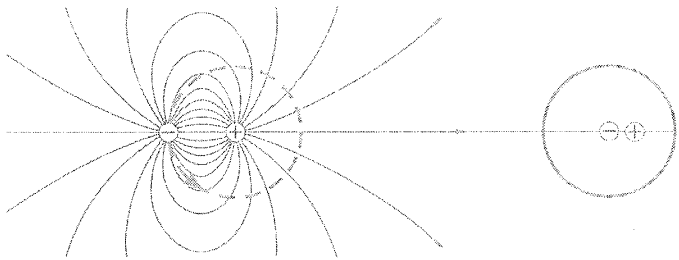




Hans Jörg Leisi

Klassische Physik

Band 2: Elektromagnetismus und Wärme



Springer Basel AG

Autor
Hans Jörg Leisi
Institut für Teilchenphysik
der ETH Zürich
ETH Hönggerberg
HPK F 24
CH-8093 Zürich

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Leisi, Hans Jörg:

Klassische Physik / Hans Jörg Leisi. – Basel ; Boston ; Berlin :
Birkhäuser.

Bd. 2. Elektromagnetismus und Wärme. – 1998

ISBN 978-3-7643-5977-5 ISBN 978-3-0348-8807-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-0348-8807-3

Das 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 Urheber-
rechtsgesetzes in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grund-
sätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen
unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

© 1998 Springer Basel AG

Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag 1998

Postfach 133
CH-4010 Basel
Schweiz

Gedruckt auf säurefreiem Papier,
hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff. TCF ∞

ISBN 978-3-7643-5977-5

9 8 7 6 5 4 3 2 1

Meinem Lehrer Paul Scherrer gewidmet

Vorwort

Der vorliegende Lehrgang der Klassischen Physik erscheint in einer Zeit, in der die Diskussion über Neuerungen und Umstrukturierungen des Unterrichts an der Hochschule und an anderen Lehranstalten einen breiten Raum einnimmt. Der aus einer langjährigen Unterrichtstätigkeit an der ETH-Zürich entstandene Lehrgang ist in erster Linie ein *Beitrag zur Gestaltung des propädeutischen Physikunterrichts* an der Hochschule. Das Buch wurde auch für Unterrichtende am Gymnasium und an höheren technischen Lehranstalten geschrieben. Es eignet sich zum Selbststudium.

Das Lehrziel ist die Vermittlung eines *Basiswissens in den Grundlagen der klassischen Physik*. Die Stoffauswahl ist selektiv; Gebiete, die durch allgemeine Konzepte miteinander verbunden sind, stehen im Zentrum. Wichtige gemeinsame Konzepte der Mechanik und der Elektrodynamik beispielsweise sind die Schwingungen und Wellen; das Konzept des Vektorfeldes kommt in der Mechanik, der Strömungslehre und der Elektrodynamik vor, etc. Ausgangspunkt sind immer die *physikalischen Phänomene*, die anhand von über 120, in Einzelheiten beschriebenen *Demonstrationsexperimenten* vorgeführt werden. Daraus entwickeln wir die *physikalischen Gesetze*, die dann auf zahlreiche, technisch und didaktisch wichtige Beispiele angewendet werden; die Beispiele sind im Text vollständig durchgerechnet. Alle Resultate sind erklärt und werden (mindestens an typischen Situation) auch hergeleitet. Zum Einüben des Stoffes stehen 131 ausformulierte Übungsaufgaben zur Verfügung, deren Lösungen jeweils am Ende des Bandes aufgeführt sind.

Die klassische Physik ist in die drei Teile *Mechanik*, *Elektromagnetismus* und *Wärme* gegliedert. Der erste Band behandelt die Mechanik im weitesten Sinn: die Bewegungen des Massenpunkts, die Gesetze der Systeme von Massenpunkten, Bewegungen starrer Körper, die Mechanik deformierbarer Medien, Schwingungen, elastische Wellen, bis hin zu einer Darstellung der Speziellen Relativitätstheorie. Ein Kapitel ist den Symmetrieeigenschaften der physikalischen Gesetze gewidmet. Elektromagnetismus und Wärme sind im vorliegenden zweiten Band dargestellt. Die Elektrizitätslehre enthält die Kapitel Elektrostatik, Elektrische Ströme, Zeitlich veränderliche Felder (Induktionsgesetz und Maxwellsche Gleichungen), sowie Elektromagnetische Wellen. Die Wärmelehre beginnt mit dem Kapitel Vielteilchensysteme – Begriffe, gefolgt von der Kinetischen Theorie der Wärme, und schliesst ab mit dem Ersten und Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Das Lehrbuch ist entstanden aus propädeutischen Vorlesungen an die Physik- und Mathematikstudenten im 2. und 3. Studiensemester und an Ingenieurstudenten im 1. und 2., bzw. 3. und 4. Semester. Jeder der beiden Bände enthält das Material zur Gestaltung einer einsemestrigen Lehrveranstaltung mit vier Wochenstunden Vorlesung und typisch zwei Stun-

