



Max Born

# Optik

Ein Lehrbuch  
der elektromagnetischen Lichttheorie

Dritte Auflage

Mit 252 Figuren

Springer-Verlag  
Berlin · Heidelberg · New York 1972

ISBN-13: 978-3-540-05954-7

e-ISBN-13: 978-3-642-61980-9

DOI: 10.1007/978-3-642-61980-9

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen. Copyright 1933 by Julius Springer in Berlin. © by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1965, 1972. Library of Congress Catalog Card Number 72-75817. Offsetdruck und Bindearbeiten: Julius Beltz, Hemsbach/Bergstr.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinn der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

## **Vorwort zum photomechanischen Nachdruck der 1. Auflage**

Seit Jahren ist von vielen Seiten an den Springer-Verlag der Wunsch herantgetragen worden, die im Jahre 1932 veröffentlichte „Optik“ von MAX BORN wieder zugänglich zu machen. Der Grund hierfür ist zweifellos das Fehlen eines vergleichbaren deutschsprachigen Buches über Optik und die Tatsache, daß die erste Auflage durch lange Jahre den Rang eines klassischen Werkes behauptet hat und auch heute noch behauptet. Verlag und Autor haben lange gezögert, diesen Wünschen zu entsprechen, nachdem eine teilweise Neubearbeitung und Erweiterung der ersten deutschen Auflage in Zusammenarbeit mit Professor EMIL WOLF, Rochester, in englischer Sprache unter dem Titel ‘Principles of Optics’ (London-Oxford, 1959 und 1964) erschienen ist. Dieses Werk (insbesondere die neu bearbeiteten Kapitel 9–12) wird jedem bekannt und unentbehrlich sein, der sich mit moderner Optik befaßt. Nachdem nun aber auch von vielen Lesern des englischen Werkes der Wunsch nach einem Nachdruck der deutschen Auflage wiederholt worden ist, hat Herr Professor BORN dankenswerterweise seine Bedenken zurückgestellt und einem photomechanischen Nachdruck zugestimmt. Bestimmend hierfür war unter anderem die Überlegung, daß beide englischen Auflagen große Teile des alten Buches nicht enthalten, besonders die Gruppe von Kapiteln, die als „Molekulare Optik“ zusammengefaßt wurden und denen auch heute noch nicht nur zur historischen Orientierung, sondern auch zum Unterricht hoher Wert beizumessen ist.

Der Springer-Verlag legt nun diesen Nachdruck der Fachwelt und insbesondere den Studierenden in der alten Ausstattung und zum alten Preis vor in der Hoffnung, daß auch die neue Generation daraus Gewinn und Anregung ziehen wird.

Springer-Verlag

## Vorwort.

Dieses Buch unterscheidet sich von älteren Darstellungen der Optik durch die Grenzziehung gegen andere Gebiete der Physik. Die überkommene Einteilung (Mechanik, Elektrizität und Magnetismus, Optik, Thermodynamik, ergänzt durch kinetische Theorie der Materie und Atomphysik) ist wohl vorläufig für den Unterricht noch unentbehrlich, so wenig sie auch der Einheit des Lehrgebäudes Rechnung trägt. Die Optik ist seit langem als elektromagnetische Lichttheorie ein Sonderkapitel der allgemeinen Lehre vom elektromagnetischen Felde. Man kann sich dabei natürlich nicht auf das sichtbare Licht beschränken, sondern muß den Frequenzbereich nach oben und unten erweitern. Die HERTZschen Wellen pflegt man aber nicht hinzuzunehmen; nach kurzen Wellen zu scheitert es geboten, die Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen auszuschließen oder wenigstens nur andeutungsweise zu behandeln. Auch hier wird diesem Brauche gefolgt. Die Optik bewegter Körper durfte früher in einem Lehrbuche der Lichttheorie nicht fehlen. Ich halte das nicht für zeitgemäß; diese Dinge gehören zur Relativitätstheorie, die sich zu einem besonderen Kapitel der Physik entwickelt hat. Am schwierigsten ist die Frage der Spektren. Sind doch für die meisten Experimentalphysiker heute die Methoden der Optik nur Hilfsmittel zur Erforschung der Spektren und ihrer Träger. Und doch gehören, meine ich, die Gesetzmäßigkeiten der Spektrallinien nicht in ein Lehrbuch der Optik, sondern in eines der Atomphysik, die nach Umfang und Bedeutung ein selbständiges Teilgebiet der Physik bildet. Für die Optik im engeren Sinne bleibt noch genug übrig, wie der Umfang dieses Buches zeigt. Es enthält alles das, was in der Optik ohne Heranziehung der Quantentheorie verständlich ist, und sein Ziel ist, den Leser bis an die Probleme hinzuführen, die den eigentlichen Inhalt der quantentheoretischen Atomphysik bilden.

