

Sexl/Schmidt

Raum – Zeit – Relativität

# vieweg studium

Roman und Hannelore Sexl

## **Weiße Zwerge – Schwarze Löcher**

Einführung in die relativistische Astrophysik

Peter Paetzold

## **Einführung in die Allgemeine Chemie**

R. D. Harrison (Hrsg.)

## **Datenbuch Chemie Physik**

Gerd Fischer

## **Lineare Algebra**

Hanns und Margret Ruder

## **Die Spezielle Relativitätstheorie**

Gerd Fischer

## **Analytische Geometrie**

Otto Forster

## **Analysis**

- 1: Differential- und Integralrechnung einer Veränderlichen
- 2: Differentialrechnung im  $\mathbb{R}^n$ , Gewöhnliche Differentialgleichungen

## **Vieweg Mathematik Lexikon**

Begriffe / Definitionen / Sätze

Beispiele für das Grundstudium

Roman Sexl  
Herbert Kurt Schmidt

# **Raum - Zeit - Relativität**

3., durchgesehene Auflage

Mit 110 Abbildungen



Prof. Dr. Roman Sexl († 1986) war Vorstand am Institut für Theoretische Physik der Universität Wien und Abteilungsleiter am Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Dr. Herbert Kurt Schmidt ist Oberstudienrat am Ludwig-Georgs-Gymnasium zu Darmstadt.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Sexl, Roman:**

Raum – Zeit – Relativität / Roman Sexl; Herbert Kurt Schmidt.  
– 3., durchges. Aufl., Nachdr. – Braunschweig; Wiesbaden:  
Vieweg, 1991

(Vieweg-Studium; 36: Grundkurs Physik)

ISBN 978-3-528-27236-4 ISBN 978-3-322-96947-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-96947-7

NE: Schmidt, Herbert Kurt.; GT

- 1.– 5. Tausend 1978
- 6.– 9. Tausend 1979
- 10.–12. Tausend 1981
- 13.–15. Tausend 1983
- 16.–18. Tausend 1985
- 19.–21. Tausend 1987
- 22.–23. Tausend 1989
- 24.–25. Tausend 1991
- 26.–27. Tausend 1993
- 28.–29. Tausend 1996

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1991

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Bertelsmann Fachinformation GmbH.



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz: Vieweg, Braunschweig

Gedruckt auf säurefreiem Papier

## Vorwort

In diesem Buch haben wir versucht, die vielfache Bedeutung aufzuzeigen, welche die Relativitätstheorie heute hat: Sie ist zunächst – zusammen mit der Quantentheorie – eine der wichtigsten Grundlagen der modernen Physik, die vor allem in den Laboratorien der Hochenergiephysik ständige Anwendung findet. Die Messung räumlicher und zeitlicher Abstände stellt aber auch eine für die Praxis wichtige Aufgabe dar. 60 Jahre nach der Aufstellung der Relativitätstheorie durch Einstein ist heute die Meßtechnik so weit vorgeschritten, daß die Ergebnisse der Relativitätstheorie für die Technik der Zeitmessung und für Ortungsaufgaben von Bedeutung sind. Raum und Zeit gehören ferner zu den ältesten Anliegen philosophischen Denkens. Über die Verknüpfung dieser Ideenwelt mit den Aussagen der Physik gibt es ein Spektrum von Ansichten, das wir nur andeuten konnten. Schließlich war die berühmte Formel  $E = mc^2$  einer der ausschlaggebenden politischen Faktoren unseres Jahrhunderts, so daß die Ergebnisse der Physik hier in besonders direkter Weise technische und politische Bedeutung erlangten.

Sie können dieses Buch auf drei Arten benützen: Wenn Sie sich für einfache Herleitungen der wichtigsten Ergebnisse der Relativitätstheorie interessieren, dann sollten Sie die Kapitel 1 bis 7, 13.1 bis 13.3, 14, 15 und 16.1 lesen. Darin werden die physikalischen Aussagen der Theorie mit elementaren Methoden abgeleitet. Wollen Sie tiefer in die Ergebnisse der Theorie eindringen, dann ergänzen Sie diese Studien durch die Lektüre der Kapitel 8 bis 11. Wollen Sie noch weiter in das Raum-Zeit Denken eindringen, das für die Relativitätstheorie charakteristisch ist, dann sollten Sie in Kapitel 12 den Umgang mit Vierervektoren und Linienelementen erlernen. Diese Methoden werden Ihnen ein besseres Verständnis der relativistischen Mechanik und Elektrodynamik ermöglichen, welche Inhalt der Kapitel 13 und 16 sind. Weitere Anwendungen dieser Methoden, vor allem auf die Physik der Elementarteilchen, enthält *R. U. Sexl* und *H. Urbantke*, Relativität, Gruppen, Teilchen, Springer 1976. Den Ausbau der speziellen Relativitätstheorie zur allgemeinen Relativitätstheorie finden Sie auf elementarem Niveau in *R. und H. Sexl*, Weisse Zwerge – Schwarze Löcher, Vieweg, Braunschweig <sup>2</sup> 1979, und mit den Mitteln der Riemannschen Geometrie dargestellt in *R. Sexl* und *H. Urbantke*, Gravitation und Kosmologie, Bibliographisches Institut, Mannheim 1975.