den Übungen. Der Lehrgang Klassische Physik ist *modular* aufgebaut, d.h. ganze Kapitel (oder Teile davon) können weggelassen werden, ohne den schrittweisen Aufbau der Vorlesung zu gefährden. (Dies bedingt gewisse Wiederholungen im Text des Buches.) Dadurch hat der Dozent grosse Variationsmöglichkeiten in der Gestaltung einer Vorlesung. Handelt es sich beispielsweise um Ingenieurstudenten oder Naturwissenschaftler (Nicht-Physiker) in den ersten Semestern, dann können mehrere Kapitel mit anspruchsvollerem Inhalt weggelassen werden. Eine "Minimalversion" des Lehrgangs umfasst die Kapitel 1, 3, 4 (ohne 4.5 und 4.6), 6, 7 aus Band I, sowie 9, 10 (ohne 10.6 und 10.9), 11, 13, 15 und 16 (ohne 16.5) aus Band II. Alle in Kleindruck verfassten Abschnitte könnten zusätzlich weggelassen werden. Es ist auch möglich, eine Vorlesung ohne Relativitätstheorie zu gestalten. In diesem Fall würde man – ausser Kapitel 8 (Band I) – folgende Abschnitte im zweiten Teil (Elektromagnetismus) weglassen: 10.6, 10.9 und 11.1.2. Auch für die Studierenden der Physik und Mathematik ist der gesamte Lehrgang stoffmässig zu umfangreich, als dass er in zwei Semestern vollständig behandelt werden könnte. Für diese Gruppe ist das Kapitel 2 (Symmetrieeigenschaften) wichtig, das u.a. als Grundlage zur Relativitätstheorie dient. Zusätzlich zur Minimalversion könnte man mindestens teilweise die Kapitel 5 (Mechanik deformierbarer Medien), 8 (Spezielle Relativitätstheorie) und 14 (Kinetische Theorie der Wärme) behandeln.

Alle Personen, die im Vorwort des ersten Bandes namentlich oder als Gruppe erwähnt worden sind, haben ebenfalls entscheidend zur Entstehung des zweiten Bandes beigetragen. Meinem Freund und langjährigen Mitarbeiter, Dr. Pieter F.A. Goudsmit, bin ich zu besonderem Dank verpflichtet. Er hat wiederum den Text kritisch gelesen und interessante Verbesserungen vorgeschlagen. Eine Reihe der im Text aufgeführten Übungsaufgaben stammen von ihm. Dr. Markus Simonius ist einigen meiner Vorlesungen aufmerksam und kritisch gefolgt; Verbesserungsvorschläge von ihm sind in den Text des zweiten Bandes eingeflossen. Die aus dem Bestand des Physikdepartements stammenden Demonstrationsexperimente sind ein zentrales Element des Lehrgangs. Diese Experimente werden z.Zt. von Rolf Epprecht, Rolf Kägi und Stefan Burri unterhalten und laufend erneuert. Rolf Epprecht bin ich besonders dankbar für die Dokumentation einzelner, im Text beschriebener Experimente, sowie für speziell angefertigte Fotografien. Einige in den letzten Jahren entstandene, sehr schöne Demonstrationsexperimente stammen von meinem Kollegen Fritz Heinrich.

Frau Rosa Bächli hat das Manuskript in druckfertiger Form verfasst, den "Layout" dazu entworfen und alle Arbeitsabläufe koordiniert; ohne sie wären die zwei Bände der Klassischen Physik kaum geschrieben worden. Die 297 Figuren im Text des zweiten Bandes verdanke ich wiederum dem Zeichnerinnenteam, Frau I. Kušar und Frau D. Kohout.

Zahlreiche Diskussionen mit meinen Kollegen Jörg Bilgram, Jean-Pierre Blaser, Hans-Jürg Gerber, Klaus Hepp, Werner Känzig, Fritz Kneubühl, Walter Kündig, Bruno Lüthi,

Geoffrey Sewell, Peter Wachter, PD Dr. Jerzy Sromicki und Dr. Beat Jeckelmann haben zur Gestaltung der Klassischen Physik beigetragen. Dr. Th. Hintermann hat als Lektor das Projekt begleitet.

All diesen Personen, einschliesslich denen, die im Vorwort des ersten Bandes erwähnt sind, gilt mein herzlichster Dank.

In den Arbeiten zu diesem Lehrbuch habe ich mich stets von der *Albert Einstein* zugeschriebenen Maxime leiten lassen:

“Man soll alles so einfach wie möglich erklären – aber nicht einfacher.”

Es ist am Leser zu beurteilen, inwieweit dies gelungen ist. Der Autor interessiert sich für Ihre Meinung.

