

J. Bille  
W. Schlegel  
(Hrsg.)

# Medizinische Physik

**3** Medizinische  
Laserphysik

 Springer

J. Bille  
W. Schlegel  
(Hrsg.)

# Medizinische Physik

## 3 Medizinische Laserphysik

 Springer

## Medizinische Physik 3

J. Bille W. Schlegel (Hrsg.)

---

# Medizinische Physik 3

Medizinische Laserphysik

Mit 272 Abbildungen und 40 Tabellen

 Springer

**Professor Dr. Josef Bille**

Universität Heidelberg, Fakultät Physik und Astronomie  
Kirchhoff-Institut Physik, Im Neuenheimer Feld 227  
69120 Heidelberg, Deutschland

**Professor Dr. Wolfgang Schlegel**

Abt. Medizinische Physik, FSE, Deutsches Krebsforschungszentrum  
Im Neuenheimer Feld 280  
69120 Heidelberg, Deutschland

ISBN 3-540-65255-8 Springer Berlin Heidelberg New York

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funkübertragung, 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 jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

[springer.de](http://springer.de)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005  
Printed in Germany

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.

Satz: Frank Herweg, Leutershausen

Einbandabbildung von Frau Dipl. Phys. Renate Jerecic

Einbandherstellung: *design & production* GmbH, Heidelberg

SPIN: 10677736      57/3141/ba - 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist der dritte Band einer dreibändigen Lehrbuchreihe zur Medizinischen Physik. Die Buchreihe ist auf der Grundlage der schriftlichen Kursunterlagen des Weiterbildungsstudiums „Medizinische Physik“ an der Universität Heidelberg entstanden. Es handelt sich um das erste umfassende deutschsprachige Lehrbuch der Medizinischen Physik.

Der Inhalt der drei Bände orientiert sich am Stoffkatalog der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik (DGMP). Er erfüllt damit, in Verbindung mit einem entsprechenden Leistungsnachweis und einer dreijährigen Berufserfahrung, eine der Voraussetzungen für die Weiterbildung, die von der DGMP zur Erlangung der Fachanerkennung für Medizinische Physik gestellt werden. Der Anerkennungsantrag muß jedoch individuell bei der DGMP gestellt werden.

Die drei Bände *Medizinische Physik* gelten in Zukunft als Arbeitsgrundlage für die in Blockform angebotenen Weiterbildungskurse an der Universität Heidelberg. Sie gliedern sich in Band 1: *Medizinische Physik: Grundlagen*, Band 2: *Medizinische Physik: Medizinische Strahlenphysik* und Band 3: *Medizinische Physik: Medizinische Laserphysik*. Die Spezialisierung auf den Gebieten der medizinischen Strahlenphysik und der medizinischen Laserphysik begründet sich durch die Forschungsschwerpunkte innerhalb der Medizinischen Physik an der Universität Heidelberg. Darüber hinaus entspricht der Inhalt der Bände 2 und 3 den Anforderungen an die Zertifizierung der Spezialrichtungen „Medizinische Strahlenphysik“ und „Medizinische Laserphysik“ der DGMP.

Im bereits erschienenen Band 1: *Medizinische Physik: Grundlagen* (1999) sind die Grundlagen aus der Medizin, die für die medizinische Physik und insbesondere für die Spezialisierungen „Medizinische Strahlenphysik“ und „Medizinische Laserphysik“ von Bedeutung sind, in Darstellungen zusammengefasst, die auf die Vorkenntnisse von Physikern abgestimmt sind. Bei den Grundlagen aus der Medizin handelt es sich im einzelnen um Anatomie, radiologische Anatomie, Physiologie und Pathologie. Als Grundlagen aus den Naturwissenschaften und der Mathematik werden Biochemie, molekulare Biophysik, Biophysik, Umweltphysik, Genetik, Biomathematik und medizinische Informatik behandelt. Aus dem Gebiet der Medizintechnik werden die Teilgebiete Biomagnetismus sowie medizinische Akustik und Audiologie

dargestellt. Des weiteren wird auf organisatorische, rechtliche und ethische Grundsätze im Gesundheitswesen eingegangen.

