

Theoretische Physik

Band 3A

---

Walter Greiner  
Johann Rafelski

**Spezielle  
Relativitäts-  
theorie**



Verlag Harri Deutsch

Theoretische Physik

Band 3 A

Walter Greiner / Johann Rafelski

Spezielle Relativitätstheorie

Walter Greiner

## Theoretische Physik

Band 1: Mechanik (Teil 1)

Band 2: Mechanik (Teil 2)

Band 3: Elektrodynamik

Band 4: Quantenmechanik, Teil 1: Einführung

Band 5: Quantenmechanik, Teil 2: Symmetrien

Band 6: Relativistische Quantenmechanik, Wellenfunktionen

Band 7: Quantenfeldtheorien I

Band 8: Eichtheorie der schwachen Wechselwirkung

Band 9: Thermodynamik und Statistische Mechanik

Band 10: Quantenchromodynamik

### Ergänzungsbände

Band 3 A: Hydrodynamik

Band 3 B: Spezielle Relativitätstheorie

Band 4 A: Quantenmechanik, Spezielle Kapitel

### In Vorbereitung

Physik der Elementarteilchen, Theoretische Grundlagen

Modelle der Elementarteilchen

Kernphysik

Quantenstatistik

Allgemeine Relativitätstheorie und Gravitation

Feldtheorien II

Theoretische Physik

Band 3 A

---

Walter Greiner  
Johann Rafelski

# Spezielle Relativitäts- theorie

Ein Lehr- und Übungsbuch  
für Anfangssemester

Mit zahlreichen Abbildungen, Beispielen  
und Aufgaben mit ausführlichen Lösungen

3., überarbeitete Auflage (1992)



Verlag Harri Deutsch

Professur Dozent mit Dr. h. c. mult. Walter Greiner an Direktor des Instituts für Theoretische Physik der Universität Frankfurt am Main.  
Prof. Dr. phil. nat. Johann Rafelski am Professor für Physik an der Universität Arizona Tucson

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Theoretische Physik.** – Tübingen, Frankfurt am Main : Deutsch.  
Ed. 1A. Greiner, Walter, Spemann-Belmontaufträge. – 4.  
überarb. Aufl. – 1992.

**Greiner, Walter.**

Spezielle Relativitätstheorie: ein Lehr- und Übungsbuch für  
Aufbauschwerer / Walter Greiner, Johann Rafelski. – 3.  
überarb. Aufl. – Tübingen, Frankfurt am Main : Deutsch, 1992.  
(Theoretische Physik, Bd. 1A)  
ISBN 3-8111-1206-X  
NE: Rafelski, Johann.

ISBN 3-8111-1206-X

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung  
des Buches – oder von Teilen daraus – sind vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in  
irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrodreh oder ein anderes Verfahren, auch nicht für  
Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, weiterverbreitet, kopiert oder in sonstiger Weise  
öffentlich zugänglich gemacht werden. Zuwiderhandlungen unterliegen den  
Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

## Vorwort zur 1. Auflage

Relativitätstheorie ist die Grundlage der modernen Physik, die häufig stiefmütterlich behandelt wird: Sie wird dem Studenten meist gezierelt vorgestellt, nämlich in den Vorlesungen Klassische Mechanik, Elektrodynamik, Quantenmechanik und Teilchenphysik. Dies kann dem Verständnis von Raum und Zeit nicht tunlich sein. Dem soll durch eine Spezialvorlesung begegnet werden (die dann erfahrungsgemäß genauso gut beachtet wird wie die Kursvorlesungen). Hält man eine solche Vorlesung, so wird ein anderer Notstand sichtbar: An guten Büchern fehlt es nicht, doch beschränken sich diese meistens auf Probleme der klassischen Mechanik oder gar auf die Diskussion der philosophischen Grundlagen. Wir haben in unseren Vorlesungen einen viel pragmatischeren Kurs eingeschlagen. Der Student soll die Fähigkeit erlangen, selbst an den Problemen arbeiten zu können, ausgenommen hierbei noch die Relativistische Quantenmechanik, zu der die angesprochenen Studenten im 3. oder 4. Semester sicherlich noch nicht die Grundlagen mitbringen. Diese wird im Band VI dieser Reihe behandelt. Doch selbst mit dieser Einschränkung muß die Fülle des Stoffes begrenzt werden, um aus Zeitmangel nicht in streifende Oberflächlichkeit zu geraten. Natürlich haben wir uns bemüht, die Vorlesung so interessant und aktuell wie möglich zu gestalten. Aus diesem Grunde haben wir Themen wie Meßvorschriften und Lorentz-Kontraktion, Lorentz-Invariante Formulierung des Kraftbegriffes, elastische und inelastische Teilchenstöße, relativistische Bewegung in elektromagnetischen Feldern, Raum-Zeit-Symmetrie angesprochen. Viele ausgearbeitete Beispiele und Aufgaben vertiefen das Gesehene und sollen auch mithelfen, Fähigkeiten im theoretisch-physikalischen Rechnen zu erlangen.

Das Resultat dieser Überlegungen und unserer praktischen Erfahrung liegt nun vor. Wir wollen hier einigen unserer Zuhörer für ihre kritischen Fragen und Mitarbeit an der Vorlesung danken, insbesondere Fr. H. Heinz, den Herren E. Engel, A. Mielke, A. Scheidemann und G. Staudt. Dabei gilt unser besonderer Dank Herrn Staudt für die Überwachung der Drucklegung.

