

NATURWISSENSCHAFTLICHE  
MONOGRAPHIEN UND LEHRBÜCHER

HERAUSGEGEBEN VON

DER SCHRIFTFÜHRUNG DER „NATURWISSENSCHAFTEN“

DRITTER BAND

DIE RELATIVITÄTSTHEORIE EINSTEINS

VON

MAX BORN



BERLIN  
VERLAG VON JULIUS SPRINGER

1922

DIE  
RELATIVITÄTSTHEORIE  
EINSTEINS

UND IHRE PHYSIKALISCHEN GRUNDLAGEN

ELEMENTAR DARGESTELLT

VON

MAX BORN

DRITTE, VERBESSERTE AUFLAGE

MIT 135 TEXTABBILDUNGEN



BERLIN  
VERLAG VON JULIUS SPRINGER

1922

ISBN-13: 978-3-642-89562-3      e-ISBN-13: 978-3-642-91418-8  
DOI: 10.1007/978-3-642-91418-8

**ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG IN FREMDE  
SPRACHEN, VORBEHALTEN.**

---

**COPYRIGHT 1922 BY JULIUS SPRINGER IN BERLIN.**

MEINER LIEBEN FRAU

GEWIDMET

## Vorwort zur ersten Auflage.

Dieses Buch ist eine Bearbeitung einiger Vorträge, die ich im letzten Winter vor einem größeren Publikum gehalten habe. Die Schwierigkeiten, die das Verständnis der Relativitätstheorie dem mathematisch und physikalisch nicht geschulten Hörer oder Leser bereitet, scheinen mir hauptsächlich dadurch zu entstehen, daß ihm die Grundbegriffe und Tatsachen der Physik, besonders der Mechanik, nicht geläufig sind. Daher habe ich bei den Vorträgen ganz einfache, qualitative Experimente gezeigt, die zur Einführung der Begriffe wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Masse, Kraft, Feldstärke usw. dienen. Bei dem Versuche, ein ähnliches Mittel für das gedruckte Buch ausfindig zu machen, kam ich auf die hier gewählte, halb historische Darstellung, die, wie ich hoffe, den trockenen Stil der elementaren Lehrbücher der Physik vermeidet. Aber ich muß betonen, daß die historische Anordnung nur das Gewand ist, das die Hauptsache, den logischen Zusammenhang, um so klarer hervorheben soll. Das einmal angefangene Verfahren zwang zur Vollständigkeit, und dadurch schwoll mir das Unternehmen unter den Händen zu dem Umfange an, in dem es jetzt vorliegt.

An mathematischen Kenntnissen setze ich möglichst wenig voraus. Ich habe nicht nur die höhere Mathematik zu vermeiden gesucht, sondern auch von dem Gebrauche elementarer Funktionen, wie des Logarithmus, der trigonometrischen Funktionen usw. abgesehen; allerdings, ohne Proportionen, lineare Gleichungen und gelegentliche Quadrate und Quadratwurzeln ging es nicht ab. Ich rate dem Leser, der an den Formeln hängen bleibt, zunächst über sie hinwegzulesen und aus dem Texte selber zum Verständnis der mathematischen Zeichen zu kommen. Von Figuren und graphischen Darstellungen habe ich ausgiebigen Gebrauch gemacht; auch der in der Handhabung der Koordinaten Ungeübte wird die Kurven leicht lesen lernen.

Die philosophischen Fragen, zu denen die Relativitätstheorie Anlaß gibt, werden in diesem Buche nur gestreift; doch ist durchweg ein ganz bestimmter erkenntnistheoretischer Standpunkt gewahrt. Ich glaube sicher zu sein, daß dieser mit EINSTEINS eigenen Ansichten in der Hauptsache übereinstimmt. Ähnliche Auffassungen vertritt MORITZ SCHLICK in seinem schönen Buche »Allgemeine Erkenntnislehre« (1. Band der vorliegenden Sammlung, Berlin 1918, Julius Springer).

Von anderen Büchern, die ich benutzt habe, nenne ich vor allem ERNST MACHS klassische »Mechanik« (Leipzig, F. A. Brockhaus, 1883), sodann die klargestriebene Geschichte der Äthertheorien von E. T. WHITTAKER »A History of the Theories of Aether and Electricity« (London, Long-

mans, Green and Co., 1910) und die großzügige Darstellung der Relativitätstheorie von H. WEYL »Raum, Zeit, Materie« (Berlin, Julius Springer, 1918). Dieses Werk muß jeder zur Hand nehmen, der tiefer in die Lehren EINSTEINS eindringen will. Die zahlreichen Bücher und Abhandlungen aufzuzählen, aus denen ich mehr oder minder unmittelbar geschöpft habe, ist nicht möglich. Auf Literaturangaben habe ich, dem Charakter des Werkes entsprechend, vollständig verzichtet.