Die Darstellung setzt Kenntnis der elementaren Optik voraus und stellt sich von Anfang an auf den Standpunkt der elektromagnetischen Lichttheorie. Das ist unhistorisch, aber unvermeidlich, wenn man den Weg bis zum heutigen Stande der Forschung nicht endlos verlängern will. Über die historische Entwicklung wird in einer besonderen Einleitung kurz berichtet.

Die vorhandenen Lehr- und Handbücher habe ich zu Rate gezogen, aber nach Möglichkeit die Originalarbeiten nachgeschlagen. In manchen Einzelheiten der ersten Kapitel bin ich dem klassischen Lehrbuche von DRUDE gefolgt, weil jede Abweichung Verschlechterung bedeutet hätte. Dieses Buch gehört zu der kleinen Zahl wissenschaftlicher Schriften, die wie echte Kunstwerke niemals veralten. Nach seinem Vorbilde habe ich versucht, den durch die Forschung gewaltig vermehrten Stoff zu behandeln.

Die Literaturangaben sind nicht vollständig, sondern haben nur den Zweck, dem Leser das Nachschlagen der wichtigsten Originalarbeiten und das Zurechtfinden in dem Chaos der Zeitschriften zu erleichtern. Wenn eine Abhandlung nicht zitiert ist, so braucht das nicht immer zu bedeuten, daß ich sie für schlecht halte.

Ich habe unter meinen Mitarbeitern, Schülern und Freunden viele freundliche Helfer gefunden. Entwürfe für einige Abschnitte haben gemacht: Herr Dr. L. NORDHEIM über absorbierende Kristalle (VI, § 69); Herr Dr. W. HEITLER über die Vereinigung von geometrischen und undulatorischen Abbildungsfehlern (IV, § 56); Herr Dr. V. WEISSKOPF über die strenge Begründung des LORENTZ-LORENZschen Gesetzes (VII, § 74); Herr Dr. E. TELLER über den RAMANEFFekt (VII, § 82 und VIII, § 100). Herr Prof. Dr. F. REICHE und Herr Dr. WEISSKOPF haben sich der Mühe unterzogen, das Kapitel über Dispersionstheorie (VIII) ganz durchzusehen. Ebenso hat Herr Dr. H. A. STUART die Abschnitte über KERREFFekt und Lichtstreuung (VII, §§ 80, 81) durch wertvolle Ergänzungen bereichert. Durch die liebenswürdige Vermittlung von Herrn Prof. M. v. ROHR erhielt ich eine schöne Aufnahme der Beugungserscheinungen am rechteckigen Spalt (§ 48, Fig. 88), die Herr Prof. A. KÖHLER angefertigt hat. Herr Dr. G. CARIO hat die anomale Dispersion des Na-Dampfes nach der Methode von WOOD für dieses Buch neu aufgenommen (§ 93, Fig. 216). Allen diesen Helfern bin ich zu großer Dankbarkeit verpflichtet.

Die ersten beiden Kapitel habe ich schon vor vielen Jahren auf Grund meiner Vorlesungen niedergeschrieben. In diesem Zustande wäre das Manuskript wohl geblieben, wenn ich nicht die Hilfe zweier Studenten gewonnen hätte, der Herren H. LIEB und W. WEPPNER. Diesen habe ich die übrigen sechs Kapitel diktieren lassen. Sie haben nicht nur mit größtem Fleiße die Reinschrift und die Anfertigung der Figuren besorgt und die Rechnungen nachgeprüft, sondern auch die Rolle pädagogischer Versuchsobjekte gespielt. An ihrer Reaktion konnte ich erkennen, ob die Darstellung den Grad der Verständlichkeit erreicht hatte, den ich anstrebte. Auch bei den Korrekturen haben diese beiden Herren unermüdlich geholfen.

