



Miles V. Klein Thomas E. Furtak

OPTIK

Übersetzt von A. Dorsel und T. Hellmuth

Mit 421 Abbildungen und 10 Tabellen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo

Professor *Miles V. Klein*

Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1110 W. Green Street
Urbana, IL 61801, USA

Professor *Thomas E. Furtak*

Department of Physics, Meyer Hall, Colorado School of Mines
Golden, CO 80401, USA

Übersetzer:

Dr. *Andreas Dorsel* · Dr. *Thomas Hellmuth*

Carl Zeiss, Postfach 1369/1380, D-7082 Oberkochen, Fed. Rep. of Germany

Titel der amerikanischen Originalausgabe: *Optics*, 2nd Edition
© 1986 John Wiley & Sons, Inc.

ISBN-13: 978-3-540-18911-4
DOI: 10.1007/978-3-642-73409-0

e-ISBN-13: 978-3-642-73409-0

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Klein, Miles V.:

Optik / M. V. Klein ; T. E. Furtak. Übers. von A. Dorsel u. T. Hellmuth. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ;
Paris ; Tokyo : Springer, 1988

Einheitssacht.: Optics <dt.>

NE: Furtak, Thomas E.

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 Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

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.

Druck: Druckhaus Beltz, 6944 Hemsbach/Bergstr.

2156/3150-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Zu unserer Freude liegt *Optics* nun auch in deutscher Sprache vor, und unser Dank gilt den Übersetzern Dr. A. Dorsel und Dr. T. Hellmuth sowie dem Springer-Verlag.

Die englischsprachige Ausgabe, wiewohl ursprünglich als Lehrbuch für Studenten gedacht, erfreut sich inzwischen auch als Nachschlagewerk großer Beliebtheit bei den „Professionals“ der Optik in Forschung und Industrie.

Wir wünschen und hoffen, die nun vorliegende deutsche Ausgabe möge ähnlichen Anklang finden.

Mai 1988

M.V. Klein, T.E. Furtak

Vorwort zur zweiten amerikanischen Auflage

Die erste Auflage dieses Buches entstand aus Vorlesungen, die an der Universität von Illinois im Rahmen eines einsemestrigen Kurses zum Thema „Licht“ für Studenten aus verschiedenen Semestern und Fachrichtungen wie Physik, Elektrotechnik, Maschinenbau und Chemie gehalten wurden. Der Text ist für die Verwendung in einer ein- bis zweisemestrigen Vorlesung gedacht, die sich an fortgeschrittene Studenten im Hauptstudium wendet.

Die zweite Auflage ist durchweg merklich überarbeitet worden, wobei unser Hauptanliegen war, den Zugang zu erleichtern und zu einer konsistenten Darstellung unter Beibehaltung des Bezugs zu strengen Prinzipien zu gelangen. So entstand ein Buch, das sich ebenso als Lehrbuch wie auch als Nachschlagewerk für die Grundlagen der Optik eignet. Unsere Überarbeitungen ergaben sich dabei aus fünfjähriger Lehrerfahrung in geometrischer und physikalischer Optik für Studenten im Grundstudium.

Optik stellt eine Einführung in die klassischen Ideen der geometrischen und physikalischen Optik dar, die unter Bezug auf die grundlegenden Theorien des Lichts – das Fermatsche und das Huygenssche Prinzip sowie die Maxwell-Gleichungen – betrachtet werden. Die Themen reichen von geschwächter und frustrierter Totalreflexion und geometrischer Aberrationstheorie über räumliche Filterung und Optik Gaußscher Strahlen bis hin zu statistischen Fluktuationen, wobei zusätzlich das übliche Rüstzeug für das Verständnis praktischer Optik wie Bildentstehung, optische Instrumente, Interferenz, Beugung und Polarisierung vermittelt wird. Der Leser erfährt genug über die Prinzipien optischer Komponenten, um effizient im Labor zu arbeiten und um als nächsten Schritt weiterführende Texte und die aktuelle Literatur in Angriff zu nehmen. Die wichtigste Auslassung dieses Buches ist die Quantentheorie der Wechselwirkung von Licht und Materie, weshalb auch der Laserprozeß nicht detailliert beschrieben wird. Andererseits stellt dieses Buch wohl die umfassendste elementare Behandlung der optischen Verarbeitung kohärenten Lichts und Gaußscher Strahlen dar, die gegenwärtig als Lehrbuch erhältlich ist.

