919 Ordinarius in Frankfurt, 1921 in Göttingen. 1933 Auswanderung. Asyl in Cambridge als Stokes Lecturer for Applied Mathematics. 1936 Tait Professor of Natural Philosophy in Edinburg bis zur Emeritierung. Dazwischen Gastprofessor in Chicago 1911, Bangalore (Indien) 1935/36, Kairo (Ägypten) 1946 und 1950. 1954–69 in Bad Pyrmont im Ruhestand. Verstorben am 5. Januar 1970 in Göttingen.

Seine Hauptarbeiten betreffen die Dynamik der Kristallgitter und die Quantenmechanik, deren Grundlagen er 1925/26 zusammen mit W. Heisenberg und P. Jordan schuf. Er war Träger mehrerer Medaillen, darunter: Hughes Medal der Royal Society, Planck-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 1952. 1954 Nobelpreis für Physik. Ehrendoktor verschiedener Fakultäten an zehn Hochschulen des In- und Auslandes, Ehrenbürger von Göttingen und Mitglied vieler Akademien und wissenschaftlicher Gesellschaften.

(Abbildung mit freundlicher Genehmigung von MIT Museum, Massachusetts, USA)

MAX BORN

Die Relativitätstheorie Einsteins

Kommentiert und erweitert von
Jürgen Ehlers und Markus Pössel

Die fünfte Auflage entstand
unter Mitarbeit von Walter Biem

Siebte Auflage
Mit 183 Abbildungen



Springer

PROF. DR. JÜRGEN EHLERS
MARKUS PÖSSEL

Albert-Einstein-Institut
MPI für Gravitationsphysik
Am Mühlberg 1
14476 Golm, Deutschland

Ursprünglich veröffentlicht als Band 1 in der Reihe *Heidelberger Taschenbücher*

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

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

ISBN 3-540-00470-X (Hardcover)

ISBN 3-540-67904-9 6. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-642-32357-7 (Softcover)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ein Unternehmen der Springer Science+Business Media
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1964, 1969, 2001, 2003; Softcover 2013

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandgestaltung: E. Kirchner, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

54/3111X0-5432

SPIN: 11414223

Vorwort zur siebten Auflage

Wir freuen uns sehr, daß unsere Neuausgabe dieses Buches bei seinen Lesern auf soviel Resonanz gestoßen ist, daß nun bereits eine weitere Auflage erscheinen kann.

Im Vergleich mit der vorangehenden Auflage haben wir in dieser siebten Auflage unser Ergänzungskapitel „Neuere Entwicklungen der relativistischen Physik“ überarbeitet und um aktuelle Forschungsergebnisse ergänzt. Völlig neu strukturiert und um einiges erweitert haben wir das Unterkapitel zur Kosmologie. Wir hatten anläßlich der sechsten Auflage bereits unsere Absicht bekundet, den Bornschen Originaltext als historisches Dokument erhalten und dort im wesentlichen nur Druckfehler korrigieren zu wollen. Die Korrektur der Druckfehler ist leider erst in dieser Auflage umgesetzt worden¹. Unsere Anmerkungen zum Bornschen Text, mit denen wir zum einen beabsichtigen, Unklarheiten und gelegentliche Fehler zu beseitigen, zum anderen, eine Verbindung zwischen Haupttext und Ergänzungskapitel herzustellen, sind in dieser Auflage ebenfalls etwas erweitert worden.

Unser Dank gilt N. Dragon für den Hinweis auf Druckfehler und ganz besonders D. Giuliani für seine ausführlichen kritischen Anmerkungen zur sechsten Auflage.

Golm, im März 2003

Jürgen Ehlers, Markus Pössel

¹ In den folgenden Ausnahmefällen ergaben sich Änderungen, die über die bloße Druckfehlerkorrektur hinausgingen: Auf S. 28 nach Formel (6) haben wir „Impulses“ in „Kraftstoßes“ geändert; auf S. 254, Zeile 10 die ursprüngliche „Drahtrichtung“ zu „Stromrichtung“; auf S. 311 lagen die Bornschen Angaben für $\Delta\nu/\nu$ jeweils um einen Faktor 2 zu niedrig und auf S. 323 haben wir das korrekte Todesjahr Einsteins eingesetzt, 1955 statt 1956.

