

Springer-Lehrbuch



Dietrich Stauffer

THEORETISCHE PHYSIK

Ein Kurzlehrbuch und Repetitorium

Mit 50 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo

Dietrich Stauffer

Institut für Theoretische Physik, Universität Köln, Zulpicher Straße 77,
D-5000 Köln 41, und (1988–1990)

Höchstleistungsrechenzentrum an der KFA Jülich, Postfach 1913
D-5170 Jülich 1, Fed. Rep. of Germany

ISBN-13: 978-3-540-50697-3
DOI: 10.1007/978-3-642-97152-5

e-ISBN-13: 978-3-642-97152-5

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek.

Stauffer, Dietrich:

Theoretische Physik : ein Kurzlehrbuch und Repetitorium / Dietrich Stauffer. – Berlin ; Heidelberg ; New York ;
London ; Paris ; Tokyo : Springer, 1989

(Springer-Lehrbuch)

ISBN-13: 978-3-540-50697-3

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 Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1989

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.

2156/3150-543210

Vorwort

Es gibt viele hervorragende theoretische Physiker und viele ausgezeichnete Lehrbücher der Theoretischen Physik. Dieses Buch und sein Autor gehören nicht dazu. Stattdessen bemüht es (das Buch, nicht der Autor) sich darum, dünn zu sein. Es ist eine Illusion zu glauben, daß ein wissenschaftliches Studium das gesamte Wissen eines Faches vermitteln könne: Jede Vorlesung, jeder Übersichtsartikel, ja sogar fast alle Originalveröffentlichungen in der Forschung geben immer nur einen Teil der Kenntnisse des Autors im jeweiligen Stoffgebiet wieder. Prioritätensetzung und Mut zur Lücke gehören unvermeidbar zu jedem Studium. Und da die Hochschule kein Fließband sein soll, brauchen auch nicht alle Studenten eines Bereiches das Gleiche zu lernen.

So wird an der Kölner Universität, und auch anderswo, seit vielen Jahren eine „Theoretische Physik in 2 Semestern“ angeboten, vor allem für diejenigen Studenten der Theoretischen Physik, die das Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien bzw. in der Sekundarstufe II anstreben und für zukünftige Diplom-Mathematiker. J. Hajdu führte diese Vorlesung in Köln ein. Der Autor des vorliegenden Lehrbuchs schrieb viel von einem Manuskript von F.W. Hehl ab und profitierte von der Kritik von K.W. Kehr, D.E. Wolf und zahlreichen Studenten an dem seit einem Jahrzehnt existierenden Skriptum, das der Vorläufer dieses Buches war. Selbstverständlich sind daher die Benannten schuld an allen Fehlern in diesem Lehrbuch.

In teilweisem Gegensatz zu anderen Büchern gleicher Zielsetzung wird hier die theoretische Physik in der üblichen Aufteilung angeboten: Mechanik, Elektrodynamik, Quantenmechanik, Statistische Physik. Auch diese Reihenfolge entspricht wohl der heute üblichen, so daß der Student leichter vom hier beschriebenen Zweisemester-Kurs zum traditionellen Viersemester-Zyklus des Diplom-Physik-Kandidaten wechseln kann. Wir haben im Lauf der Jahre teils im Wintersemester, teils im kürzeren Sommersemester mit der Mechanik begonnen, und übrigbleibende Zeit zu forschungsorientierten Ergänzungen verwendet, die in diesem Buch fehlen.

Die Kürze wird erreicht durch Überspringen komplizierterer Probleme und mathematischer Ableitungen, nicht durch Weglassen größerer Gebiete. Der Leser, der dem Autor nicht glaubt (richtig geschrieben zu haben), sollte ausführlichere Lehrbücher zu Rate ziehen, wenn er einzelne Ableitungen nicht nachvollziehen kann. Dieses Buch soll nicht den Besuch der Vorlesung ersetzen, wo manche Details besser erläutert werden können. Die Übungen wurden meist als Präsenzaufgaben gestellt, die die Studenten ohne spezielle Vorbereitung, aber mit Beratung durch einen Tutor, lösen sollten. Die Fragen dienen auch der Vorbereitung auf mündliche Prüfungen. Die eingestreuten Computerprogramme für *Anfänger* sollen nicht (nur) „Kino während der Vorlesung“ bieten, sondern klarmachen, daß Programmierkenntnisse heute von den meisten Physikstudenten erworben werden und recht hilfreich im Studium sind. Der zur Erstellung der Programme benutzte Apple IIe Computer stammte von der Müller-Reitz-Stiftung im Deutschen Stifterverband.

