
Tutorium Optik

Christoph Gerhard

Tutorium Optik

Ein verständlicher Überblick für
Physiker, Ingenieure und Techniker

Christoph Gerhard
HAWK Hochschule für angewandte
Wissenschaft und Kunst
Göttingen, Deutschland

ISBN 978-3-662-48574-3 ISBN 978-3-662-48575-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48575-0

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 2016

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Seit jeher ist der Mensch fasziniert von der Kraft und Farbenfreude des Lichts, welches gemeinhin als Inbegriff des Positiven und des Lebens gilt. Dies findet in der religiösen und schöngestigen Literatur sowie im allgemeinen Sprachgebrauch Ausdruck. So beginnt beispielsweise die biblische Schöpfungsgeschichte mit der Erschaffung des Lichts, das Leben eines Menschen beginnt, wie der Physikprofessor *Eduard Rüchardt* sein Werk zur Natur des Lichts treffend eröffnet, mit der Umschreibung, dass ein Kind das Licht der Welt erblickt, und dem Dichtefürsten *Johann Wolfgang von Goethe* wird nachgesagt, er habe auf dem Sterbebett nach „mehr Licht“ verlangt.

Optik, die Lehre vom Licht, ist ein essenzieller Bestandteil der Physik und Grundlage einer Vielzahl moderner Technologien. Optische Komponenten und Systeme ermöglichen Fortschritte in den unterschiedlichsten Bereichen wie etwa der Medizintechnik, Logistik, Unterhaltungs- und Konsumgüterindustrie sowie der Sicherheitstechnik. So haben sich gemäß einer aktuellen Studie weltweit die Umsätze im Bereich der optischen Technologien von 2005 bis 2015 mehr als verdoppelt. *David J. Sainsbury*, der derzeitige Kanzler der Universität Cambridge, zog daraus folgenden Schluss: „*There is good reason to believe that the impact of photonics in the 21st century will be as significant as electronics was in the 20th, or steam in the 19th.*“ („Es gibt guten Grund zur Annahme, dass der Einfluss der optischen Technologien im 21. Jahrhundert genauso maßgeblich sein wird wie der der Elektronik im 20. oder der des Dampfes im 19.“).

Die Optik sollte als Querschnitts- und Schlüsseltechnologie ein wesentlicher und zukunftssträchtiger Bestandteil der Ausbildung von Physikern, Ingenieuren, Technikern und anderen Fachkräften sein. Das vorliegende Werk soll vor diesem Hintergrund zum Verständnis der grundlegenden Prinzipien und Zusammenhänge der Optik beitragen. Dazu wird auf Entstehung und Eigenschaften des Lichts, Lichtquellen, optische Materialien, Komponenten, Systeme und Geräte, die optische Abbildung sowie Abbildungsfehler eingegangen. Aufgrund der hohen und stetig wachsenden technischen Relevanz von Laserquellen behandelt es zudem die Grundlagen zu Entstehung und Eigenschaften von Laserlicht sowie die wichtigsten Laserquellen.

Zur Benutzung dieses Buchs

Die wichtigsten Inhalte und Erkenntnisse werden zu Beginn jedes Einzelkapitels kurz zusammengefasst. Am Ende des Kapitels sind die relevanten Gleichungen zur besseren Übersicht und Auffindbarkeit zudem in einer Formelsammlung zusammengefasst. Vor dem Hintergrund der voranschreitenden Internationalisierung in Ausbildung und Berufsleben sind für die wichtigsten Fachausdrücke die jeweiligen englischen Fachvokabeln mit angegeben. Besonderer Wert wurde bei der Konzeption des vorliegenden Werks auf Übungsaufgaben gelegt. Thematisch geordnet schließt daher jedes Einzelkapitel mit zahlreichen Verständnisfragen zur Vertiefung der behandelten Themen ab. Darüber hinaus vertiefen die anschließenden Rechenaufgaben unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge. Ausführliche Lösungen finden sich im Anhang, der auch ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen sowie Literaturhinweise enthält.

Danksagung

Die Entstehung eines Fachbuchs von der Idee bis zum Druck ist eine umfangreiche Aufgabe, die nur gemeinschaftlich zu bewältigen ist. Vor diesem Hintergrund möchte ich mich für die tatkräftige Mithilfe seitens des Verlags und namentlich bei Frau Margit Maly, Frau Sabine Bartels und Frau Vera Spillner für ihre Unterstützung während des Entstehungsprozesses des vorliegenden Werks danken. Besonderer Dank gilt auch Herrn Benjamin Bahr und vor allem meiner Familie.