Bei der Anfertigung der Abbildungen haben mir Fräulein Dr. ELISABETH BORMANN und Herr Dr. OTTO PAULI, bei der Herstellung des Registers Herr Dr. W. DEHLINGER in liebenswürdiger Weise geholfen. Um die Richtigkeit der historischen Angaben sicher zu stellen, habe ich Herrn Prof. CONRAD MÜLLER in Hannover gebeten, die Korrekturen zu lesen; dieser ausgezeichnete Kenner der Geschichte der Mathematik und Physik hat sich mit Hingabe der großen Mühe unterzogen und mir viele wertvolle Ratschläge gegeben. Allen diesen Helfern schulde ich großen Dank, ebenso dem Verleger und den Herausgebern, durch deren Mühe und Eifer das rasche Erscheinen des Buches in der vorliegenden soliden Ausstattung ermöglicht wurde.

Frankfurt a. M., im Juni 1920.

Max Born.

### Vorwort zur zweiten Auflage.

Die ersten fünf Kapitel, welche die Entwicklung der Physik bis zur Einsteinschen Relativitätstheorie darstellen, sind im wesentlichen unverändert geblieben. An einigen Stellen, wo in der ersten Auflage nur das Resultat einer mathematischen Überlegung angegeben wurde, habe ich diese selbst eingefügt, weil ich mich nicht auf den Glauben, sondern auf die Überzeugung des Lesers stützen möchte. Die Ausführungen über eine astronomische Methode zur Feststellung der Bewegung des Sonnensystems durch den Äther mit Hilfe der Verfinsterungen der Jupitermonde waren in der ersten Auflage nicht korrekt, da ich den Grad der Genauigkeit der astronomischen Messungen überschätzt hatte; dieser Abschnitt ist umgearbeitet worden.

Die letzten Kapitel, die von der Einsteinschen Theorie selbst handeln, sind stark erweitert worden; ihr Umfang war im Verhältnis zu der ausführlichen Vorbereitung zweifellos zu knapp und ihr Inhalt zu spärlich. Die Ergänzungen betreffen vor allem die Einsteinsche Dynamik; ich habe den Versuch gemacht, ihre Gesetze abzuleiten, ohne aus dem mathematischen Rahmen dieses Buches herauszutreten, der nur die elementaren Rechen-

operationen umfaßt. Sodann habe ich die gegen die Relativitätstheorie vorgebrachten Einwände ausführlicher besprochen; die Autoren dieser sogenannten »Paradoxien« aber habe ich nicht genannt, weil ich die Fortsetzung des unfruchtbaren Streites für zwecklos halte.

Um den Anschein zu vermeiden, daß persönliche Teilnahme sich in meine wissenschaftliche Überzeugung eindränge, habe ich das Bild und den Lebenslauf Einsteins in der neuen Auflage fortgelassen.

Beim Lesen der Korrekturen haben mir die Herren Prof. R. LADENBURG, Dr. E. BRODY, Dr. E. HAUSER und Dr. H. WEIGT in liebenswürdiger Weise geholfen, wofür ich ihnen großen Dank schulde.

Göttingen, 12. Mai 1921.

**Max Born.**

### Vorwort zur dritten Auflage.

Diese Auflage unterscheidet sich von der vorigen abgesehen von einer Reihe geringfügiger Änderungen durch die Umarbeitung des Abschnitts über die Einsteinsche Dynamik. In dieser war bei der Bildung der Beschleunigung nicht scharf zwischen Zeit und Eigenzeit unterschieden und statt der gewöhnlichen Kraft war der Minkowskische kovariante Kraftvektor benützt worden; hierdurch mußte das Verständnis dieses an sich schon schwierigen Kapitels noch mehr erschwert werden. Durch Herrn Dr. W. PAULI jun. wurde ich auf eine von LEWIS und TOLMAN stammende Ableitung der relativistischen Massenformel aufmerksam gemacht, die sich in ausgezeichneter Weise dem Rahmen dieses Buches einfügt, da sie ebenso wie die hier gewählte Darstellung der Mechanik an den Begriff des Impulses anknüpft. Das Kapitel über die Einsteinsche Dynamik wurde auf Grund dieser Betrachtungsweise umgearbeitet; dadurch werden auch einige Änderungen in der Darstellung der gewöhnlichen Mechanik notwendig. Ich hoffe, daß diese Neuerung das Verständnis erleichtern wird.

Ich möchte nicht unterlassen, Herrn Dr. W. PAULI für seinen Rat meinen Dank auszusprechen. Sein großes Werk über Relativitätstheorie, das als Artikel 19 des V. Bandes der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften vor kurzem erschienen ist, ist mir von großem Nutzen gewesen. Ich möchte es allen denen, die tiefer in die Relativitätstheorie eindringen wollen, in erster Linie zum Studium empfehlen.

Beim Lesen der Korrekturen haben mir die Herren Dr. E. HÜCKEL und Dr. R. MINKOWSKI in freundlichster Weise geholfen.

Göttingen, 6. März 1922.

