

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Rudolf Langkau Wolfgang Scobel
Gunnar Lindström

Physik kompakt 2

Elektrodynamik
und Elektromagnetische Wellen

Zweite Auflage
Mit 226 Abbildungen



Springer

Professor Dr. Rudolf Langkau
Professor Dr. Wolfgang Scobel
Professor Dr. Dr. h.c. Gunnar Lindström

Universität Hamburg
Institut für Experimentalphysik
Luruper Chaussee 149
22761 Hamburg, Deutschland
e-mail: wolfgang.scobel@desy.de
gunnar.lindstroem@desy.de

Die erste Auflage erschien in zwei Teilbänden in dem 6teiligen Werk *Physik kompakt* in der Reihe: Vieweg Studium – Grundkurs Physik, herausgegeben von Hanns Ruder, bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme:

Physik kompakt. –
Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Tokio : Springer
(Springer-Lehrbuch)

Bd. 2. Elektrodynamik und elektromagnetische Wellen / Rudolf Langkau ... - 2. Aufl. – 2002

ISBN 978-3-540-43140-4 ISBN 978-3-642-56016-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-56016-3

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 jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 2002

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.

Datenkonvertierung von Fa. LE-TeX, Leipzig

Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

SPIN: 10860371 56/3141/ba - 5 4 3 2 1 0

Allgemeines Vorwort

Die vorliegende Einführung in die Experimentalphysik entstand aus den Kursvorlesungen Physik I-III an der Universität Hamburg, die sich an Studierende der Physik, Geowissenschaften und Mathematik mit dem Studienziel Diplom oder Höheres Lehramt richten und in den ersten drei Studiensemestern gehört werden sollen. Diese Vorlesungen wurden von den drei Autoren über mehr als zwei Jahrzehnte regelmäßig gehalten und fortlaufend den Bedürfnissen dieses Hörerkreises angepasst. Der Stoff wurde in Vorlesungen von 2×2 Semesterwochenstunden angeboten; die typischerweise ca. 10 Demonstrationsversuche je Doppelstunde dienten dem qualitativen Verständnis der Phänomene. Die Studierenden erhielten vorlesungsbegleitende Skripten, die die Autoren aufeinander abstimmten, ihnen aber ansonsten ihre individuellen Stile beließen. Mathematische Herleitungen wurden nur dann geboten, wenn sie kurz und prägnant waren; ansonsten haben wir für längere Herleitungen auf die Skripten verwiesen.

Mit dem Abschluss der Lehrtätigkeiten von zwei der drei Autoren (G.Li., R.La.) wurde auch ein gewisser Abschluss in der Entwicklung der Skripten erreicht. Wir haben diesen Zeitpunkt zum Anlass genommen, die Skripten noch einmal zu überarbeiten und textlich etwas zu erweitern, so dass sie sich auch für eine Veröffentlichung in kompakter Buchform eignen, wobei jedoch der ursprüngliche Charakter nicht geleugnet werden kann und soll. Die Aufteilung des Stoffes erfolgt pragmatisch in jeweils einem Band pro Semester mit der in Hamburg - und an den meisten anderen deutschen Universitäten - üblichen Aufteilung des Stoffes.

Der Titel der drei Bände, **Physik kompakt**, ist Programm. Es ist nicht unsere Absicht, in Konkurrenz mit bewährten, umfangreicheren Lehrbüchern der Experimentalphysik zu treten. Vielmehr sollen die Studierenden ein Buch an die Hand bekommen, das sie durch seine kompakte Form und vorlesungsorientierte Stoffauswahl ermutigt, es vorlesungsbegleitend durchzuarbeiten. Das Mitschreiben in der Vorlesung kann dadurch erheblich reduziert werden, so dass dem mündlichen Vortrag und der Vermittlung von Phänomenen in Demonstrationsversuchen größere Aufmerksamkeit zuteil werden.

Die Autoren danken allen Studierenden und Kollegen für Fehlerhinweise, Anregungen und Kommentare. Unser Lektor, Herr Dr. Kölsch, hat uns unterstützt und ermutigt, die Skripten in der vorgelegten Form zu veröffentlichen.

Frau M. Berghaus danken wir für die Ausfertigung vieler Skizzen und die Übertragung der Skripten in das L^AT_EX-Layout. Allen zukünftigen Benutzern der **Physik kompakt** sind wir dankbar für Verbesserungshinweise.

Hamburg, im September 2001

R. Langkau
G. Lindström
W. Scobel

Vorwort Band 2

Der vorliegende Band 2: **Elektrodynamik und Elektromagnetische Wellen** der Serie **Physik kompakt** enthält die Einführung in die Grundlagen der Wechselwirkungen am Beispiel der Gravitation, der Elektrizitätslehre und des Magnetismus, wie sie üblicherweise im zweiten Semester angeboten werden. Die Grundlagen der elektrischen Leitung und die Betrachtungen zu den Erscheinungen des Elektromagnetismus im stoffgefüllten Raum sowie die Einführung der zeitabhängigen elektromagnetischen Felder bereiten auf Vorlesungen des Hauptstudiums vor. Die anschließende Darstellung der Wellenlehre führt ein in die Wellenoptik und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum. In praktischen Beispielen werden die geometrische Strahlenoptik und Mehrstrahlinterferenzen in FRAUNHOFERScher Geometrie erörtert.