Wertvolle Hilfe haben mir ferner geleistet: Herr G. RATHENAU und Fräulein G. PÖSCHL bei der letzten Durchsicht des Manuskriptes und den Korrekturen; Herr W. LOTMAR bei der letzten Korrektur; die Herren A. WEYGANDT, R. BUNGERS und F. BOPP durch Anfertigung von numerischen Tabellen und Kurventafeln. Ihnen allen bin ich zu größtem Danke verpflichtet.

Dem Verlage habe ich für den sorgfältigen Druck und die schöne Ausstattung zu danken.

Göttingen, im Oktober 1932.

**MAX BORN.**

# Inhaltsverzeichnis.

Die mit \* bezeichneten Abschnitte können beim ersten Studium übergangen werden.

Einleitung. Historische Übersicht . . . . .	Seite 1
---	------------

## Erstes Kapitel.

### Elektromagnetische Lichttheorie für durchsichtige isotrope Körper ohne Farbenzerstreuung.

§ 1. Die MAXWELLSchen Gleichungen . . . . .	9
§ 2. Der Energiesatz . . . . .	11
§ 3. Fortpflanzung ebener Wellen . . . . .	12
§ 4. Das SNELLIUSSche Brechungsgesetz . . . . .	15
§ 5. Die MAXWELLSche Formel für den Brechungsindex . . . . .	17
§ 6. Die skalare einfach harmonische Welle . . . . .	19
§ 7. Die einfach harmonische Vektorwelle. Elliptische Polarisation . . . . .	21
§ 8. Lineare und zirkulare Polarisation . . . . .	23
§ 9. Die Grenzbedingungen an der Berührungsfläche zweier Medien . . . . .	26
§ 10. Die FRESNELSchen Formeln für Reflexion und Brechung einer ebenen Welle . . . . .	27
§ 11. Polarisation bei Spiegelung und Brechung . . . . .	30
* § 12. Einfluß von Übergangsschichten auf die Polarisation des reflektierten Lichts . . . . .	36
§ 13. Totalreflexion . . . . .	41

## Zweites Kapitel.

### Geometrische Optik.

§ 14. Grenzübergang zu unendlich kleiner Wellenlänge . . . . .	45
§ 15. Der Satz von MALUS und das Prinzip von FERMAT . . . . .	49
§ 16. Die Brennpunkteigenschaften eines infinitesimalen Strahlenbüschels . . . . .	52
§ 17. Kaustische Flächen und Kurven . . . . .	54
§ 18. Brechung an einer Kugelfläche . . . . .	58
* § 19. Absolute optische Instrumente . . . . .	61
§ 20. Achsensymmetrische Kollineationen . . . . .	63
§ 21. Charakteristische Funktion und Eikonal . . . . .	68
§ 22. Das Winkeleikonal . . . . .	71
§ 23. Das Winkeleikonal für die Brechung an einer Rotationsfläche . . . . .	73
§ 24. Die GAUSSSche Dioptrik . . . . .	75
§ 25. Die Strahlenbegrenzung durch Blenden . . . . .	81
§ 26. Die Farbenabweichungen . . . . .	82
§ 27. Das SEIDELSche Eikonal . . . . .	85
§ 28. Die Sinusbedingung . . . . .	88
* § 29. Die Fehler dritter Ordnung . . . . .	92
* § 30. Das SEIDELSche Eikonal eines zusammengesetzten optischen Systems . . . . .	97
* § 31. Die Fehler dritter Ordnung eines zentrierten Linsensystems . . . . .	98
* § 32. Beispiel. Die dünne Einzellinse . . . . .	103
§ 33. Optische Abbildungsinstrumente . . . . .	107

## Drittes Kapitel.

### Interferenz.

§ 34. Interferenz zweier Strahlen . . . . .	110
§ 35. Der Interferenzversuch nach YOUNG . . . . .	114
§ 36. Der FRESNELSche Doppelspiegel, das FRESNELSche Biprisma, die Halbblinsen von BILLET . . . . .	115
§ 37. Stehende Wellen . . . . .	116
§ 38. Die Farben dünner Blättchen und die NEWTONSchen Ringe . . . . .	118
§ 39. Die Schärfe der Interferenzstreifen . . . . .	122
§ 40. Interferenzrefraktometer . . . . .	127
§ 41. Interferometer . . . . .	128
§ 42. Interferenzspektroskope und ihr Auflösungsvermögen . . . . .	132

