

Helmut Naumann
Gottfried Schröder
Martin Löffler-Mang

Handbuch Bauelemente der Optik

Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik

7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Inhalt

Vorwort zur 7. Auflage	V
Autorenverzeichnis	XXI
1 Optische Grundbegriffe	3
<i>Martin Löffler-Mang</i>	
1.1 Wellenausbreitung	5
1.2 Optische Medien	5
1.3 Brechung, Reflexion und Totalreflexion	6
1.4 Prinzip von Fermat	8
1.5 Interferenz und Beugung	9
1.6 Gauß-Strahlen	14
1.7 Polarisation	17
2 Bewertung der Strahlung	21
<i>Dietrich Gall</i>	
2.1 Licht und Spektrum	23
2.2 Licht- und strahlungsphysikalische Größen	26
2.2.1 Lichttechnische Größen	26
2.2.2 Lichttechnische Stoffkennzahlen	29
2.2.3 Bewertete, strahlungsphysikalische und photonentechnische Größen	31
2.3 Farbbewertung	33
2.3.1 Niedere Farbmeterik	33
2.3.2 Farbmischungen und -transformationen	36
2.3.3 Höhere Farbmeterik (Farbempfindungsmeterik)	39
2.4 Licht-, Strahlungs- und Farbmessung	41
2.4.1 Spektrale und räumliche Bewertung durch Sensoren	41
2.4.2 Messung von lichttechnischen Größen (Photometrie)	41

3	Optische Werkstoffe und Herstellungsverfahren von optischen Bauelementen <i>Jens Bliedtner</i>	47
3.1	Optische Werkstoffe	49
3.1.1	Mineralische Gläser	49
3.1.2	Kunststoffe (organische Gläser)	50
3.1.3	Kristalle und Sonderwerkstoffe	52
3.2	Ausgewählte Werkstoffeigenschaften	54
3.2.1	Optische Eigenschaften	54
3.2.2	Chemische Eigenschaften	57
3.2.3	Mechanische Eigenschaften	59
3.3	Spiegelwerkstoffe	64
3.4	Fertigungsverfahren für optische Bauelemente	66
3.4.1	Urformen von mineralischen Gläsern	66
3.4.1.1	Fertigung von Gobs und Presslingen	66
3.4.1.2	Blockglasfertigung	67
3.4.2	Urformen von organischen Gläsern	67
3.4.2.1	Gießen	68
3.4.2.2	Spritzgießen	69
3.4.2.3	Heißprägen	70
3.5	Uniformen mineralischer Gläser	71
3.5.1	Pressen	72
3.5.2	Faserherstellung	74
3.6	Trennen von mineralischen Gläsern und Kristallen	75
3.6.1	Zerteilen/Zurichten	75
3.6.2	Schleifen	76
3.6.3	Polieren	79
3.6.4	Ultrapräzisionszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide	81
3.7	Beschichtungsverfahren	84
4	Optische Abbildung <i>Norbert Aldiek</i>	91
4.1	Grundlagen	93
4.1.1	Begriffe	93
4.1.2	Vorzeichenregel	94
4.1.3	Kardinalelemente eines optischen Systems: Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte	95
4.1.4	Abbildungsmaßstab und Vergrößerung	96
4.2	Matrizenformalismus	97
4.2.1	Translationsmatrix	97
4.2.2	Brechungsmatrix	97
4.2.3	Reflexionsmatrix	98
4.3	Abbildungsgleichungen	99
4.3.1	Allgemeines Bezugssystem	99

4.3.2	Scheitelpunkte als Bezugssystem	100
4.3.3	Wechsel auf andere Bezugssysteme	100
4.3.4	Brennpunkte als Bezugssystem	101
4.3.5	Hauptpunkte als Bezugssystem	101
4.3.6	Scheimpflugbedingung	102
4.3.7	Zeichnerische Bildkonstruktion	103
4.4	Begrenzung der Strahlengänge	103
4.4.1	Aperturblende und Pupillen	103
4.4.2	Feldblende und Luken	105
4.4.3	Vignettierung	106
4.5	Abbildungsfehler	107
4.6	Schärfentiefe	118
4.7	Abbildung Gaußscher Strahlen	120
5	Bauelemente auf der Basis von Reflexion und Brechung	127
	<i>Norbert Aldiek</i>	
5.1	Paraxiale und vollständige Durchrechnung einer Flächenfolge	129
5.1.1	Paraxiale Durchrechnung	129
5.1.2	Vektorielle Strahldurchrechnung (raytracing)	130
5.2	Sphärische Linsen	133
5.3	Spiegel	136
5.4	Systeme mit mehreren Gliedern	139
5.5	Bauelemente mit asphärischen Flächen	141
5.6	Planplatten	147
5.7	Reflexionsprismen	149
5.8	Strahlteiler	155
5.9	Dispersions- und Ablenkprismen, Keile	157
5.10	Normung und Zeichnungsangaben	160
6	Strahlungsquellen und Empfänger	167
	<i>Martin Löffler-Mang</i>	
6.1	Allgemeine Eigenschaften von Strahlungsquellen	169
6.2	Glühlampen und Entladungslampen	171
6.3	Leuchtdioden	175