Aus dem Vorwort zur sechsten Auflage

Das Buch, das wir hier auf Anregung des Springer-Verlages in einer die neuen Entwicklungen berücksichtigenden, wesentlich erweiterten Fassung vorlegen, ist aus populären Vorlesungen hervorgegangen.

„Die Vorträge“, so schrieb Max Born am 5. März 1920 an Arnold Sommerfeld, „habe ich im Januar gehalten für Eintrittsgeld und 6000,- M für mein Institut zusammenbekommen.“ Von dem Erlös wurde der berühmte Stern–Gerlach–Versuch über Richtungsquantelung an Silberatomen im Frankfurter Institut finanziert. Die Begeisterung über die neuen Ideen, aus denen dies Buch hervorging, war verbunden mit der freundschaftlichen Verehrung, die Born für Einstein empfand. Sie geht aus folgenden Zeilen hervor, die der ersten Auflage des Bornschen Buches entnommen sind: „Die durch den Krieg geschaffenen Mauern zwischen den Völkern verhinderten auch, daß [Einstein] an den Vorbereitungen der Sonnenfinsternis-Expeditionen zur Prüfung seiner Theorie teilnehmen konnte; als ich ihn damals fragte, was er wohl tun würde, wenn der vorausgesagte Effekt nicht da wäre, da meinte er mit seiner unerschütterlichen Ruhe: „Da würde ich mich sehr wundern.“ Er glaubte an seine Theorie, und er hat recht behalten. Heute ist er ein sehr berühmter Mann, vielleicht der bekannteste deutsche Gelehrte; aber er ist dabei der einfache, anspruchslose Mensch geblieben. Wir Physiker verehren in ihm den Führer in eine neue Periode der Forschung.“

Vielleicht bedarf es einer Rechtfertigung, ein so altes, allgemeinverständliches Buch, wenn auch mit Ergänzungen, nochmals herauszubringen.

Dazu muß zunächst bemerkt werden, daß das grundlegende Verständnis der Struktur von Raum und Zeit seit der ersten Auflage (1920) beziehungsweise seit der letzten Bearbeitung (1964) nicht so große Fortschritte gemacht hat wie beispielsweise die auf die Struktur der Materie gerichtete physikalische Forschung. Nach wie vor stützt sich nicht nur die makroskopische Physik, sondern auch die Elementarteilchenphysik

auf die Einstein-Minkowskische Raumzeitstruktur der speziellen Relativitätstheorie, und wenn die Schwerkraft berücksichtigt werden muß, also in der Astrophysik und Kosmologie, wird mit Erfolg die allgemeine Relativitätstheorie zugrundegelegt. Die Bornschen Schilderungen sind daher für den heutigen Leser bei weitem nicht nur von historischem Interesse; die Grundlagen der Relativitätstheorie sind auch heute noch wichtige Voraussetzung für ein Verständnis der Physik.

Zweitens nimmt Borns Buch auch heute noch eine Sonderstellung in der – inzwischen noch viel zahlreicheren – allgemeinverständlichen Literatur zur Relativitätstheorie ein. Es ist üblich geworden, in Büchern, die sich an ein allgemeineres Publikum wenden, auf Formeln nach Möglichkeit ganz zu verzichten. Lesern, die einige einfache Mathematikkenntnisse auf dem Niveau der zehnten Gymnasialklasse mitbringen und bereit sind, ihr Wissen unter Borns Führung auf physikalische Situationen anzuwenden, kann dieses Buch mit seiner geschickten Mischung aus nachvollziehbaren Rechnungen und physikalischen Betrachtungen Einsichten in die betrachteten Gebiete der Physik bieten, die eine rein erzählerische Aufarbeitung niemals erzielen könnte. Dieser Umstand wird es, so hoffen wir, für motivierte Gymnasialschüler und -schülerinnen, angehende Studierende der Physik und allgemein für solche Leser interessant machen, die jenseits der üblichen populärwissenschaftlichen Literatur ein besseres Verständnis der Einsteinschen Theorien erlangen wollen, ohne sich gleich der herkömmlichen Lehrbuchliteratur bedienen zu wollen. Andererseits dürfte das Buch für diejenigen Leser, die sich – etwa im Rahmen eines Physikstudiums – näher mit der Relativitätstheorie beschäftigen werden, einen nützlichen Einstieg und eine gute Orientierungshilfe bieten, in der die physikalischen Grundlagen, Konzepte und Ergebnisse der Theorie ohne den Ballast des zum tieferen Einstieg notwendigen mathematischen Formalismus präsentiert werden.