Einige der in *Optik* ausgearbeiteten Themen finden sich in keinem anderen Lehrbuch. In Kap. 3 werden spezielle Strahldurchrechnungsverfahren sowohl in strenger (allgemein gültiger) Form als auch im paraxialen Grenzfall präsentiert; diese Techniken sind als Grundlage entsprechender Computerprogramme geeignet und führen außerdem zur Matrixbehandlung der Darstellung und Auswertung der Linsenwirkung im restlichen Teil des Kapitels.

Unsere Behandlung der Linsenfehler im Kap. 4 ist so geradlinig und vollständig wie möglich, wobei auch explizite Formeln für die primären Aberrationen dünner Linsen angegeben werden. Unsere Behandlung der Vielstrahlinterferenz in Kap. 5 stützt

sich auf Jones-Matrizen, ist aber bisher nicht in Lehrbüchern erschienen und eignet sich darüber hinaus ebenfalls zum Einsatz mit Computern, wo dieser leistungsstarke Formalismus die Lösung komplexer Probleme wie den Entwurf eines Interferenzfilters gestattet (vgl. die entsprechende Aufgabe am Ende des Kapitels!). Die Behandlung der Beugung in Kap. 6 und 7 basiert auf dem Konzept der Transformationen, wie man sie in fortgeschrittenen theoretischen Abhandlungen findet, obgleich sie hier in der einfachsten konsistenten Form dargeboten werden. Diese Grundlagen lassen sich direkt auf Problemstellungen eines Wissenschaftlers oder eines Ingenieurs anwenden.

Einige spezielle Änderungen und Zusätze in der überarbeiteten Auflage sind einer kurzen Anmerkung wert:

- Es wurde durchweg das SI-Einheiten-System verwandt.
- Alle einführende Theorie ist in Kap. 1 verdichtet und aus historischer Sicht wiedergegeben.
- Die gesamte Behandlung der Wechselwirkung von Licht und Materie wurde auf Kap. 2 beschränkt.
- Die Matrix-Vereinbarung in Kap. 3 ist der verbreitetsten Konvention angepaßt worden. Es wurden weitere Beispiele optischer Abbildung aufgenommen und eine überflüssige Behandlung der Bildentstehungstheorie weggelassen.
- Der Abschnitt über Linsenfehler in Kap. 4 wurde völlig neu abgefaßt.
- Neu ist Kap. 5 über Interferenz, in dem die Matrixmethode für die Vielstrahlinterferenz sowie viele weitere Beispiele für die Anwendung der Interferenz vermittelt werden; auch die Phänomene des Gitters sind in dieses Kapitel aufgenommen worden.
- Die Details der Fresnel-Kirchhoff-Theorie sind aus Kap. 6 in einen Anhang verlagert worden, und die Fourier-Mathematik wird in einem separaten Abschnitt innerhalb des Kapitels vorgestellt.
- Anspruchsvollere Themenstellungen der Beugung finden sich in Kap. 7, wobei die Notation vereinfacht wurde, um die leichtverständlichen Transformationseigenschaften der Theorie herauszustellen; diesem Kapitel wurde auch neues Material über die Optik Gaußscher Strahlen hinzugefügt.
- Der gesamte Themenkreis der partiellen Kohärenz sowie die inkohärente Bildentstehung sind in Kap. 8 enthalten.
- Rund die Hälfte der Abbildungen wurde neu gezeichnet, um die Klarheit zu erhöhen.

Die überarbeitete Version enthält eine deutlich vergrößerte Anzahl von Übungsaufgaben am Ende jedes Kapitels, die verschiedenartig genug sind, um in einer Vielzahl von Lehranwendungen hilfreich zu sein.

Als Voraussetzungen für eine anhand dieses Textes gehaltene Vorlesung betrachten wir eine Einführungsvorlesung in Physik – wobei Ideen wie Elektrizität, Magnetismus und Wellenbewegung angesprochen werden sollten – und eine Einführung in Mathematik. Es wird nicht erwartet, daß die Studenten Differentialgleichungen lösen können; diese werden nur als Bindeglied zur Wellentheorie diskutiert.

Will man das Buch in einem einsemestrigen Kurs verwenden, sind vielleicht folgende Richtlinien nützlich: Einführende Theorie (Abschn. 1.1–1.5); Wechselwirkung von Licht und Materie (Abschn. 2.1.3, 2.2.2–2.2.5, 2.3); Bildentstehung und optische Instrumente (Abschn. 3.1.1, 3.2.1, 3.3–3.5); Blenden (Abschn. 4.1.1); Interferenz

(Abschn. 5.1–5.6); Fernfeldbeugung (Abschn. 6.1, 6.2); Nahfeldbeugung (Abschn. 7.1, 7.2) und Polarisation (Abschn. 9.1, 9.2).