6.4	Lasert und Laserdioden	179
6.5	Allgemeine Eigenschaften von Empfängern	186
6.6	Lichtelektrische Empfänger	187
6.7	Das menschliche Auge	191
7	Filter und dünne Schichten	199
	<i>Markus Michler</i>	
7.1	Optische Dünnschichten	201
7.1.1	Materialsysteme und Beschichtungsverfahren	201
7.1.1.1	Metalle	201
7.1.1.2	Dielektrika	201
7.1.1.3	Beschichtungsverfahren	202
7.1.2	Das Konzept der äquivalenten Brechzahl	203
7.1.2.1	Viertelwellenschichten (A/4-Schicht; QWOT)	203
7.1.2.2	Die äquivalente Brechzahl einer Viertelwellenschicht (n_{1e})	204
7.1.2.3	Die äquivalente Brechzahl eines Systems mit m Viertelwellenschichten (n_{me})	205
7.1.3	Schichtsysteme zur Reflexminderung	205
7.1.3.1	Die Einschicht-AR (das Q-Design)	206
7.1.3.2	Die Zweischicht-AR (das QQ-Design)	207
7.1.4	Schichtsysteme zur Reflexionserhöhung	208
7.1.4.1	Metallische Reflektoren	208
7.1.4.2	Verbesserte Metallspiegel (enhanced metal mirrors)	208
7.1.4.3	Dielektrische Hochreflektorsysteme (HR)	209
7.2	Eigenschaften und Kenngrößen optischer Filter	210
7.3	Absorptionsfilter	214
7.3.1	Farbglasfilter	216
7.3.2	Polyesterfilter/Filter aus Gelatine bzw. Harz	218
7.3.3	Flüssigkeitsfilter – Flüssigkeiten in Küvetten	219
7.4	Interferenzfilter	219
7.4.1	Dielektrische Kantenfilter (Langpass-/Kurzpassfilter)	220
7.4.1.1	Beispiel: Gelbfilter (Langpassfilter)	221
7.4.1.2	Beispiel: Zyanfilter (Kurzpassfilter)	221
7.4.2	Dielektrische breitbandige Bandpassfilter	222
7.4.3	Schmalbandige Bandpassfilter (Fabry-Perot-Filter)	223
7.4.3.1	Das Fabry-Perot-Etalon	223
7.4.3.2	Dünnschicht-Fabry-Perot-Schmalbandfilter	224
8	Mechanische Bauelemente	229
	<i>Thomas Thönig, Matthias Ulrich</i>	
8.1	Fassen optischer Komponenten	231
8.1.1	Axiales Klemmen rotationssymmetrischer Bauteile	231
8.1.2	Radiale Federklemmung	234
8.1.3	Klemmen von Planplatten und prismatischen Bauteilen	235

8.1.4	Gratfassungen	236
8.1.5	Fassen mit radial federnden Ringen	237
8.1.6	Kleben	237
8.1.7	Löten	238
8.2	Montage optischer Systeme	239
8.2.1	Passspielmontage	239
8.2.2	Justierkleben	243
8.2.3	Justierdrehen	244
8.2.4	Systemjustage	246
8.3	Falschlicht in optischen Systemen	246
8.3.1	Entstehung und Unterdrückung von Falschlicht	247
8.3.2	Bauelemente zur Reduzierung von Falschlicht	248
8.4	Mechanische Aufbausysteme für optische Komponenten	250
8.4.1	Schienensysteme	250
8.4.2	Profilsysteme	250
8.4.3	Käfig- und Stangensysteme	252
8.4.4	Tubussysteme	252
8.4.5	Tischaufbausysteme	253
8.5	Optische Tische	254
8.5.1	Aufbau von optischen Tischen	255
8.5.2	Dämpfungselemente	256
8.6	Positionierelemente	257
8.6.1	Linearversteller	257
8.6.2	Fokussier- und Zoommechanik	259
8.6.3	Kippversteller	260
9	Beleuchtung in optischen Geräten und Projektoren, Beleuchtungssysteme	265
	<i>Karsten Lindig</i>	
9.1	Grundlagen der Beleuchtungstechnik	267
9.2	Kondensoren und Objektive	269
9.3	Bildschirme; Retroreflektoren	271
9.4	Projektoraufbau	274
9.5	Projektoren für technische Anwendungen	278
9.6	Spezielle Beleuchtungseinrichtungen; Scanner	281
9.7	Scheinwerfer	286

