

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Zum Geleit</b> .....	7
<b>1 Einleitung</b> .....	17
<b>2 Geometrische Optik</b> .....	18
2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung .....	18
2.2 Fermat'sches Prinzip .....	19
2.3 Reflexion von Lichtstrahlen .....	20
2.3.1 Reflexion an ebenen Flächen .....	20
2.3.2 Reflexion an gekrümmten Flächen .....	21
2.4 Brechung des Lichts .....	26
2.4.1 Brechungsgesetz .....	26
2.4.2 Dispersion .....	27
2.4.3 Totalreflexion .....	30
2.4.4 Prismen .....	32
2.5 Brechung an gekrümmten Flächen .....	35
2.5.1 Asphärische Flächen .....	35
2.5.2 Kugelflächen .....	36
2.5.2.1 Vorzeichenkonvention in der technischen Optik .....	36
2.5.2.2 Brechung an einer Kugelfläche .....	37
2.6 Abbildung durch Linsen .....	40
2.6.1 Dünne Linsen .....	40
2.6.2 Dicke Linsen .....	48
2.6.3 Fresnel-Linsen .....	55
2.6.4 GRIN-Linsen .....	56
2.6.5 Linsen mit torischen Flächen .....	59
2.6.6 Linsensysteme .....	61
2.7 Matrixmethoden der Gauß'schen Optik .....	65
2.7.1 Matrizen zur Beschreibung der Strahlausbreitung .....	66
2.7.2 Matrizen für Linsen .....	68
2.7.3 Eigenschaften der Systemmatrix .....	72
2.7.4 Lage der Kardinalpunkte eines optischen Systems .....	75
2.7.5 Lage der Referenzebenen .....	81

2.8	Strahlbegrenzungen . . . . .	82
2.8.1	Blenden und Pupillen . . . . .	82
2.8.2	Kenngößen der Strahlenbegrenzung . . . . .	86
2.8.3	Feldblenden und Luken . . . . .	87
2.8.4	Feldlinsen und Kondensoren . . . . .	90
2.9	Abbildungsfehler . . . . .	93
2.9.1	Sphärische Aberration (Öffnungsfehler) . . . . .	93
2.9.2	Koma (Asymmetriefehler) . . . . .	99
2.9.3	Astigmatismus und Bildfeldwölbung . . . . .	101
2.9.4	Verzeichnung . . . . .	103
2.9.5	Chromatische Aberration (Farbfehler) . . . . .	104
2.10	Optische Instrumente . . . . .	107
2.10.1	Optik des menschlichen Auges . . . . .	107
2.10.2	Lupen und Okulare . . . . .	113
2.10.3	Mikroskope . . . . .	118
2.10.4	Fernrohre . . . . .	128
2.10.5	Fotoapparat . . . . .	136

**3 Radio- und Fotometrie . . . . . 143**

3.1	Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie . . . . .	143
3.1.1	Grundlagen, Definitionen . . . . .	143
3.1.2	Strahlungsfelder einfacher Geometrien . . . . .	152
3.2	Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen und kegelförmig abstrahlenden Lichtquellen in optisch-analytischen Geräten . . . . .	157
3.2.1	Abstrahl-Charakteristik verschiedener Lichtquellen . . . . .	157
3.2.2	Technische Ausführung von Lampen für optisch-analytische Messgeräte . . . . .	159
3.2.3	Ulbricht'sche Integrationskugel . . . . .	162
3.3	Lichttechnische Größen, Fotometrie . . . . .	165
3.4	Farbmetrik . . . . .	170

**4 Wellenoptik . . . . . 181**

4.1	Elektromagnetische Wellen . . . . .	181
4.2	Polarisation des Lichts . . . . .	186
4.2.1	Polarisationsformen . . . . .	186
4.2.2	Mathematische Beschreibung des Polarisationszustands . . . . .	187
4.2.3	Polarisationsoptische Komponenten . . . . .	191
4.2.4	Optische Aktivität . . . . .	200
4.2.5	Elektro- und magnetooptische Effekte . . . . .	203
4.2.6	Anwendungen der Doppelbrechung . . . . .	210
4.3	Lichtwellen an Grenzflächen . . . . .	215
4.3.1	Fresnel'sche Gleichungen . . . . .	215
4.3.2	Übergang vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium . . . . .	219
4.3.3	Übergang vom optisch dichten ins optisch dünne Medium . . . . .	221
4.3.4	Wellen in absorbierenden Medien . . . . .	228