**Max Born.**

## Inhaltsverzeichnis.

### Einleitung.

	Seite
<b>I. Geometrie und Kosmologie.</b>	
1. Ursprung der Raum- und Zeitmeßkunst . . . . .	6
2. Einheiten für Länge und Zeit . . . . .	6
3. Nullpunkt und Koordinatensystem. . . . .	7
4. Die geometrischen Axiome . . . . .	8
5. Das PTOLEMÄISCHE Weltsystem . . . . .	9
6. Das KOPERNIKANISCHE Weltsystem . . . . .	9
7. Der Ausbau der KOPERNIKANISCHEN Lehre . . . . .	11
<b>II. Die Grundgesetze der klassischen Mechanik.</b>	
1. Gleichgewicht und Kraftbegriff. . . . .	13
2. Bewegungslehre. Geradlinige Bewegung . . . . .	14
3. Bewegung in der Ebene. . . . .	20
4. Kreisbewegung. . . . .	21
5. Bewegung im Raume . . . . .	23
6. Dynamik. Das Trägheitsgesetz . . . . .	23
7. Der Stoß oder Impuls. . . . .	25
8. Der Impulssatz . . . . .	26
9. Die Masse . . . . .	26
10. Kraft und Beschleunigung . . . . .	28
11. Beispiel. Elastische Schwingungen . . . . .	30
12. Gewicht und Masse. . . . .	32
13. Die analytische Mechanik . . . . .	35
14. Der Energiesatz . . . . .	36
15. Dynamische Einheiten von Kraft und Masse . . . . .	40
<b>III. Das Newtonsche Weltsystem.</b>	
1. Der absolute Raum und die absolute Zeit . . . . .	43
2. NEWTONS Anziehungsgesetz. . . . .	46
3. Die allgemeine Gravitation. . . . .	48
4. Die Mechanik des Himmels . . . . .	51
5. Das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik . . . . .	53
6. Der »eingeschränkt« absolute Raum . . . . .	55
7. GALILEI-Transformationen . . . . .	56
8. Trägheitskräfte . . . . .	61
9. Die Fliehkräfte und der absolute Raum . . . . .	62
<b>IV. Die Grundgesetze der Optik.</b>	
1. Der Äther . . . . .	68
2. Emissions- und Undulationstheorie . . . . .	69
3. Die Lichtgeschwindigkeit . . . . .	72
4. Grundbegriffe der Wellenlehre. Interferenz . . . . .	75
5. Polarisation und Transversalität der Lichtwellen . . . . .	81
6. Der Äther als elastischer Festkörper . . . . .	84
7. Die Optik bewegter Körper . . . . .	92
8. Der DOPPLERSCHE Effekt . . . . .	94
9. Die Mitführung des Lichtes durch die Materie . . . . .	99
10. Die Aberration . . . . .	108
11. Rückblick und Ausblick . . . . .	110



<b>V. Die Grundgesetze der Elektrodynamik.</b>	Seite
1. Die Elektro- und Magnetostatik . . . . .	113
2. Galvanismus und Elektrolyse . . . . .	121
3. Widerstand und Stromwärme. . . . .	123
4. Elektromagnetismus . . . . .	125
5. FARADAYS Kraflinien . . . . .	127
6. Die magnetische Induktion. . . . .	132
7. Die Nahwirkungstheorie MAXWELLS . . . . .	134
8. Der Verschiebungsstrom . . . . .	137
9. Die elektromagnetische Lichttheorie . . . . .	139
10. Der elektromagnetische Äther . . . . .	144
11. HERTZ' Theorie der bewegten Körper . . . . .	146
12. Die Elektronentheorie von LORENTZ . . . . .	151
13. Die elektromagnetische Masse . . . . .	157
14. Das Experiment von MICHELSON . . . . .	162
15. Die Kontraktionshypothese . . . . .	166
<b>VI. Das spezielle Einsteinsche Relativitätsprinzip.</b>	
1. Der Begriff der Gleichzeitigkeit . . . . .	173
2. Die EINSTEINSche Kinematik und die LORENTZ-Transformationen . . . . .	178
3. Geometrische Darstellung der EINSTEINSchen Kinematik . . . . .	181
4. Bewegte Maßstäbe und Uhren . . . . .	186
5. Schein und Wirklichkeit. . . . .	189
6. Die Addition der Geschwindigkeiten . . . . .	196
7. Die EINSTEINSche Dynamik . . . . .	199
8. Die Trägheit der Energie . . . . .	207
9. Optik bewegter Körper . . . . .	213
10. MINKOWSKIs absolute Welt . . . . .	218
<b>VII. Die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins.</b>	
1. Relativität bei beliebigen Bewegungen. . . . .	223
2. Das Äquivalenzprinzip . . . . .	225
3. Das Versagen der euklidischen Geometrie . . . . .	230
4. Die Geometrie auf krummen Flächen . . . . .	232
5. Das zweidimensionale Kontinuum . . . . .	237
6. Mathematik und Wirklichkeit. . . . .	239
7. Die Maßbestimmung des raum-zeitlichen Kontinuums . . . . .	243
8. Die Grundgesetze der neuen Mechanik . . . . .	246
9. Mechanische Folgerungen und Bestätigungen . . . . .	249
10. Optische Folgerungen und Bestätigungen . . . . .	254
11. Makrokosmos und Mikrokosmos . . . . .	260
12. Schluß . . . . .	262
Zeittafel. . . . .	264
Namensverzeichnis . . . . .	266