Frankfurt/Main, im Mai 1983

Walter Greiner  
Johann Rafelski

## Vorwort zur 2. Auflage

Die Beliebtheit der Vorlesungen über Theoretische Physik machte eine Neuauflage der "Speziellen Relativitätstheorie" erforderlich. Dies gab uns Gelegenheit zu Verbesserungen und Erweiterungen. Zahlreiche neue Beispiele und ausgearbeitete Aufgaben so z. B. über die Aberration wurden aufgenommen. Die in der ersten Auflage teilweise benutzte Schreibweise von Formeln in natürlichen Einheiten (i.e.  $\hbar = c = 1$ ) wurde aus didaktischen Gründen in der vorliegenden Auflage aufgegeben. Wir hoffen, daß damit die Vorlesungen noch übersichtlicher und verständlicher werden.

Diesmal bedanken wir uns besonders bei Frau Hiltraud Steidle für die Bearbeitung der Zeichnungen und bei Herrn Dr. Artur Thiel für die Überwachung der Drucklegung.

Frankfurt am Main, im August 1988

Walter Greiner

## Vorwort zur 3. Auflage

Die erneute Auflage dieser Vorlesungen über die für die gesamte Physik so wichtigen Zusammenhänge gab uns Gelegenheit zu Ergänzungen und Verbesserungen. In Form von Fußnoten wurde der Werdegang der bedeutendsten Persönlichkeiten skizziert. Auch fügten wir ein Beispiel über die Methode der äquivalenten Photonen ein. Dies ist eine speziell in hochrelativistischen feldtheoretischen Problemen häufig benutzte Möglichkeit, ein klassisches elektromagnetisches Potential durch ein quantenmechanisches Photonspektrum zu ersetzen.

Schließlich wurden im Anhang Faksimile zweier bedeutender Originalarbeiten Albert Einsteins zum besonderen Vergnügen der Leser aufgenommen. Wir bedanken uns bei dem Johann Ambrosius Barth Verlag Leipzig für die Genehmigung zum Abdruck.

Unser Dank gilt diesmal Herrn Dr. Stefan Graf für seine gute Arbeit bei der Überwachung der Drucklegung.

Frankfurt am Main, im März 1991

Walter Greiner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie</b>	
1.1	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	1
1.2	Die Suche nach dem Äther	9
1.3	Das Michelson-Experiment	14
1.4	Eine relativistische Uhr	21
1.5	Die Lorentz-Transformation	28
1.6	Die verschiedenen Meßvorrichtungen und die Gleichzeitigkeit von Ereignissen	50
1.7	Kausalität von Ereignissen, Lichtkegel	66
<b>2.</b>	<b>Relativistische Mechanik</b>	
2.1	Masse und Energie	74
2.2	Was wiegt ein Körper?	83
2.3	Der Vierervektor	85
2.4	Der Energie-Impuls-Vierervektor	93
2.5	Die Vierergeschwindigkeit und die Eigenzeit	97
2.6	Die Viererbeschleunigung	99
2.7	Relativistische Mechanik	101
2.8	Die Lorentz-Kraft	110
2.9	Das Variationsprinzip	116
2.10	Lorentz-skalare Potentiale	125
2.11	Die Bewegung eines Teilchens in Kraftfeldern	127
<b>3.</b>	<b>Relativistische Kinematik</b>	
3.1	Das Schwerpunktsystem	136
3.2	Der elastische Stoß	141
3.3	Der inelastische Stoß	156
3.4	Teilchenzerfälle	173
	<b>Zwischenbemerkungen</b>	<b>183</b>
<b>4.</b>	<b>Relativistische Elektrodynamik</b>	
4.1	Der elektromagnetische Feldstärketensor	186
4.2	Die Invarianten des elektromagnetischen Feldstärketensors	192



4.3	Die homogenen Maxwell-Gleichungen	199
4.4	Die inhomogenen Maxwell-Gleichungen	200
4.5	Der Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Feldes	207
4.6	Das Feld bewegter Ladungen	219
4.7	Die Liénard-Wiechert-Potentiale	226
4.8	Der kovariante Impulsraum	242
4.9	Ladungen und Felder im Impulsraum	250
4.10	Strahlung einer bewegten Ladung	252
<b>5</b>	<b>Symmetrien des Raumes</b>	
5.1	Der nichtrelativistische Grenzfall	268
5.2	Homogenität des Raum-Zeit-Gefüges, relativistischer Fall	273
5.3	Lorentz-Transformationen	276
5.4	Die Generatoren der Lorentz-Transformation	282
5.5	Die Generatoren der Translationsgruppe und die Poincaré-Transformationen	290
5.6	Die physikalische Bedeutung der Poincaré-Invarianz	300
	<b>Epilog</b>	313
	<b>Zwei Originalarbeiten Albert Einstein's</b>	314
	<b>Sachverzeichnis</b>	349