Die Arbeit an diesem Buch wurde wesentlich durch Forschungsaufenthalte eines der Autoren (R.S.) am CERN, Genf, gefördert, dem wir für die Gastfreundschaft danken wollen. Dank schulden wir auch Herrn Prof. *C. Alley* für die Überlassung unpublizierter Daten über Atomuhren und Dr. *G. Becker* (Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig) für viele Informationen über Zeitmessung.

Wien und Flensburg, Herbst 1977

*R. U. Sexl, H. K. Schmidt*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	V
<b>Warum interessiert uns die Relativitätstheorie?</b>	X
<b>Raum und Zeit</b>	
<b>1 Raum, Zeit und Äther</b>	1
1.1 Das Weltbild der Antike und des Mittelalters	1
1.2 Die Kopernikanische Revolution	2
1.3 Descartes und Newton	4
1.4 Äther, Licht und Feld	6
1.5 Die Suche nach dem Äther	7
Aufgaben	12
<b>2 Vom Äther zur Relativitätstheorie</b>	12
2.1 Das Relativitätsprinzip	12
2.2 Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	13
2.3 Theorie und Experiment	14
Aufgaben	15
<b>3 Zeit und Uhr</b>	15
3.1 Was ist Zeit?	15
3.2 Von der Sonnenuhr zur Atomuhr	16
Aufgaben	20
<b>4 Atomuhr und Weltzeit</b>	21
4.1 Atomuhren	21
4.2 Gleichzeitigkeit	23
4.3 Die Atomzeit TAI und die Weltzeit UTC	27
4.4 Das LORAN-C Netzwerk	29
Aufgaben	30
<b>5 Bewegte Uhren und die Zeitdilatation</b>	31
5.1 Die bewegte Lichtuhr	31
5.2 Experimente mit Atomuhren	35
5.3 Experimente mit Elementarteilchen	43
5.4 Das Zwillingsparadoxon	45
5.5 Uhren im Schwerfeld	48
Aufgaben	52

<b>6 Relative Gleichzeitigkeit</b>	54
6.1 Die Definition der Gleichzeitigkeit	54
6.2 Die Relativität der Gleichzeitigkeit	56
Aufgaben	59

## Relativistische Kinematik

<b>7 Die Lorentz-Transformation</b>	60
7.1 Raum-Zeit-Diagramme	61
7.2 Die Galilei-Transformation	63
7.3 Minkowski-Diagramme	68
7.4 Die Lorentz-Transformation	73
Aufgaben	75
<b>8 Die Lorentz-Kontraktion</b>	77
8.1 Bewegte Körper sind verkürzt	77
8.2 Schein oder Wirklichkeit?	80
8.3 Die Unsichtbarkeit der Lorentz-Kontraktion	84
Aufgaben	85
<b>9 Lichtkegel und Kausalität</b>	86
9.1 Die Lichtgeschwindigkeit als Grenze	86
9.2 Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft	89
Aufgaben	92
<b>10 Der relativistische Doppler-Effekt</b>	92
10.1 Der bewegte Sender	93
10.2 Der Doppler-Effekt und das Zwillingsparadoxon	97
Aufgaben	99
<b>11 Das Geschwindigkeitsadditionstheorem</b>	100
11.1 Die relativistische Addition von Geschwindigkeiten	100
11.2 Der $\pi^0$ -Mesonen-Zerfall	103
11.3 Das Fizeau-Experiment	103
11.4 Vorwärtsstrahlung schnell bewegter Teilchen	106
Aufgaben	109

## Relativistische Dynamik

<b>12 Die invariante Raum-Zeit</b>	110
12.1 Das Linienelement	110
12.2 Vierervektoren	115
12.3 Vierergeschwindigkeit und Viererbeschleunigung	119
Aufgaben	122

