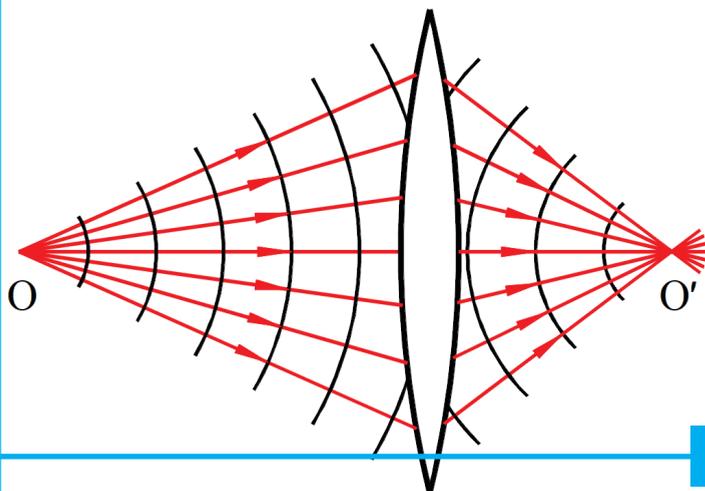


Rolf Martin

# Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften

Aufgaben mit Lösungen



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Martin

## Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften



### **Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Rolf Martin

# Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften

Aufgaben mit Lösungen

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

## Der Autor:

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Rolf Martin, Hochschule Esslingen



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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.

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © Prof. Dr. Dr. Rolf Martin

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47873-2

E-Book-ISBN 978-3-446-47878-7

*Für Maximilian, Greta, Moritz und Paul*



# Vorwort

Das vorliegende Übungsbuch mit Aufgaben zur Optik sowie deren Lösungen ist gedacht als Ergänzung zum Lehrbuch „Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften“, herausgegeben 2023 von E. Hering und R. Martin. Die ersten sieben Grundlagenkapitel des Lehrbuchs enthalten bereits eine große Zahl von Beispielen, die durch das Aufgabenbuch wesentlich erweitert werden.

Mit dieser Aufgabensammlung und den ausführlichen Lösungen wird ein Leserwunsch erfüllt. Die Aufgaben sind von verschiedenen Schwierigkeitsgraden; sie reichen von einfachen und leicht zu beantwortenden Fragen bis zu sehr komplexen Problemen, die mitunter nur mithilfe eines Rechners gelöst werden können. Mit vielen Abbildungen werden die Aufgaben und deren Lösungen veranschaulicht.

Die Zielgruppe, die mit diesem Buch angesprochen werden soll, sind Studierende, die ihre Kenntnisse und Fertigkeiten bei der Lösung optischer Fragestellungen vertiefen und festigen und sich auf Prüfungen dieses Fachgebiets vorbereiten wollen. Darüber hinaus ist die Beschäftigung mit optischen Fragen sicher auch interessant für Ingenieure und Naturwissenschaftler, die bereits mit optischen Technologien befasst sind oder aber sich einen Zugang erarbeiten wollen.

Das Aufgabenbuch ist genauso gegliedert wie sein großer Bruder, das Lehrbuch. Zu allen sieben Grundlagenkapiteln desselben wurden passende Übungsaufgaben formuliert und auf das Lehrbuch abgestimmt. Sämtliche Verweise auf Kapitel, Gleichungen, Bilder und Tabellen des Lehrbuches werden zur Unterscheidung kursiv dargestellt. Die Verweise innerhalb dieses Buches bleiben in Standardschrift.

Ich bedanke mich für die hervorragende Betreuung durch meine Lektorin, Frau Natalia Silakova im Carl Hanser Verlag. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau, die wieder einmal viel Geduld aufgebracht hat während der Entstehungszeit des Werks.

Meinen Leserinnen und Lesern wünsche ich nützliche Erkenntnisse auf dem Gebiet der Optik und Photonik. Vor allem aber hoffe ich, dass sie dieselbe Faszination erfahren wie ich, der ich als 13-jähriger Schüler erstmals mit optischen Phänomenen Bekanntschaft machte und seither davon begeistert bin.

Für Hinweise und Verbesserungsvorschläge bin ich stets dankbar.