Über diese Überlegungen hinaus scheint uns, die Rechtfertigung habe schon Fritz Zwicky in seiner Besprechung der 3. Auflage von 1922 vorweggenommen: „Dem Laien ist Born in weitem Maße gerecht geworden, indem er alle physikalischen Tatsachen und Theorien, die in engem Zusammenhang mit Relativität stehen, geschichtlich und sachlich systematisch entwickelt. Dadurch gelingt es ihm, den Leser die Notlage der theoretischen Physik in der Zeit vor 1905 nachleben zu lassen und ihm so das Verständnis für die neue Theorie zu erleichtern. Aber nicht nur dies; dank der bewusst ausgesprochenen und glücklich durchgeführten Tendenz, die Entwicklung der exakten Naturwissenschaften unter dem Gesichtspunkt der Befreiung ihres Stoffes von Subjektivem darzustellen,

in welcher Entwicklung die Relativität als ein natürlicher Schlusspunkt erscheint, wird das Buch zum künstlerisch vollendeten Ganzen.“

Trotzdem ist zu bemerken, daß in der Gravitationsforschung seit der letzten Auflage des Buches große Fortschritte erzielt worden sind, und daß dieser Forschungszweig gegenwärtig zu den aktivsten Gebieten der Grundlagenforschung zählt.

Um dieser Entwicklung gerecht zu werden, haben wir uns entschlossen, den Bornschen Text um ein Zusatzkapitel zu erweitern, in dem wir über neuere Entwicklungen berichten – wie wir hoffen, der besten Bornschen Tradition verständlicher Darstellung folgend. Abschnitt VIII, 1 enthält dabei experimentelle (und auch einige theoretische) Ergänzungen zu den Kapiteln VI und VII; Abschnitte 2 bis 4 berichten über Gravitationswellen, Schwarze Löcher und die neuere relativistische Kosmologie; in Abschnitt VIII, 5 schließlich versuchen wir, das aktuelle Problem der Vereinigung der beiden fundamentalen Theorien der Physik, der Quantentheorie und der allgemeinen Relativitätstheorie darzustellen.

Anschließend folgen einige Literaturhinweise und ein Anhang, der sich mit dem Verhältnis der von Born benutzten physikalischen Einheiten zum heute üblichen Systeme International (SI) beschäftigt und insbesondere dazu gedacht ist Lesern, die sich noch gründlicher mit dem Gegenstand des Buches befassen wollen, den Übergang zur modernen Fachliteratur zu erleichtern. [...]

Zum Schluß möchten wir unseren Kollegen vom Albert-Einstein-Institut (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik) danken, die uns bei unserer Arbeit durch hilfreiche Anmerkungen und klärende Diskussionen unterstützt haben, insbesondere C. Cutler, R. Helling, H. Nicolai, M. A. Papa, A. Sintès, S. Theisen, T. Thiemann und A. Vecchio. Weiterhin danken wir S. Harneit, die es als Nicht-Physikerin unternommen hat, unsere Ergänzungskapitel im Hinblick auf gute Verständlichkeit gegenzulesen. C. Caron vom Springer-Verlag danken wir für seine geduldige Unterstützung und K. von Meyenn für Hinweise auf die Entstehungsgeschichte des Bornschen Buches.

Golm, im November 2000

Jürgen Ehlers, Markus Pössel

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
I. Geometrie und Kosmologie	4
1. Ursprung der Raum- und Zeitmessung	4
2. Einheiten für Länge und Zeit	4
3. Nullpunkt und Koordinatensystem	5
4. Die geometrischen Axiome	6
5. Das ptolemäische Weltsystem	7
6. Das kopernikanische Weltsystem	8
7. Der Ausbau der kopernikanischen Lehre	10
II. Die Grundgesetze der klassischen Mechanik	11
1. Gleichgewicht und Kraftbegriff	11
2. Bewegungslehre – Geradlinige Bewegung	12
3. Bewegung in der Ebene	19
4. Kreisbewegung	21
5. Bewegung im Raum	23
6. Dynamik – Das Trägheitsgesetz	24
7. Kraftstöße	25
8. Die Wirkung von Kraftstößen	27
9. Masse und Impuls	27
10. Kraft und Beschleunigung	30
11. Elastische Schwingungen	31
12. Gewicht und Masse	35
13. Die analytische Mechanik	38
14. Der Energiesatz	40
15. Dynamische Einheiten von Kraft und Masse	43