<b>13 Masse und Energie</b>	123
13.1 Die relativistische Massenzunahme	123
13.2 Hochenergiephysik	127
13.3 Materie und Antimaterie	139
13.4 Die Erhaltungssätze	141
13.5 Photonen und der Compton-Effekt	146
Aufgaben	149
<b>14 Der Massendefekt</b>	151
14.1 Der Atomkern in Zahlen	151
14.2 Kernfusion	155
14.3 Kernspaltung	156
Aufgaben	160
<b>15 Grenzen der Weltraumfahrt</b>	161
15.1 Die konstant beschleunigte Rakete	161
15.2 Die relativistische Rakete	165
<b>16 Die relativistische Elektrodynamik</b>	168
16.1 Magnetismus als relativistischer Effekt	168
16.2 Beschleunigung, Kraft und Energie	175
16.3 Das elektromagnetische Feld	177
Aufgaben	181
<b>Epilog: Albert Einstein und das 20. Jahrhundert</b>	182
1 Relativitätstheorie und Physik	182
2 Physik und Philosophie	184
3 Einstein und die Politik	187
Anmerkungen	189
Lösungen der Aufgaben	194
Kurzbiographie der Autoren	200
Personenregister	201
Sachregister	202
Bildquellenverzeichnis	205



## Warum interessiert uns die Relativitätstheorie?

Albert Einstein war Anfang 1916 unter den Besuchern der „Literarischen Gesellschaft“ in Berlin. Einer der Literaturfreunde wandte sich an ihn und bat um Aufklärung:

*„Also bitte, Herr Professor Einstein, was bedeutet Potential, invariant, kontravariant, Energietensor, skalar, Relativitätspostulat, hypereuklidisch und Inertialsystem? Können Sie mir das ganz kurz erklären?“* „Gewiß“, sagte Einstein, *„das sind Fachausdrücke!“* Damit war dieser Kursus beendet.<sup>1</sup>

Damals war die Relativitätstheorie nur einem kleinen Kreis von Fachleuten bekannt und verständlich. Selbst Einstein schien es unmöglich, seine Ideen in knapper Form zu erläutern. Heute ist die Relativitätstheorie dagegen einer der Grundpfeiler unseres Naturverständnisses und ohne große Anstrengung in wenigen Wochen erlernbar.

Die grundlegende Rolle der Einsteinschen Ideen für die Physik erklärt sich daraus, daß die Relativitätstheorie die Anschauungen über Raum und Zeit, die die Menschheit in Jahrtausenden entwickelt hatte, völlig verändert hat.

So glaubte man beispielsweise an die Existenz einer „absoluten Zeit“, die im gesamten Universum gleichmäßig vergeht. Aus der Relativitätstheorie folgt dagegen, daß schnell bewegte Uhren langsamer als ruhende Uhren gehen, so daß es keine Zeit gibt, die überall und für jedermann gleichschnell verstreicht. Dieser Effekt, die „Zeitdilatation“, schien lange unmeßbar. Heute kann man die Zeitdilatation einfach aus der Arbeit des Uhrennetzes ersehen, von dem die Zeitsignale unserer Radiosender ausgehen (siehe Kapitel 4). Selbst im Flugzeug kann man heute die Verlangsamung des Uhrengangs mit Hilfe von Atomuhren messen.

Die spezielle Relativitätstheorie sagt auch voraus, daß Maßstäbe umso kürzer sind, je rascher sie sich bewegen. Sowohl der Abstand zwischen zwei Punkten, als auch die Zeit, die zwischen zwei Ereignissen vergeht, hängen somit vom Beobachter ab. Diese Vorhersagen Albert Einsteins, deren Beweis die folgenden Kapitel gewidmet sind, haben die Physik in ihren Grundfesten erschüttert. Mehr als 200 Jahre lang waren doch für den Physiker die Definitionen maßgebend gewesen, die Isaac Newton 1687 in seinem Hauptwerk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ niedergelegt hatte. Sie hatten den absoluten Raum und die absolute Zeit, die für alle Beobachter überall gleichermaßen vergeht, zu Grundbegriffen der Physik gemacht. Auf diesen Grundlagen war von Generationen von Physikern ein riesiges Lehrgebäude errichtet worden, das nicht nur die Mechanik, sondern auch die Elektrizitätslehre, Optik, Wärmelehre, kurz die gesamte klassische Physik umfaßte. Es schien nur eine Frage weniger Jahre, bis die letzten noch offenen Fragen zufriedenstellend gelöst werden konnten.

Als zum Beispiel der spätere Physiknobelpreisträger Max Planck im Jahre 1875 überlegte, ob er vielleicht Physik studieren solle, riet ihm ein Professor der Physik der Universität München ab. In der Physik sei doch im wesentlichen schon alles erforscht, es gelte nurmehr geringe Lücken auszufüllen!<sup>2</sup> Max Planck ließ sich allerdings nicht abschrecken und schuf 25 Jahre später die ersten Grundlagen der

Quantentheorie, die eine radikale Abwendung von der klassischen Physik und eine völlige Neuerung bedeuteten.

