
Springer-Lehrbuch

Experimentalphysik

Band 1

Mechanik und Wärme

4. Auflage

ISBN 3-540-26034-X

Band 2

Elektrizität und Optik

4. Auflage

ISBN 3-540-33794-6

Band 3

Atome, Moleküle und Festkörper

3. Auflage

ISBN 3-540-21473-9

Band 4

Kern-, Teilchen- und Astrophysik

2. Auflage

ISBN 3-540-21451-8

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 2

Elektrizität und Optik

Vierte, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 677, meist zweifarbigen Abbildungen,
11 Farbtafeln, 19 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 145 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen

 Springer

Professor Dr. Wolfgang Demtröder

Universität Kaiserslautern

Fachbereich Physik

67663 Kaiserslautern, Deutschland

e-mail: demtroed@rhrk.uni-kl.de oder demtroed@physik.uni-kl.de

URL: http://www.physik.uni-kl.de/w_demtro/w_demtro.html

ISBN 3-540-33794-6 4. Auflage
Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-20210-2 3. Auflage
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

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.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.com

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995, 1999, 2004, 2006

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.

Lektorat, Satz, Illustrationen und Umbruch: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

Umschlaggestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 56/3141/YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur vierten Auflage

In der 4. Auflage der Experimentalphysik 2 wurden eine Reihe von Fehlern oder Unklarheiten beseitigt, mehrere Abbildungen verbessert und einige Abschnitte neu geschrieben, um auch neuere Entwicklungen in der Optik, wie z. B. die Realisierung von Medien mit negativem Brechungsindex oder Fortschritte bei optischen Teleskopen, zu berücksichtigen.

Ich danke allen Lesern, die mit ihren Vorschlägen und Korrekturen dazu geholfen haben, die Darstellung dieses Lehrbuches zu verbessern. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Peter Staub, TU Wien, der sich intensiv mit der 3. Auflage befaßt und viele Anregungen für Korrekturen gegeben hat. Auch meinem Kollegen, Herrn Prof. Klaas Bergmann, TU Kaiserslautern, danke ich für manche Hinweise.

Der Autor hofft, daß dieses Lehrbuch in seiner 4. Auflage auch weiterhin den Spaß an den Grundlagen der Elektrizität und Optik wecken und das Verständnis dieser wichtigen Gebiete vertiefen kann und er freut sich auf die aktive Mitarbeit seiner Leser. Er wird sich bemühen, alle Hinweise und Anregungen prompt zu beantworten.

Kaiserslautern,
im Mai 2006

Wolfgang Demtröder

Vorwort zur dritten Auflage

Die dritte Auflage der Experimentalphysik 2 hat profitiert von vielen Zuschriften der Leser mit Kommentaren, Korrekturen und Verbesserungsvorschlägen. Diese haben zu einer gründlichen Überarbeitung des Stoffes und zur Umstellung einiger Abschnitte geführt. So wurde z. B. der Abschnitt über Lichtstreuung aus Kap. 8 in das Kap. 10 integriert, wo die Behandlung der Interferenz und der kohärenten Streuung nun kombiniert werden konnte, sodass nicht wie in der 2. Auflage eine Reihe identischer Gleichungen in zwei verschiedenen Abschnitten aufgeführt und hergeleitet werden müssen. Im Kap. 9 wurden optische Erscheinungen in der Atmosphäre etwas ausführlicher dargestellt, weil sie spektakuläre physikalische Phänomene darstellen und weil ich immer wieder feststelle, dass damit zusammenhängende Fragen über ihre Erklärung häufig von Laien gestellt werden. Ein angehender Physiker sollte solche Fragen kompetent beantworten können. Im letzten Kapitel über neuere Entwicklungen in der Optik wurden einige Abschnitte überarbeitet, erweitert und auf den heutigen Stand gebracht. Auch das Literaturverzeichnis wurde um einige kürzlich erschienene Titel erweitert.

Allen, die bei dieser 3. Auflage durch konstruktive Kritik geholfen haben, möchte ich sehr herzlich danken. Besonders erwähnen möchte ich hier Herrn Dr. Staub, TU Wien, der viele Korrekturvorschläge gemacht hat, und meinen Kollegen Herrn Prof. Bergmann, Kaiserslautern, der nach seiner Vorlesung, bei der dieses Buch als Grundlage diente, vor allem durch seine Verbesserungsvorschläge für eine Reihe von Abbildungen und für eine klarere Darstellung mancher Abschnitte viel zu einer Verbesserung der 3. Auflage beigetragen hat.