## Viertes Kapitel.

**Beugung.**

	Seite
§ 43. Wesen der Beugungserscheinungen. Kugelwellen . . . . .	141
§ 44. Das HUYGENSSCHE Prinzip . . . . .	142
§ 45. KIRCHHOFFS Formulierung des HUYGENSSCHEN Prinzips . . . . .	147
§ 46. Die KIRCHHOFFSsche Beugungstheorie . . . . .	151
§ 47. Klassifizierung der Beugungserscheinungen. Das BABINETSche Prinzip . . . . .	154
§ 48. FRAUNHOFERSche Beugungserscheinungen am Rechteck und am Spalt . . . . .	155
§ 49. Die Beugungserscheinungen an einer kreisförmigen Öffnung . . . . .	159
§ 50. Beugende Öffnungen von anderen Formen . . . . .	161
§ 51. Beugungsgitter . . . . .	162
§ 52. Ebene Kreuzgitter und Raumgitter. Röntgenspektren . . . . .	170
1. Das LAUEVerfahren . . . . .	173
2. Die Verfahren von BRAGG und DEBYE-SCHERRER-HULL . . . . .	173
§ 53. Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente . . . . .	176
a) Das Auflösungsvermögen des Gitters . . . . .	177
b) Das Auflösungsvermögen des Prismas . . . . .	178
c) Die Auflösungsgrenze des Fernrohrs . . . . .	181
d) Die Auflösungsgrenze des Mikroskops . . . . .	182
α) Abbildung selbstleuchtender Objekte . . . . .	182
β) Abbildung nicht selbstleuchtender Objekte . . . . .	184
§ 54. Messung kleiner Winkel . . . . .	187
§ 55. FRESNELSche Beugungserscheinungen . . . . .	190
* § 56. Verhalten der Lichtwellen in der Umgebung von Punkten geometrischer Strahlenvereinigung; Beugungstheorie der Bildfehler . . . . .	195
* § 57. SOMMERFELDS strenge Behandlung der Beugungserscheinungen . . . . .	209

## Fünftes Kapitel.

**Kristalloptik.**

§ 58. Elektromagnetische Lichttheorie für anisotrope Körper . . . . .	218
§ 59. Die FRESNELSchen Formeln für die Lichtausbreitung in Kristallen . . . . .	223
§ 60. Geometrische Konstruktionen zur Bestimmung von Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und Schwingungsrichtungen der Wellen . . . . .	226
§ 61. Optische Kristallklassen. Optisch-isotrope und einachsige Kristalle . . . . .	231
§ 62. Optisch zweiachsige Kristalle . . . . .	234
§ 63. Messung der optischen Kristalleigenschaften. Polarisator und Kompensator . . . . .	242
1. Das NICOLSche Prisma . . . . .	242
2. Kompensatoren . . . . .	243
a) Viertelwellenlängenplättchen . . . . .	244
b) BABINETScher Kompensator . . . . .	244
c) Der Kompensator von SOLEIL . . . . .	245
§ 64. Interferenz an Kristallplatten . . . . .	245
§ 65. Interferenzfiguren an Platten einachsiger Kristalle in konvergentem Licht . . . . .	249
§ 66. Interferenzfiguren an Platten aus optisch zweiachsigen Kristallen . . . . .	253

## Sechstes Kapitel.

**Metalloptik.**

§ 67. Fortpflanzung ebener Wellen in leitenden Substanzen . . . . .	258
§ 68. Die Reflexion des Lichtes an Metalloberflächen . . . . .	261
§ 69. Absorbierende Kristalle . . . . .	267
I. Einachsige Kristalle . . . . .	272
II. Zweiachsige Kristalle . . . . .	273
* § 70. Beugung an leitenden Kugeln . . . . .	274
* § 71. Physikalische Diskussion des Streulichts . . . . .	285