Friedland
Juli 2015

Der Autor

Inhaltsverzeichnis

1	Eigenschaften des Lichts	1
1.1	Wie Licht entsteht	3
1.1.1	Spontane Emission	4
1.1.2	Photonenenergie	4
1.1.3	Natürliche Linienbreite	5
1.1.4	Der Welle-Teilchen-Dualismus	6
1.2	Licht als elektromagnetische Welle	6
1.2.1	Die Maxwell'schen Gleichungen	8
1.2.2	Charakteristische Größen einer Lichtwelle	9
1.2.3	Polarisation von Licht	11
1.2.4	Kohärenz	13
1.2.5	Das Huygens'sche Prinzip	13
1.3	Das Lichtspektrum	14
1.3.1	Wellenlängenbereiche und Lichtfarben	14
1.3.2	Lichtquellen	16
1.4	Licht-Materie-Wechselwirkungen	16
1.4.1	Absorption von Licht	17
1.4.2	Lineare und nichtlineare Wechselwirkungen	18
1.5	Eigenschaften des Lichts mathematisch	20
1.6	Übungsaufgaben zu Eigenschaften des Lichts	23
2	Grundbegriffe der Optik	27
2.1	Brechungsindex und Brechung	28
2.1.1	Der Brechungsindex	28
2.1.2	Die optische Weglänge	29
2.1.3	Brechung und Snellius'sches Brechungsgesetz	30
2.1.4	Nichtlinearer Brechungsindex und Suszeptibilität	32
2.1.5	Doppelbrechung	33
2.2	Dispersion	35
2.2.1	Zur Entstehung der Dispersion	35
2.2.2	Die Sellmeier-Gleichung	36

2.3	Absorption und Transmission	37
2.3.1	Der komplexe Brechungsindex	37
2.3.2	Der Transmissionsgrad	39
2.4	Reflexion	41
2.4.1	Die Fresnel'schen Formeln	42
2.4.2	Der Brewster-Winkel	44
2.4.3	Der Grenzwinkel der Totalreflexion	44
2.5	Interferenz	46
2.5.1	Konstruktive und destruktive Interferenz	46
2.5.2	Interferenzbedingungen	47
2.5.3	Farben dünner Blättchen	48
2.6	Beugung	50
2.6.1	Beugung am Spalt	50
2.6.2	Beugung an Hindernissen	52
2.7	Streuung	53
2.8	Grundbegriffe der Optik mathematisch	55
2.9	Übungsaufgaben zu Grundbegriffen der Optik	57
3	Optische Materialien	63
3.1	Optische Gläser	65
3.1.1	Bestandteile optischer Gläser	65
3.1.2	Der Aggregatzustand von Glas	66
3.1.3	Herstellung optischer Gläser	67
3.1.4	Charakterisierung optischer Gläser	67
3.2	Optische Sondermaterialien	72
3.2.1	Kristalle	72
3.2.2	Glaskeramik	73
3.2.3	Gradientenindexmaterialien	74
3.2.4	Kunststoffe	75
3.2.5	Optische Flüssigkeiten	76
3.3	Optische Materialien mathematisch	76
3.4	Übungsaufgaben zu optischen Materialien	77
4	Optische Komponenten	81
4.1	Planplatten	83
4.2	Prismen	84
4.2.1	Umlenkprismen und Umkehrprismen	87
4.2.2	Dispersionsprismen	88
4.3	Spiegel	89
4.4	Linsen	91
4.5	Optische Schichten	97
4.5.1	Reflexionsschichten	97
4.5.2	Antireflexschichten	99
4.5.3	Filterschichten	99