Mein Dank gebührt auch der Firma LE- \TeX und ihren Mitarbeitern, welche die Satzgestaltung übernommen haben, und trotz der schwer leserlichen handschriftlichen Anmerkungen des Autors alle Umstellungen, Einfügungen und Korrekturen gut ausgeführt haben. Auch den Mitarbeitern des Springer-Verlages, Herrn Dr. Schneider, Frau Friedhilde Meyer und Frau Ute Heuser danke ich herzlich für die allzeit hervorragende Zusammenarbeit.

Ich hoffe, dass auch diese neue Auflage eine positive Aufnahme findet. Wieder möchte ich alle Leser um ihre Kritik und mögliche Verbesserungsvorschläge bitten, die dann in einer späteren neuen Auflage berücksichtigt werden können.

Kaiserslautern,
im Januar 2004

Wolfgang Demtröder

Vorwort zur ersten Auflage

Der hiermit vorgelegte zweite Band des vierbändigen Lehrbuchs der Experimentalphysik, der die Elektrizitätslehre und die Optik behandelt, möchte für die Studenten des zweiten Semesters eine Brücke bauen zwischen den in der Schule bereits erworbenen Kenntnissen auf diesen Gebieten und dem in späteren fortgeschrittenen Physikvorlesungen erwarteten höheren Niveau der Darstellung.

Wie im ersten Band steht auch hier das Experiment als Prüfstein jedes theoretischen Modells der Wirklichkeit im Mittelpunkt. Ausgehend von experimentellen Ergebnissen soll deutlich gemacht werden, wie diese erklärt werden können und zu einem in sich konsistenten Modell führen, das viele Einzelbeobachtungen in einen größeren Zusammenhang bringt und damit zu einer physikalischen Theorie wird. Die mathematische Beschreibung wird, so weit wie möglich, nachvollziehbar dargestellt. In Fällen, wo dies aus Platzgründen nicht realisierbar war oder den Rahmen der Darstellung sprengen würde, wird auf entsprechende Literatur verwiesen, wo der interessierte Student nähere experimentelle Details oder eine genauere mathematische Herleitung finden kann.

Das Buch beginnt, wie allgemein üblich, mit der Elektrostatik, behandelt dann den stationären elektrischen Strom und die von ihm erzeugten Magnetfelder. Dabei werden sowohl die verschiedenen Leitungsmechanismen in fester, flüssiger und gasförmiger Materie diskutiert als auch die Wirkungen des elektrischen Stromes und die darauf basierenden Messmethoden. Aufbauend auf den in Band 1 erläuterten Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie wird gezeigt, wie in einer relativistischen, d. h. Lorentz-invarianten Darstellung elektrisches und magnetisches Feld miteinander verknüpft sind.

Zeitlich veränderliche elektrische Felder und Ströme und die daraus resultierenden Induktionserscheinungen bilden den Inhalt des vierten Kapitels, in dem auch die Zusammenfassung all dieser Phänomene durch die Maxwell-Gleichungen diskutiert wird.

Um die Bedeutung der bisher gewonnenen Kenntnisse für technische Anwendungen zu unterstreichen, befasst sich Kap. 5 mit elektrischen Generatoren und Motoren, mit Transformatoren und Gleichrichtung von Wechselstrom und Drehstrom, mit Wechselstromkreisen, elektrischen Filtern und Elektronenröhren.

Von besonderer Bedeutung für technische Anwendungen, aber auch für ein grundlegendes Verständnis schnell veränderlicher elektromagnetischer Felder und Wellen sind elektromagnetische Schwingkreise, die in Kap. 6 behandelt werden. Am Beispiel der Abstrahlung des Hertzschen Dipols wird die Entstehung elektromagnetischer Wellen ausführlich dargestellt, deren Ausbreitung im freien Raum und in begrenzten Raumgebieten (Wellenleiter und Resonatoren) den Inhalt von Kap. 7. bil-

det. Experimentelle Methoden zur Messung der Lichtgeschwindigkeit schließen das Kapitel ab.

Kapitel 8, das die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Materie behandelt, bildet den Übergang zur Optik, weil viele der hier diskutierten Phänomene besonders für Lichtwellen von besonderer Bedeutung sind, obwohl sie im gesamten Frequenzbereich auftreten.