III. Das Newtonsche Weltsystem	45
1. Der absolute Raum und die absolute Zeit.....	45
2. Newtons Anziehungsgesetz.....	49
3. Die allgemeine Gravitation	51
4. Himmelsmechanik	54
5. Das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik	57
6. Der „eingeschränkt“ absolute Raum	59
7. Galilei-Transformationen.....	60
8. Trägheitskräfte	65
9. Die Fliehkräfte und der absolute Raum	67
IV. Die Grundgesetze der Optik	73
1. Der Äther	73
2. Die Korpuskel- und die Wellentheorie des Lichtes	73
3. Die Lichtgeschwindigkeit	77
4. Grundbegriffe der Wellenlehre – Interferenz.....	82
5. Polarisierung und Transversalität der Lichtwellen	89
6. Der Äther als elastischer Festkörper	92
7. Die Optik bewegter Körper	101
8. Der Doppler-Effekt	104
9. Die Mitführung des Lichtes durch die Materie	110
10. Die Aberration	120
11. Rückblick und Ausblick.....	123
V. Die Grundgesetze der Elektrodynamik	125
1. Die Elektro- und Magneto-Statik	125
2. Strom und Elektrolyse	134
3. Widerstand und Stromwärme	137
4. Elektromagnetismus	139
5. Faradays Kraftlinien	142
6. Der elektrische Verschiebungsstrom	150
7. Die magnetische Induktion	151
8. Die Nahwirkungstheorie Maxwells.....	154
9. Die elektromagnetische Lichttheorie.....	158
10. Der elektromagnetische Äther	163
11. Hertz' Theorie der bewegten Körper	166
12. Die Elektronentheorie von Lorentz	172
13. Die elektromagnetische Masse	179
14. Das Experiment von Michelson und Morley	185
15. Die Kontraktionshypothese	188

VI. Das spezielle Einsteinsche Relativitätsprinzip	194
1. Der Begriff der Gleichzeitigkeit	194
2. Die Einsteinsche Kinematik und die Lorentz-Transformationen	200
3. Geometrische Darstellung der Einsteinschen Kinematik	205
4. Bewegte Maßstäbe und Uhren	212
5. Schein und Wirklichkeit	216
6. Die Addition der Geschwindigkeiten	226
7. Einsteins Dynamik	230
8. Die Trägheit der Energie	240
9. Energie und Impuls	249
10. Optik bewegter Körper	256
11. Minkowskis absolute Welt	262
VII. Die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins	266
1. Relativität bei beliebigen Bewegungen	266
2. Das Äquivalenzprinzip	269
3. Das Versagen der euklidischen Geometrie	273
4. Die Geometrie auf krummen Flächen	276
5. Das zweidimensionale Kontinuum	282
6. Mathematik und Wirklichkeit	284
7. Die Maßbestimmung des raumzeitlichen Kontinuums	288
8. Die Grundgesetze der neuen Mechanik	291
9. Mechanische Folgerungen und Bestätigungen	294
10. Vorhersagen der neuen Mechanik und ihre Bestätigungen	299
11. Optische Folgerungen und Bestätigungen	302
12. Kosmologie	311
13. Die einheitliche Feldtheorie	321
14. Schlußwort	324
VIII. Neuere Entwicklungen der relativistischen Physik (von J. Ehlers und M. Pössel)	325
1. Neuere Experimente zur speziellen und zur allgemeinen Relativitätstheorie	325
2. Gravitationswellen	358
3. Schwarze Löcher	372
4. Kosmologie	393
5. Quantentheorie und Relativitätstheorie	436

XIV Inhaltsverzeichnis

Weiterführende Literatur	465
Anhang: Einheiten und Dimensionen.....	471
Anmerkungen der Herausgeber zu den Kapiteln I–VII	477
Namen- und Sachverzeichnis.....	491

Meiner lieben Frau gewidmet