Im ebenfalls bereits erschienenen Band 2: *Medizinische Physik: Medizinische Strahlenphysik* (2002) ist das Gebiet der medizinischen Strahlenphysik in Grundlagen, Methoden und klinischen Anwendungen dargestellt. Im ersten Teil von Band 2 werden die Grundlagen der Kernphysik, die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, die Konzepte in der Strahlenphysik und Dosimetrie, die Messmethoden in der Dosimetrie, die Grundlagen der Strahlenwirkungen und Erzeugung von ionisierenden Strahlen zusammengefasst. Der zweite Teil von Band 2 bietet eine Darstellung der mathematischen, physikalischen und technischen Grundlagen der radiologischen Diagnostik. Dabei werden die Nuklearmedizin, die Ultraschalldiagnostik, die Röntgencomputertomographie und die Magnetresonanztomographie sowie -spektroskopie behandelt. Im dritten Teil von Band 2 wird auf die mathematischen, physikalischen und technischen Grundlagen der Strahlentherapie eingegangen. Es werden die Bestrahlungsgeräte der Teletherapie und die Therapieplanung beschrieben. Der vierte Teil von Band 2 bietet eine Auswahl von Themen aus der klinischen Radiologie.

Der vorliegende Band 3, *Medizinische Laserphysik*, gliedert sich in

- physikalische Grundlagen: visuelles System (Kap. 1), optische Komponenten (Kap. 2), Beugungsoptik (Kap. 3), kohärente Optik (Kap. 4), nichtlineare Optik und kurze Laserpulse (Kap. 5), lineare Laserspektroskopiemethoden (Kap. 6), nichtlineare Laserspektroskopiemethoden (Kap. 7),
- medizinisch-optische diagnostische Systeme: konfokale Mikroskopie in der Genomforschung (Kap. 8), hochauflösende 3D-Lichtmikroskopie (Kap. 9), Flusszytometrie (Kap. 10),
- moderne Verfahren der Interferometrie und Lasermesstechnik: optische Datenerfassung und Verarbeitung (Kap. 11), Holographie (Kap. 12), optische Interferometrie (Kap. 13),
- medizinische Lasersysteme und Laserchirurgie: Lasersysteme (Kap. 14), Laser-Gewebe-Wechselwirkungen (Kap. 15), Laser in der Augenheilkunde (Kap. 16), Laseranwendungen in der Orthopädie (Kap. 17), stereotaktische Laserneurochirurgie (Kap. 18), Anwendungen der Lasertechnik in der Zahnarztpraxis (Kap. 19), Lasersicherheit Gerätetechnik: Medizinproduktegesetz und technische Normen (Kap. 20).

Damit wird den Medizinphysikern wie auch den Lasermedizinern eine umfassende Darstellung geboten, die auf der Grundlage der physikalischen Prinzipien und der gerätetechnischen Verfahren zu einem vertieften Verständnis der vielfältigen diagnostischen und therapeutischen Einsatzmöglichkeiten der medizinischen Laserphysik in der biomedizinischen Forschung wie auch der klinischen Praxis führt.

An der Überarbeitung der Manuskripte haben die Mitglieder des Heidelberger Graduiertenkollegs Tumordiagnostik und -therapie unter Einsatz dreidimensionaler radiologischer und lasermedizinischer Verfahren mitgewirkt.

Danken möchten wir insbesondere den Tutoren der Beiträge des vorliegenden Buchs, Frau Dipl. Phys. Joana Büchler de Matos Costa, Herrn Dr. Klaus Greger, Herrn Dr. Lars Georg Hildenbrand, Herrn Dr. Thomas Hübner, Herrn Dr. Michael Klingenberg, Frau Dr. Nicole Marme, Herrn Dr. Thomas Nirmaier, Herrn Dr. Markus Rheinwald, Herrn Dr. Steffen Sammet, Herrn Dr. Andreas Velten, Herrn Olivier La Schiazza sowie Herrn Dr. Oliver Vossen.