## Aufgaben und Beispiele

<b>1.</b>	<b>Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie</b>	
1.1	Parallel bewegte relativistische Uhr	23
1.2	$\alpha$ -Meson-Zerfall	27
1.3	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	34
1.4	Doppler-Effekt, relativistisch und nicht-relativistisch	35
1.5	Zeitdilatation bei einer Raumexpedition	37
1.6	Relativistische Kollision	40
1.7	Fresnelscher Mitführungskoeffizient	41
1.8	Die Aberration der Fixsterne	42
1.9	Berechnung der Aberration	44
1.10	Die abbildungsgeometrische Bedeutung der Aberration	45
1.11	Rotverschiebung der Sternstrahlungsfrequenz	56
1.12	Rotverschiebung der Wellenlänge	57
1.13	Rotverschiebung von Quasarstrahlung	57
1.14	Relativistische Winkeltransformation	61
1.15	Lorentz-Kontraktion und ihre Täuschungen	63
1.16	Lorentz-Paradox: Kontraktion in schwach verbundenen bewegten Systemen	65
1.17	Invarianz von $s^2$	67
1.18	$s < r$ und die Kausalität der Ereignisse	70
1.19	Das Alter der Drillinge bei Raumreisen	71
<b>2.</b>	<b>Relativistische Mechanik</b>	
2.1	Energie-Impuls-Beziehung für elektromagnetische Wellen	79
2.2	Veranschaulichung des Äquivalenz von Masse und Energie	81
2.3	Geschwindigkeitsabhängigkeit der (trägen) Masse	82
2.4	Lorentz-Transformationen und Additionstheorem der Geschwindigkeiten	90
2.5	Additionsgesetz für die Rapidität	92
2.6	Nichtkommutativität der Lorentz-Transformationen	93
2.7	Orthogonalität der Geschwindigkeit und Beschleunigung	100
2.8	Freier Fall zur Erdoberfläche	102
2.9	Unabhängigkeit der Ruhemasse $m_0$ von der Beschleunigung	107
2.10	Null-Komponente der Lorentz-Kraft	113

2.11	Bewegung im konstanten magnetischen Feld	114
2.12	Bewegung im konstanten elektrischen Feld	131
<b>3.</b>	<b>Relativistische Kinematik</b>	
3.1	Compton-Streuung	150
3.2	Maximaler Streuwinkel im elastischen Stoß	153
3.3	Elektron-Positron-Vernichtung	165
3.4	Annihilations-Erzeugung	166
3.5	Produktion neuer Elementarteilchen	167
3.6	Elektron-Positron-Produktion	168
3.7	Umwandlung der Energie in Materie	168
3.8	Erzeugung von Hyperkernen	170
3.9	Mandelstam-Variablen	171
3.10	Summenbeziehung der Mandelstam-Variablen	172
3.11	Zerfall (?) eines Photons und der $\gamma$ -Strahlungsdetektor	177
3.12	Lebensdauer der Sonne	182
<b>4.</b>	<b>Relativistische Elektrodynamik</b>	
4.1	Vektoren und Tensoren	189
4.2	Lorentz-Transformation des Feldstärke tensors	191
4.3	Der Tensor $\epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$	193
4.4	Invarianz des Tensors $\epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$ unter eigentlichen Lorentz-Transformationen	193
4.5	Die Vektoren $\vec{E}$ und $\vec{H}$ und ihre relativen Winkel bei der Lorentz-Transformation	197
4.6	$\vec{E} \cdot \vec{H} = 0$	198
4.7	Das Ohm'sche Gesetz	202
4.8	Magnetische Monopol-Ladungen	204
4.9	Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Feldes	211
4.10	$\epsilon_{ijk}$	213
4.11	Energieerichte und Impuls des elektromagnetischen Feldes	215
4.12	Retardierte und avancierte Wellen	221
4.13	Das elektrische und magnetische Feld einer bewegten Ladung	229
4.14	Das Feld einer angehaltenen Ladung	233
4.15	Die Bewegung im Coulomb-Feld einer schweren Ladung	236
4.16	Frequenzspektrum $\frac{d^2t}{dt^2}$ einer beschleunigten Ladung	257
4.17	Die Methode der äquivalenten Photonen	259

5.	<b>Symmetrie des Raumes</b>	
5.1.	Rotation um eine Achse	284
5.2.	Allgemeine Transformationen im Raum-Zeit-Gefüge	293
5.3.	Kommutatoren der Poincaré-Generatoren	296
5.4.	Lorentz-Gruppe $SL_2(\mathbb{C})$	302
5.5.	Cayley-Hamilton'sche Gleichung	305
5.6.	Kleine Gruppe	307
5.7.	$e^{A+B}$	309
5.8.	Generatoren einer Transformation	311

# 1. Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie

## 1.1 Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

In der Zeit von 1864 bis 1865 hatte *Maxwell* die Theorie der Elektrodynamik entwickelt und veröffentlicht. Die sogenannten Maxwell-Gleichungen enthielten dann als Lösungen auch die elektromagnetischen Wellen. Diese Wellen hatten eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ . Diese Ausbrei-

---

<sup>1</sup> James Clerk Maxwell, geb. 13. Juni 1831 in Edinburgh, gest. 5. November 1879 in Cambridge. Der Vater war ein Gutbesitzer und Sonderling, an dem M. mit großer Liebe hing; er ließ dem Knaben nach dem frühen Tod der Mutter (ferne Familie den Namen Maxwell trug), die beste Schulbildung zuteil werden. M. studierte drei Jahre Mathematik und Physik in Edinburgh und schloß 1854 sein Studium in Cambridge ab. Ein Jahr später legte er zum ersten Mal seine erste Arbeit vor, die schon auf die späteren Maxwell'schen Gleichungen zielte.