Aber nicht nur die Physik war von einer Veränderung zweier ihrer Grundbegriffe betroffen. Auch die Philosophie hatte sich seit altersher mit Raum und Zeit auseinandergesetzt und viele Konzepte geschaffen, die später in die Physik eingingen. Mit einigen Höhepunkten dieser großen kulturellen Tradition werden wir uns in Kapitel 1 und 2 auseinandersetzen um zu erkennen, welcher Ausgangspunkt um die Jahrhundertwende vorhanden war und wie die traditionellen Begriffe in der Relativitätstheorie neu erfaßt wurden.

Während die Veränderung des Raum- und Zeitbegriffs durch die Relativitätstheorie lange Zeit unbeobachtbar blieb und auch heute noch von geringer technischer Bedeutung ist, erwies sich eine andere Folgerung der Einsteinschen Theorie als einer der ausschlaggebenden politischen Faktoren unseres Jahrhunderts: Es ist dies die Umwandelbarkeit von Masse in Energie, die in der berühmten Relation  $E = mc^2$  ihren Ausdruck findet (dabei bedeutet  $c = 300\,000$  km/s die Lichtgeschwindigkeit).

Wie die Verwandlung von Raum und Zeit durch die Relativitätstheorie, so schien auch die Umwandlung von Masse in Energie zunächst ein sehr theoretisches Konzept ohne praktische Auswirkung. Selbst Albert Einstein glaubte anfänglich nicht an praktische Folgerungen seiner Theorie und bemerkte im Jahre 1920 gesprächsweise:<sup>3</sup>

*„Es existiert vorläufig nicht der leiseste Anhalt dafür, ob und wann jemals diese Energiegewinnung erzielt werden könnte.“*

Doch knapp zwei Jahrzehnte später, am 2. August 1939, schrieb Einstein einen der entscheidenden Briefe unseres Jahrhunderts an den amerikanischen Präsidenten Franklin D. Roosevelt. Er beginnt mit den Worten:<sup>4</sup>

*„Einige neuere Untersuchungen von Enrico Fermi und Leo Szilard, die mir im Manuskript zugänglich wurden, lassen mich erwarten, daß das Element Uran zu einer neuen und wichtigen Energiequelle in der unmittelbaren Zukunft werden kann ...“*

Dieser Brief löste eine Kette von Ereignissen aus, die die politischen Geschehnisse unserer Welt unwiderruflich veränderten. Die Freisetzung von Kernenergie durch Umwandlung eines Teils der Masse von Urankernen wurde bereits am 2. Dezember 1942 Wirklichkeit. Unter der Leitung des italienischen Physikers Enrico Fermi begann damals der erste Atomreaktor der Welt in Chicago zu arbeiten. Das „Zeitalter der Atomenergie“ hatte begonnen.

Wenig später vollzog sich die Umwandlung von Masse in Energie,  $E = mc^2$ , auf eine andere schreckliche Art: am 6. August 1945 explodierte eine Atombombe über Hiroshima und verwüstete fast die gesamte japanische Stadt. Drei Tage darauf erlitt Nagasaki ein ähnliches Schicksal.

In Kernreaktor und Atombombe erschloß die Menschheit eine Energiequelle, die in der Natur seit Jahrmilliarden wirksam ist: In Sternen wandeln Kernreaktionen seit jeher Masse in Energie um. Die Relativitätstheorie erwies sich somit auch als Schlüssel zum Verständnis der Sterne als riesiger Kernkraftwerke. Sie ist somit

eine der Grundlagen der Physik der Sterne, der „Astrophysik“, die in den letzten Jahren zu einem der wichtigsten und aktuellsten Themen physikalischer Forschung geworden ist.

Auch die moderne Elementarteilchenphysik baut auf der Relativitätstheorie auf. In riesigen Beschleunigeranlagen, wie dem Synchrotron des Europäischen Kernforschungszentrums CERN in Genf, versucht man die kleinsten Bausteine der Materie soweit zu beschleunigen, daß sie beim Aufprall auf andere Teilchen tief in deren Inneres eindringen und uns so Kunde vom Aufbau der Materie geben. Dabei wird die Umwandlung von Masse in Energie und umgekehrt zur alltäglichen Erscheinung. Bremsst man nämlich ein rasch bewegtes Teilchen durch einen Stoß plötzlich ab, so wandelt sich seine Energie in Masse um und neue Formen und Elementarteilchen entstehen. Diesen neuen und meist sehr kurzlebigen Elementarteilchen gilt das Interesse der „Hochenergiephysik“, da man in ihnen einen Schlüssel zu unserem zukünftigen Verständnis der Materie sieht.

Diese Beispiele zeigen, daß die Relativitätstheorie die philosophische, wissenschaftliche und auch die politische Entwicklung des 20. Jahrhunderts in höchstem Maße beeinflußt hat. Zusammen mit der Quantentheorie bildet die Relativitätstheorie die wichtigste Grundlage moderner Physik und des gesamten darauf aufbauenden Naturverständnisses.