Zur Unterstützung der formalen Behandlung dieses Stoffes werden in ergänzenden Abschnitten Grundlagen der Vektoranalysis und der Wellengleichungen behandelt.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Elektrodynamik

1	Gravitationswechselwirkung	3
1.1	Gravitationsgesetz	3
1.2	Gravitationskraft und potentielle Energie	4
1.3	Gravitationspotential und Gravitationsfeldstärke	7
1.4	Ergänzung: Planetenbahnen und Rutherfordstreuung	15
2	Elektrische Wechselwirkung	29
2.1	Elektrische Ladung und COULOMBSches Gesetz	29
2.2	Elektrisches Feld, Feldstärke und Potential	32
2.3	Ergänzung: Potential einer Ladungswolke in Multipol- Darstellung	45
2.3.1	Mathematische Grundlagen	45
2.3.2	Wolke aus Punktladungen	47
2.3.3	Ein einfaches Beispiel	50
2.3.4	Kontinuierliche Ladungswolke	56
2.3.5	Axialsymmetrische Ladungswolke	58
2.3.6	Ein Beispiel: Homogen geladenes Rotationsellipsoid ...	62
2.3.7	Tensoren; Erinnerung an ein bekanntes Beispiel aus der Mechanik	64
2.4	Ergänzung: Wechselwirkung zwischen Dipolen	66
2.4.1	Feld eines elektrischen Dipols	66
2.4.2	Dipolfeld in großer Entfernung ($r \gg \ell$, Fernfeld)	68
2.4.3	Dipol mit dem Moment \mathbf{p} im Feld eines Dipols mit dem Moment \mathbf{p}_0	70
2.5	Quantelung der Ladung, Ladungserhaltung, atomarer Aufbau der Materie	76
3	Magnetische Wechselwirkung	83
3.1	Magnetische Kraftwirkung auf elektrische Ladungen	85
3.2	Ergänzung: Potential für das Magnetfeld	96
3.2.1	Mathematischer Rückblick	96
3.2.2	Rückblick auf die Elektrostatik	96
3.2.3	Magnetisches Feld	97

3.2.4	Allgemeines Beispiel	98
3.2.5	Konkretes Beispiel und lehrreicher Sonderfall	99
3.3	Das Magnetfeld bewegter Ladungen (nicht relativistisch)	102
3.4	Magnetische Wechselwirkung zwischen bewegten Ladungen . .	110
4	Elektrische Leitung	115
4.1	Strom als Ladungstransport; Ohmsches Gesetz; elektrische Leitfähigkeit	115
4.2	Mechanismus der elektrischen Leitung	120
4.3	Elektrische Netzwerke	130
4.4	Ergänzung: Elektrische und magnetische Felder um einen unendlich langen, geraden und stromdurchflossenen Leiter . . .	134
4.4.1	Feld einer Linienladung	134
4.4.2	Feld einer Linienladung aus der Sicht eines bewegten Beobachters	135
4.4.3	Feld eines geraden und stromdurchflossenen (Metall-) Drahtes aus der Sicht eines ruhenden Beobachters	137
4.4.4	Feld eines geraden und stromdurchflossenen Drahtes aus der Sicht eines bewegten Beobachters	138
4.4.5	Kräfte auf eine Ladung	141
5	Materie im statischen elektrischen und magnetischen Feld	145
5.1	Gaußscher Satz des elektrischen Feldes	145
5.2	Materie im elektrischen Feld	154
5.3	Ergänzung: Potential und Feldstärke polarisierter Materie . .	170
5.3.1	Homogen polarisierte, unendlich ausgedehnte Platte . .	175
5.3.2	Ursprünglich unpolarisierte, unendlich ausgedehnte Platte im äußeren homogenen Feld	176
5.3.3	Mit einem Dielektrikum ausgefüllter Plattenkondensator	177
5.3.4	Geschichtete, unendlich ausgedehnte Platte im homogenen Feld	178
5.3.5	Homogen polarisierte Kugel	179
5.3.6	Ursprünglich unpolarisierte Kugel im äußeren homogenen Feld	181
5.4	Amperescher Satz des Magnetfeldes	184
5.5	Materie im Magnetfeld	188
5.6	Zusammenfassung der Gesetzmäßigkeiten des statischen elektrischen und magnetischen Feldes	195
6	Zeitabhängige elektromagnetische Felder	197
6.1	Elektromagnetische Induktion, FARADAY-HENRY-Satz	197
6.2	AMPERE-MAXWELL-Satz	210
6.3	MAXWELL-Gleichungen	213
6.4	Ergänzung: Hochfrequente Wechselströme in Drahnten	214

