

Dieter Meschede

Optik, Licht und Laser

Dieter Meschede

Optik, Licht und Laser

3., durchgesehene Auflage

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

Prof. Dr. rer. nat. Dieter Meschede

Studium in Hannover, Köln, Boulder, Co (USA) und München von 1973 bis 1984. Postdoc und Assistant Professor an der Yale University, New Haven, Ct (USA) von 1984 bis 1987. Von 1988 bis 1990 Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Professor für Experimentalphysik in Hannover von 1990 bis 1994 und seit 1994 in Bonn.

1. Auflage 1999
2. Auflage 2005
- 3., durchgesehene Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Ulrich Sandten | Kerstin Hoffmann

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0143-2

Vorwort zur 2. und 3. Auflage

Die Optik spielt eine wachsende Rolle im Lehrplan naturwissenschaftlicher Fächer. Diese Entwicklung geht nicht zuletzt auf die zunehmende technologische Bedeutung der Photonik zurück. Manche sagen, mit dem 21. Jahrhundert breche die Zeit des Photons nach der Zeit des Elektrons an. Um Licht als Sensor für Meßgrößen, als Träger zur Übermittlung von Nachrichten und vieles anderes nutzbar zu machen, muß man seine Eigenschaften verstanden haben und kontrollieren können.

Auch die neuesten Erkenntnisse und Anwendungsmöglichkeiten fußen auf den seit mehr als 200 Jahren entwickelten Konzepten der Optik. Dieser Text schlägt einen Bogen von der Strahlenoptik über die Wellenoptik bis hin zur Optik mit einzelnen Photonen. Natürlich wird dem Laser, der 1960 die noch immer anhaltende revolutionäre Entwicklung der Optik angestoßen hat, breiter Raum gewidmet. Im naturwissenschaftlichen Studium soll dieser Text ein kompakter Begleiter auf dem Weg zur modernen Optik sein: Angebote zur klassischen Optik, Laserphysik, Laserspektroskopie, Nichtlinearen Optik, Angewandten Optik und Photonik können davon profitieren. Im Vordergrund stehen Konzepte, die zum vertieften Studium in der Spezialliteratur anregen sollen.

Der Leser findet ergänzende Informationen im Internet unter der Adresse:

www.uni-bonn.de/iap/OLL

Dozenten und andere Vortragende können sich dort die meisten Abbildungen des Buches für den Einsatz in der Lehre besorgen.

Sechs Jahre nach dem ersten Erscheinen ist die 2. Auflage an vielen Stellen über die erste hinausgewachsen: Es gibt zu jedem Kapitel Aufgaben, die in verschiedener Intensität zum Nachdenken über den Stoff anregen sollen. Ein neues Kapitel vermittelt erste Begriffe und Konzepte aus der Quantenoptik und zahlreiche neue Abschnitte, z.B. über photonische Materialien, nehmen aktuelle und sehr erfolgreiche Entwicklungen der Optik auf.

Schon die erste Auflage ist sehr wohlwollend aufgenommen worden. Ich bedanke mich für die zahlreichen Anregungen und Kommentare, die alle in diese Auflage eingeflossen sind. Bücher zu einem aktuellen Thema können gar nicht fertig werden, sie sind aber ein großes Privileg kontinuierlichen Lernens.

Auch eine Neuauflage kostet viel Vorbereitung, für die dafür gezeigte Geduld danke ich meiner Familie.

Bonn, im Oktober 2005 und im August 2008

Inhalt

1	Lichtstrahlen	1
1.1	Lichtstrahlen in menschlicher Erfahrung	1
1.2	Strahlenoptik	2
1.3	Reflexion	2
1.4	Brechung	3
1.5	Fermatsches Prinzip	5
1.6	Prismen	9
1.7	Lichtstrahlen in Glasfasern	12
1.8	Linsen und Hohlspiegel	17
1.9	Matrizenoptik	20
1.10	Strahlenoptik und Teilchenoptik	28
2	Wellenoptik	35
2.1	Elektromagnetische Strahlungsfelder	35
2.2	Wellentypen	45
2.3	Gauß-Strahlen	48
2.4	Polarisation	59
2.5	Beugung	63
3	Lichtausbreitung in Materie	85
3.1	Dielektrische Grenzflächen	85
3.2	Komplexe Brechzahl	92
3.3	Lichtwellenleiter	96
3.4	Funktionstypen von Fasern	106
3.5	Photonische Materialien	107