10	Optische Beobachtungsinstrumente	293
	<i>Gottfried Schröder, Martin Löffler-Mang</i>	
10.1	Lupen	295
10.2	Grundlagen der Brillenoptik	297
10.3	Fernrohre	299
10.4	Objektive und Okulare für Teleskope	305
10.5	Bildleitung durch enge Rohre und Öffnungen	307
10.6	Entfernungsmesser und Autofokus-Systeme	309
11	Mikroskopie	317
	<i>Rolf Wartmann, Lothar Schreiber</i>	
11.1	Grundlagen des Mikroskops	319
11.2	Mikroskop-Beleuchtung und Beobachtungsverfahren	323
11.2.1	Hellfeldbeleuchtung	324
11.2.2	Dunkelfeldbeleuchtung	325
11.3	Objektive und Okulare für Mikroskope	326
11.3.1	Mikroskop-Objektiv-Typen	326
11.3.2	Okulare für den direkten Mikroskop-Einblick	329
11.4	Spezielle Mikroskopie-Verfahren (Auswahl)	330
11.4.1	Phasenkontrast	330
11.4.2	Differentieller Interferenzkontrast (DIC)	331
11.4.3	Fluoreszenz-Mikroskopie	333
11.4.4	Konfokale Mikroskop-Verfahren	334
11.4.5	Ultra-Mikroskop und Überauflösung	335
11.5	Mikroskope und Ausrüstungen	337
11.5.1	Mikroskop-Stativ	337
11.5.2	Kamera-Schnittstellen	337
11.5.3	Digital-Mikroskope	338
11.6	Stereomikroskope	339
11.6.1	Stereomikroskop nach Greenough	339
11.6.2	Stereomikroskop als Fernrohr-Typ	340
11.6.3	Stereoskopische Mikroskop-Bilder mit Pupillen-Shutter	340
12	Optoelektronische Sensorik	347
	<i>Dominik Schön, Jürgen Bretschneider, Markus Keinath, Martin Löffler-Mang</i>	
12.1	Spektrale Sensoren	349
	<i>Jürgen Bretschneider</i>	
12.1.1	Thermische Detektoren	349

12.1.2	Quantendetektoren aus Halbleitermaterial	353
12.1.3	InGaAs-Halbleiterdetektoren	355
12.1.4	Silizium-Halbleiterdetektoren	356
12.1.4.1	CCD-Sensoren	356
12.1.4.2	Bildartefakte bei CCD-Aufnahmen	360
12.1.4.3	CMOS-Sensoren	361
12.2	Sensoren für Flächenbild-und Zeilenkamas	364
	<i>Markus Keinath</i>	
12.2.1	Sensorgößen	364
12.2.2	Sensorauflösung und Bildwiederholrate (Framerate)	365
12.2.3	Farbsensoren	366
12.2.4	Rolling Shutter und Global Shutter (CMOS)	367
12.2.5	Ausleseverfahren bei CCD-Sensoren - Interlaced und Progressive Scan	368
12.2.6	Sensoren für Zeilenkamas	369
12.3	Lichtschrankensysteme	370
	<i>Martin Löffler-Mang, Dominik Schön</i>	
12.3.1	Rauchmelder	371
12.3.2	Trübungsmessung	371
12.3.3	Nebelsensor	372
12.3.4	PARSIVEL	376
12.4	Triangulationssensor	377
13	Optische Übertragungsfunktion und Bildgüte	385
	<i>Martin Buchholz</i>	
13.1	Optische Übertragungsfunktion	387
13.2	Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion	394
13.3	Auflösungsvermögen und Gütezahl	397
14	Interferometrie	403
	<i>Andreas Ettemeyer</i>	
14.1	Grundlagen von Interferometern	405
14.1.1	Zweistrahlinterferenz	405
14.1.2	Bestimmung der Phase	406
14.1.3	Demodulation	407
14.1.3.1	Zeitliche Demodulation	407
14.1.3.2	Örtliche Demodulation	408
14.1.4	Kontrast eines Interferometers	408
14.1.4.1	Intensitätsverhältnis	408
14.1.4.2	Polarisation	409
14.1.4.3	Zeitliche (longitudinale) Kohärenz	409
14.1.4.4	Räumliche Kohärenz	409
14.1.4.5	Mechanische Einflüsse	410
14.1.5	Mehrstrahl Interferenz	410