Vielen Kollegen und Studenten sind wir für Vorschläge und Anregungen zu Dank verpflichtet, besonders R.D. Sard und H. Macksey. Wir danken Nila Meredith, Nancy Fowler, Darcy Sorocco und Geri Frank für ihre sorgfältige Erstellung des Manuskripts und Marc de Peo für die Aufnahme einiger Photos zur Beugung. Am meisten aber danken wir unseren Familien für ihr Verständnis und ihre Unterstützung bei diesem Projekt.

Miles V. Klein, Thomas E. Furtak

Inhaltsverzeichnis

1. Die Natur des Lichtes	1
1.1 Frühe Vorstellungen und Beobachtungen	1
1.1.1 Geradlinige Ausbreitung	1
1.1.2 Reflexion	2
1.1.3 Brechung	4
1.1.4 Die Theorie des Lichtes	5
1.2 Die Teilchenmodelle	5
1.2.1 Descartes	6
1.2.2 Fermat	7
1.2.3 Das Fermatsche Prinzip	7
1.2.4 Newton	11
1.3 Die Wellenmodelle	12
1.3.1 Die Mathematik der Wellenausbreitung	12
1.3.2 Frühe Wellentheorien	20
1.3.3 Huygens	20
1.3.4 Entscheidende Experimente	24
1.4 Das Modell der elektromagnetischen Wellen	28
1.4.1 Die Maxwell-Gleichungen	30
1.4.2 Die elektromagnetische Wellengleichung	35
1.4.3 Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	37
1.5 Neuere Entwicklungen	41
1.5.1 Relativistische Optik	41
1.5.2 Quantenoptik	42
1.6 Übungsaufgaben	42
2. Optik planer Grenzflächen	47
2.1 Lichtwellen in Materie	47
2.1.1 Gebundene Ladungen und Ströme	48
2.1.2 Antwortfunktionen	52
2.1.3 Ebene Wellen in Materie	53
2.2 Reflexion und Transmission an Grenzflächen	56
2.2.1 Randbedingungen	57
2.2.2 Geometrische Optik an Grenzflächen	59
2.2.3 Relationen zwischen den Amplituden	60
2.2.4 Reflexion der Energie und Transmissionskoeffizienten	64
2.2.5 Dielektrische Medien	64
2.3 Anwendungen in der Optik ebener Oberflächen	69

2.3.1	Dielektrika	69
2.3.2	Lichtundurchlässige Medien	76
2.4	Einführung in die optischen Eigenschaften der Materie	78
2.4.1	Modell eines verdünnten, nichtpolaren Gases	78
2.4.2	Leitende Medien	84
2.4.3	Dichte Dielektrika	87
2.5	Übungsaufgaben	96
3.	Geometrische Optik	99
3.1	Strahldurchrechnung	99
3.1.1	Brechung und Reflexion	100
3.1.2	Bildentstehung	101
3.1.3	Brechung und Reflexion an sphärischen Flächen	104
3.2	Paraxiale Optik	108
3.2.1	Brechung	110
3.2.2	Reflexionen	114
3.3	Matrizen-Verfahren	117
3.3.1	Transformations-Matrizen	117
3.3.2	Einzellinse	120
3.3.3	Hauptebenen	121
3.4	Bildentstehung	127
3.4.1	Allgemeine Überlegungen zur Bildentstehung	127
3.4.2	Graphische Konstruktion der Abbildung	129
3.5	Beispiele paraxialer Optik	133
3.5.1	Abbildende Systeme	133
3.5.2	Fernrohr-Systeme	140
3.6	Übungsaufgaben	143
4.	Praktische geometrische Optik	149
4.1	Blenden	149
4.1.1	Blenden und Pupillen	149
4.1.2	Gesichtsfeldblenden und Luken	154
4.2	Radiometrie und Photometrie	158
4.2.1	Physikalische oder radiometrische Nomenklatur	158
4.2.2	Psychophysikalische oder photometrische Nomenklatur	163
4.2.3	Beispiele aus der Radiometrie	166
4.3	Linsenfehler	174
4.3.1	Monochromatische Bildfehler	175
4.3.2	Chromatische Fehler	196
4.4	Übungsaufgaben	202
5.	Interferenz	205
5.1	Zweistrahlinterferenz	206
5.1.1	Allgemeine Betrachtungen	206
5.1.2	Vektoraddition im Zeigerdiagramm	208
5.1.3	Zeitmittel der Intensität	210
5.1.4	Voraussetzungen für Interferenz	212