4.6	Beugungsgitter	101
4.7	Polarisatoren und Verzögerungsplatten	102
4.7.1	Polarisatoren und Polarisationsfilter	102
4.7.2	Verzögerungsplatten	106
4.8	Strahlteiler	107
4.9	Optische Fasern	108
4.9.1	Stufenindexfasern	108
4.9.2	Gradientenindexfasern	111
4.10	Optische Komponenten mathematisch	112
4.11	Übungsaufgaben zu optischen Komponenten	115
5	Optische Abbildung und Abbildungsfehler	121
5.1	Abbildungsmodelle	123
5.1.1	Das paraxiale Abbildungsmodell	124
5.1.2	Das geometrisch-optische Abbildungsmodell	124
5.1.3	Das wellenoptische Abbildungsmodell	125
5.1.4	Die Auflösungsgrenze	125
5.2	Optische Abbildungen	126
5.2.1	Paraxiale Größen	126
5.2.2	Reelle und virtuelle Abbildungen	129
5.3	Die Abbildungsgleichungen	130
5.3.1	Abbildung durch eine Einzellinse	130
5.3.2	Abbildung durch zwei Einzellinsen	131
5.4	Abbildungsfehler	132
5.4.1	Die Seidel'schen Summen	132
5.4.2	Sphärische Aberration	135
5.4.3	Chromatische Aberration	137
5.4.4	Asymmetriefehler	140
5.4.5	Astigmatismus	141
5.4.6	Petzval'sche Bildfeldwölbung	142
5.4.7	Die Verzeichnung	143
5.4.8	Geisterbilder	144
5.4.9	Wellenaberration	145
5.4.10	Kontrastübertragung	145
5.4.11	Darstellung von Abbildungsfehlern	146
5.5	Optische Abbildung und Abbildungsfehler mathematisch	147
5.6	Übungsaufgaben zu optischer Abbildung und Abbildungsfehlern	150
6	Optische Systeme und Geräte	157
6.1	Das Auge	159
6.1.1	Aufbau des Auges	159
6.1.2	Sehfehler	160

6.2	Lupen	161
6.3	Objektive und Okulare	162
6.4	Endoskope	162
6.5	Teleskope	162
6.5.1	Linsenteleskope	162
6.5.2	Spiegelteleskope	164
6.6	Mikroskope	164
6.7	Interferometer	166
6.7.1	Das Michelson-Interferometer	166
6.7.2	Das Mach-Zehnder-Interferometer	168
6.7.3	Das Fizeau-Interferometer	169
6.7.4	Das Fabry-Pérot-Interferometer	170
6.7.5	Das Probeglasverfahren	171
6.8	Optische Profilometer	173
6.8.1	Autofokussensoren	173
6.8.2	Weißlichtsensoren	173
6.8.3	Konfokalsensoren	174
6.9	Spektrometer	174
6.9.1	Gitterspektrometer	174
6.9.2	Prismenspektrometer	176
6.10	Optische Schalter und Isolatoren	177
6.10.1	Akustooptische Modulatoren	177
6.10.2	Faraday-Rotatoren und Isolatoren	177
6.10.3	Pockels-Zellen	178
6.10.4	Passive optische Schalter	178
6.11	Optische Systeme und Geräte mathematisch	179
6.12	Übungsaufgaben zu optischen Systemen und Geräten	181
7	Laserquellen und Laserlicht	185
7.1	Das Laserprinzip	187
7.1.1	Die Besetzungsinversion	188
7.1.2	Stimulierte Emission	189
7.2	Aufbau eines Lasers	190
7.2.1	Bestandteile eines Lasers	191
7.2.2	Betriebsarten eines Lasers	194
7.3	Lasertypen	195
7.3.1	Gas-, Festkörper- und Farbstofflaser	195
7.3.2	Laserschutzklassen	196
7.4	Eigenschaften von Laserlicht	197
7.4.1	Lasermode	197
7.4.2	Divergenz von Laserlicht	199
7.4.3	Ausbreitung von Laserstrahlen	199

7.5	Laseranwendungen	204
7.5.1	Laserbasierte Fertigung	204
7.5.2	Laserbasierte Messtechnik	204
7.5.3	Datenspeicherung und -übertragung	205
7.6	Laserquellen und Laserlicht mathematisch	206
7.7	Übungsaufgaben zu Laserquellen und Laserlicht	208
Anhang	213
Literatur	267
Stichwortregister	269