Köngen, im Frühjahr 2023

Rolf Martin



# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	7
----------------------	---

<b>Zum Geleit</b> .....	21
-------------------------	----

## Teil I Aufgaben

<b>1 Einleitung</b> .....	25
---------------------------	----

1.1 Lichtwellenlängen .....	25
1.2 Welleneigenschaften .....	25

<b>2 Geometrische Optik</b> .....	27
-----------------------------------	----

2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung .....	27
2.2 Fermat'sches Prinzip .....	27
2.3 Reflexion von Lichtstrahlen .....	27
2.3.1 Reflexionsgesetz aus Fermat'schem Prinzip .....	27
2.3.2 Winkelspiegel .....	27
2.3.3 Rotierende Flüssigkeit als Parabolspiegel .....	28
2.3.4 Konstruktive Verfolgung eines schiefen Strahls bei einem Spiegel ..	28
2.3.5 Abbildung eines weit entfernten Gegenstands durch einen Hohlspiegel .....	28
2.3.6 Newton'sche Abbildungsgleichung beim Hohlspiegel .....	29
2.3.7 Abbildung durch Hohl- und Wölbspiegel .....	29
2.3.8 Vergrößerung eines Kosmetikspiegels .....	29
2.4 Brechung des Lichts .....	30
2.4.1 Brechungsgesetz aus Fermat'schem Prinzip .....	30
2.4.2 Codenummern optischer Gläser .....	30
2.4.3 Brechung an einem Glaswürfel .....	30
2.4.4 Brechung und Totalreflexion an einem Prisma .....	30
2.4.5 Brechzahlbestimmung .....	31
2.4.6 Numerische Apertur einer Glasfaser .....	31
2.4.7 Minimaler Ablenkwinkel am Prisma .....	31
2.4.8 Bauernfeind-Prisma .....	31
2.4.9 Abbe-Refraktometer .....	32

2.5	Brechung an gekrümmten Flächen. . . . .	32
2.5.1	Kartesisches Ovaloid. . . . .	32
2.5.2	Vergleich Kartesisches Ovaloid und Kugelfläche . . . . .	33
2.5.3	Stablinse mit Abbe'scher Invariante . . . . .	33
2.5.4	Kugellinse mit Abbe'scher Invariante. . . . .	34
2.5.5	Kugelförmiges Aquarium. . . . .	34
2.6	Abbildung durch Linsen . . . . .	34
2.6.1	Linse an Luft und Wasser. . . . .	34
2.6.2	Brennweite in Abhängigkeit vom umgebenden Medium . . . . .	34
2.6.3	Linsenschleifergleichung . . . . .	34
2.6.4	Linsenschleifergleichung . . . . .	35
2.6.5	Bessel-Verfahren zur Brennweitenbestimmung . . . . .	35
2.6.6	Abbildungsfälle bei einer Sammellinse . . . . .	35
2.6.7	Abbildungsfälle bei einer Zerstreuungslinse. . . . .	35
2.6.8	Abbildung eines weit entfernten Gegenstandes . . . . .	36
2.6.9	Linsensystem mit drei Linsen . . . . .	36
2.6.10	Dicke Linse, Fermat'sches Prinzip . . . . .	36
2.6.11	Abbildung durch eine dicke Plankonvexlinse . . . . .	37
2.6.12	Brennweite einer dicken Plankonvexlinse . . . . .	37
2.6.13	Brennweite und Hauptebenen einer dicken Meniskuslinse. . . . .	37
2.6.14	Brechkraft einer dicken Bikonvexlinse. . . . .	37
2.6.15	Stablinse. . . . .	37
2.6.16	Anamorphotische Abbildung. . . . .	38
2.6.17	Linsensystem aus zwei Sammellinsen . . . . .	38
2.6.18	Linsensystem aus Sammel- und Zerstreuungslinse . . . . .	38
2.6.19	Achromat . . . . .	39
2.6.20	Hauptebenen dicker Linsen . . . . .	39
2.7	Matrixmethoden der Gauß'schen Optik . . . . .	40
2.7.1	Laserschneidkopf . . . . .	40
2.7.2	Dreilinsiges System . . . . .	40
2.7.3	Systemmatrix . . . . .	41
2.7.4	Kollimation mit GRIN-Linse. . . . .	41
2.7.5	Abbildung mit GRIN-Linse. . . . .	41
2.7.6	Unterwasserlampe . . . . .	41
2.7.7	Dünne Linse in verschiedenen Medien . . . . .	42
2.7.8	Kombination aus Zerstreuungslinse und Hohlspiegel . . . . .	42
2.7.9	Kameraobjektiv. . . . .	42
2.8	Strahlbegrenzungen. . . . .	43
2.8.1	Pupillen . . . . .	43
2.8.2	Pupillenlagen und Öffnungswinkel. . . . .	43
2.8.3	Pupillen und Öffnungswinkel eines Systems. . . . .	44
2.8.4	Luken . . . . .	44
2.8.5	Luken und Pupillen. . . . .	44
2.8.6	Fernrohr mit Feldblende und Feldlinse . . . . .	44
2.8.7	Blendenlage . . . . .	45
2.9	Abbildungsfehler . . . . .	45
2.9.1	Fehlerarten . . . . .	45