Da die Optik eine zunehmende Bedeutung für wissenschaftliche und technische Anwendungen erlangt, wird sie hier ausführlicher als in vielen anderen Lehrbüchern behandelt. Nach Meinung des Autors stehen wir vor einer „optischen Revolution“, die wahrscheinlich eine ähnliche Bedeutung haben wird wie in den letzten Jahrzehnten die elektronische Revolution.

Für die praktische Optik hat sich für viele Anwendungen die Näherung der geometrischen Optik bewährt, die im Kap. 9 als „Lichtstrahlen-Abbildung“ erklärt wird, wobei auch das Verfahren der Matrizenoptik kurz erläutert wird.

Interferenz und Beugung werden immer als wichtige Bestätigungen für das Wellenmodell des Lichtes angesehen. In Kap. 10 werden die Grundlagen dieser Erscheinungen erläutert, der Begriff der Kohärenz erklärt und experimentelle Anordnungen, nämlich die verschiedenen Typen von Interferometern vorgestellt, die auf der Interferenz von verschiedenen kohärenten Teilstrahlen basieren. Um ein etwas genaueres Verständnis der Beugungserscheinungen zu erreichen, wird nicht nur die Beugung von parallelen Lichtbündeln (Fraunhofer-Beugung) sondern auch die in der Praxis viel häufiger auftretende Fresnel-Beugung behandelt.

Kapitel 11 ist der Darstellung optischer Geräte und moderner optischer Verfahren, wie der Holographie und der adaptiven Optik gewidmet.

Im letzten Kapitel wird dann die thermische Strahlung heißer Körper behandelt und insbesondere der Begriff des schwarzen Strahlers erläutert und das Plancksche Strahlungsgesetz diskutiert, das zum Begriff des Photons führte, also den Teilchencharakter des Lichtes wieder deutlich macht, aber vor allem zu einer konsistenten Symbiose von Wellen- und Teilchenmodell führt. Dieser Aspekt der nicht widersprüchlichen, sondern komplementären Darstellung von Wellen- und Teilchenbild wird dann im dritten Band auf die Beschreibung von Materieteilchen ausgedehnt und bildet die physikalische Grundlage für die Quantentheorie.

Die Darstellung der verschiedenen Gebiete in diesem Buch wird durch viele Beispiele illustriert. Am Ende jedes Kapitels gibt es eine Reihe von Übungsaufgaben, die dem Leser die Möglichkeit geben, seine Kenntnisse selber zu testen. Er kann dann seine Lösungen mit den im Anhang angegebenen Lösungen vergleichen.

Vielen Leuten, ohne deren Hilfe das Buch nicht entstanden wäre, schulde ich Dank. Hier ist zuerst Herr G. Imsieke zu nennen, der durch sorgfältiges Korrekturlesen, Hinweise auf Fehler und viele Verbesserungsvorschläge sehr zur Optimierung der Darstellung beigetragen hat und Herr T. Schmidt, der die Textfassung übernommen hat. Ich danke Frau A. Kübler, Frau B. S. Hellbarth-Busch und Herrn Dr. H. J. Kölsch vom Springer-Verlag für die gute Zusammenarbeit und für ihre kompetente und geduldige Unterstützung des Autors, der oft die vorgegebenen Termine nicht einhalten konnte. Frau I. Wollscheid, die einen Teil der Zeichnungen angefertigt hat sowie Frau S. Heider, die das Manuskript geschrieben hat, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt. Auch meinen Mitarbeitern, Herrn Eckel und Herrn Krämer, die bei den Computerausdrucken der Abbildungen behilflich waren, gebührt mein Dank.

Besonderen Dank hat meine liebe Frau verdient, die mit großem Verständnis die Einschränkungen der für die Familie zur Verfügung stehenden Zeit hingenommen hat und die mir durch ihre Unterstützung die Zeit zum Schreiben ermöglicht hat.

Kein Lehrbuch ist vollkommen. Der Autor freut sich über jeden kritischen Kommentar, über Hinweise auf mögliche Fehler und über Verbesserungsvorschläge. Nachdem der erste Band eine überwiegend positive Aufnahme gefunden hat, hoffe ich, dass auch der vorliegende zweite Band dazu beitragen kann, die Freude an der Physik zu wecken und zu vertiefen und die fortwährenden Bemühungen aller Kollegen um eine Optimierung der Lehre zu unterstützen.

