

Wolfgang Demtröder

# Experimental- physik 2

Elektrizität und Optik

*6. Auflage*

---

Springer-Lehrbuch

## **Experimentalphysik**

Band 1

Mechanik und Wärme

6. Auflage

ISBN 978-3-642-25465-9

Band 2

Elektrizität und Optik

6. Auflage

ISBN 978-3-642-29943-8

Band 3

Atome, Moleküle und Festkörper

4. Auflage

ISBN 978-3-642-03910-2

Band 4

Kern-, Teilchen- und Astrophysik

3. Auflage

ISBN 978-3-642-01597-7

---

Wolfgang Demtröder

# Experimentalphysik 2

Elektrizität und Optik

6., überarbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer Spektrum

Wolfgang Demtröder  
TU Kaiserslautern  
Fachbereich Physik  
Erwin-Schrödinger-Str. 46  
67663 Kaiserslautern  
Deutschland  
e-mail: demtroed@rhrk.uni-kl.de

ISSN 0937-7433  
ISBN 978-3-642-29943-8  
DOI 10.1007/978-3-642-29944-5

ISBN 978-3-642-29944-5 (eBook)

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995, 1999, 2004, 2006, 2009, 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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:* Vera Spillner, Stefanie Adam

*Einbandentwurf:* deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

---

## Vorwort zur sechsten Auflage

In den drei Jahren seit Erscheinen der 5. Auflage haben sich die Optik und ihre vielfältigen Anwendungen rasant weiterentwickelt. Die Herstellung von Masken mit immer kürzeren Wellenlängen für die Miniaturisierung integrierter Schaltungen hat die Dichte von elektronischen Bauteilen in integrierten Schaltungen um fast eine Größenordnung erhöht. Die neuen hochauflösenden optischen Techniken haben detaillierte Informationen über den Aufbau und die Funktionen biologischer Moleküle und des Inneren von Zellen gebracht. Die optische Nachrichtentechnik hat von der Entwicklung ultrakurzer Lichtpulse und der Verbesserung optischer Lichtleiter und optischer Schaltelemente sehr profitiert und die enorme Steigerung der Datenmenge, die im Internet zur Verfügung steht, wäre ohne diese optischen Techniken gar nicht möglich.

Deshalb ist ein gründlicheres Studium der Optik für viele Berufszweige unverzichtbar.

In dieser 6. Auflage wurden neben den klassischen Grundlagen der Elektrodynamik und der Optik einige dieser neueren Entwicklungen mit aufgenommen, um die lebendige Weiterentwicklung der Optik zu demonstrieren.

Viele Leser haben durch ihre Zuschriften zur Eliminierung von Fehlern und zur Verbesserung der Darstellung beigetragen. Ihnen möchte ich herzlich danken.

Besonderen Dank gilt Herrn Dr. Peter Staub, der viele Anregungen zur Optimierung dieses Lehrbuches gegeben hat.

Ich danke den Mitarbeitern von Springer-Spektrum, insbesondere Frau Dr. Spillner für die Verlagsbetreuung und den Mitarbeitern der le-tex publishing services GmbH Leipzig, insbesondere Frau Kroke, für Layout und Satzgestaltung.

An vielen Universitäten sind inzwischen Bachelor- und Master-Studiengänge mit einer verkürzten Studiendauer eingerichtet worden. Um den Studenten solcher Studiengänge die Lektüre dieses Lehrbuches zu erleichtern, sind alle Abschnitte, die nach Meinung des Autors für das verkürzte Studium weggelassen werden können, im Inhaltsverzeichnis mit einem Stern markiert.

Kaiserslautern,  
im August 2012

*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 bildet. 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

<b>1</b>	<b>Elektrostatik</b>	1
1.1	Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz	2
1.1.1	Maßsysteme	3
1.2	Das elektrische Feld	5
1.2.1	Elektrische Feldstärke	5
1.2.2	Elektrischer Fluss; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes	8
1.3	Elektrostatistisches Potential	9
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	23
1.7.2	Polarisationsladungen	25
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie*	26
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	28
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	31
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	34
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	34
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	35
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	36
1.9.4	Kugelblitze	36
1.9.5	Elektrostatische Staubfilter	37
1.9.6	Elektrostatische Farbbeschichtung	37
1.9.7	Elektrostatische Kopierer und Drucker	38
1.9.8	Elektrostatische Aufladung und Neutralisierung	39
	Zusammenfassung	39
	Übungsaufgaben	41