Bei der Überarbeitung, der Zusammenführung und Abstimmung der Manuskripte haben sich Herr Dr. Klaus Borkenstein, Frau Dr. Nina Korablinova und Herr Dr. Christian Rumpf verdient gemacht. Ihnen gilt unser ganz besonderer Dank.

Heidelberg,  
März 2004

*Josef Bille*  
*Wolfgang Schlegel*



# Inhaltsverzeichnis

## 1 Das visuelle System des Menschen

|  |    |
|--|----|
| J.F. Bille, N.A. Korablinova, U. von Pape, A. Schmitt-Lieb . . . . .   | 1  |
| 1.1 Die Optik des Auges . . . . .  | 1  |
| 1.1.1 Physiologie des menschlichen Auges . . . . .   | 1  |
| 1.1.2 Das optische System des Auges . . . . .  | 2  |
| 1.1.3 Modelle des menschlichen Auges . . . . .   | 3  |
| 1.2 Grenzen der räumlichen Auflösung des Auges . . . . .   | 5  |
| 1.2.1 Auflösungsvermögen (Visus) . . . . .   | 5  |
| 1.2.2 Einfluss der Beugungseffekten . . . . .  | 6  |
| 1.2.3 Abbildungsfehler des menschlichen Auges . . . . .  | 9  |
| 1.2.4 Rezeptorendichte der Netzhaut . . . . .  | 10 |
| 1.3 Optische Qualität des Auges . . . . .  | 12 |
| 1.4 Hornhauttopographie . . . . .  | 15 |
| 1.4.1 Messmethoden . . . . .   | 15 |
| 1.4.2 Darstellung der Hornhauttopographie . . . . .  | 21 |
| 1.4.3 Ausblick . . . . .   | 21 |
| 1.5 Aberrometrie . . . . .   | 22 |
| 1.5.1 Messmethoden . . . . .   | 22 |
| 1.5.2 Darstellung der Ergebnisse . . . . .   | 25 |
| 1.6 Wellenfrontbasierte Optimierung der optischen Abbildung<br>des menschlichen Auges mittels refraktiver Laserchirurgie . . . . .       | 28 |
| 1.6.1 Einführung . . . . .   | 28 |
| 1.6.2 Die wellenfrontgesteuerte LASIK . . . . .  | 31 |
| 1.6.3 Erste klinische Ergebnisse<br>der wellenfrontgesteuerten LASIK verglichen<br>mit Daten der konventionellen LASIK-Methode . . . . . | 33 |
| 1.6.4 Ausblick . . . . .   | 37 |
| Literatur . . . . .  | 38 |

## 2 Optische Komponenten

|  |    |
|--|----|
| M. Niemz . . . . .                                   | 39 |
| 2.1 Eigenschaften von optischen Substraten . . . . . | 39 |
| 2.2 Brechende Medien . . . . .                       | 41 |
| 2.2.1 Linsen . . . . .                               | 41 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.2.2 | Prismen . . . . .                            | 42 |
| 2.2.3 | Lichtfasern . . . . .                        | 42 |
| 2.3   | Beschichtungen, Spiegel und Filter . . . . . | 44 |
| 2.3.1 | Metallische Beschichtungen . . . . .         | 44 |
| 2.3.2 | Dielektrische Beschichtungen . . . . .       | 45 |
| 2.4   | Polarisationsempfindliche Optiken . . . . .  | 46 |
| 2.4.1 | Polarisatoren . . . . .                      | 46 |
| 2.4.2 | Verzögerungsplatten . . . . .                | 47 |
| 2.4.3 | Pockel-Zellen . . . . .                      | 47 |
| 2.4.4 | Faraday-Rotatoren . . . . .                  | 48 |
| 2.5   | Lichtmodulatoren . . . . .                   | 48 |
| 2.6   | Optische Detektoren . . . . .                | 49 |
| 2.6.1 | Photodioden . . . . .                        | 49 |
| 2.6.2 | Charge-Coupled Devices (CCD) . . . . .       | 49 |
| 2.6.3 | Photomultiplier . . . . .                    | 50 |
| 2.6.4 | Streak-Kameras . . . . .                     | 50 |
|       | Literatur . . . . .                          | 51 |