1856 erhielt M. eine kleine Professur in Aberdeen, von 1860 an wirkte er für fünf Jahre am King's College in London. Ähnlich wie Hermann von Helmholtz beschäftigte sich M. mit der Physiologie des Fortbewegens und baute die Driftfahrentheorie von Young weiter aus. Epochenmachend waren M.'s Arbeiten zur Elektrodynamik, wo er die intuitiven Vorstellungen Faradays in eine mathematische strenge Form brachte und die Feldphysik begründete.

Die vollen Maxwell'schen Gleichungen wurden 1862 im Philosophical Magazine unter dem Titel <On Physical Lines of Force> veröffentlicht. In der Einführung des Vortexstromsystems ging Maxwell über Faraday hinaus, nach Maxwell muß ein sich änderndes elektrisches Feld in einem Kreisraume wie ein elektrischer Strom magnetische Wirkungen zeigen. Gerade diese Annahme führte zur Möglichkeit transversaler elektromagnetischer Wellen. Über die mathematisch ermittelte Fortpflanzungsgeschwindigkeit schrieb M. 1864: "This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws."

1873 legte M. in dem zweibändigen <Treatise> eine Zusammenfassung aller bisherigen Arbeiten vor; die Maxwell'schen Gleichungen sind ihnen dabei in einer komplizierteren Form; von Heaviside und Heaviside griffen auf die ursprüngliche Fassung zurück. Es dauerte Jahrzehnte, bis die Maxwell'schen Gleichungen voll verstanden und anerkannt wurden. Dann aber bildete die <Maxwell'sche Elektrodynamik> zusammen mit der noch von Newton stammenden Mechanik das stolze Gebäude der klassischen Physik. Boltzmann, der selbst viel zur Einführung der Maxwell'schen Gleichungen beitrug, stellte in Bewunderung ihrer Schönheit und Symmetrie dem Teil 2 seines <Vorlesungen über Maxwell's Theorie> als Motto das Gethewort voran: "Was ist ein Gott, der diese Zeichen schrieb?"

Auch auf dem Gebiete der klassischen Gastheorie leistete M. Bahnbrechendes. Er griff die Ansätze von König und Clausius auf, während diese nur die mittlere Geschwindigkeit der

tungsgeschwindigkeit sollte ferner, der Theorie nach, von der Frequenz der elektromagnetischen Strahlung unabhängig sein. Damit war, wie wir gleich sehen werden, das Fundament der Relativitätstheorie gelegt. *Hertz*<sup>2</sup> entdeckte diese Wellen einige Jahre später, 1887, doch das Gebäude der Relativitäts-

---

Moleküle betrachtet hatten, stellte *M.* die Frage nach der individuellen Geschwindigkeit des einzelnen Teilchens. Er fand die heute sog. Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung und begründete damit zugleich die statistische Physik. Auf Boltzmann wirkten diese Abhandlungen wie eine Offenbarung, und in der Folge haben beide Forscher durch Parallelarbeit, einander anregend und kritisierend, das neue Gebiet aufgebaut. Als Wegbereiter der kinetischen Gastheorie war *M.* auch ein überzeugter Anhänger der Atomistik. In einer programmatischen Rede vor der British Association for the Advancement of Science äußerte er 1871 seine Überzeugung, daß die Atome absolut unveränderliche Gegebenheiten darstellen, und leitete daraus die Forderung nach atomaren Standards für die Grundeinheiten der Masse, der Länge und der Zeit ab.

1865 legte *M.* aus gesundheitlichen Gründen sein Lehramt am King's College nieder. Sein Güterbesitz in Schottland sicherte ihm finanzielle Unabhängigkeit, und frei von den akademischen Verpflichtungen setzte er seine Forschungen als Privatgelehrter fort und verfaßte die umfangreichen Manuskripte seiner Anfang der sechziger Jahre erschienenen Werke. Eine Berufung nach St. Andrews, an die älteste schottische Universität, lehnte er ab. Als aber die Universität Cambridge einen Lehrstuhl für Experimentalphysik neu gründete und, erstmalig für England, mit einem großen Unterrichtslaboratorium ausgestattet, versagte sich *M.* immer für die kritische Wissenschaft so wichtigen Aufgabe nicht. (In Großbritannien hatte es bisher nur ein physikalisches Universitätslaboratorium gegeben, das von Thomson im schottischen Glasgow.) Der Bau und die Einrichtung des nach dem hauptsächlichsten Geldgeber so genannten "Cavendish Laboratory" nahm viel Zeit in Anspruch; mit ihm begründete aber *M.* eine moderne Ausbildung und die berühmte Tradition der Experimentalphysik in Cambridge. [HE]

<sup>2</sup> *Heinrich Rudolf Hertz*, geb. 22. Februar 1857 in Hamburg, gest. 1. Januar 1894 in Bonn. H. erhielt 1885 eine Professur der Physik in Karlsruhe, 1889 wechselte er an die Universität in Bonn.