4.4	Interferenz . . . . .	236
4.4.1	Zweistrahl-Interferenz . . . . .	236
4.4.2	Kohärenz . . . . .	238
4.4.3	Gruppengeschwindigkeit . . . . .	243
4.4.4	Interferenz einander schräg durchdringender Wellen . . . . .	247
4.4.5	Stehende Wellen . . . . .	248
4.4.6	Interferenzen an dielektrischen Schichten . . . . .	251
4.4.7	Interferenzen an dielektrischen Vielfachschichten . . . . .	258
4.4.8	Interferometer . . . . .	264
4.4.9	Vielstrahlinterferenzen . . . . .	267
4.5	Beugung . . . . .	273
4.5.1	Huygens-Fresnel'sches Prinzip . . . . .	273
4.5.2	Beugung am Spalt und an der Lochblende . . . . .	275
4.5.3	Auflösungsvermögen beugungsbegrenzter Instrumente . . . . .	280
4.5.4	Beugung am Gitter . . . . .	285
4.6	Gauß'sche Strahlen . . . . .	296
4.6.1	Feldverteilung im Gauß-Strahl . . . . .	296
4.6.2	Laser-Resonatoren . . . . .	300
4.6.3	Durchgang Gauß'scher Strahlen durch optische Komponenten . . . . .	302
4.7	Holografie . . . . .	307
4.7.1	Aufnahme eines Hologramms und Rekonstruktion des Bildes . . . . .	307
4.7.2	Technische Anwendungen der Holografie . . . . .	314

## **5 Quantenoptik . . . . . 318**

5.1	Lichtquanten . . . . .	318
5.2	Welle-Teilchen-Dualismus . . . . .	322
5.3	Absorption und Emission von Licht . . . . .	324
5.4	Laser . . . . .	329
5.4.1	Laserprinzip . . . . .	329
5.4.2	Lasertypen . . . . .	334

## **6 Optoelektronik . . . . . 339**

6.1	Halbleiter-Sender . . . . .	340
6.1.1	Strahlungsemission aus Halbleitern . . . . .	340
6.1.2	Lumineszenzdioden (LEDs) . . . . .	342
6.1.3	Laserdioden (Injektionslaser) . . . . .	349
6.2	Halbleiter-Detektoren . . . . .	362
6.2.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern . . . . .	362
6.2.2	Gütekriterien von Detektoren . . . . .	364
6.2.3	Fotowiderstand . . . . .	366
6.2.4	Fotodiode . . . . .	367

**7 Führung von Licht in Lichtwellenleitern .....376**

7.1	Einleitung .....	376
7.2	Schichtwellenleiter .....	377
7.2.1	Strahlenbild .....	377
7.2.2	Wellenbild .....	379
7.3	Wellen in zylindrischen Fasern .....	382
7.3.1	Stufenindex-Faser .....	382
7.3.2	Einmodenfaser .....	388
7.3.3	Gradientenfaser .....	391
7.4	Dämpfung in Lichtwellenleitern .....	394
7.5	Dispersion im Lichtwellenleiter .....	398
7.5.1	Modendispersion .....	399
7.5.2	Chromatische Dispersion .....	404
7.6	Lichtleiter in praktischen Anwendungen .....	408