### 3 Beugungsoptik

|       |  |    |
|-------|--|----|
|       | R. Müller, T. Fernholz . . . . .                             | 53 |
| 3.1   | Einführung und einfache Beispiele . . . . .                  | 53 |
| 3.1.1 | Was ist Beugung? . . . . .                                   | 53 |
| 3.1.2 | Beispiele für Beugung . . . . .                              | 53 |
| 3.1.3 | Das Huygens-Fresnel-Prinzip . . . . .                        | 53 |
| 3.1.4 | Die Beugung am Doppelspalt . . . . .                         | 54 |
| 3.1.5 | Die Beugung am Einzelspalt . . . . .                         | 55 |
| 3.1.6 | Die Beugung am Gitter . . . . .                              | 56 |
| 3.1.7 | Der Einfluss der endlichen Spaltbreite . . . . .             | 57 |
| 3.2   | Die Theorie der Beugung . . . . .                            | 57 |
| 3.2.1 | Das Beugungsintegral . . . . .                               | 58 |
| 3.2.2 | Das Babinet-Prinzip . . . . .                                | 59 |
| 3.3   | Die Fraunhofer-Beugung . . . . .                             | 60 |
| 3.3.1 | Die Berechnung einer rechteckigen Blende . . . . .           | 61 |
| 3.3.2 | Die Beugung an einer kreisförmigen Blende . . . . .          | 62 |
| 3.3.3 | Das Auflösungsvermögen eines optischen Instruments . . . . . | 66 |
| 3.4   | Fresnel-Beugung . . . . .                                    | 66 |
| 3.4.1 | Die Cornu-Spirale . . . . .                                  | 69 |
|       | Literatur . . . . .  | 71 |

### 4 Kohärente Optik

|       |   |    |
|-------|---|----|
|       | R. Grimm . . . . .                        | 73 |
| 4.1   | Der Kohärenzbegriff . . . . .             | 73 |
| 4.1.1 | Interferenzfähigkeit des Lichts . . . . . | 73 |
| 4.1.2 | Zeitliche Kohärenz . . . . .              | 75 |