- 2.9.2 Farbfehler . . . . . 45
- 2.9.3 Linsenordnung für minimalen Öffnungsfehler . . . . . 45
- 2.9.4 Linse bester Form . . . . . 45
- 2.9.5 Reduktion der Koma . . . . . 46
- 2.9.6 Beseitigung des Astigmatismus . . . . . 46
- 2.9.7 Achromatisches Dublett . . . . . 46
- 2.10 Optische Instrumente . . . . . 46
  - 2.10.1 Augenmodell mit Matrizenmethoden . . . . . 46
  - 2.10.2 Akkomodation der Augenlinse . . . . . 47
  - 2.10.3 Korrektur der Kurzsichtigkeit mit Kontaktlinse . . . . . 48
  - 2.10.4 Lupenvergrößerung . . . . . 48
  - 2.10.5 Huygens-Okular . . . . . 48
  - 2.10.6 Mikroskopvergrößerung . . . . . 48
  - 2.10.7 Förderliche Vergrößerung eines Mikroskops . . . . . 49
  - 2.10.8 Astronomisches Fernrohr . . . . . 49
  - 2.10.9 Galilei'sches Fernrohr . . . . . 49
  - 2.10.10 Auflösungsvermögen einer Digitalkamera . . . . . 49
  - 2.10.11 Schärfentiefe bei Nahaufnahmen . . . . . 50

**3 Radio- und Fotometrie . . . . . 51**

- 3.1 Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie . . . . . 51
  - 3.1.1 Kollimationsausbeute bei Kugelstrahler . . . . . 51
  - 3.1.2 Kollimationsausbeute bei Lambert-Strahler . . . . . 51
  - 3.1.3 Abstrahlung einer LED . . . . . 52
  - 3.1.4 Ebene Fläche strahlt auf Detektor . . . . . 52
  - 3.1.5 Strahldichte einer diffus reflektierenden Fläche . . . . . 53
  - 3.1.6 Wien'sches Verschiebungsgesetz . . . . . 53
  - 3.1.7 Stefan-Boltzmann-Gesetz . . . . . 53
  - 3.1.8 Lichtleitwert . . . . . 53
- 3.2 Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen . . . . . 54
  - 3.2.1 Kenngrößen . . . . . 54
  - 3.2.2 Ulbrichtkugel . . . . . 54
  - 3.2.3 Bestrahlungsstärke in der Ulbrichtkugel . . . . . 54
- 3.3 Lichttechnische Größen, Fotometrie . . . . . 55
  - 3.3.1 Lichtstrom einer roten LED . . . . . 55
  - 3.3.2 Lichtstrom einer Wolfram-Halogen-Lampe . . . . . 55
  - 3.3.3 Hellempfindlichkeitsgrad . . . . . 56
  - 3.3.4 Abstrahlcharakteristik einer LED . . . . . 56
  - 3.3.5 Straßenbeleuchtung . . . . . 57
  - 3.3.6 Leuchtdichte der Sonne . . . . . 57
- 3.4 Lichttechnische Größen, Fotometrie . . . . . 58
  - 3.4.1 Farbwertanteile eines schwarzen Strahlers . . . . . 58
  - 3.4.2 Farbwertanteile einer LED . . . . . 58
  - 3.4.3 Farbwertanteile einer Wolfram-Halogen-Lampe . . . . . 60
  - 3.4.4 Farbmischung . . . . . 60