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Schematische Darstellung der Besetzung der Energieniveaus eines Atoms im thermodynamischen Gleichgewicht gemäß der Boltzmann-Verteilung	3
Abb. 1.2	Prinzip der spontanen Emission: Zugeführte Energie wird von einem Elektron im Energiegrundzustand E_0 (a) absorbiert, wodurch es auf ein höheres Energieniveau E_1 wechselt (b). Nach einer gewissen Verweildauer im angeregten Zustand (b und c) fällt das Elektron zurück auf seinen Grundzustand (d), wobei eine Lichtwelle bzw. ein Lichtquant emittiert wird	4
Abb. 1.3	Reflexion (1), Beugung (2) und Interferenz (3) von Wasserwellen an einem Dalben	7
Abb. 1.4	Schematische Darstellung einer aus einem oszillierenden elektrischen und einem oszillierenden magnetischen Feld bestehenden elektromagnetischen Welle	7
Abb. 1.5	Charakteristische Größen einer Lichtwelle: Amplitude A des elektrischen Felds (hier in y -Richtung), Wellenlänge λ und Ausbreitungsrichtung \vec{z}	10
Abb. 1.6	Veranschaulichung der Phasenverschiebung: links herrscht Phasengleichheit ($\Delta\varphi = 0$), rechts sind die Lichtwellen gegeneinander phasenverschoben ($\Delta\varphi > 0$)	11
Abb. 1.7	Polarisationszustände von Licht	12
Abb. 1.8	Darstellung des Huygens'schen Prinzips an einer ebenen (links) bzw. gekrümmten Wellenfront (rechts), jeweils dargestellt als durchgezogene Linie. Die gepunkteten Linien bezeichnen Elementarwellen an den markierten Punkten der Wellenfront	14
Abb. 1.9	Das elektromagnetische Spektrum	15
Abb. 1.10	Vergleich grundlegender Eigenschaften von Licht verschiedener Lichtquellen	17

Abb. 2.1	Vereinfachtes Modell zur Brechung an einer optischen Grenzfläche durch die Entstehung einer neuen Wellenfront als Tangente auf Elementarkugelwellen. Die als schwarze Pfeile dargestellten Lichtstrahlen stehen senkrecht auf den Wellenfronten	31
Abb. 2.2	Das Snellius'sche Brechungsgesetz	31
Abb. 2.3	Entstehung der Dispersion durch Konstruktion der Wellenfronten auf Elementarwellen unterschiedlicher Wellenlänge nach dem Huygens'schen Prinzip	35
Abb. 2.4	Qualitative Darstellung des wellenlängenabhängigen Brechungsindexverlaufs eines Glases	36
Abb. 2.5	Transmissionsverhalten eines Quarzglas in Abhängigkeit von der Wellenlänge: Man sieht die fundamentale Absorptionskante im ultravioletten Spektralbereich, den Transmissionsbereich im Sichtbaren und die Vibrations- und Rotationsabsorption im infraroten Spektralbereich. Beachten Sie die unterschiedliche Skalierung der x -Achse im linken und rechten Bereich des Diagramms	38
Abb. 2.6	Abschwächung eines Lichtstrahls mit der Eingangsintensität I_0 beim Durchgang durch ein optisches Medium als Folge von Reflexion an den Grenzflächen, Absorption und Streuung	40
Abb. 2.7	Verlauf von Realteil (durchgezogene graue Linie, Brechungsindex n) und Imaginärteil (gestrichelte graue Linie, Extinktionskoeffizient K) des komplexen Brechungsindex bei einer Resonanzwellenlänge λ_{res}	41
Abb. 2.8	Darstellung des Reflexionsgesetzes: gerichtete Reflexion an einer ideal glatten (links), diffuse Reflexion an einer rauen spiegelnden Oberfläche (rechts)	42
Abb. 2.9	Intensitäts- und Amplituden-Reflektivität R (durchgezogene Linien) bzw. r (gestrichelte Linien) für senkrecht (s) und parallel (p) polarisiertes Licht an einer Grenzfläche zwischen Luft ($n_1 \approx 1$) und Glas ($n_2 \approx 1,5$)	43
Abb. 2.10	Der Grenzwinkel der Totalreflexion ϵ_g	45
Abb. 2.11	Konstruktive und destruktive Interferenz bei der Überlagerung zweier Wellen mit den Amplituden A_1 und A_2	48
Abb. 2.12	Die Vorderseiten- und Rückseitenreflexion an einem optischen Keil führt zu jeweils unterschiedlichen Interferenzbedingungen zwischen den reflektierten Lichtwellen 1 und 2	49
Abb. 2.13	Beugung an einem Hindernis; durch die Ausbildung einer neuen Elementarwelle kann Licht in den geometrischen Schatten des Hindernisses propagieren	50
Abb. 2.14	Beugung am Spalt für unterschiedliche Spaltbreiten b	51
Abb. 2.15	Beugungsfigur hinter einer Blende bzw. einem Spalt	52