4.1.3 Räumliche Kohärenz . . . . . 77

4.2 Ausbreitung von Laserlicht: der Gauß-Strahl . . . . . 78

4.3 Resonante Wechselwirkung von Laserlicht und Materie . . . . . 82

4.3.1 Elektromagnetische Welle im polarisierbaren Medium . . . 82

4.3.2 Klassisches Oszillatormodell: Absorption und Dispersion . . . 84

4.3.3 Verbindung zur Quantenmechanik und Lasertheorie . . . . 85

Literatur . . . . . 87

**5 Nichtlineare Optik und kurze Laserpulse**

F.X. Kärtner . . . . . 89

5.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen . . . . . 89

5.2 Lineare Wellenausbreitung . . . . . 90

5.2.1 Dispersion . . . . . 90

5.2.2 Dämpfung und Verstärkung . . . . . 93

5.3 Nichtlineare Wellenausbreitung . . . . . 93

5.3.1 Die nichtlineare Suszeptibilität . . . . . 94

5.3.2 Wichtige nichtlineare Prozesse . . . . . 96

5.4 Erzeugung von kurzen Laserpulsen . . . . . 99

5.5 Güteschaltung . . . . . 101

5.5.1 Aktive Güteschaltung . . . . . 101

5.5.2 Passive Güteschaltung . . . . . 102

5.6 Modenkopplung . . . . . 103

5.6.1 Aktive Modenkopplung . . . . . 103

5.6.2 Passive Modenkopplung . . . . . 105

5.7 Lasersysteme . . . . . 107

5.7.1 Kompakter diodengepumpter modengekoppelter Laser . . 107

5.7.2 Regenerativer Verstärker . . . . . 108

Literatur . . . . . 108

**6 Lineare Laserspektroskopiemethoden**

T. Dreier . . . . . 111

6.1 Lineare Laserspektroskopiemethoden . . . . . 111

6.1.1 Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) . . . . . 111

6.1.2 Zweiniveaumodell der LIF . . . . . 113

6.2 Absorptionsspektroskopie . . . . . 116

6.2.1 Absorption und Dispersion . . . . . 116

6.2.2 Absorptionsspektroskopie mit Lasern . . . . . 118

Literatur . . . . . 125

**7 Nichtlineare Laserspektroskopiemethoden**

T. Dreier . . . . . 127

7.1 Die nichtlineare Wechselwirkung von quantenmechanischen Systemen mit Licht . . . . . 127

7.1.1 Nichtlineare Raman-Prozesse . . . . . 127

7.2 Nichtlineare Absorptionsspektroskopie ..... 132  
 7.2.1 DFWM ..... 133  
 7.2.2 Lasermassenspektroskopie ..... 135  
 Literatur ..... 136

**8 Konfokale Mikroskopie in der Genomforschung**

C. Cremer ..... 137

8.1 Problemstellung ..... 137  
 8.2 Methodische Grundlagen der dreidimensionalen Mikroskopie .... 139  
 8.2.1 Grundprinzip ..... 139  
 8.2.2 Konfokale Fluoreszenzmikroskopie ..... 140  
 8.2.3 Fluoreszenzmarkierungstechniken  
 für die 3D-Mikroskopie des Genoms ..... 144  
 8.2.4 Dreidimensionale Digitale Bildverarbeitung ..... 145  
 8.2.5 Experimentelle Kalibrierungsmessungen ..... 148  
 8.2.6 Modelle zur Architektur von Zellkern und Chromosomen 155  
 8.3 Ergebnisse ..... 158  
 8.3.1 Ausdehnung individueller Chromosomenterritorien  
 im Zellkern: Vergleich mit quantitativen Voraussagen ... 158  
 8.3.2 Exklusivität der Chromosomenterritorien ..... 159  
 8.3.3 Morphologie von Chromosomenterritorien ..... 159  
 8.3.4 Topologie der Chromosomenterritorien ..... 162  
 8.3.5 Dynamik der Kernarchitektur ..... 164  
 8.4 Perspektiven ..... 165  
 8.4.1 Bedeutung einer dreidimensionalen Kernarchitektur .... 165  
 8.4.2 Weiterentwicklung der konfokalen Mikroskopie ..... 166  
 8.4.3 Verbesserung von Markierungsmethoden ..... 169  
 8.4.4 Weiterentwicklung von Computermodellen ..... 169  
 Literatur ..... 171

**9 Hochauflösende 3D-Lichtmikroskopie**

S.W. Hell ..... 179

9.1 Grundlegendes zur Auflösung ..... 179  
 9.2 Die Punktabbildungsfunktion als dreidimensionale Sonde ..... 182  
 9.2.1 Das konfokale Fluoreszenzrastermikroskop ..... 182  
 9.2.2 Das Multiphotonenfluoreszenzrastermikroskop ..... 187  
 9.2.3 Anregung durch Ein- und Multiphotonenabsorption .... 189  
 9.2.4 Limitierende Effekte in der Multiphotonenmikroskopie .. 196  
 9.2.5 Die Detektionseffizienz eines Rastermikroskops ..... 198  
 9.2.6 Anwendungsbeispiele der Multiphotonenmikroskopie .... 198  
 9.2.7 Auflösung der Ein- und Multiphotonenmikroskopie ..... 202  
 9.2.8 Konfokale Multiphotonenmikroskopie ..... 202  
 9.3 Point-Spread-Function-Engineering als Ansatz  
 zur Auflösungserhöhung im Fernfeldmikroskop ..... 203

9.3.1 Grundlagen der  $4\pi$ -konfokalen Mikroskopie . . . . . 204  
 9.3.2 Multiphotonen- $4\pi$ -konfokale Mikroskopie . . . . . 208  
 9.3.3 Höchstaufösung in lateraler Richtung: Neuere Konzepte . 212  
 9.4 Zusammenfassung und Ausblick . . . . . 213  
 Literatur . . . . . 214