<b>4</b>	<b>Wellenoptik</b>	<b>61</b>
4.1	Elektromagnetische Wellen	61
4.1.1	Sichtbares Spektrum	61
4.1.2	Wellengleichung in Abhängigkeit von der Laufrichtung	61
4.1.3	Laufrichtung einer Welle	61
4.1.4	Kugelwelle	61
4.1.5	Ebene Wellen in verschiedenen Richtungen	62
4.1.6	Feldstärken solarer Strahlung	62
4.2	Polarisation des Lichts	62
4.2.1	Polarisationsformen	62
4.2.2	Jones-Vektoren	62
4.2.3	Interpretation von Jones-Vektoren	63
4.2.4	Gesetz von Malus	63
4.2.5	Viertel- und Halbwellenplatte	63
4.2.6	Jones Matrizen	63
4.2.7	Polarisation durch Reflexion	63
4.2.8	Polarisationsfolien	64
4.2.9	Gesetz von Malus mit realen Polarisatoren	64
4.2.10	Tripel-Polarisator	64
4.2.11	Indexellipsoid in einachsigen Kristallen	65
4.2.12	Glan-Taylor-Prisma	65
4.2.13	Rochon-Prisma	65
4.2.14	$\lambda/2$ -Platte nullter Ordnung	66
4.2.15	Licht-Modulator	66
4.3	Lichtwellen an Grenzflächen	66
4.3.1	Fresnel'sche Gleichungen	66
4.3.2	Fresnel-Rhombus	66
4.3.3	Totalreflexion	67
4.3.4	Reflexion an einer Metalloberfläche	67
4.4	Interferenz	67
4.4.1	Gangunterschied	67
4.4.2	Zweistrahlinterferenz	68
4.4.3	Laser-Array	68
4.4.4	Doppelspalt	68
4.4.5	Kohärenzeigenschaften eines Halbleiterlasers	69
4.4.6	Kohärenzeigenschaften einer Spektrallampe	69
4.4.7	Gruppenindex	69
4.4.8	Gruppenindex von Quarzglas	69
4.4.9	Holografisches Gitter	70
4.4.10	Stehende Wellen im Laser-Resonator	70
4.4.11	Farbreflexe einer Seifenlamelle	71
4.4.12	Fizeau-Streifen	71
4.4.13	Reflexvermindernde Einzelschicht	71
4.4.14	Reflexvermindernde Einzelschicht für Unterwasserkamera	72
4.4.15	Dielektrischer Spiegel	72
4.4.16	Michelson-Interferometer	72

4.4.17	Wärmeausdehnung mit Michelson-Interferometer . . . . .	72
4.4.18	Fabry-Perot-Interferometer . . . . .	73
4.4.19	Fabry-Perot-Interferometer - Auflösungsvermögen . . . . .	73
4.5	Beugung. . . . .	73
4.5.1	Huygens'sches Prinzip . . . . .	73
4.5.2	Spaltbeugung. . . . .	74
4.5.3	Beugung am Rechteckspalt . . . . .	74
4.5.4	Intensitätsverhältnisse bei der Spaltbeugung . . . . .	75
4.5.5	Linsenfokus . . . . .	75
4.5.6	Auflösungsvermögen des Auges und Pixelbilder . . . . .	75
4.5.7	Airy-Scheibchen . . . . .	76
4.5.8	Doppelspalt . . . . .	76
4.5.9	Auflösung eines Gitters . . . . .	76
4.5.10	Spektrometer mit Reflexionsgitter . . . . .	77
4.5.11	Lineare Dispersion . . . . .	77
4.6	Gauß'sche Strahlen. . . . .	77
4.6.1	Strahlradius . . . . .	77
4.6.2	Lunar Laser Ranging . . . . .	77
4.6.3	Gaußstrahl . . . . .	78
4.6.4	Laserfokussierung . . . . .	78
4.6.5	Laser mit geringer Divergenz . . . . .	79
4.7	Holografie . . . . .	79
4.7.1	Weißlichthologramm . . . . .	79
4.7.2	Intensitätsverlauf bei Hologramm-Belichtung . . . . .	80

**5 Quantenoptik. . . . .81**

5.1	Lichtquanten . . . . .	81
5.1.1	Äußerer Fotoeffekt . . . . .	81
5.1.2	Innerer Fotoeffekt . . . . .	81
5.1.3	Lichtdruck . . . . .	81
5.1.4	Druck solarer Photonen . . . . .	82
5.1.5	Photonenenergien und -impulse . . . . .	83
5.1.6	Elektron-Photon-Stoß . . . . .	83
5.2	Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	83
5.2.1	Antreffwahrscheinlichkeit gebeugter Photonen . . . . .	83
5.3	Absorption und Emission von Licht . . . . .	84
5.3.1	Photonabsorption . . . . .	84
5.3.2	Impuls- und Energieerhaltung bei der Emission . . . . .	84
5.3.3	Lebensdauer angeregter Elektronen und spektrale Linienbreite . . . . .	85
5.4	Laser. . . . .	85
5.4.1	Verstärkung eines Lasers. . . . .	85
5.4.2	Reflexionsgrad von Laserspiegeln. . . . .	85
5.4.3	Frequenzänderung infolge von Längenänderung . . . . .	85
5.4.4	Monomode-Laser. . . . .	85
5.4.5	Laser-Pulse. . . . .	86
5.4.6	Femtosekundenlaser. . . . .	86