3.6	Lichtpulse in dispersiven Materialien	119
3.7	Anisotrope optische Materialien	130
3.8	Optische Modulatoren	138
4	Abbildungen	151
4.1	Das menschliche Auge	152
4.2	Lupen und Okulare	153
4.3	Mikroskope	155
4.4	Teleskope	162
4.5	Linsen: Bauformen und Fehler	167
5	Kohärenz und Interferometrie	179
5.1	Youngs Doppelspalt	179
5.2	Kohärenz und Korrelation	180
5.3	Der Doppelspaltversuch	184
5.4	Michelson-Interferometer	190
5.5	Fabry-Perot-Interferometer	196
5.6	Optische Resonatoren	203
5.7	Dünne optische Schichten	209
5.8	Holographie	212
5.9	Speckelmuster	217
6	Licht und Materie	221
6.1	Klassische Strahlungswechselwirkung	222
6.2	Zwei-Niveau-Atome	233
6.3	Stimulierte und spontane Strahlungsprozesse	244
6.4	Inversion und Verstärkung	248
7	Laser	255
7.1	Die Klassiker: Helium-Neon-Laser	258
7.2	Andere Gaslaser	269
7.3	Die Arbeitspferde: Festkörper-Laser	278
7.4	Ausgewählte Festkörperlaser	282

Inhalt		IX
7.5	Laser mit vibronischen Zuständen	290
7.6	Durchstimmbare Ringlaser	294
8	Laserdynamik	299
8.1	Grundzüge einer Lasertheorie	299
8.2	Laser-Ratengleichungen	306
8.3	Schwellenlose Laser und Mikrolaser	310
8.4	Laserrauschen	314
8.5	Gepulste Laser	323
9	Halbleiter-Laser	337
9.1	Halbleiter	337
9.2	Optische Eigenschaften von Halbleitern	340
9.3	Heterostruktur-Laser	350
9.4	Dynamische Eigenschaften von Halbleiter-Lasern	360
9.5	Laserdioden – Diodenlaser – Lasersysteme	367
9.6	Hochleistungs-Laserdioden	370
10	Sensoren für Licht	375
10.1	Kenngößen optischer Detektoren	376
10.2	Schwankungen optoelektrischer Meßgrößen	381
10.3	Photonenrauschen und Nachweisgrenzen	383
10.4	Thermische Detektoren	389
10.5	Quantensensoren I: Photomultiplier	391
10.6	Quantensensoren II: Halbleitersensoren	396
10.7	Positions- und Bildsensoren	401
11	Laserspektroskopie	407
11.1	Laserinduzierte Fluoreszenz	407
11.2	Absorption und Dispersion	408
11.3	Spektrallinien: Form und Breite	410
11.4	Doppler-freie Spektroskopie	417
11.5	Transiente Phänomene	424

11.6	Lichtkräfte	430
12	Grundzüge der Quantenoptik	445
12.1	Hat das Licht Quantencharakter?	445
12.2	Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	447
12.3	Spontane Emission	450
12.4	Schwache Kopplung und starke Kopplung	457
12.5	Resonanzfluoreszenz	461
12.6	Lichtfelder in der Quantenoptik	469
12.7	Zwei-Photonen-Optik	479
12.8	Verschränkte Photonen	484
13	Nichtlineare Optik I: Optische Mischprozesse	493
13.1	Anharmonische geladene Oszillatoren	493
13.2	Nichtlineare Suszeptibilität 2. Ordnung	495
13.3	Wellenausbreitung in nichtlinearen Medien	501
13.4	Frequenzverdopplung	504
13.5	Summen- und Differenzfrequenz	517
14	Nichtlineare Optik II: Vierwellenmischung	525
14.1	Frequenzverdreifachung in Gasen	526
14.2	Nichtlineare Brechzahl – der optische Kerr-Effekt	527
14.3	Selbstphasenmodulation	536
A	Mathematik für die Optik	539
A.1	Spektralzerlegung schwankender Meßgrößen	539
A.2	Poynting-Theorem	545
B	Ergänzungen zur Quantenmechanik	546
B.1	Zeitliche Entwicklung eines Zweizustandssystems	546
B.2	Dichtematrix-Formalismus	547
B.3	Zustandsdichten	548
	Literaturverzeichnis	551

Inhalt

XI

Sachverzeichnis

561