**8 Beleuchtungstechnik .....415**

8.1	Einleitung .....	415
8.2	Lichttechnische Größen .....	416
8.3	Lichtquellen .....	420
8.3.1	Lampen .....	420
8.3.2	Leuchten .....	421
8.4	Optische Systeme zur Beleuchtung .....	422
8.4.1	Beleuchtung im Innenraum .....	422
8.4.2	Beleuchtung im Außenraum .....	427
8.4.3	Signalisation .....	433
8.4.4	Informationsträger .....	442
8.5	Simulation und Berechnungsprogramme .....	443
8.5.1	DIALux .....	443
8.5.2	ReluxSuite .....	445
8.5.3	Weitere Simulationssoftware für den Innenbereich .....	445
8.6	Spezielle Kapitel der Beleuchtungstechnik .....	446
8.6.1	Wirkung des Lichts auf den Menschen .....	446
8.6.2	Lichtverschmutzung .....	447

**9 Laseranwendungen .....450**

9.1	Laser in der Materialbearbeitung .....	450
9.1.1	Laserstrahlquellen .....	450
9.1.1.1	Festkörperlaser .....	451
9.1.1.2	Halbleiterlaser (Diodenlaser) .....	455
9.1.1.3	Gaslaser .....	456
9.1.2	Strahlqualität .....	459
9.1.3	Wechselwirkung Strahlung mit Materie .....	460
9.1.3.1	Energieströme und Wirkungsgrade .....	460
9.1.3.2	Einwirkdauer und Leistungsdichte .....	462

9.1.4	Laser-Materialbearbeitung .....	463
9.1.4.1	Aufwärmen zum Bearbeiten von Oberflächen .....	463
9.1.4.2	Schmelzen zur Behandlung von Oberflächen .....	464
9.1.4.3	Schmelzen zum Aufbauen und Laserformen (Urformen) ..	465
9.1.4.4	Wärmeleitschweißen (Schmelzen zum Fügen) .....	466
9.1.4.5	Tiefschweißen (Verdampfen zum Fügen) .....	467
9.1.4.6	Laserschneiden .....	467
9.1.4.7	Laserbohren .....	468
9.1.4.8	Lasermikrobearbeitung (Verdampfen zum Reinigen, Strukturieren und Abtragen) .	469
9.2	Laser in der Kommunikationstechnik .....	471
9.2.1	Funktionsweise .....	471
9.2.2	Vor- und Nachteile .....	471
9.2.3	Anwendungen .....	472
9.3	Laseranwendungen in Medizin und Biologie .....	474
9.3.1	Wechselwirkungen von Laserstrahlung mit Zellen und Gewebe .....	474
9.3.2	Laseranwendungen in Diagnose und Therapie .....	476
9.3.3	Mikroskopische Laseranwendungen .....	480
9.4	Laser bei den Konsumgütern .....	483
9.4.1	Laserdrucker und Laserkopierer .....	483
9.4.2	Laserscanner .....	485
9.4.3	Laserprojektor .....	486
9.5	Laser in der Unterhaltung .....	487
9.5.1	Technischer Aufbau .....	487
9.5.2	Projektion .....	490
9.5.3	Laservideo .....	491
9.5.4	Räumliche Strahleneffekte .....	491
9.5.5	Strahlensicherheit beim Audience Scanning .....	493

## **10** Optische Sensoren und Messtechnik .....494

10.1	Eigenschaften optischer Sensoren .....	494
10.2	Optische Detektoren .....	495
10.2.1	Arbeit und Leistung von Lichtsignalen .....	495
10.2.2	Basis-Parameter von Detektoren .....	495
10.2.3	Fotoröhren, Fotomultiplier (PMT) und Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (SEV oder SEM) .....	497
10.2.4	Mikrokanalplatte (MCP: Micro Channelplate) .....	499
10.2.5	Festkörperdetektoren .....	500
10.2.6	Planck'sche Strahlung, Hintergrundstrahlung .....	502
10.2.7	Flächendetektoren (Array, CCD und CMOS) .....	503
10.2.8	Arrays und NIR-Flächendetektoren .....	510
10.2.9	CCD mit Bildverstärkung .....	511
10.2.10	CMOS-Sensoren, Active Pixel Sensoren (APS) .....	512
10.3	Methoden der optischen Messtechnik .....	513
10.3.1	Schattenprojektion .....	514