<b>6</b>	<b>Optoelektronik</b>	<b>87</b>
6.1	Halbleiter-Sender	87
6.1.1	Temperaturdrift der LED-Farbe	87
6.1.2	Wirkungsgrade einer LED	87
6.1.3	Plastik-Vergusskörper einer LED	87
6.1.4	Modulation einer IRED	88
6.1.5	Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle	89
6.1.6	Abstand longitudinaler Moden	89
6.1.7	Modensprünge	89
6.1.8	Modulation eines Halbleiterlasers	90
6.1.9	Laserschwelle	90
6.1.10	DFB-Laser	90
6.2	Halbleiter-Detektoren	90
6.2.1	Eindringtiefe von Photonen	90
6.2.2	Quantenausbeute und Empfindlichkeit	91
6.2.3	Detektivität von pin-Fotodioden	91
6.2.4	Lawinenfotodiode	91
6.2.5	Silicium-Fotodiode	91
<b>7</b>	<b>Führung von Licht in Lichtwellenleitern</b>	<b>93</b>
7.1	Einleitung	93
7.1.1	Eigenschaften von Lichtwellenleitern	93
7.2	Schichtwellenleiter	93
7.2.1	Doppelheterostruktur	93
7.3	Wellen in zylindrischen Fasern	93
7.3.1	Stufenindex-Faser	93
7.3.2	Monomode-Faser	94
7.3.3	Zusammensetzung des Faserkerns	94
7.4	Dämpfung in Lichtwellenleitern	94
7.4.1	Dämpfungskoeffizient	94
7.4.2	Dämpfung in PMMA	95
7.4.3	Abschneidemethode	95
7.4.4	Wechsel des Sendelasers	95
7.4.5	Nachrichtenübertragung auf POF	95
7.5	Dispersion im Lichtwellenleiter	96
7.5.1	Bitrate einer Stufenindex-Faser	96
7.5.2	Bitrate einer Plastikfaser	96
7.5.3	Kombination von Dispersionsmechanismen	96
7.5.4	Dispersion einer Multimodefaser	96

## Teil II Lösungen

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>99</b>
1.1	Lichtwellenlängen	99
1.2	Welleneigenschaften	99
<b>2</b>	<b>Geometrische Optik</b>	<b>101</b>
2.1	Lichtstrahlen, optische Abbildung	101
2.3	Reflexion von Lichtstrahlen	101
2.3.1	Reflexionsgesetz aus Fermat'schem Prinzip	101
2.3.2	Winkelspiegel	101
2.3.3	Rotierende Flüssigkeit als Parabolspiegel	102
2.3.4	Konstruktive Verfolgung eines schiefen Strahls bei einem Spiegel	103
2.3.5	Abbildung eines weit entfernten Gegenstands durch einen Hohlspiegel	103
2.3.6	Newton'sche Abbildungsgleichung beim Hohlspiegel	103
2.3.7	Abbildung durch Hohl- und Wölbspiegel	104
2.3.8	Vergrößerung eines Kosmetikspiegels	104
2.4	Brechung des Lichts	105
2.4.1	Brechungsgesetz aus Fermat'schem Prinzip	105
2.4.2	Codenummern optischer Gläser	106
2.4.3	Brechung an einem Glaswürfel	106
2.4.4	Brechung und Totalreflexion an einem Prisma	106
2.4.5	Brechzahlbestimmung	107
2.4.6	Numerische Apertur einer Glasfaser	107
2.4.7	Minimaler Ablenkwinkel am Prisma	107
2.4.8	Bauernfeind-Prisma	109
2.4.9	Abbe-Refraktometer	110
2.5	Brechung an gekrümmten Flächen	111
2.5.1	Kartesisches Ovaloid	111
2.5.2	Vergleich Kartesisches Ovaloid und Kugelfläche	112
2.5.3	Stablinse mit Abbe'scher Invariante	112
2.5.4	Kugellinse mit Abbe'scher Invariante	112
2.5.5	Kugelförmiges Aquarium	113
2.6	Abbildung durch Linsen	113
2.6.1	Linse an Luft und Wasser	113
2.6.2	Brennweite in Abhängigkeit vom umgebenden Medium	114
2.6.3	Linsenschleifergleichung	114
2.6.4	Linsenschleifergleichung	115
2.6.5	Bessel-Verfahren zur Brennweitenbestimmung	115
2.6.6	Abbildungsfälle bei einer Sammellinse	116
2.6.7	Abbildungsfälle bei einer Zerstreuungslinse	116
2.6.8	Abbildung eines weit entfernten Gegenstandes	116
2.6.9	Linsensystem mit drei Linsen	117
2.6.10	Dicke Linse, Fermat'sches Prinzip	118
2.6.11	Abbildung durch eine dicke Plankonvexlinse	118