Kaiserslautern,
im März 1995

Wolfgang Demtröder

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrostatik

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1 | Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz | 1 |
| 1.2 | Das elektrische Feld | 5 |
| 1.2.1 | Elektrische Feldstärke | 5 |
| 1.2.2 | Elektrischer Fluss; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes | 7 |
| 1.3 | Elektrostatistisches Potential | 8 |
| 1.3.1 | Potential und Spannung | 9 |
| 1.3.2 | Potentialgleichung | 10 |
| 1.3.3 | Äquipotentialflächen | 11 |
| 1.3.4 | Spezielle Ladungsverteilungen | 11 |
| 1.4 | Multipole | 13 |
| 1.4.1 | Der elektrische Dipol | 14 |
| 1.4.2 | Der elektrische Quadrupol | 16 |
| 1.4.3 | Multipolentwicklung | 16 |
| 1.5 | Leiter im elektrischen Feld | 18 |
| 1.5.1 | Influenz | 18 |
| 1.5.2 | Kondensatoren | 19 |
| 1.6 | Die Energie des elektrischen Feldes | 22 |
| 1.7 | Dielektrika im elektrischen Feld | 23 |
| 1.7.1 | Dielektrische Polarisierung | 24 |
| 1.7.2 | Polarisationsladungen | 25 |
| 1.7.3 | Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie | 26 |
| 1.7.4 | Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum | 29 |
| 1.8 | Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten | 30 |
| 1.8.1 | Der Millikan-Versuch | 30 |
| 1.8.2 | Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern | 31 |
| 1.8.3 | Molekulare Dipolmomente | 32 |
| 1.9 | Elektrostatik in Natur und Technik | 35 |
| 1.9.1 | Reibungselektrizität und Kontaktpotential | 35 |
| 1.9.2 | Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre | 36 |
| 1.9.3 | Die Entstehung von Gewittern | 36 |
| 1.9.4 | Elektrostatische Staubfilter | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.9.5 | Elektrostatische Farbbeschichtung | 37 |
| 1.9.6 | Elektrostatische Kopierer und Drucker | 38 |
| | Zusammenfassung | 39 |
| | Übungsaufgaben | 40 |

2. Der elektrische Strom

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Strom als Ladungstransport | 43 |
| 2.2 | Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz | 45 |
| 2.2.1 | Driftgeschwindigkeit und Stromdichte | 45 |
| 2.2.2 | Das Ohmsche Gesetz | 47 |
| 2.2.3 | Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes ... | 48 |
| 2.2.4 | Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung | 50 |
| 2.3 | Stromleistung und Joulesche Wärme | 54 |
| 2.4 | Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln | 55 |
| 2.4.1 | Reihenschaltung von Widerständen | 56 |
| 2.4.2 | Parallelschaltung von Widerständen | 56 |
| 2.4.3 | Wheatstonesche Brückenschaltung | 56 |
| 2.5 | Messverfahren für elektrische Ströme | 57 |
| 2.5.1 | Strommessgeräte | 57 |
| 2.5.2 | Schaltung von Amperemetern | 58 |
| 2.5.3 | Strommessgeräte als Voltmeter | 59 |
| 2.6 | Ionenleitung in Flüssigkeiten | 59 |
| 2.7 | Stromtransport in Gasen; Gasentladungen | 61 |
| 2.7.1 | Ladungsträgerkonzentration | 61 |
| 2.7.2 | Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger | 62 |
| 2.7.3 | Strom-Spannungs-Kennlinie | 63 |
| 2.7.4 | Mechanismus von Gasentladungen | 64 |
| 2.7.5 | Verschiedene Typen von Gasentladungen | 67 |
| 2.8 | Stromquellen | 68 |
| 2.8.1 | Innenwiderstand einer Stromquelle | 69 |
| 2.8.2 | Galvanische Elemente | 69 |
| 2.8.3 | Akkumulatoren | 71 |
| 2.8.4 | Verschiedene Typen von Batterien | 71 |
| 2.8.5 | Chemische Brennstoffzellen | 73 |
| 2.9 | Thermische Stromquellen | 74 |
| 2.9.1 | Kontaktpotential | 74 |
| 2.9.2 | Der Seebeck-Effekt | 75 |
| 2.9.3 | Thermoelektrische Spannung | 75 |
| 2.9.4 | Peltier-Effekt | 77 |
| | Zusammenfassung | 78 |
| | Übungsaufgaben | 79 |