10.3.2	Lasertriangulation .....	517
10.3.3	Streifenprojektion .....	519
10.3.4	Fotogrammetrie .....	521
10.3.5	Deflektometrie .....	527
10.3.6	Konfokale Sensorik .....	530
10.3.7	Lasertracking .....	533
10.3.8	Individualisierte optische Messtechnik .....	537
10.4	Messung physikalischer Größen .....	538
10.4.1	Geometrische Größen .....	538
10.4.1.1	Abstands- und Wegsensoren .....	538
10.4.1.2	Winkel und Drehbewegung .....	549
10.4.1.3	3-D-Messtechnik .....	550
10.4.2	Objekterfassung .....	556
10.4.2.1	Lichtschanke, Lichttaster .....	556
10.4.2.2	Laserscanner .....	574
10.4.2.3	Optische Identifikation .....	577
10.4.3	Temperaturmessung .....	581
10.4.4	Fotometrie .....	583
10.4.5	Feuchtemessung .....	596
10.4.5.1	Messungen im Infrarotbereich (IR) .....	597
10.4.5.2	Messung im nahen Infrarotbereich (NIR) .....	598
10.4.5.3	Messung im ultravioletten Bereich (UV-Licht) .....	599
10.4.5.4	Messung mit Lichtwellenleitern .....	600
10.4.5.5	Diodenlaserspektrometer (TDL) .....	601
10.4.5.6	Messung von Wassertropfchen (Flüssigphase) .....	602
10.5	Anwendungsgebiete in der Medizin und Biologie .....	603
10.5.1	Überblick der Nachweismethoden .....	603
10.5.2	Oberflächenplasmonen-Resonanz (SPR) .....	603
10.5.3	Interne Totalreflexionsfluoreszenz (TIRF) .....	605
10.5.4	Lumineszenzverfahren .....	606
10.5.5	Colorimetrie/ Fotometrie .....	608
10.6	Optische Sensoren in der Chemie .....	610
10.6.1	Einleitung .....	610
10.6.2	Komponenten des optischen Sensors .....	612
10.6.3	Detektionsprinzipien .....	614
10.6.4	Ausgewählte Anwendungen .....	616

**11 Optische Gerätetechnik .....** **618**

11.1	Einleitung .....	618
11.2	Fotokameras .....	619
11.2.1	Analoge Fotokamera .....	619
11.2.2	Digitale Fotokamera .....	621
11.2.3	Kamerachips .....	622
11.2.4	Bauformen digitaler Kameras .....	623
11.2.5	Besondere Anforderungen an digitale Kameras .....	627
11.2.6	Zusammenfassung .....	629

---

11.3	Fernoptische Geräte	630
11.4	Mikroskopie	637
11.4.1	Klassische Lichtmikroskopie	637
11.4.2	Verfahren zur Reduktion des Hintergrunds	639
11.4.3	Super Resolution Microscopy	642
11.5	Digitale Visualisierung	647
11.5.1	Displaytechnologien	647
11.5.2	Übersicht	647
11.5.3	Funktionsprinzip von LCD, OLED und E-Paper	648
11.5.4	Pixelansteuerung und elektro-optische Kurve	650
11.5.5	Zusammenfassung	651
11.5.6	Displays in optischen Geräten	651
11.5.7	Digitale Projektoren (Beamer)	651
11.5.8	Augmented Reality und Virtual Reality	652
11.5.9	Stereosysteme	654
11.5.10	Zusammenfassung	656
11.6	Optische Messgeräte	657
11.6.1	Interferometer	657
11.6.2	Shack-Hartmann-Sensoren	663
11.6.3	Autokollimatoren	665
11.6.4	Brechzahlmessung	666
11.7	Spektralapparate	667
11.7.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	667
11.7.2	Beugungsgitter	669
11.7.3	Dispersionsprismen	672
11.7.4	Filter	674
11.7.5	Polarisation	674
11.7.6	Spektrometer	675
11.7.7	Doppelspektrometer	681
11.7.8	Spektrometer für den tiefen UV- und Vakuum-UV-Bereich	683
11.7.9	Kompakte Spektrometer mit Lichtleiterkopplung	685
11.7.10	Spezielle Anforderungen der Lichtleiterkopplung	686
11.7.11	Transmissions-Spektrometer	687
11.7.12	Prismenspektrometer	687
11.7.13	Echellespektrometer	688
11.7.14	Hyperspektrale Spektrometer (Hyperspectral Imaging Spectroscopy)	688
11.7.15	Allgemeine Funktionen	688
11.8	Spektralfotometer	694
11.8.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	694
11.8.2	Absorptions- und Reflexions-Spektralfotometer	695
11.8.3	Lumineszenz-Spektroskopie: Fluoreszenz und Phosphoreszenz	699
11.8.4	Messmethoden für dynamische Lumineszenz - Lifetime-Messung	703
11.8.5	RAMAN- und BRILLOUIN-Spektralfotometrie	709
11.8.6	Spektrale Radiometrie	715