2.6.12	Brennweite einer dicken Plankonvexlinse	119
2.6.13	Brennweite und Hauptebenen einer dicken Meniskuslinse	119
2.6.14	Brechkraft einer dicken Bikonvexlinse	119
2.6.15	Stablinse	120
2.6.16	Anamorphotische Abbildung	121
2.6.17	Linsensystem aus zwei Sammellinsen	122
2.6.18	Linsensystem aus Sammell- und Zerstreuungslinse	123
2.6.19	Achromat	123
2.6.20	Hauptebenen dicker Linsen	124
2.7	Matrixmethoden der Gauß'schen Optik	126
2.7.1	Laserschneidkopf	126
2.7.2	Dreilinsiges System	127
2.7.3	Systemmatrix	128
2.7.4	Kollimation mit GRIN-Linse	129
2.7.5	Abbildung mit GRIN-Linse	130
2.7.6	Unterwasserlampe	131
2.7.7	Dünne Linse in verschiedenen Medien	133
2.7.8	Kombination aus Zerstreuungslinse und Hohlspiegel	134
2.7.9	Kameraobjektiv	135
2.8	Strahlbegrenzungen	136
2.8.1	Pupillen	136
2.8.2	Pupillenlagen und Öffnungswinkel	136
2.8.3	Pupillen und Öffnungswinkel eines Systems	138
2.8.4	Luken	139
2.8.5	Luken und Pupillen	139
2.8.6	Fernrohr mit Feldblende und Feldlinse	140
2.8.7	Blendenlage	142
2.9	Abbildungsfehler	143
2.9.1	Fehlerarten	143
2.9.2	Farbfehler	143
2.9.3	Linsenanordnung für minimalen Öffnungsfehler	143
2.9.4	Linse bester Form	143
2.9.5	Reduktion der Koma	144
2.9.6	Beseitigung des Astigmatismus	144
2.9.7	Achromatisches Dublett	144
2.10	Optische Instrumente	145
2.10.1	Augenmodell mit Matrizenmethoden	145
2.10.2	Akkommodation der Augenlinse	147
2.10.3	Korrektur der Kurzsichtigkeit mit Kontaktlinse	148
2.10.4	Lupenvergrößerung	149
2.10.5	Huygens-Okular	149
2.10.6	Mikroskopvergrößerung	151
2.10.7	Förderliche Vergrößerung eines Mikroskops	151
2.10.8	Astronomisches Fernrohr	152
2.10.9	Galilei'sches Fernrohr	153
2.10.10	Auflösungsvermögen einer Digitalkamera	154
2.10.11	Schärfentiefe bei Nahaufnahmen	154

<b>3</b>	<b>Radio- und Fotometrie</b>	<b>157</b>
3.1	Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie	157
3.1.1	Kollimationsausbeute bei Kugelstrahler	157
3.1.2	Kollimationsausbeute bei Lambert-Strahler	157
3.1.3	Abstrahlung einer LED	158
3.1.4	Ebene Fläche strahlt auf Detektor	159
3.1.5	Strahldichte einer diffus reflektierenden Fläche	160
3.1.6	Wien'sches Verschiebungsgesetz	161
3.1.7	Stefan-Boltzmann-Gesetz	161
3.1.8	Lichtleitwert	162
3.2	Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen	163
3.2.1	Kenngößen	163
3.2.2	Ulbrichtkugel	164
3.2.3	Bestrahlungsstärke in der Ulbrichtkugel	165
3.3	Lichttechnische Größen, Fotometrie	166
3.3.1	Lichtstrom einer roten LED	166
3.3.2	Lichtstrom einer Wolfram-Halogen-Lampe	167
3.3.3	Hellempfindlichkeitsgrad	168
3.3.4	Abstrahlcharakteristik einer LED	169
3.3.5	Straßenbeleuchtung	169
3.3.6	Leuchtdichte der Sonne	170
3.4	Lichttechnische Größen, Fotometrie	172
3.4.1	Farbwertanteile eines schwarzen Strahlers	172
3.4.2	Farbwertanteile einer LED	172
3.4.3	Farbwertanteile einer Wolfram-Halogen-Lampe	173
3.4.4	Farbmischung	174
<b>4</b>	<b>Wellenoptik</b>	<b>177</b>
4.1	Elektromagnetische Wellen	177
4.1.1	Sichtbares Spektrum	177
4.1.2	Wellengleichung in Abhängigkeit von der Laufrichtung	177
4.1.3	Laufrichtung einer Welle	177
4.1.4	Kugelwelle	177
4.1.5	Ebene Wellen in verschiedenen Richtungen	178
4.1.6	Feldstärken solarer Strahlung	179
4.2	Polarisation des Lichts	179
4.2.1	Polarisationsformen	179
4.2.2	Jones-Vektoren	179
4.2.3	Interpretation von Jones-Vektoren	181
4.2.4	Gesetz von Malus	182
4.2.5	Viertel- und Halbwellenplatte	183
4.2.6	Jones Matrizen	184
4.2.7	Polarisation durch Reflexion	186
4.2.8	Polarisationsfolien	187
4.2.9	Gesetz von Malus mit realen Polarisatoren	187
4.2.10	Tripel-Polarisator	188