<b>2</b>	<b>Der elektrische Strom</b>	43
2.1	Strom als Ladungstransport	44
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohm'sches Gesetz	45
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte	46
2.2.2	Das Ohm'sche Gesetz	48
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohm'schen Gesetzes	49
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung	50
2.3	Stromleistung und Joule'sche Wärme	54
2.4	Netzwerke; Kirchhoff'sche Regeln	55
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	56
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	56
2.4.3	Wheatstone'sche 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	62
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen	64
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen	66
2.8	Stromquellen	67
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle	68
2.8.2	Galvanische Elemente	68
2.8.3	Akkumulatoren	70
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
2.9.5	Thermoelektrische Konverter	77
2.9.6	Thomson Effekt	78
	Zusammenfassung	80
	Übungsaufgaben	80
<b>3</b>	<b>Statische Magnetfelder</b>	83
3.1	Permanentmagnete	84
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme	85
3.2.1	Magnetischer Kraftfluss und magnetische Spannung	86
3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters	87
3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer lang gestreckten Spule	87
3.2.4	Das Vektorpotential	88
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz	88
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen	89
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	94
3.3.1	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	95
3.3.2	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern	95
3.3.3	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft	96

3.3.4	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern	97
3.3.5	Hall-Effekt	99
3.3.6	Das Barlow'sche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen	100
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip*	100
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung	100
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	102
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom	103
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld	105
3.5	Materie im Magnetfeld	106
3.5.1	Magnetische Dipole	106
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	108
3.5.3	Diamagnetismus	109
3.5.4	Paramagnetismus	111
3.5.5	Ferromagnetismus	111
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
<b>4</b>	<b>Zeitlich veränderliche Felder</b>	123
4.1	Faraday'sches Induktionsgesetz	124
4.2	Lenz'sche Regel	127
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung	127
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder	127
4.2.3	Magnetische Levitation	128
4.2.4	Wirbelströme	128
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion	129
4.3.1	Selbstinduktion	129
4.3.2	Gegenseitige Induktion	132
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes	134
4.5	Der Verschiebungsstrom	134
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale	136
	Zusammenfassung	138
	Übungsaufgaben	139
<b>5</b>	<b>Elektrotechnische Anwendungen*</b>	141
5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	142
5.1.1	Gleichstrommaschinen	144
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	146
5.2	Wechselstrom	147
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	149
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	151
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	152
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	152
5.4.3	Allgemeiner Fall	152
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	154
5.5.1	Hochpass	154
5.5.2	Tiefpass	155
5.5.3	Frequenzfilter	156

5.6	Transformatoren . . . . .	157
5.6.1	Unbelasteter Transformator . . . . .	158
5.6.2	Belasteter Transformator . . . . .	158
5.6.3	Anwendungsbeispiele . . . . .	160
5.7	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen . . . . .	160
5.8	Gleichrichtung . . . . .	161
5.8.1	Einweggleichrichtung . . . . .	162
5.8.2	Zweiweggleichrichtung . . . . .	162
5.8.3	Brückenschaltung . . . . .	162
5.8.4	Kaskadenschaltung . . . . .	164
5.9	Elektronenröhren . . . . .	164
5.9.1	Vakuum-Dioden . . . . .	164
5.9.2	Triode . . . . .	165
	Zusammenfassung . . . . .	167
	Übungsaufgaben . . . . .	167
<b>6</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen</b> . . . . .	<b>169</b>
6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis . . . . .	170
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen . . . . .	170
6.1.2	Erzwungene Schwingungen . . . . .	172
6.2	Gekoppelte Schwingkreise . . . . .	173
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen . . . . .	175
6.4	Offene Schwingkreise; Hertz'scher 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	Strahlungsämpfung . . . . .	184
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung . . . . .	184
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung . . . . .	185
	Zusammenfassung . . . . .	188
	Übungsaufgaben . . . . .	188
<b>7</b>	<b>Elektromagnetische Wellen im Vakuum</b> . . . . .	<b>191</b>
7.1	Die Wellengleichung . . . . .	192
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 . . . . .	195
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 . . . . .	197
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	Die Drehspiegelmethode von Foucault . . . . .	201
7.7.4	Phasenmethode . . . . .	202
7.7.5	Bestimmung von $c$ aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge . . . . .	202
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen . . . . .	203
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen . . . . .	203

7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren . . . . .	204
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 . . . . .	216
<b>8</b>	<b>Elektromagnetische Wellen in Materie . . . . .</b>	<b>219</b>
8.1	Brechungsindex . . . . .	220
8.1.1	Makroskopische Beschreibung . . . . .	220
8.1.2	Mikroskopisches Modell . . . . .	221
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 . . . . .	231
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 . . . . .	235
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
8.4.10	Medien mit negativem Brechungsindex* . . . . .	241
8.4.11	Photonische Kristalle* . . . . .	242
8.5	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung . . . . .	243
8.5.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien . . . . .	243
8.5.2	Brechungsindex-Ellipsoid . . . . .	245
8.5.3	Doppelbrechung . . . . .	246
8.6	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht . . . . .	248
8.6.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion . . . . .	249
8.6.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle . . . . .	249
8.6.3	Doppelbrechende Polarisatoren . . . . .	250
8.6.4	Polarisationsdreher . . . . .	251
8.6.5	Optische Aktivität . . . . .	252
8.6.6	Spannungsdoppelbrechung . . . . .	254
8.7	Nichtlineare Optik . . . . .	254
8.7.1	Optische Frequenzverdopplung . . . . .	255
8.7.2	Phasen Anpassung . . . . .	255
8.7.3	Optische Frequenzmischung . . . . .	257
8.7.4	Erzeugung hoher Harmonischer . . . . .	257
	Zusammenfassung . . . . .	258
	Übungsaufgaben . . . . .	259