6.5	Ergänzung: Selbsterregte Oszillatoren für elektrische Schwingungen	221
7	Anhang: Notizen und simple Beispiele zur Vektoranalysis.	231
7.1	Radialkraftfeld	231
7.2	Temperaturverteilung	231
7.3	Druckverteilung	232
7.4	Zentralkraftfeld	232
7.5	Kraftfeld	233
7.6	Rotation eines Vektorfeldes. Einfache Beispiele aus der Mechanik	234
7.7	Zum Begriff der “Divergenz” eines Vektorfeldes	237
7.8	Welche Zentralkraftfelder sind quellenfrei?	239

Teil II Elektromagnetische Wellen

1	Harmonische Wellen im Raum	243
1.1	Grundlagen und Definitionen	243
1.2	Das HUYGENS'sche Prinzip der Wellenausbreitung	245
1.3	Reflexion und Brechung	245
1.4	Beugung	248
1.4.1	Vorbemerkung	248
1.4.2	Beugung am Spalt	249
1.4.3	Beugung an einer Kreisblende	251
1.5	Interferenz	252
1.5.1	Vorbemerkung	252
1.5.2	Überlagerung zweier Kugelwellen	253
1.5.3	Überlagerung mehrerer ebener Wellen	256
1.5.4	Beugung am Gitter	259
1.6	Ergänzung: Das BABINETSche Theorem bei der Beugung am Gitter	262
1.6.1	Vorbemerkungen zur Beugung an Gittern	262
1.6.2	Gesetzmäßigkeiten der Beugung an Gittern	263
1.6.3	Das BABINETSche Theorem	266
1.6.4	Anwendung auf die Gitterbeugung	268
1.7	Ergänzung: Beugung und FOURIER-Transformation	271
1.7.1	Mathematische Vorbemerkungen	271
1.7.2	Ein erstes mathematisches Beispiel	272
1.7.3	Beugung am Spalt	273
1.7.4	Ein zweites mathematische Beispiel	275
1.7.5	Beugung am Gitter	278
1.7.6	Beugung am Sinus-Gitter	279
1.7.7	Beugung am Grau-Keil	284
1.7.8	Ein wichtiger Sonderfall der Fourier-Transformation ..	287

1.8	Wellenausbreitung in dispersiven Medien	290
1.9	Ergänzung: Zur Dispersion von Wellen	292
1.9.1	Allgemeines	292
1.9.2	Wellenausbreitung ohne Dispersion	293
1.9.3	Wellenausbreitung mit Dispersion an zwei Beispielen mechanischer Wellen	293
2	Elektromagnetische Wellen	301
2.1	Existenz und grundsätzliche Eigenschaften	301
2.2	Energietransport durch elektromagnetische Wellen	304
2.3	Reflexion und Transmission elektromagnetischer Wellen	308
2.4	Elektromagnetische Wellen in homogenen, isotropen, neutralen und leitenden Substanzen	321
2.5	Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Metallen ...	331
2.6	Übertragung von Signalen durch Kabel	335
2.7	Doppler-Effekt und Aberration bei elektromagnetischen Wellen	348
2.8	Entstehung elektromagnetischer Wellen	355
2.8.1	Potentiale zeitabhängiger Raumladungs- und Strom-Dichteverteilungen	355
2.8.2	Elektromagnetische Wellen von bewegten Punktladungen	359
2.8.3	Spezialfälle	363
2.8.4	Elektromagnetische Wellen von einem oszillierenden Dipol	376
3	Optik	401
3.1	Einleitung	401
3.2	Geometrische Optik	404
3.2.1	Vorbemerkung	404
3.2.2	Spiegel	404
3.2.3	Brechung an planparallelen Platten	409
3.2.4	Brechung an Prismen	409
3.2.5	Brechung an sphärischen Linsen	411
3.2.6	Ergänzung: Die sphärische Aberration für einen einfachen Fall	416
3.2.7	Optische Instrumente	424
3.3	Interferenzerscheinungen	428
3.3.1	Erzeugung kohärenter Lichtbündel durch Brechung am Fresnelschen Biprisma	428
3.3.2	Erzeugung kohärenter Lichtbündel durch Reflexion (Lloydscher Spiegelversuch)	430
3.3.3	Erzeugung kohärenter Lichtbündel durch Reflexion einer planparallelen Platte	430

3.4 Einfluss der Beugung auf das Auflösungsvermögen abbildender optischer Instrumente	432
3.5 Holographie	435
3.6 Polarisationserscheinungen.....	436
3.6.1 Streuung und Polarisation	436
3.6.2 Anisotropie und Polarisation	437
3.6.3 Optische Aktivität und Polarisation	440
3.6.4 Durchlässigkeit von Polarisatoren und Analysatoren ..	440
Sachwortverzeichnis	443