H. bestätigte durch seine Untersuchungen über die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen 1867/88 die Voraussetzungen der Maxwell'schen Theorie, die er später in seinen theoretischen Arbeiten vertiefte und verbesserte. Die von ihm entdeckten Hertzschen Wellen bilden eine der physikalischen Grundlagen der heutigen Funktechnik. Sein Nachweis des Einflusses ultravioletter Lichts auf die elektrische Entladung (1887) führte zur ersten Deutung des Photoeffektes durch Hallwachs. H. beobachtete 1892 den Durchgang von Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten und eröffnete Lenard die Möglichkeit, die Natur dieser Strahlung experimentell zu klären. In seinen letzten Lebensjahren widmete er sich einer

theorie ist erst 40 Jahre nach Maxwell von Einstein<sup>3</sup> vollendet worden. Die so wichtige Größe  $c$ , die gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, kennen wir heute recht genau. Messungen haben den folgenden Wert ergeben:

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \pm 1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

Neuformulierung der Mechanik. Sein Ziel war dabei eine Höckführung der gesamten Physik auf die Mechanik. Die postum veröffentlichten «Prinzipien der Mechanik» (1874) wurden zu einem Klassiker der Naturphilosophie und Erkenntnistheorie des 19. Jahrhunderts.

<sup>3</sup> Albert Einstein, geb. 14. März 1879 in Ulm, gest. 18. April 1955 in Princeton, E. wuchs in München auf und studierte 1894 in die Schweiz über (1901 schweizerischer Staatsbürger). In dem Zeitraum von 1902 bis 1906 war E. technischer Experte dritter Klasse am Patentamt in Bern. Danach wurde E. Professor an den Univs. Zürich und Prag (1911/12) sowie an der Eidgenöss. TH in Zürich. Seit 1914 hauptamtl. Mitgl. des Preuss. Akademie der Wissenschaften und Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik in Berlin; 1933 veranlaßten ihn die nationalsozialist. Angriffe aufgrund seiner jüd. Abkunft zum Verzicht auf seine akadem. Ämter in Deutschland. Er fand in den USA am Institute for Advanced Study in Princeton eine neue Wirkungsstätte, wo der 31. Febr. 1940 amerikan. Staatsbürger) bis zu seinem Tode arbeitete. E.s letzter Lebensabschnitt wurde davon überschattet, daß er – lebenslang überzeugter Pazifist – aus Furcht vor einer dt. Aggression durch einen Brief an Präs. Roosevelt am 2.8.1939 mit anderen den Anstoß zum Bau des ersten amerikanischen Atombomben gegeben hatte.

E. wurde durch seine Arbeiten, von denen einige die Grundlagen der Physik revolutionierten, zum bedeutendsten Physiker des 20. Jh. Ausgehend von einer fundamentalen Kritik der Raum- und Zeitmessung, entwickelte er 1905 die spezielle Relativitätstheorie; aus ihr folgte er das Gesetz von der Trägheit der Energie, das er 1907 zum Gesetz der allg. Äquivalenz von Masse und Energie erweiterte. 1914–16 formulierte er die allg. Relativitätstheorie. Sie umfaßt das empir. Äquivalenzprinzip der Gleichheit von träger und schwerer Masse als Ausgangspunkt, liefert neue Feldgleichungen der Gravitation und wendet die Anschauungen über die Struktur des physikal. Raums grundlegend. Der Nachweis der mit ihr vorhergesagten Lichtablenkung im Gravitationsfeld durch brit. Sommersemesterexpeditionen (1919) brachte E. weltweiten Ruhm. In log. Fortführung der Arbeiten zur Hecks-Hydrattheorie versuchte er ab 1929 jahresweilend, eine «relativistische» Feldtheorie aufzustellen, die außer der Gravitation auch die Elektrodynamik umfassen sollte. Diese Versuche blieben unbefriedigend, sowohl vor die Erfordernisse der Quantenmechanik und der Elementarteilchenphysik (bes. die Existenz so starker Wechselwirkungen wie die der Kernkräfte) nicht berücksichtigten.

1935 entwickelte E. auch, vom Theorem der Brownschen Bewegung und der gekoppel. Schwachungserscheinungen, die eine Bestätigung der bis dahin noch nicht allg. anerkannten Atomhypothese und damit der korpuskularen Natur des Materie brachten. Im gleichen

(Die Genauigkeit, mit der die Lichtgeschwindigkeit bis heute bestimmt wurde, ist erstaunlich, sie entspricht etwa der Geschwindigkeit eines Wanderers)<sup>†</sup>

---

Jahr kam er mit seiner Lichtquantenhypothese zu dem Schluss, daß auch elektromagnet. Strahlung aus Korpuskeln (Lichtquanten oder Photonen) besteht. Mit diesem zunächst von den meisten Physikern als zu radikal angesehenen Energiequantisierungsged. das die Grundlage einer Quantentheorie der Strahlung bildet, konnte er den äußeren Photoeffekt erklären und 1912 das photochem. Quantenäquivalenzgesetz herleiten. Er wandte so 1907 auch auf die Gitterschwingungen der Atome in Festkörpern an und gelangte so zu einer Theorie der spezif. Wärm. die deren Verhalten bes. bei tiefen Temperaturen im wesentlichen richtig beschrieb. 1924/25 baute E. die von Bose für Photonen gas entwickelte statist. Methode durch Anwendung auf unteilbare Partikel zur Bose-Einstein. Statistik aus. Obwohl E. viel zur Entdeckung der Quantenmechanik beigetragen und 1927 in seiner statist. Herleitung des Planckschen Strahlungsgesetzes richtungweisende Gedanken für ihre Interpretation gegeben hat, akzeptierte er aufgrund seiner philosoph. Grundhaltung nie die von Born gegebene statist. Interpretation und die darauf basierende, von Bohr und Heisenberg gegebene Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik. Er versuchte immer wieder, ihre log. Inkonsistenz nachzuweisen, und entzehrte sich auf diese Weise um wesentliche Entwicklungen der Physik.