<b>9</b>	<b>Geometrische Optik</b> . . . . .	261
9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik . . . . .	262
9.2	Die optische Abbildung . . . . .	263
9.3	Hohlspiegel . . . . .	265
9.4	Prismen . . . . .	268
9.5	Linsen . . . . .	270
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche . . . . .	270
9.5.2	Dünne Linsen . . . . .	271
9.5.3	Dicke Linsen . . . . .	273
9.5.4	Linsensysteme . . . . .	275
9.5.5	Zoom-Linsensysteme . . . . .	276
9.5.6	Linsenfehler . . . . .	277
9.5.7	Die aplanatische Abbildung . . . . .	285
9.5.8	Asphärische Linsen . . . . .	286
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik* . . . . .	287
9.6.1	Die Translationsmatrix . . . . .	287
9.6.2	Die Brechungsmatrix . . . . .	287
9.6.3	Die Reflexionsmatrix . . . . .	288
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse . . . . .	288
9.6.5	Abbildungsmatrix . . . . .	289
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen . . . . .	289
9.6.7	Jones-Vektoren . . . . .	290
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre . . . . .	292
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre . . . . .	292
9.7.2	Scheinbare Größe des aufgehenden Mondes . . . . .	293
9.7.3	Fata Morgana . . . . .	293
9.7.4	Regenbogen . . . . .	294
	Zusammenfassung . . . . .	297
	Übungsaufgaben . . . . .	297
<b>10</b>	<b>Interferenz, Beugung und Streuung</b> . . . . .	299
10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .	300
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen . . . . .	301
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz . . . . .	302
10.3.1	Fresnel'scher Spiegelversuch . . . . .	303
10.3.2	Young'scher Doppelspaltversuch . . . . .	303
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte . . . . .	305
10.3.4	Michelson-Interferometer . . . . .	306
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment . . . . .	308
10.3.6	Sagnac-Interferometer . . . . .	310
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer . . . . .	311
10.4	Vielstrahl-Interferenz . . . . .	311
10.4.1	Fabry-Pérot-Interferometer . . . . .	313
10.4.2	Dielektrische Spiegel . . . . .	316
10.4.3	Antireflexschicht . . . . .	317
10.4.4	Anwendungen der Interferometrie . . . . .	318
10.5	Beugung . . . . .	320
10.5.1	Beugung als Interferenzphänomen . . . . .	320
10.5.2	Beugung am Spalt . . . . .	321
10.5.3	Beugungsgitter . . . . .	323
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung . . . . .	326
10.6.1	Fresnel'sche Zonen . . . . .	327
10.6.2	Fresnel'sche Zonenplatte . . . . .	329
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung* . . . . .	330
10.7.1	Das Beugungsintegral . . . . .	330

10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt	331
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante	332
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	332
10.7.5	Babinet'sches Theorem	334
10.8	Fourierdarstellung der Beugung*	334
10.8.1	Fourier-Transformation	334
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme	335
10.9	Lichtstreuung	337
10.9.1	Kohärente und inkohärente Streuung	337
10.9.2	Streuquerschnitte	339
10.9.3	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung	339
10.10	Atmosphären-Optik	340
10.10.1	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre	340
10.10.2	Halo-Erscheinungen	342
10.10.3	Aureole um den Mond	343
10.10.4	Glorien	343
	Zusammenfassung	344
	Übungsaufgaben	345
<b>11</b>	<b>Optische Instrumente</b>	<b>347</b>
11.1	Das Auge	348
11.1.1	Aufbau des Auges	348
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	349
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges	350
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	351
11.2.1	Die Lupe	352
11.2.2	Das Mikroskop	353
11.2.3	Das Fernrohr	354
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	356
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	356
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	358
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	358
11.3.4	Abbe'sche Theorie der Abbildung	359
11.3.5	Überwindung der klassischen Beugungsgrenze	360
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	361
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	362
11.5.1	Prismenspektrographen	363
11.5.2	Gittermonochromator	364
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	364
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	367
	Zusammenfassung	369
	Übungsaufgaben	370
<b>12</b>	<b>Neue Techniken in der Optik</b>	<b>371</b>
12.1	Konfokale Mikroskopie	372
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	373
12.3	Aktive und adaptive Optik	374
12.3.1	Aktive Optik	374
12.3.2	Adaptive Optik	375
12.3.3	Interferometrie in der Astronomie	376
12.4	Holographie	377
12.4.1	Aufnahme eines Hologramms	378
12.4.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	380