3. Statische Magnetfelder

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Permanentmagnete; Polstärke | 81 |
| 3.2 | Magnetfelder stationärer Ströme | 83 |
| 3.2.1 | Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung | 84 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2.2 | Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters | 85 |
| 3.2.3 | Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule | 86 |
| 3.2.4 | Das Vektorpotential | 86 |
| 3.2.5 | Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz | 87 |
| 3.2.6 | Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen | 88 |
| 3.3 | Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld | 92 |
| 3.3.1 | Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld | 94 |
| 3.3.2 | Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern | 94 |
| 3.3.3 | Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft | 95 |
| 3.3.4 | Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern | 96 |
| 3.3.5 | Hall-Effekt | 97 |
| 3.3.6 | Das Barlowsche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen | 98 |
| 3.4 | Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip | 99 |
| 3.4.1 | Das elektrische Feld einer bewegten Ladung | 99 |
| 3.4.2 | Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld | 101 |
| 3.4.3 | Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom | 102 |
| 3.4.4 | Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld | 104 |
| 3.5 | Materie im Magnetfeld | 105 |
| 3.5.1 | Magnetische Dipole | 105 |
| 3.5.2 | Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität | 107 |
| 3.5.3 | Diamagnetismus | 109 |
| 3.5.4 | Paramagnetismus | 110 |
| 3.5.5 | Ferromagnetismus | 110 |
| 3.5.6 | Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite | 114 |
| 3.5.7 | Feldgleichungen in Materie | 115 |
| 3.5.8 | Elektromagnete | 116 |
| 3.6 | Das Magnetfeld der Erde | 117 |
| | Zusammenfassung | 119 |
| | Übungsaufgaben | 120 |

4. Zeitlich veränderliche Felder

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | Faradaysches Induktionsgesetz | 123 |
| 4.2 | Lenzsche Regel | 126 |
| 4.2.1 | Durch Induktion angefachte Bewegung | 126 |
| 4.2.2 | Elektromagnetische Schleuder | 127 |
| 4.2.3 | Magnetische Levitation | 127 |
| 4.2.4 | Wirbelströme | 128 |
| 4.3 | Selbstinduktion und gegenseitige Induktion | 128 |
| 4.3.1 | Selbstinduktion | 128 |
| 4.3.2 | Gegenseitige Induktion | 132 |
| 4.4 | Die Energie des magnetischen Feldes | 133 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.5 | Der Verschiebungsstrom | 134 |
| 4.6 | Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale | 136 |
| | Zusammenfassung | 138 |
| | Übungsaufgaben | 138 |

5. Elektrotechnische Anwendungen

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Elektrische Generatoren und Motoren | 141 |
| 5.1.1 | Gleichstrommaschinen | 143 |
| 5.1.2 | Wechselstromgeneratoren | 146 |
| 5.2 | Wechselstrom | 146 |
| 5.3 | Mehrphasenstrom; Drehstrom | 148 |
| 5.4 | Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme | 151 |
| 5.4.1 | Wechselstromkreis mit Induktivität | 151 |
| 5.4.2 | Wechselstromkreis mit Kapazität | 151 |
| 5.4.3 | Allgemeiner Fall | 152 |
| 5.5 | Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter | 153 |
| 5.5.1 | Hochpass | 154 |
| 5.5.2 | Tiefpass | 155 |
| 5.5.3 | Frequenzfilter | 155 |
| 5.6 | Transformatoren | 156 |
| 5.6.1 | Unbelasteter Transformator | 157 |
| 5.6.2 | Belasteter Transformator | 158 |
| 5.6.3 | Anwendungsbeispiele | 159 |
| 5.7 | Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen | 160 |
| 5.8 | Gleichrichtung | 161 |
| 5.8.1 | Einweggleichrichtung | 161 |
| 5.8.2 | Zweiweggleichrichtung | 162 |
| 5.8.3 | Brückenschaltung | 162 |
| 5.8.4 | Kaskadenschaltung | 163 |
| 5.9 | Elektronenröhren | 164 |
| 5.9.1 | Vakuum-Dioden | 164 |
| 5.9.2 | Triode | 165 |
| | Zusammenfassung | 166 |
| | Übungsaufgaben | 166 |

6. Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1 | Der elektromagnetische Schwingkreis | 169 |
| 6.1.1 | Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen | 170 |
| 6.1.2 | Erzwungene Schwingungen | 171 |
| 6.2 | Gekoppelte Schwingkreise | 172 |
| 6.3 | Erzeugung ungedämpfter Schwingungen | 174 |
| 6.4 | Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol | 176 |
| 6.4.1 | Experimentelle Realisierung eines Senders | 177 |
| 6.4.2 | Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols .. | 178 |
| 6.5 | Die Abstrahlung des schwingenden Dipols | 183 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 6.5.1 | Die abgestrahlte Leistung | 183 |
| 6.5.2 | Strahlungsdämpfung | 184 |
| 6.5.3 | Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung | 185 |
| 6.5.4 | Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung | 186 |
| | Zusammenfassung | 188 |
| | Übungsaufgaben | 189 |
| 7. | Elektromagnetische Wellen im Vakuum  | |
| 7.1 | Die Wellengleichung | 191 |
| 7.2 | Ebene elektrische Wellen | 192 |
| 7.3 | Periodische Wellen | 193 |
| 7.4 | Polarisation elektromagnetischer Wellen | 194 |
| 7.4.1 | Linear polarisierte Wellen | 194 |
| 7.4.2 | Zirkular polarisierte Wellen | 194 |
| 7.4.3 | Elliptisch polarisierte Wellen | 195 |
| 7.4.4 | Unpolarisierte Wellen | 195 |
| 7.5 | Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen | 195 |
| 7.6 | Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen ... | 196 |
| 7.7 | Messung der Lichtgeschwindigkeit | 200 |
| 7.7.1 | Die astronomische Methode von Ole Rømer | 200 |
| 7.7.2 | Die Zahnradmethode von Fizeau | 201 |
| 7.7.3 | Phasenmethode | 201 |
| 7.7.4 | Bestimmung von c aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge | 202 |
| 7.8 | Stehende elektromagnetische Wellen | 202 |
| 7.8.1 | Eindimensionale stehende Wellen | 202 |
| 7.8.2 | Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren | 203 |
| 7.9 | Wellen in Wellenleitern und Kabeln | 206 |
| 7.9.1 | Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten ... | 206 |
| 7.9.2 | Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt | 208 |
| 7.9.3 | Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel | 211 |
| 7.9.4 | Beispiele für Wellenleiter | 213 |
| 7.10 | Das elektromagnetische Frequenzspektrum | 214 |
| | Zusammenfassung | 216 |
| | Übungsaufgaben | 217 |
| 8. | Elektromagnetische Wellen in Materie  | |
| 8.1 | Brechungsindex | 219 |
| 8.1.1 | Makroskopische Beschreibung | 220 |
| 8.1.2 | Mikroskopisches Modell | 220 |
| 8.2 | Absorption und Dispersion | 223 |
| 8.3 | Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie | 227 |
| 8.3.1 | Wellen in nichtleitenden Medien | 227 |
| 8.3.2 | Wellen in leitenden Medien | 228 |
| 8.3.3 | Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien ... | 230 |
| 8.4 | Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien | 231 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.4.1 | Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke | 232 |
| 8.4.2 | Reflexions- und Brechungsgesetz | 232 |
| 8.4.3 | Amplitude und Polarisation von reflektierten und gebrochenen Wellen | 233 |
| 8.4.4 | Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche | 234 |
| 8.4.5 | Brewsterwinkel | 236 |
| 8.4.6 | Totalreflexion | 237 |
| 8.4.7 | Änderung der Polarisation bei schrägem Lichteinfall | 238 |
| 8.4.8 | Phasenänderung bei der Reflexion | 239 |
| 8.4.9 | Reflexion an Metalloberflächen | 240 |
| 8.5 | Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung | 241 |
| 8.5.1 | Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien | 242 |
| 8.5.2 | Brechungsindex-Ellipsoid | 243 |
| 8.5.3 | Doppelbrechung | 246 |
| 8.6 | Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht | 247 |
| 8.6.1 | Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion | 247 |
| 8.6.2 | Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle | 248 |
| 8.6.3 | Doppelbrechende Polarisatoren | 248 |
| 8.6.4 | Polarisationsdreher | 250 |
| 8.6.5 | Optische Aktivität | 250 |
| 8.6.6 | Spannungsdoppelbrechung | 253 |
| 8.7 | Nichtlineare Optik | 253 |
| 8.7.1 | Optische Frequenzverdopplung | 254 |
| 8.7.2 | Phasenanpassung | 254 |
| 8.7.3 | Optische Frequenzmischung | 256 |
| | Zusammenfassung | 257 |
| | Übungsaufgaben | 258 |