1921 erhielt E. für seine Beiträge zur Quantentheorie, bes. für seine Deutung des Photoeffekts, den Nobelpreis für Physik. In der Folgezeit waren E. und die Relativitätstheorie heftigen, meist auf Antikommunismus beruhenden Angriffen ausgesetzt. Zunehmend berief er von einem jüdisch. Standpunkt aus auch zu polit. Fragen Stellung. Nach dem Zweiten Weltkrieg wandte er vor dem Gefahren der Kernwaffen und setzte sich für eine Weltregierung ein.

† Die Unsicherheit in der Bestimmung des Wertes der Naturkonstante  $c$  resultiert nicht aus der Messungenauigkeit als solcher, sondern aus der Ungenauigkeit der Definition der Längeneinheit "Meter".

Im Jahre 1983 hat die Internationale Einheitenkommision (Conférence Générale des Poids et Mesures) deshalb eine neue Festlegung der Einheit "Meter" beschlossen. Im ist nun die Strecke, die das Licht im Vakuum in  $1/299\,792\,458$  Sekunden zurücklegt. Die Lichtgeschwindigkeit ist daher heute ab

$$c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Einer raschen Entwicklung der Relativitätstheorie stand damals einiges im Weg. Die zwei wichtigsten Hürden waren:

1) Die *Newton'sche* Theorie der Mechanik und des Relativitätsprinzip

<sup>2</sup> Sir Isaac Newton, geb. 4. Januar 1643 (nach damaliger Zählung 28. Dezember 1642) in Woolsthorpe bei Grantham (Lincoln); gest. 31. März 1727 (20. März 1727), beigesetzt in der Westminster Abbey. N. wurde als Sohn eines Landwirts, muss der Eltern seiner Mutter und Großmutter auf. 1661 trat er in das Trinity College in Cambridge ein und wurde 1669 als Nachfolger seines Lehrers Barrow (1626-77) Prof. für Mathematik in Cambridge. 1689 wurde er nach der Genesung von einer schweren, nervösen Erkrankung (1669/90) als Münzwarden nach London berufen; wo er 1696 Master of the Mint wurde. Im selben Jahre wählte ihn die Pariser Akademie zu einem ihrer acht auswärtigen Mitglieder. Der Royal Society gehörte N. seit 1672 an, von 1703 bis zu seinem Tode als ihr Präsident.

N.s. erfolgreichsten Leistungen liegen auf den Gebieten der experimentellen Optik, der theoret. Mechanik und der höhern Mathematik. Bei der Verbesserung des Fernrohrs erkannte er, daß die bei der Brechung des Lichts durch Linsen auftretenden Farbenänderungen Abblüßungsgüte beeinträchtigen. Wohl ohne Kenntnis der bereits von Gregory in seiner *«Optica promota»* durchgearbeiteten Idee verfertigte daher N. statt einer Linsenbrille ein Spiegelteleskop. Zwar ergründete N. experimentelle Befunde über die prismatischen Farben weitgehend höherem Feststellungen von Keoplamont (1595-1667). N. betrachtete jedoch die Farben nicht mehr als Kondensatum des Lichts. Er wies einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Strahlableitung und Lichtfarbe nach und erklärte Weiß als Ergebnis des Zusammenwirkens sämtlicher Spektralfarben (1672). Später (1675) beschäftigte er sich auch mit dem Farben-Rainbow-Blättchen (*New's rainbow experiment*) und dem bei der Beugung des Lichts auftretenden Farbsaum. Eine zusammenfassende Darstellung seiner opt. Untersuchungen gab N. erst 1704 nach dem Tode von Hook, der ihm bei Letzterem damals in Präzisionsvermögen verwickelt hatte. In den *«Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light»* behandelte er das Licht als einen Strom unwägbarer, schiedel stahuffingender Teilchen, die *«Ete»* haben sollten, periodische Anordnungen bei dem Durchgange durch brechende Flächen oder bei der Reflexion an ihnen. Hypothesenbildung leitete N. trotz seines *«Hypothesis non fingo»* keineswegs grundsätzlich ab. Die Vermutungen über das Wesen der Molekularkräfte, die er in den auf die *«Opticks»* folgenden *«Queries»* ausgesprochen suchte, schloß die Chemie bis 18. und 19. Jahrh. bei ihren Theorien vielfach an sich.

Das für den Fortschritt der physikal. und astronom. Forschung wichtigste Werk von N.s. 1687 erschienene *«Philosophiæ naturalis principia mathematica»* (Mathemat. Grundlagen der Naturwissenschaft, dt. von J. Wolff, 1872). In seiner ersten Behauptung des Stoffes faßte darin N. die Leistungen seiner Vorgänger Kepler, Galilæi, Huygens, v. Guericke u.a.

von Galilei.<sup>8</sup> Danach sollten sich Geschwindigkeiten linear addieren. Die Lichtgeschwindigkeit wäre also in verschiedenen, d.h. zueinander bewegten Inertialsystemen, verschieden. Dies erläutert Fig. 1. Die Lampe A ist relativ zum Beobachter B in Ruhe, die Lampe A' dagegen bewegt sich relativ zu ihm mit der Geschwindigkeit  $v$ .