Abb. 2.16	Bildung von Beugungsfiguren an einem voll ausgeleuchteten Hindernis: (a) Prinzip der Interferenz (dargestellt durch Knotenpunkte) nach Beugung, (b) mittels Laserstrahlung voll ausgeleuchtete Stiftspitze, (c) Beugungsmuster hinter der Stiftspitze	53
Abb. 3.1	Schematische Abkühlkurve einer Glasschmelze. In der Mitte erkennt man den Transformationsbereich und die Extrapolation auf den Transformationspunkt T_g	66
Abb. 3.2	Ein typisches Abbe-Diagramm	69
Abb. 3.3	Verlauf des Brechungsindex in einer Gradientenindexlinse	74
Abb. 4.1	Parallelversatz V_p eines Lichtstrahls beim Durchgang durch eine Planplatte in Luft	83
Abb. 4.2	Bildebenenversatz V_{BE} konvergierender Strahlen beim Durchgang durch eine Planplatte in Luft	84
Abb. 4.3	Ablenkung δ eines Lichtstrahls an einem optischen Keil in Luft	85
Abb. 4.4	Weg eines Lichtstrahls durch ein Prisma in Luft	85
Abb. 4.5	Beispiele unterschiedlicher Umlenk-/Umkehrprismen: (a) 90° -Prisma als Umlenkprisma (links) bzw. als Umkehrprisma nach Porro (rechts), (b) Dove-Prisma, (c) Bauernfeind-Prisma, (d) Pentagonalprisma	87
Abb. 4.6	Ein Dispersionsprisma zerlegt einfallendes Licht in seine spektralen Komponenten.	89
Abb. 4.7	Dispersion in einem Geradsichtprisma (in Luft)	89
Abb. 4.8	Grundformen optischer Spiegel: Planspiegel sowie Konkav- und Konvexspiegel mit Krümmungsradius R , Krümmungsmittelpunkt M und Brennpunkt F . Die Lichtstrahlen fallen unter dem Einfallswinkel ε und in der Strahleinfallshöhe h ein	90
Abb. 4.9	Kenngrößen einer Bikonvexlinse; die optische Achse verläuft hier durch die Scheitelpunkte der Oberflächen.	92
Abb. 4.10	Charakteristische Größen zur Definition einer asphärischen Linsenoberfläche: ortsabhängige Pfeilhöhe $p(h)$ und Krümmungsradius R einer zugrunde liegenden Basiskugel	92
Abb. 4.11	Definition der Meridional- und Sagittalebene am Beispiel einer Zylinderlinse	93
Abb. 4.12	Übersicht über verschiedene Linsentypen und deren Bezeichnungen inklusive der Radienverhältnisse und jeweiligen Symbole	95
Abb. 4.13	Fokussierung paralleler Lichtstrahlen durch eine Gradientenindexlinse	97