Hans Jörg Leisi

Oberehrendingen, im März 1998

Inhaltsverzeichnis

2. Teil: Elektromagnetismus	1
9 Elektrostatik	6
9.1 Die elektrische Ladung und das Coulombsche Gesetz	6
9.2 Der Begriff des elektrischen Feldes	12
9.3 Das Gauss'sche Gesetz – erste Eigenschaft des \vec{E} -Feldes	16
9.4 Elektrische Leiter (A)	28
9.5 Das elektrostatische Potential – zweite Eigenschaft des \vec{E} -Feldes	35
9.6 Die Poisson- und die Laplace-Gleichung	45
9.7 Der Kondensator (A)	56
9.8 Die Energie des elektrischen Feldes	61
9.9 Elektrische Eigenschaften der Materie (A)	71
9.9.1 Dielektrika	72
9.9.2 Phänomenologie elektrischer Systeme	80
9.10 Die Grundgleichungen der Elektrostatik	84
10 Elektrische Ströme	87
10.1 Der Strombegriff und die Kontinuitätsgleichung	87
10.2 Das Ohmsche Gesetz (A)	96
10.3 Elektromotorische Kraft und Joulesche Wärme	116
10.4 RC-Stromkreise (A)	121
10.5 Der Begriff des Magnetfeldes – die Lorentzkraft	126
10.6 Berechnung der magnetischen Kraft	139
10.7 Die Eigenschaften des \vec{B} -Feldes	145
10.7.1 Das Ampèresche Durchflutungsgesetz	145
10.7.2 Quellenfreiheit	155
10.7.3 \vec{B} -Feld einer beliebigen Stromverteilung	158
10.8 Der Hall-Effekt	168
10.9 Die Lorentztransformation der Felder \vec{E} , \vec{B}	175
11 Zeitlich veränderliche Felder	183
11.1 Das Induktionsgesetz von Faraday	183
11.1.1 Bewegte Leiterschleife im stationären \vec{B} -Feld	183
11.1.2 Ruhende Leiterschleife – zeitabhängiges \vec{B} -Feld	191

INHALTSVERZEICHNIS

11.1.3	Das universelle Induktionsgesetz	193
11.1.4	Anwendungen	196
11.2	Die Energie des Magnetfeldes	218
11.3	Magnetische Eigenschaften der Materie (A)	229
11.3.1	Der Grundversuch	230
11.3.2	Der Satz von Larmor	232
11.3.3	Diamagnetismus	237
11.3.4	Magnetisierung	240
11.3.5	Spin und magnetisches Moment des Elektrons	242
11.3.6	Paramagnetismus	243
11.3.7	Ferromagnetismus	244
11.4	Die Maxwellschen Gleichungen (1864)	251
12	Elektromagnetische Wellen	256
12.1	Die Wellengleichung im Vakuum	256
12.2	Elektromagnetische Wellen im Doppelleitersystem	259
12.3	Der Energiefluss (Pointing-Vektor)	276
12.4	Elektromagnetische Wellen im Raum	278
3.	Teil: Wärme	293
13	Vielteilchensysteme – Begriffe	296
13.1	Die Teilchen der Materie sind in Bewegung	297
13.2	Thermodynamischer Gleichgewichtszustand	299
13.3	Temperatur	300
13.4	Wärme	302
13.5	Das ideale Gas	306
13.6	Irreversible und reversible Zustandsänderungen	310
14	Kinetische Theorie der Wärme	319
14.1	Der Gasdruck	319
14.2	Die Temperatur	324
14.3	Innere Energie und Äquipartition	328
14.3.1	Kinetische Energie	329
14.3.2	Potentielle Energie	331
14.3.3	Spezifische Wärmen	335
14.4	Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle	341
14.5	Maxwell-Boltzmannsches Verteilungsgesetz der Energie	348

15 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	365
15.1 Die Energieerhaltung	365
15.2 Anwendungen zum idealen Gas	370
15.3 Reale Gase und Phasenumwandlungen	377
15.3.1 Experiment	377
15.3.2 Theorie	383
15.4 Der Joule-Thomson-Effekt und die Gasverflüssigung (A)	391
16 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	399
16.1 Der Carnotsche Kreisprozess	400
16.2 Formulierungen des zweiten Hauptsatzes – Anwendungen	405
16.3 Wärmemaschinen (A)	416
16.3.1 Die Wärmekraftmaschine von Stirling	417
16.3.2 Thermoelektrische Systeme	424
16.4 Die Entropie im abgeschlossenen System – irreversible Prozesse	429
16.5 Entropie und Wahrscheinlichkeit – der Zeitpfeil	439
Lösungen der Aufgaben	447
A. Internationales Einheitensystem und physikalische Konstanten	461
Sachverzeichnis	465