**10 Flusszytometrie**

M. Hausmann . . . . . 215  
 10.1 Historie . . . . . 216  
 10.2 Allgemeiner Aufbau und Prinzip eines Flusszytometers . . . . . 217  
 10.3 Technische Aspekte . . . . . 220  
     10.3.1 Lichtquellen . . . . . 220  
     10.3.2 Anregungsoptik . . . . . 220  
     10.3.3 Detektionsoptik . . . . . 223  
     10.3.4 Hydrodynamik von „Jet-in-Air“-Tröpfchensortern . . . . . 225  
 10.4 Fluoreszenzmarkierung . . . . . 230  
 10.5 Slit-Scan-Analyse und Sortierung . . . . . 231  
 Literatur . . . . . 234

**11 Optische Datenerfassung und -verarbeitung**

H. Tiziani . . . . . 237  
 11.1 Optische Datenspeicherung und -wiedergabe bei CD . . . . . 237  
     11.1.1 Konfokale Mikroskopie . . . . . 239  
     11.1.2 Bildübertragung . . . . . 241  
     11.1.3 Konfokale Fluoreszenzmikroskopie . . . . . 243  
     11.1.4 Beobachtung . . . . . 244  
 Literatur . . . . . 248

**12 Holographie und holographische Interferometrie**

H. Tiziani . . . . . 249  
 12.1 Aufzeichnung, Speicherung und Rekonstruktion  
     des Hogramms . . . . . 249  
     12.1.1 Aufzeichnung des Hogramms . . . . . 249  
     12.1.2 Rekonstruktion des Hogramms . . . . . 250  
     12.1.3 Holographische Interferometrie . . . . . 251  
 Literatur . . . . . 255

**13 Optische Interferometrie**

H. Tiziani . . . . . 257  
 13.1 Grundbegriffe der Interferometrie . . . . . 257  
     13.1.1 Linienbreite der Lichtquelle und Kohärenzlänge . . . . . 257  
     13.1.2 Räumliche Kohärenz . . . . . 259  
     13.1.3 Zweistrahlinterferenz . . . . . 259  
     13.1.4 Zweistrahlinterferenzanordnungen . . . . . 260

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 13.2   | Einige Interferenzanordnungen in der Messtechnik . . . . .                     | 261 |
| 13.2.1 | Fizeau-Interferenzgerät . . . . .  | 261 |
| 13.2.2 | Michelson-Anordnung . . . . .  | 262 |
| 13.2.3 | Twyman-Green-Interferometer . . . . .  | 263 |
| 13.2.4 | Interferometrie in der Längenmessung . . . . .                                 | 264 |
| 13.2.5 | Mach-Zehnder-Interferometer . . . . .  | 264 |
| 13.2.6 | Wellenfrontscherungsinterferometer . . . . .                                   | 265 |
| 13.3   | Digitale interferometrische Messtechnik . . . . .                              | 266 |
| 13.3.1 | Phasenschiebungsverfahren . . . . .  | 267 |
| 13.3.2 | Anwendung der Interferenzmethoden<br>in der Mikroskopie . . . . .              | 269 |
| 13.4   | Heterodynverfahren . . . . .   | 271 |
| 13.5   | Interferometrische Längenmessung . . . . .                                     | 272 |
| 13.5.1 | Interferometrische Messung geometrischer Größen<br>und Fehlerquellen . . . . . | 274 |
| 13.5.2 | Fehlerquellen . . . . .  | 275 |
| 13.6   | Weitere Verfahren der interferometrischen Messtechnik . . . . .                | 275 |
| 13.6.1 | Zweiwellenlängen-( $2\lambda$ )-Verfahren . . . . .                            | 275 |
| 13.6.2 | Interferometer<br>mit computergeneriertem Prüfhologramm . . . . .              | 276 |
| 13.6.3 | Weißlichtinterferometrie . . . . .   | 276 |
|        | Literatur . . . . .  | 277 |