Abb. 4.14	Prinzip einer auf konstruktiver Interferenz basierenden dielektrischen Reflexionsschicht (a) und einer auf destruktiver Interferenz basierenden dielektrischen Antireflexschicht (b)	98
Abb. 4.15	Optische Filter: Interferenzfilter, Kerbfilter, Tiefpassfilter und Hochpassfilter	100
Abb. 4.16	Ein Brewster-Fenster spaltet unpolarisiertes Lichts (p, s) in einen reflektierten Anteil mit senkrechter (s) Polarisation und einen transmittierten parallel (p) polarisierten Anteil auf	103
Abb. 4.17	Ein Drahtgitterpolarisator lässt nur senkrecht zur Gitterrichtung polarisiertes Licht durch	104
Abb. 4.18	Beispiele unterschiedlicher Polarisationsprismen: a) Nicol'sches Prisma, b) Rochon-Prisma, c) Glan-Thompson-Prisma, d) Glan-Taylor-Prisma zur Aufspaltung eines einfallenden Lichtstrahls in eine ordentlichen (o) und außerordentlichen Strahl (ao) mit unterschiedlichen Polarisationen	105
Abb. 4.19	Strahlteilerwürfel (links) bzw. -platte (rechts) zur Aufspaltung von einfallendem Licht mit Ausgangsintensität I_0 in einen transmittierten Teilstrahl mit der Intensität I_T und einen reflektierten Teilstrahl mit der Intensität I_R	107
Abb. 4.20	Einkopplung von Licht in eine Stufenindexfaser. Der Grenzwinkel der Totalreflexion ε_g und der maximale Akzeptanzwinkel θ_{max} ergeben sich aus den Brechungsindizes von Faserkern (n_K) und Fasermantel (n_M). D_K ist der Kerndurchmesser	108
Abb. 4.21	In einer Stufenindexfaser haben unterschiedliche Moden (durchgezogene bzw. gestrichelte Linien) verschiedene optische Weglängen (oben), in einer Gradientenindexfaser sind die optischen Weglängen für verschiedene Moden annähernd gleich (unten)	111
Abb. 5.1	Das von einer Punklichtquelle ausgesandte Licht lässt sich manchmal direkt als Lichtstrahlen wahrnehmen	123
Abb. 5.2	Aperturwinkel u und Öffnungswinkel ω eines abbildenden optischen Elements bzw. Systems	124
Abb. 5.3	Eintritts- und Austrittspupille in einem zweilinsigen optischen System mit Aperturblende	126
Abb. 5.4	Die Durchmesser der Beugungsscheibchen (Airy-Scheibchen), D_{Airy} und D'_{Airy} , und ihr als Auflösungsgrenze definierter Abstand a_{min}	127

Abb. 5.5	Die relevanten Parameter bzw. paraxialen Größen zur Beschreibung optischer Abbildungen (zur Erläuterung der Formelzeichen siehe Aufzählung im Text), sowie die Konstruktionstrahlen Parallelstrahl (1), Hauptstrahl (2) und Brennpunktstrahl (3)	127
Abb. 5.6	Objektseitige und bildseitige Hauptebene einer Bikonvexlinse. Man erhält die Hauptebenen über die Schnittpunkte der verlängerten Brennpunkt- und Parallelstrahlen (theoretischer Lichtweg, gekennzeichnet durch durchgezogene Linien innerhalb der Linse). Die Hauptpunkte sind die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der optischen Achse	128
Abb. 5.7	Reelle und virtuelle Abbildung am Beispiel eines konkaven bzw. konvexen Wölbspiegels	130
Abb. 5.8	Charakteristische Größen für die Bestimmung von Seidel'schen Summen	133
Abb. 5.9	Entstehung der sphärischen Aberration aufgrund der Kugelgestalt einer sphärischen Linsenoberfläche. (Zur Übersichtlichkeit wird die Brechung an der zweiten Grenzfläche vernachlässigt)	136
Abb. 5.10	Entstehung des Farblängsfehlers aufgrund der Dispersionseigenschaften des Materials einer Plankonvexlinse. (Zur Übersichtlichkeit wird die Brechung an der zweiten Grenzfläche vernachlässigt)	138
Abb. 5.11	Entstehung des Farbquerfehlers durch je nach Wellenlänge unterschiedliche Bildvergrößerung	138
Abb. 5.12	Aufbau eines verkitteten Achromats	139
Abb. 5.13	Entstehung des Asymmetriefehlers an einer optischen Grenzfläche bei einem schräg zur optischen Achse einfallenden Strahlenbündel. Links tritt der Fehler wegen einer ungünstigen Lage der Aperturblende auf, rechts nicht . . .	141
Abb. 5.14	Entstehung des Astigmatismus durch ein schräg einfallendes Lichtbündel und daraus resultierende unterschiedliche Meridional- und Sagittalschnitte auf der Linsenoberfläche	142
Abb. 5.15	Petvalsche Bildfeldwölbung	143
Abb. 5.16	Definition der Verzeichnung: ein quadratisches Objekt wird entweder tonnen- oder kissenförmig verzerrt abgebildet	144
Abb. 5.17	Zwei Strahlenbündel, die einen Achromaten unter unterschiedlichen Winkeln durchlaufen (oben bzw. links vergrößert), mit dem dazugehörigen Spotdiagramm (a) und dem Queraberrationsdiagramm (b), erstellt mit dem Simulationsprogramm „WinLens“	146