## Siebentes Kapitel.

**Molekulare Optik.**

§ 72. Polarisation und Magnetisierung . . . . .	298
§ 73. Der Tensor der Polarisierbarkeit und die wirkende Feldstärke . . . . .	307
* § 74. Molekulare Theorie der Lichtfortpflanzung, Brechung und Reflexion in isotropen Medien . . . . .	313
* § 75. Gitteroptik der Kristalle . . . . .	327
§ 76. Fall der Isotropie. Das LORENTZ-LORENZsche Gesetz . . . . .	337



	Seite
§ 77. Erzwungene Anisotropie. Berechnung von Mittelwerten . . . . .	345
§ 78. Der FARADAYeffekt. . . . .	353
* § 79. Der COTTON-MOUTON-Effekt . . . . .	360
§ 80. Der elektrische KERREffekt . . . . .	365
§ 81. Die Streuung des Lichts . . . . .	371
§ 82. Der RAMANEffekt . . . . .	390
Einfluß der Molekülrotation auf den RAMANEffekt. . . . .	393
Normalkoordinaten und Eigenschwingungen. . . . .	395
Schwingungs- und Rotations-RAMANEffekt . . . . .	397
§ 83. Optisches Drehungsvermögen isotroper Körper . . . . .	403
* § 84. Optisch aktive Kristalle . . . . .	413

### Achstes Kapitel.

#### Emission, Absorption, Dispersion.

§ 85. Klassisches Modell einer Lichtquelle . . . . .	421
§ 86. Breite von Emissionslinien. Strahlungsdämpfung und DOPPLEReffekt . . . . .	427
I. Strahlungsdämpfung . . . . .	427
II. Der DOPPLEReffekt . . . . .	431
§ 87. Breite von Emissionslinien. Stoßdämpfung . . . . .	435
* § 88. Breite von Emissionslinien. Verbreiterung durch STARKEffekt und Kopplung . . . . .	444
§ 89. Elektronentheorie des ZEEMANEffekts . . . . .	455
§ 90. Quantenprozesse und Grenzen der klassischen Theorie . . . . .	460
§ 91. Erzwungene Schwingungen eines Resonators. Stärke und Strahlungsdämpfung der optischen Resonatoren . . . . .	469
§ 92. Einfluß von Stoßdämpfung und DOPPLEReffekt auf den Resonanzvorgang . . . . .	473
§ 93. Verlauf von Dispersion und Absorption durch eine einzelne Spektrallinie . . . . .	476
I. Dispersions- und Absorptionsverlauf bei Vernachlässigung des DOPPLEReffekts . . . . .	477
II. Dispersions- und Absorptionsverlauf bei Berücksichtigung des DOPPLEReffekts . . . . .	482
§ 94. Experimentelle Bestimmung der Absorptions- und Dispersionskonstanten von Gasen . . . . .	486
I. Absorption . . . . .	486
1. Gesamtabsorption . . . . .	487
a) Unendlich dünne Schichten . . . . .	487
b) Endliche Schichtdicke. Kontinuierlicher Hintergrund. . . . .	489
2. Absorptionsverlauf . . . . .	493
II. Dispersion . . . . .	495
§ 95. Dispersionsverlauf in durchsichtigen Gebieten bei Gasen und festen Körpern . . . . .	499
* § 96. Inverser ZEEMANEffekt und Dispersion des FARADAYeffektes . . . . .	508
* § 97. Resonanzfluoreszenz und ihre Beeinflussung durch magnetische Felder . . . . .	516
* § 98. Dispersion des KERREffekts und der Streuung. Kopplungsschwingungen . . . . .	522
* § 99. Dispersion des natürlichen Drehungsvermögens für Flüssigkeiten und Gase . . . . .	527
§ 100. Ultrarote Schwingungen und RAMANEffekt . . . . .	537
I. Zweiatomige Moleküle . . . . .	538
1. Ultrarot . . . . .	538
a) Reine Rotation . . . . .	538
b) Rotationsschwingungsbanden . . . . .	540
2. RAMANEffekt . . . . .	541
* II. Mehratomige Moleküle . . . . .	543
1. Symmetrieeigenschaften und Auswahlregeln . . . . .	544
2. Beispiele mehratomiger Moleküle . . . . .	548
a) N <sub>2</sub> O . . . . .	548
b) Tetraedermoleküle AB <sub>4</sub> . . . . .	553
* § 101. Dispersion von Dipolflüssigkeiten . . . . .	560
<b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>572</b>