9. Geometrische Optik

| | | |
|-------|---|-----|
| 9.1 | Grundaxiome der geometrischen Optik | 260 |
| 9.2 | Die optische Abbildung | 261 |
| 9.3 | Hohlspiegel | 262 |
| 9.4 | Prismen | 266 |
| 9.5 | Linsen | 267 |
| 9.5.1 | Brechung an einer gekrümmten Fläche | 267 |
| 9.5.2 | Dünne Linsen | 269 |
| 9.5.3 | Dicke Linsen | 272 |
| 9.5.4 | Linsensysteme | 273 |
| 9.5.5 | Zoom-Linsensysteme | 275 |
| 9.5.6 | Linsenfehler | 275 |
| 9.5.7 | Die aplanatische Abbildung | 283 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 9.5.8 | Asphärische Linsen | 284 |
| 9.6 | Matrixmethoden der geometrischen Optik | 285 |
| 9.6.1 | Die Translationsmatrix | 285 |
| 9.6.2 | Die Brechungsmatrix | 285 |
| 9.6.3 | Die Reflexionsmatrix | 286 |
| 9.6.4 | Transformationsmatrix einer Linse | 286 |
| 9.6.5 | Abbildungsmatrix | 287 |
| 9.6.6 | Matrizen von Linsensystemen | 288 |
| 9.6.7 | Jones-Vektoren | 288 |
| 9.7 | Geometrische Optik der Erdatmosphäre | 290 |
| 9.7.1 | Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre | 290 |
| 9.7.2 | Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes | 292 |
| 9.7.3 | Fata Morgana | 292 |
| 9.7.4 | Regenbogen | 293 |
| | Zusammenfassung | 295 |
| | Übungsaufgaben | 296 |

10. Interferenz, Beugung und Streuung

| | | |
|--------|--|-----|
| 10.1 | Zeitliche und räumliche Kohärenz | 299 |
| 10.2 | Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen | 301 |
| 10.3 | Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz | 302 |
| 10.3.1 | Fresnelscher Spiegelversuch | 302 |
| 10.3.2 | Youngscher Doppelspaltversuch | 303 |
| 10.3.3 | Interferenz an einer planparallelen Platte | 304 |
| 10.3.4 | Michelson-Interferometer | 305 |
| 10.3.5 | Das Michelson-Morley-Experiment | 307 |
| 10.3.6 | Sagnac-Interferometer | 310 |
| 10.3.7 | Mach-Zehnder Interferometer | 311 |
| 10.4 | Vielstrahl-Interferenz | 311 |
| 10.4.1 | Fabry-Pérot-Interferometer | 314 |
| 10.4.2 | Dielektrische Spiegel | 317 |
| 10.4.3 | Antireflexschicht | 318 |
| 10.4.4 | Anwendungen der Interferometrie | 319 |
| 10.5 | Beugung | 320 |
| 10.5.1 | Beugung als Interferenzphänomen | 320 |
| 10.5.2 | Beugung am Spalt | 322 |
| 10.5.3 | Beugungsgitter | 324 |
| 10.6 | Fraunhofer- und Fresnel-Beugung | 328 |
| 10.6.1 | Fresnelsche Zonen | 328 |
| 10.6.2 | Fresnelsche Zonenplatte | 331 |
| 10.7 | Allgemeine Behandlung der Beugung | 332 |
| 10.7.1 | Das Beugungsintegral | 332 |
| 10.7.2 | Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt | 333 |
| 10.7.3 | Fresnel-Beugung an einer Kante | 334 |
| 10.7.4 | Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung | 334 |
| 10.7.5 | Babinetsches Theorem | 335 |
| 10.8 | Fourierdarstellung der Beugung | 336 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 10.8.1 | Fourier-Transformation | 336 |
| 10.8.2 | Anwendung auf Beugungsprobleme | 337 |
| 10.9 | Lichtstreuung | 339 |
| 10.9.1 | Kohärente und inkohärente Streuung | 339 |
| 10.9.2 | Streuquerschnitte | 341 |
| 10.9.3 | Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung | 341 |
| 10.10 | Atmosphären-Optik | 342 |
| 10.10.1 | Lichtstreuung in unserer Atmosphäre | 342 |
| 10.10.2 | Halo-Erscheinungen | 344 |
| 10.10.3 | Aureole um den Mond | 345 |
| | Zusammenfassung | 345 |
| | Übungsaufgaben | 346 |