4.2.11	Indexellipsoid in einachsigen Kristallen	189
4.2.12	Glan-Taylor-Prisma	190
4.2.13	Rochon-Prisma	190
4.2.14	$\lambda/2$ -Platte nullter Ordnung	191
4.2.15	Licht-Modulator	192
4.3	Lichtwellen an Grenzflächen	194
4.3.1	Fresnel'sche Gleichungen	194
4.3.2	Fresnel-Rhombus	195
4.3.3	Totalreflexion	196
4.3.4	Reflexion an einer Metalloberfläche	196
4.4	Interferenz	197
4.4.1	Gangunterschied	197
4.4.2	Zweistrahlinterferenz	198
4.4.3	Laser-Array	198
4.4.4	Doppelspalt	199
4.4.5	Kohärenzeigenschaften eines Halbleiterlasers	200
4.4.6	Kohärenzeigenschaften einer Spektrallampe	200
4.4.7	Gruppenindex	200
4.4.8	Gruppenindex von Quarzglas	201
4.4.9	Holografisches Gitter	201
4.4.10	Stehende Wellen im Laser-Resonator	202
4.4.11	Farbreflexe einer Seifenlamelle	202
4.4.12	Fizeau-Streifen	203
4.4.13	Reflexvermindernde Einzelschicht	203
4.4.14	Reflexvermindernde Einzelschicht für Unterwasserkamera	204
4.4.15	Dielektrischer Spiegel	204
4.4.16	Michelson-Interferometer	205
4.4.17	Wärmeausdehnung mit Michelson-Interferometer	205
4.4.18	Fabry-Perot-Interferometer	205
4.4.19	Fabry-Perot-Interferometer – Auflösungsvermögen	207
4.5	Beugung	208
4.5.1	Huygens'sches Prinzip	208
4.5.2	Spaltbeugung	209
4.5.3	Beugung am Rechteckspalt	209
4.5.4	Intensitätsverhältnisse bei der Spaltbeugung	210
4.5.5	Linsenfokus	211
4.5.6	Auflösungsvermögen des Auges und Pixelbilder	211
4.5.7	Airy-Scheibchen	212
4.5.8	Doppelspalt	212
4.5.9	Auflösung eines Gitters	213
4.5.10	Spektrometer mit Reflexionsgitter	214
4.5.11	Lineare Dispersion	214
4.6	Gauß'sche Strahlen	215
4.6.1	Strahlradius	215
4.6.2	Lunar Laser Ranging	215
4.6.3	Gaußstrahl	216
4.6.4	Laserfokussierung	217

4.6.5	Laser mit geringer Divergenz	217
4.7	Holografie	218
4.7.1	Weißlichthologramm	218
4.7.2	Intensitätsverlauf bei Hologramm-Belichtung	219

**5 Quantenoptik. . . . . 221**

5.1	Lichtquanten	221
5.1.1	Äußerer Fotoeffekt	221
5.1.2	Innerer Fotoeffekt	222
5.1.3	Lichtdruck	222
5.1.4	Druck solarer Photonen	222
5.1.5	Photonenenergien und -impulse	223
5.1.6	Elektron-Photon-Stoß	223
5.2	Welle-Teilchen-Dualismus	225
5.2.1	Antreffwahrscheinlichkeit gebeugter Photonen	225
5.3	Absorption und Emission von Licht	227
5.3.1	Photonabsorption	227
5.3.2	Impuls- und Energieerhaltung bei der Emission	227
5.3.3	Lebensdauer angeregter Elektronen und spektrale Linienbreite	228
5.4	Laser	229
5.4.1	Verstärkung eines Lasers	229
5.4.2	Reflexionsgrad von Laserspiegeln	229
5.4.3	Frequenzänderung infolge von Längenänderung	229
5.4.4	Monomode-Laser	230
5.4.5	Laser-Pulse	230
5.4.6	Femtosekundenlaser	231