Der Beobachter sollte nun nach Galilei zwei verschiedene Lichtgeschwindigkeiten messen können. Wäre etwa  $c$  die Geschwindigkeit des Lichtes, welches von A ausgesandt wird, so wäre

$$c' = c + v \quad (2)$$

zu einem System der theoret. Mechanik zusammen. Am der Spitze des Werkes stellen Newton-Definitionen, dann Stimmhalt sich erst im Zuge der Benutzung herausstell. An sie schloßen sich die Newtonschen Axiome der Dynamik an.

Zur Rechtfertigung des Keplerischen Gesetzes sprach N. die Gravitationshypothese aus, deren Anwendung auf die Schwerkraftzunahme anfangs große mathemat. Schwierigkeiten bereitete. Unter Bannstrahlung der von ihm entwickelten Fluxionsrechnung wurde er ihnen allmählich Herr, und hieraus sticht am Benutzung eines ungenauen Wertes für den Erdhalbmesser, erklärt sich eine mehryährige Verzögerung in der Fertigstellung der <Principien>. Außer der Bewegung des Himmelskörpers behandelte N. auch die Erscheinung von Ebbe und Flut, Bewegungen im widerstehenden Mittel, Strömungs- und Schwingungsvorgänge sowie dann zusammenhängende akust. Fragen; er erhielt jedoch dabei für die Schallgeschwindigkeit in Luft aus seiner Formeln einen falschen Wert, weil er dies wichtige Faktor  $\rho/v$  (Verhältnis der spezif. Wärme bei konstantem Druck zur spezif. Wärme bei konstantem Volumen) in seinen Gleichungen noch nicht Rechnung trug. Die Frage nach dem Wesen der Schwerkraft ließ N. offen. Seine Schüler dogmatisierten sie im Sinne einer Fernwirkung.

N.s. Theorien fanden nicht sogleich Beifall, sondern setzten sich gegen den Cartesiansmus erst allmählich durch. In Frankreich traten für sie zuerst de Moirville, Voltaire und Diderot ein. In der Folgezeit gewannen N.s. Anschauungen, z.B. seine Annahme der Existenz eines absoluten Raumes, einer absoluten Zeit und einer absoluten Bewegung, bei Philosophen und Philosophen gewandte akademische Geltung. Erst auf Grund der Untersuchungen von Mach, Lorenz, Poincaré und vor allem von Einstein wandten diese Auffassungen stark revidiert. Von den mathemat. Arbeiten N.s. sind die zur Fluxionsrechnung von bes. großem Wert. Da Leibniz unabhängig von N. ein ganz ähnliches Verfahren in seiner Differential- und Integralkunst ausgebildet hatte, kam es zwischen beiden und ihren Anhängern zu einem unersparlichen Prioritätsstreit, in dem Leibniz Unrecht geschied und der erst durch Löhms Tod seines Abschluß fand.

Außer mathemat. und physikal. Schriften veröffentlichte N. auch theologische, z.B. Bemerkungen zum Propheten Daniel und zur Johannes-Apokalyptik.

<sup>8</sup> Galilei Galilei, geb. 15. Februar 1564 in Pisa, gest. 8. Januar 1642 in Arcetri (heute zu Florenz). G. ist der Sohn des Vincenzo Galilei, eines bekannten italienischen Komponisten und Musiktheoretikers. G. studierte 1581-85 in Pisa, wurde an der Florentiner Accademia dei Disegni mit den Schriften des Archimedes bekannt und baute daraufhin 1586 eine hydrostat. Waage; 1589 erhielt er ein Professor für Mathematik in Pisa. Ob er dort



Fig. 1. Bewegte ( $A'$ ) und unbewegte ( $A$ ) Lichtquelle, in Bezug auf den Beobachter ( $B$ )

die Geschwindigkeit des Lichtes, welches von  $A'$  ausgesandt wird. Dies stand im Widerspruch zur Maxwell'schen Theorie, nach der die Ausbreitungsges-

am schiefen Turm Fallversuche zur Bestätigung einer von ihm aufgestellten Fälltheorie anzustellen, ist nicht einwandfrei erwiesen. Der besseren Bezahlung halber übernahm G. (1602) die Professur der Mathematik in Padua. Er erfuhr dort seine Proportionalrechen-, rechnete sich in seinem Haus eine feinschnittliche Werkstatt ein, fand die Gesetze für das Fächerschild und leistete in vielen Gedankenexperimenten die Fallgesetze her; zur Bestätigung seiner Theorie entwickelte er die Fallrinne. G. konnte das eine Jahr früher in Holland erfundenen Fernrohr nach, bestritt es ein weiteres Beobachtungen und veröffentlichte deren seine Ergebnisse 1610 in seinem <Sidereus nuncius>, der <Sternenbotschaft>. G. entdeckte die bergige Natur des Mondes, den Durchmesser der Milchstraße, die Phasen der Venus, die vier größten Jupitermonde (17.1.1610) und die Saturnringe sowie 1611 auch Saturnus die Sonnenflecke. Diese Beobachtungen widersprachen z.T. dem damaligen, in der aristot.-Lehre ausgeprägteren Weltbild.