5.1.5	Das Youngsche Doppelspalt-Experiment	213
5.1.6	Weitere Anordnungen mit Quellen-Aufteilung	215
5.2	Vielstrahlinterferenz	215
5.2.1	Darstellung im Zeigerdiagramm	215
5.2.2	Mathematische Lösung	216
5.2.3	Gitter	219
5.3	Zweistrahlinterferenz: Parallele Grenzflächen	222
5.3.1	Differenz der optischen Weglänge in einer dielektrischen Schicht	222
5.3.2	Haidingersche Ringe	225
5.3.3	Das Michelson-Interferometer	227
5.3.4	Fizeau-Interferenz	229
5.4	Vielstrahlinterferenz: Parallele Flächen	230
5.4.1	Matrix-Formalismus	230
5.4.2	Einfache Platte	235
5.4.3	Das Fabry-Perot-Interferometer	238
5.5	Anwendungen der Interferenz	241
5.5.1	Interferometrie	241
5.5.2	Spektroskopie	244
5.5.3	Optische Beschichtungen	249
5.5.4	Optische Resonatoren und Wellenleiter	253
5.6	Übungsaufgaben	257
6.	Beugung I	263
6.1	Allgemeine Prinzipien der Beugung	263
6.1.1	Das Beugungsintegral	264
6.1.2	Diskussion des Beugungsintegrals	266
6.2	Beugung und Fernfeld	269
6.2.1	Lineare Näherung	269
6.2.2	Rechtwinklige Öffnungen	273
6.2.3	Kreisblenden	279
6.3	Fourier-Analyse	283
6.3.1	Grundsätzliche Definitionen der Fourier-Analyse	283
6.4	Beispiele der Fourier-Analyse in der Beugungstheorie	293
6.4.1	Zusammenstellung der Ergebnisse	293
6.4.2	Das Feldtheorem	296
6.4.3	Beugungsgitter	300
6.4.4	Beugungsbegrenzte Abbildung	304
6.5	Übungsaufgaben	312
7.	Beugung II	315
7.1	Fresnel-Transformationen	315
7.1.1	Allgemeine Transformation	316
7.1.2	Näherungen für die Phase	318
7.2	Fresnel-Beugung	323
7.2.1	Rechteckige Blende	324
7.2.2	Kreisblenden	335

7.3	Bildentstehung: Kohärente Objekte	344
7.3.1	Die Wirkung einer Linse	345
7.3.2	Fourier-Optik	355
7.3.3	Anwendungen der Bildentstehungstheorie	364
7.4	Übungsaufgaben	389
8.	Kohärenz	393
8.1	Zeitliche Kohärenz	393
8.1.1	Einführung in die zeitliche Kohärenz	394
8.1.2	Interferenzspektroskopie	397
8.1.3	Eigenschaften von $\gamma(\tau)$	401
8.2	Statistische Optik	406
8.2.1	Die Autokorrelationsfunktion	407
8.2.2	Modelle thermischer Lichtquellen	412
8.2.3	Kohärenzzeit und Frequenzbreite	417
8.2.4	Zusammenfassung zum Abschnitt „Zeitliche Kohärenz“	418
8.3	Räumliche Kohärenz	419
8.3.1	Das Youngsche Doppelspaltexperiment	420
8.3.2	Endliche Frequenzbreite	428
8.3.3	Transversale Kohärenz	431
8.4	Fluktuationen	434
8.4.1	Korrelationsinterferometrie	435
8.4.2	Quantenphysikalische Aspekte	438
8.5	Bildentstehung: Inkohärente Objekte	443
8.5.1	Transferfunktionen	443
8.5.2	Beispiele optischer Transferfunktionen	450
8.6	Übungsaufgaben	454
9.	Polarisation	457
9.1	Polarisiertes Licht	457
9.1.1	Arten polarisierten Lichts	457
9.1.2	Darstellungen für elliptisch polarisiertes Licht	460
9.1.3	Unpolarisiertes Licht	463
9.2	Polarisationsempfindliche optische Elemente	464
9.2.1	Erzeugung polarisierten Lichts	464
9.2.2	Phasenschieber	471
9.3	Teilweise polarisiertes Licht	476
9.3.1	Die Kohärenz-Matrix	477
9.3.2	Beispiele	478
9.3.3	Kombination von Lichtstrahlen	480
9.3.4	Beschreibung der Polarisation	484
9.4	Kristall-Optik	486
9.4.1	Elektromagnetische Wellen in anisotropen Dielektrika	487
9.4.2	Indexflächen	492
9.4.3	Zweiachsige Kristalle	497
9.5	Übungsaufgaben	500

Anhang	505
A.1 Ableitung des Fresnel-Kirchhoff-Integrals aus dem Helmholtz-Kirchhoffschen Satz	505
A.2 Ableitung des Helmholtz-Kirchhoffschen Theorems aus der Wellengleichung	509
Sachverzeichnis	511