## 14 Lasersysteme

|  |     |
|--|-----|
| J. Bille . . . . .   | 279 |
| 14.1 Gaslaser . . . . .  | 279 |
| 14.1.1 Helium-Neon-(HeNe-)Laser . . . . .                                      | 279 |
| 14.1.2 Argon-Ionen-( $\text{Ar}^{+}$ -)Laser . . . . .                         | 281 |
| 14.1.3 Kohlendioxid-( $\text{CO}_2$ -)Laser . . . . .                          | 282 |
| 14.1.4 Excimerlaser . . . . .  | 286 |
| 14.1.5 Konstruktion . . . . .  | 288 |
| 14.1.6 Farbstofflaser . . . . .  | 290 |
| 14.1.7 Laseraufbau . . . . .   | 293 |
| 14.2 Festkörperlaser . . . . .   | 295 |
| 14.2.1 Rubinlaser . . . . .  | 296 |
| 14.2.2 Neodym-YAG-Laser (inkl. Erbium-, Holmiumlaser) . . . . .                | 297 |
| 14.2.3 Halbleiterlaser . . . . .   | 300 |
| 14.3 Diodengepumpte Festkörperlaser . . . . .                                  | 303 |
| 14.4 Ultrakurzpulslaser . . . . .  | 305 |
| 14.4.1 Pikosekundenlaser im IR, sichtbaren<br>und UV-Spektralbereich . . . . . | 305 |
| 14.4.2 Ti:Saphir-Femtosekundenlaser . . . . .                                  | 314 |
| 14.5 Freie-Elektronen-Laser . . . . .  | 319 |
| 14.5.1 Physikalisches Prinzip der Freie-Elektronen-Laser . . . . .             | 319 |

14.5.2 Die Freie-Elektronen-Laser FELIX und S-DALINAC . . . . 320  
 14.5.3 Medizinische Forschung mit FEL . . . . . 321  
 Literatur . . . . . 322

**15 Laser-Gewebe-Wechselwirkungen**

J. Bille . . . . . 323  
 15.1 Überblick über die Arten der Laser-Gewebe-Wechselwirkungen . . 323  
     15.1.1 Klassifizierung nach Wechselwirkungszeiten . . . . . 323  
     15.1.2 Beispiele für die klinische Lasertherapien . . . . . 324  
 15.2 Photochemische Wechselwirkung . . . . . 325  
     15.2.1 Grundlagen der photochemischen Wechselwirkung . . . . . 325  
     15.2.2 Prinzip der photodynamischen Therapie . . . . . 326  
 15.3 Photothermische Wechselwirkung . . . . . 326  
     15.3.1 Grundlagen der photothermischen Wechselwirkung . . . . . 326  
     15.3.2 Modell der photothermischen Wechselwirkung . . . . . 328  
 15.4 Photoablative Wechselwirkung . . . . . 331  
     15.4.1 Grundlagen der photoablativen Wechselwirkung . . . . . 331  
     15.4.2 Modell der photoablativen Wechselwirkung . . . . . 333  
 15.5 Photodisruptive/plasmainduzierte Wechselwirkung . . . . . 335  
     15.5.1 Grundlagen der photodisruptiven/  
         plasmainduzierten Wechselwirkung . . . . . 335  
     15.5.2 Theoretisches Modell der plasmainduzierten Ablation . . . 339  
     15.5.3 Dynamik des Ablationsprozesse . . . . . 341  
 Literatur . . . . . 343

**16 Laser in der Augenheilkunde**

J.F. Bille, M.H. Niemz . . . . . 345  
 16.1 Diagnostische Laseranwendungen . . . . . 347  
     16.1.1 Laserscanningtomographie zur Glaukomdiagnostik  
         („grüner Star“) . . . . . 348  
     16.1.2 Aktiv-optische Verbesserung der Tiefenauflösung . . . . . 349  
     16.1.3 Fourier-ellipsometrische Vermessung  
         der Nervenfaserschicht . . . . . 350  
 16.2 Therapeutische Laseranwendungen . . . . . 352  
     16.2.1 Die Netzhaut . . . . . 352  
     16.2.2 Die Linse . . . . . 353  
     16.2.3 Die Iris . . . . . 355  
     16.2.4 Das Trabekelwerk . . . . . 356  
     16.2.5 Die Sklera . . . . . 356  
     16.2.6 Die Hornhaut . . . . . 357  
 16.3 Ausblick . . . . . 361  
 Literatur . . . . . 362