Erst seit 1610 trat G., der in diesem Jahr als Hofmathematiker und Hofphilosoph des Großherzogs nach Florenz zurückgekehrt war, öffentlich für das heliocentrische Weltssystem des Kopernikus ein; 1613 entwickelte er in einem Brief an den Benediktiner Gastaldi seine Vorstellungen über das Verhältnis der Bibel zur Naturkenntnis und v.a. sein heliocentrisches System, die eine Neuinterpretation der Hl. Schrift verkörperte. Dies führte zu einer ersten Auseinandersetzung mit der röm. Kirche, die 1616 mit dem Verbot dieses Lehres durch den Papst antwortete. G. widmete sich nunmehr intensiv der Weiterführung der aristotelisch-scholast. Physik. Im Rahmen eines Streites über das Wesen der Kammer von 1618, bei dem G. nicht in allen Punkten im Recht war, verfaßte er als eine seiner gastvollsten Abhandlungen den <Saggiatore> (<Prüfer mit der Goldwaage>), 1620, eine Schrift, die Papst Urban VIII. gewidmet war. Da dieser als Nachfahre ihres wohlgenegten Vorfahren war, glaubte G., ihn für die Anerkennung der kopernikanischen Lehre gewinnen zu können. Es verfaßte seinen <Dialogo sopra i due massimi sistemi>, den <Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische>, legte die Handschrift in Rom zur Prüfung vor und ließ sie 1632 in Florenz erscheinen. Das Buch wurde noch im selben Jahr auf kirchl. Befehl verboten eingezogen. Da es seine Parteinahme für Kopernikus zu deutlich gezeigt hatte, kam es zu einem Prozeß gegen G., der mit seiner Abschwörung und Verurteilung am 22.6.1633 endete. G. befand sich im Gefängnis der Inquisition wenige Tage in Haft. Legendär ist die Aussprache: <Und sie (die Erde) bewegt sich doch> (<Eppur si muove>), G. wurde zu höchstester Haft verurteilt, die er (seit 1637 erblindet) mit kurzer Unterbrechung in seinem Landhaus in Arcetri verbrachte. Dort verfaßte er auch sein für die weitere Entwicklung der Physik wichtiges

geschwindigkeit aller elektromagnetischen Wellen im Vakuum konstant sein sollte.

2) Ein zweites Problem kam durch die Maxwell'sche Theorie selbst auf, nämlich das Problem der Existenz der elektromagnetischen Wellen. Um diese Wellen analog etwa den Wasserwellen oder den Schallwellen verstehen zu können, benötigte man ein Medium, in dem sich diese Wellen ausbreiten könnten, den Äther. Würde der Äther existieren, so sollte man die eigene Geschwindigkeit relativ zu ihm bestimmen können; der Äther stellte dann ein absolutes Bezugssystem dar.

Das erste Problem, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, läßt sich nun auf zwei Weisen lösen. Entweder ist die Gültigkeit der Maxwell'schen Gesetze auf ein spezielles Inertialsystem beschränkt, oder aber, das Relativitätsprinzip ist in der Galileischen Form falsch, die Geschwindigkeiten addieren sich nicht linear. Die erste Möglichkeit erscheint unbefriedigend und widerspricht unserer Erfahrung. Wenn wir die Maxwell'schen Gesetze stellvertretend für andere Naturgesetze betrachten, werden wir zu dem Relativitätsprinzip geführt.

Alle Naturgesetze behalten ihre Gültigkeit  
in beliebigen Inertialsystemen.

Beobachter in verschiedenen Inertialsystemen sollen also dieselben Naturgesetze aus ihren Beobachtungen und Messungen ableiten können.

---

Werk, die «Discorsi e dimostrazioni matematiche» (Lissabon 1688), die «Unterredungen und mathemat. Demonstrationen über zwei neue Wissenzweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend», wobei mit Mechanik hier die Festigkeitslehre gemeint ist. – In der neueren Forschung wird die Theorie vertreten, daß G. wegen Abweichung von der tridentin. Eucharistiefeier verurteilt worden ist.

G.'s Hauptleistung besteht in der neuen Auffassung von der Möglichkeit physikal. Erkenntnisse. An die Stelle der Frage nach dem «Warum» setzt er die Frage nach dem «Wie» eines Prozesses; denn nur so könne die unmeßb. Ratio mit Hilfe der Mathematik Einblick in den göttl. Schöpfungsplan gewinnen. G. begründete (wenn es auch Aristoteles hatte) mit Descartes ein neues Zeitalter der Wissenschaft, v.a. durch eine klare Methodik (Mathematisierung der Natur); er war ein bedeutender Philosoph, Denker und zugleich ein guter Beobachter. Als glänzender Redner und Schriftsteller hat er seiner Zeit nachkommen neuen Naturwissenschaftl. und ihren Methoden (zuerst der Gelehrten seines Zeit. France und Göttinger gewünscht und sie zu weiteren Forschungen angeregt).

G. war einer der ersten Italiener, die sich für die Darstellung naturwissenschaftl. Probleme in ihren Werken auch des Muttersprache bedienten. Seine Prosa nimmt im Rahmen der italien. Literatur eine Sonderstellung ein, da sie sich durch ihre Klarheit und Schlichtheit von dem herrschenden besonnen Schwulst abhebt, den G. auch in seinen literaturkrit. Aufsätzen über Tasso u.a. getadelt hatte. In seinen wichtigsten Werken bediente er sich der von den italien. Humanisten überkommenen Form des Dialogs, um gemeinverständlich zu sein.