11.9	Optometrie.....	718
11.9.1	Geräte beim Augenoptiker.....	718
11.9.2	Geräte für die Augenheilkunde.....	724
11.10	Astronomische Teleskope.....	728
11.10.1	Einleitung.....	728
11.10.2	Bauformen.....	728
11.10.3	Amateurastronomie.....	729
11.10.4	Terrestrische Astronomie.....	730
11.10.5	Weltraumteleskope.....	733

**12 Bildgebende Verfahren .....736**

12.1	Definition und Übersicht.....	736
12.2	Messprinzipien.....	738
12.3	Optische Verfahren.....	742
12.4	Abbildungskette und ihre Komponenten.....	743
12.5	Lichtquellen und Beleuchtung.....	744
12.6	Bildwiedergabe (Empfänger).....	746
12.7	Optische Systeme nach Auflösung und Vergrößerung der optischen Abbildung.....	749
12.8	Objekttreue.....	754
12.9	Komplexität bildgebender Verfahren.....	756
12.10	Komplexität optischer Systeme.....	758
12.11	Rechenaufwand.....	759
12.12	Beispiele einiger bildgebender Verfahren.....	760
12.12.1	Computertomografie (CT) zur Werkstoffprüfung.....	760
12.12.2	Akustisches Mikroskop zur Untersuchung elektronischer Bauteile.....	762

**13 Optikdesign und Simulation .....764**

13.1	Optikdesign.....	764
13.1.1	Einleitung.....	764
13.1.2	Apertur und Feld, Eintritts- und Austrittspupille.....	765
13.1.3	Bildfehler dritter Ordnung.....	770
13.1.4	Bewertung optischer Systeme.....	772
13.1.5	Optikdesign-Prozess.....	779
13.1.6	Optikdesign.....	781
13.1.7	Optimierung.....	796
13.1.8	Tolerierung.....	802
13.1.9	Spezielle Komponenten im Optik-Design.....	803
13.2	Optiksimulation.....	819
13.2.1	Einleitung.....	819
13.2.2	Streulichtsimulationen.....	820
13.2.3	Digitalisierung.....	827
13.2.4	Simulation äußerer Einflüsse.....	831
13.2.5	Wellenoptische Simulationen.....	832



<b>14</b>	<b>Optische Phänomene</b> .....	<b>837</b>
14.1	Definition und Erklärungsversuche .....	837
14.2	Geometrische Täuschungen .....	839
14.2.1	Längentäuschung .....	839
14.2.2	Krümmungstäuschung .....	840
14.2.3	Richtungstäuschung .....	840
14.2.4	Größentäuschung .....	840
14.3	Räumliche Täuschungen .....	841
14.3.1	Ambiguität .....	841
14.3.2	Perspektiventäuschung .....	843
14.4	Helligkeits- und Kontrasttäuschungen .....	845
14.5	Bewegungstäuschungen .....	846
14.6	Farbtäuschungen .....	846
14.7	Unmögliche Figuren, Objekte und Bilder .....	847
14.8	Ames-Raum .....	849
<b>15</b>	<b>Optiknormen</b> .....	<b>851</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>854</b>