**6 Optoelektronik . . . . . 233**

6.1	Halbleiter-Sender	233
6.1.1	Temperaturdrift der LED-Farbe	233
6.1.2	Wirkungsgrade einer LED	233
6.1.3	Plastik-Vergusskörper einer LED	234
6.1.4	Modulation einer IRED	234
6.1.5	Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle	235
6.1.6	Abstand longitudinaler Moden	235
6.1.7	Modensprünge	236
6.1.8	Modulation eines Halbleiterlasers	237
6.1.9	Laserschwelle	237
6.1.10	DFB-Laser	238
6.2	Halbleiter-Detektoren	238
6.2.1	Eindringtiefe von Photonen	238
6.2.2	Quantenausbeute und Empfindlichkeit	238
6.2.3	Detektivität von pin-Fotodioden	239
6.2.4	Lawinenfotodiode	239
6.2.5	Silicium-Fotodiode	239

---

<b>7</b>	<b>Führung von Licht in Lichtwellenleitern .....</b>	<b>241</b>
7.1	Einleitung .....	241
7.1.1	Eigenschaften von Lichtwellenleitern.....	241
7.2	Schichtwellenleiter.....	241
7.2.1	Doppelheterostruktur.....	241
7.3	Wellen in zylindrischen Fasern.....	242
7.3.1	Stufenindex-Faser.....	242
7.3.2	Monomode-Faser.....	243
7.3.3	Zusammensetzung des Faserkerns.....	244
7.4	Dämpfung in Lichtwellenleitern .....	245
7.4.1	Dämpfungskoeffizient .....	245
7.4.2	Dämpfung in PMMA.....	246
7.4.3	Abschneidemethode .....	247
7.4.4	Wechsel des Sendelasers .....	247
7.4.5	Nachrichtenübertragung auf POF.....	248
7.5	Dispersion im Lichtwellenleiter .....	248
7.5.1	Bitrate einer Stufenindex-Faser.....	248
7.5.2	Bitrate einer Plastikfaser .....	249
7.5.3	Kombination von Dispersionsmechanismen .....	249
7.5.4	Dispersion einer Multimodefaser .....	250

# Zum Geleit

Optik ist eine entscheidende Innovationskraft in Naturwissenschaft und Technik. Sie hat in Verbindung mit der Datenverarbeitung weitreichende Auswirkungen auf die Menschen und deren Handeln. Als Beispiele seien die Herstellung von Chips genannt, die durch das Smartphone weltweit unglaubliche kommunikative Möglichkeiten eröffnet haben. Aber auch die Anwendungen der bildgebenden Verfahren, die chirurgischen Eingriffe in der Medizin oder die vielfältigen Anwendungen der Lasertechnik zeigen die Bedeutung der Optik deutlich.

Die Anwendungen der optischen Technologien zu verstehen und weiter zu entwickeln setzt ein Verständnis der physikalischen Grundlagen voraus. Dies ist das Ziel des erfolgreichen Lehrbuches „Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“. In ihm haben über 15 Experten aus der Praxis ihr Wissen über optische Anwendungen dem Leser nähergebracht. Die Grundlagenkapitel stammen fast ausschließlich aus der Feder von Prof. Dr. Rolf Martin, der sein breites und tiefes Fachwissen didaktisch vorbildlich präsentiert. Bei alledem gilt es, das Wissen um die optischen Zusammenhänge zu vertiefen und zu verankern. Das geschieht durch das vorliegende Übungsbuch.

Nur durch Übung wird ein tieferes Verständnis erzeugt. Deshalb ist dieses Buch eine wichtige Ergänzung zum oben erwähnten Lehrbuch. Mögen es die Leser nutzen, um zu erleben, dass es sich lohnt, optische Zusammenhänge noch besser zu verstehen. Dadurch werden die Leser in ihrem Wissen gefestigt und befähigt, mit ihren erworbenen Kenntnissen weitere Innovationen in der Optik anzustoßen und zu verwirklichen. Die dort aufgeführten Übungen sind so interessant gestaltet, dass jeder Leser beim Durcharbeiten der Übungsaufgaben auch Spaß an dem Zugewinn an Wissen hat. Möge mit diesem Übungsbuch auch die Ausbildung im optischen Bereich verbessert werden und die in der Praxis stehenden Anwender der Optik motivieren, die faszinierenden Bereiche der Optik zum Nutzen der Menschen weiter zu entwickeln. Dieses Ziel zu erreichen, wünsche ich Rolf Martin, meinem Freund und Mitautor in vielen Sachbüchern und den zahlreichen Lesern, die durch diese Übungen Spaß an den Erkenntnissen der Optik haben.

Prof. Dr. Dr. Ekbert Hering



# **TEIL I**

## **Aufgaben**