Jülich, Januar 1989

D. Stauffer

Inhaltsverzeichnis

1. Mechanik	1
1.1 Punktmechanik	1
1.1.1 Grundbegriffe der Mechanik und Kinematik	1
1.1.2 Das Newtonsche Bewegungsgesetz	3
1.1.3 Einfache Anwendungen des Newtonschen Gesetzes	5
1.1.4 Harmonischer Oszillator in einer Dimension	12
1.2 Mechanik von Massenpunkt-Systemen	15
1.2.1 Die zehn Erhaltungssätze	15
1.2.2 Das Zweikörper-Problem	17
1.2.3 Zwangskräfte und d'Alembert-Prinzip	18
1.3 Analytische Mechanik	21
1.3.1 Die Lagrange-Funktion	21
1.3.2 Die Hamilton-Funktion	23
1.3.3 Harmonische Näherung für kleine Schwingungen	25
1.4 Mechanik starrer Körper	29
1.4.1 Kinematik und Trägheitstensor	29
1.4.2 Bewegungsgleichungen	33
1.5 Kontinuumsmechanik	38
1.5.1 Grundbegriffe	38
1.5.2 Spannung, Bewegung und Hookesches Gesetz	43
1.5.3 Wellen in isotropen Kontinua	44
1.5.4 Hydrodynamik	46
2. Elektrodynamik	53
2.1 Vakuum-Elektrodynamik	53
2.1.1 Zeitlich konstante elektrische und magnetische Felder	53
2.1.2 Maxwell-Gleichungen und Vektorpotential	57
2.1.3 Energiedichte des Feldes	59
2.1.4 Elektromagnetische Wellen	60
2.1.5 Fourier-Transformation	60
2.1.6 Inhomogene Wellengleichung	61
2.1.7 Anwendungen	62
2.2 Elektrodynamik in Materie	66
2.2.1 Maxwell-Gleichungen in Materie	66
2.2.2 Materialeigenschaften	67
2.2.3 Wellengleichung in Materie	69
2.2.4 Elektrostatik an Oberflächen	70

2.3	Relativitätstheorie	73
2.3.1	Lorentz-Transformation	73
2.3.2	Relativistische Elektrodynamik	76
2.3.3	Energie, Masse und Impuls	78
3.	Quantenmechanik	81
3.1	Grundbegriffe	81
3.1.1	Einführung	81
3.1.2	Mathematische Grundlagen	82
3.1.3	Grundaxiome der Quantentheorie	83
3.1.4	Operatoren	86
3.1.5	Heisenbergsche Unschärferelation	87
3.2	Schrödingergleichung	88
3.2.1	Die Grundgleichung	88
3.2.2	Eindringen	89
3.2.3	Tunneleffekt	90
3.2.4	Quasiklassische WBK-Näherung	92
3.2.5	Freie und gebundene Zustände im Potentialtopf	92
3.2.6	Harmonischer Oszillator	94
3.3	Drehimpuls und Atomstruktur	96
3.3.1	Drehimpuls-Operator	96
3.3.2	Eigenfunktionen von L^2 und L_z	97
3.3.3	Wasserstoffatom	98
3.3.4	Atomaufbau und Periodisches System	101
3.3.5	Ununterscheidbarkeit	102
3.3.6	Austauschwechselwirkungen und homöopolare Bindung ...	104
3.4	Störungstheorie und Streuung	106
3.4.1	Zeitunabhängige Störungstheorie	106
3.4.2	Zeitabhängige Störungstheorie	107
3.4.3	Streuung und 1. Bornsche Näherung	109
4.	Statistische Physik	111
4.1	Wahrscheinlichkeit und Entropie	111
4.1.1	Kanonische Verteilung	111
4.1.2	Entropie, Hauptsätze und Freie Energie	114
4.2	Thermodynamik des Gleichgewichts	117
4.2.1	Energie und andere thermodynamische Potentiale	117
4.2.2	Thermodynamische Relationen	119
4.2.3	Alternativen zur kanonischen Wahrscheinlichkeitsverteilung	121
4.2.4	Wirkungsgrad und Carnot-Maschine	123
4.2.5	Phasengleichgewichte und Clausius-Clapeyron-Gleichung ..	125
4.2.6	Massenwirkungsgesetz für Gase	127
4.2.7	Die Gesetze von Henry, Raoult und van't Hoff	128
4.2.8	Joule-Thomson-Effekt	130
4.3	Statistische Mechanik idealer und realer Systeme	131
4.3.1	Fermi- und Bose-Verteilung	131

4.3.2	Klassischer Grenzfall $\beta\mu \rightarrow -\infty$	133
4.3.3	Klassischer Gleichverteilungssatz	135
4.3.4	Ideales Fermigas bei tiefen Temperaturen $\beta\mu \rightarrow +\infty$	136
4.3.5	Ideales Bosegas bei tiefen Temperaturen $\beta\mu \rightarrow -\infty$	137
4.3.6	Schwingungen	139
4.3.7	Virialentwicklung realer Gase	141
4.3.8	Van der Waals-Gleichung	141
4.3.9	Magnetismus lokalisierter Spins	143
Anhang: Übungen		149
A.1	Mechanik und Elektrodynamik	149
A.2	Quantenmechanik und Statistische Physik	153
Weiterführende Literatur		156
Sachverzeichnis		157