11. Optische Instrumente

| | | |
|--------|--|-----|
| 11.1 | Das Auge | 349 |
| 11.1.1 | Aufbau des Auges | 349 |
| 11.1.2 | Kurz- und Weitsichtigkeit | 351 |
| 11.1.3 | Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges | 351 |
| 11.2 | Vergrößernde optische Instrumente | 352 |
| 11.2.1 | Die Lupe | 353 |
| 11.2.2 | Das Mikroskop | 354 |
| 11.2.3 | Das Fernrohr | 355 |
| 11.3 | Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten | 357 |
| 11.3.1 | Auflösungsvermögen des Fernrohrs | 358 |
| 11.3.2 | Auflösungsvermögen des Auges | 359 |
| 11.3.3 | Auflösungsvermögen des Mikroskops | 360 |
| 11.3.4 | Abbesche Theorie der Abbildung | 361 |
| 11.4 | Die Lichtstärke optischer Instrumente | 362 |
| 11.5 | Spektrographen und Monochromatoren | 363 |
| 11.5.1 | Prismenspektrographen | 364 |
| 11.5.2 | Gittermonochromator | 365 |
| 11.5.3 | Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen | 365 |
| 11.5.4 | Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen | 368 |
| | Zusammenfassung | 370 |
| | Übungsaufgaben | 371 |

12. Neue Techniken in der Optik

| | | |
|--------|-----------------------------------|-----|
| 12.1 | Konfokale Mikroskopie | 373 |
| 12.2 | Optische Nahfeldmikroskopie | 375 |
| 12.3 | Aktive und adaptive Optik | 376 |
| 12.3.1 | Aktive Optik | 376 |
| 12.3.2 | Adaptive Optik | 377 |
| 12.3.3 | Interferometrie in der Astronomie | 379 |
| 12.4 | Holographie | 379 |
| 12.4.1 | Aufnahme eines Hologramms | 380 |

| | | |
|--------|---|------------|
| 12.4.2 | Die Rekonstruktion des Wellenfeldes | 382 |
| 12.4.3 | Weißlichtholographie | 383 |
| 12.4.4 | Holographische Interferometrie | 383 |
| 12.4.5 | Anwendungen der Holographie | 385 |
| 12.5 | Fourieroptik | 386 |
| 12.5.1 | Die Linse als Fouriertransformator | 387 |
| 12.5.2 | Optische Filterung | 389 |
| 12.5.3 | Optische Mustererkennung | 391 |
| 12.6 | Mikrooptik | 391 |
| 12.6.1 | Diffraktive Optik | 391 |
| 12.6.2 | Fresnel-Linse und Linsenarrays | 393 |
| 12.6.3 | Herstellung diffraktiver Optik | 395 |
| 12.6.4 | Refraktive Mikrooptik | 395 |
| 12.7 | Optische Wellenleiter und integrierte Optik | 396 |
| 12.7.1 | Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern | 396 |
| 12.7.2 | Lichtmodulation | 398 |
| 12.7.3 | Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern | 399 |
| 12.7.4 | Integrierte optische Elemente | 399 |
| 12.8 | Optische Lichtleitfasern | 400 |
| 12.8.1 | Lichtausbreitung in optischen Lichtleiterfasern | 401 |
| 12.8.2 | Absorption in optischen Fasern | 402 |
| 12.8.3 | Pulsausbreitung in Fasern | 403 |
| 12.8.4 | Nichtlineare Pulsausbreitung; Solitonen | 404 |
| 12.9 | Optische Nachrichtenübertragung | 405 |
| | Zusammenfassung | 407 |
| | Übungsaufgaben | 408 |
| | Lösungen der Übungsaufgaben | 409 |
| | Farbtafeln | 465 |
| | Literaturverzeichnis | 473 |
| | Sachwortverzeichnis | 479 |