Abb. 5.18	Feldaberrationsdiagramme für Astigmatismus (a) und Verzeichnung (b) sowie Modulationstransferfunktion (c), erstellt mit dem Simulationsprogramm „WinLens“	147
Abb. 6.1	Die wesentlichen optischen Komponenten des Auges	159
Abb. 6.2	Definition von Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit (oben); Korrektur von Kurz- und Weitsichtigkeit durch zerstreuende bzw. sammelnde Brillengläser (unten)	160
Abb. 6.3	Entstehung eines vergrößerten virtuellen Bilds durch eine Lupe	161
Abb. 6.4	Funktionsprinzip eines Kepler-Teleskops	163
Abb. 6.5	Spiegelteleskope nach <i>Newton</i> (links) und nach <i>Cassegrain</i> (rechts)	165
Abb. 6.6	Strahlengang in einem Mikroskop	166
Abb. 6.7	Prinzipieller Aufbau eines Michelson-Interferometers	167
Abb. 6.8	Verzerrung von Interferenzstreifen durch eine Kerzenflamme, links: Referenzinterferogramm, rechts: durch die Flamme verzerrtes Interferogramm	168
Abb. 6.9	Prinzipieller Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers	169
Abb. 6.10	Prinzipieller Aufbau eines Fizeau-Interferometers	169
Abb. 6.11	Zur interferometrischen Prüfung werden eine sphärische Oberfläche (links) und eine geneigte Planfläche (rechts) mit einer planen Referenzfläche verglichen; oben: schematische Darstellung, Mitte: jeweiliges Interferogramm, unten: Intensitätsprofile der Interferogramme	172
Abb. 6.12	Aufbau eines Gitterspektrometers am Beispiel des Ebert-Fastie-Spektrometers	175
Abb. 6.13	Aufbau eines Prismenspektrometers	176
Abb. 7.1	Schematische Darstellung der Besetzung von Energieniveaus in einem Atom im thermodynamischen Gleichgewicht gemäß der Boltzmann-Verteilung (links) und bei einer Besetzungsinversion (rechts)	189
Abb. 7.2	Stimulierte Emission in einem 2-Niveau-System: Ein einlaufendes Photon regt ein Elektron von Atom 1 zur Emission eines weiteren, identischen Photons an, woraufhin Atom 2 und Atom 3 ebenfalls zur Emission stimuliert werden (unten). Solange kein Photon absorbiert wird, wächst die Gesamtamplitude der phasengleichen Photonen mit jeder stimulierten Emission an (oben)	190
Abb. 7.3	Absorption des Pumplichts und Emission von Laserstrahlung im 4-Niveau-System des Nd:YAG-Lasers (Schema)	191
Abb. 7.4	Schematischer Aufbau eines Lasers	191
Abb. 7.5	Stabilitätsdiagramm für Laserresonatoren	193
Abb. 7.6	Transversal-elektromagnetische Lasermoden (TEM-Moden)	198

Abb. 7.7	Ausbreitungscharakteristik eines Gauß-Strahls (zur Erläuterung der Formelzeichen siehe Text)	200
Abb. 7.8	Ausbreitungscharakteristik eines Gauß-Strahls nach Fokussierung durch ein sammelndes optisches Element (zur Erläuterung der Formelzeichen siehe Text)	202

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Übersicht der für die Optik relevanten Wellenlängenbereiche	15
Tab. 1.2	Lichtfarben und deren Wellenlängenbereiche innerhalb des sichtbaren Spektrums	15
Tab. 2.1	Brechungsindizes einiger optischer Medien	29
Tab. 2.2	Definition des Brechungsindex der schnellen bzw. langsamen Achse eines doppelbrechenden Mediums	34
Tab. 3.1	Einteilung von Gläsern nach ihrem Netzwerkbildner	65
Tab. 3.2	Fraunhofer-Linien und deren Wellenlänge zur Berechnung der Abbe-Zahl ν_e bzw. ν_d	68
Tab. 3.3	UV-transparente Kristalle	72
Tab. 3.4	IR-transparente Kristalle	72
Tab. 3.5	Kenngrößen optischer Kunststoffe	75
Tab. 4.1	Auswahl dielektrischer Materialien für optische Schichten	99
Tab. 5.1	Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabs von Brennweite, Objektweite und Bildweite bei einer optischen Abbildung	131
Tab. 7.1	Typische Resonatorkonfigurationen von Lasern	193
Tab. 7.2	Wichtige Lasertypen	194
Tab. 7.3	Wellenlänge und Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) für Laserschutzklassen gemäß DIN EN 60 825-1	197