14.2	Ausführungsformen von Interferometern	412
14.2.1	Michelson-Interferometer	412
14.2.2	Twyman-Green-Interferometer	413
14.2.2.1	Messen ebener Flächen	414
14.2.2.2	Messung sphärischer Flächen	415
14.2.2.3	Messung von Asphären	416
14.2.3	Fizeau-Interferometer	417
14.2.4	Mach-Zehnder-Interferometer	417
14.2.5	Scher-Interferometer (Shear Interferometer)	418
14.2.6	Schräglich-Interferometer	420
14.2.7	Point-Diffraction-Interferometer	421
14.2.8	Weißlicht-Interferometer	422
14.2.9	Fabry-Perot-Interferometer	422
15	Diffraktive Optiken	429
	<i>Steffen Reichel</i>	
15.1	Grundlagen diffraktiver Optiken	431
15.1.1	Fraunhofer-Beugung am Einzelspalt	431
15.1.2	Das Beugungsgitter	432
15.1.3	Einzelspalt und Gitter als Oberflächenstruktur	434
15.1.4	Die Blazetechnik	436
15.1.5	Binäre Optik als eine Realisierung von Oberflächenstrukturen	437
15.2	Diffraktive Linse: die Fresnelzonenlinse	439
15.3	Diffraktive optische Elemente	440
15.4	Anwendung von diffraktiven Optiken	441
15.4.1	Fresnelzonenlinse	441
15.4.2	Laserstrahlformung mittels DOE	442
16	Spektralgeräte	447
	<i>Rene Michels</i>	
16.1	Allgemeine Grundlagen	449
16.2	Spektrale Eigenschaften von Lichtquellen und Detektoren	450
16.2.1	Lichtquellen	450
16.2.2	Detektoren	450
16.3	Spektralapparate	452
16.3.1	Feste Spektralapparate	452
16.3.2	Monochromatoren und Polychromatoren	452
16.3.3	FTIR-Spektrometer	456
16.4	Spektrometer und Photometer	458
16.4.1	Punktspektrometer	458
16.4.2	Ein- und Zweistrahlphotometer	458
16.5	Bildgebende Spektroskopie	460

16.5.1	Scannende hyperspektrale Bildgebung	461
16.5.2	Hyperspektrale Flächenkameras	462
17	Polarisationsoptik	467
	<i>Alexander Hornberg</i>	
17.1	Polarisationszustände	469
17.1.1	Polarisationsellipse	469
17.1.2	Klassifizierung der Polarisationszustände	473
17.1.2.1	Zirkulare Polarisation	473
17.1.2.2	Lineare Polarisation	473
17.1.2.3	Elliptische Polarisation	473
17.1.3	Jones-Vektoren	473
17.1.3.1	Zirkular polarisierte Welle	474
17.1.3.2	Linear polarisierte Welle	474
17.1.3.3	Elliptisch polarisierte Welle	474
17.1.4	Partiell polarisiertes Licht	475
17.2	Polarisationsoptische Bauteile	477
17.2.1	Polarisatoren	477
17.2.2	Eigenzustände eines Polarisators	479
17.2.3	Spektraleigenschaften der Intensitätsmatrix	480
17.2.3.1	Abschätzungen der Intensität	480
17.2.3.2	Polarzerlegung der Jones-Matrix	482
17.2.4	Drehung von Polarisatoren	483
17.2.5	Normale Polarisatoren	485
17.2.5.1	Pauli-Algebra für Jones-Matrizen	485
17.2.5.2	Stokes-Parameter des Ausgangszustands	486
17.2.6	Polarisatoren	487
17.2.6.1	Idealer Polarisator	487
17.2.6.2	Realer Polarisator	488
17.2.7	Verzögerer	489
17.2.7.1	Zirkularer Verzögerer	489
17.2.7.2	Linearer Verzögerer	490
17.3	Physik der Polarisatoren	493
17.3.1	Polarisationseigenschaften von Flächen	493
17.3.1.1	Jones-Matrix der Fläche	493
17.3.1.2	Reflexions- und Transmissionsgrad	494
17.3.1.3	Verhalten am optisch dichteren Medium	495
17.3.1.4	Verhalten am optisch dünneren Medium	496
17.3.2	Kristalloptiken ...'	497
17.3.2.1	Materialgesetze optisch anisotroper Werkstoffe	498
17.3.2.2	Phasenverzögerungsplatten	499
17.3.2.3	Wellengleichung	500
17.3.2.4	Dispersionsrelation	501
17.3.2.5	Geometrische Interpretation	502
17.3.2.6	Uniaxiale Kristalle	503
17.3.2.7	Reflexion und Brechung an einer Ebene	505
17.3.2.8	Polarisationsprismen	508
17.3.3	Dünnschichtpolarisatoren	509
17.3.4	Gitterpolarisatoren	509

17.3.5	Nanopartikelpolarisatoren	511
17.3.6	Folienpolarisatoren	512
17.3.7	Optische Aktivität von Kristallen und Flüssigkeiten	513
17.3.8	Faradayrotator als Phasenmodulator	514
18	Lichtwellenleiter: Faseroptik, Integrierte Optik, Sensorik	519
	<i>Markus Michler</i>	
18.1	Grundbegriffe der Wellenleiteroptik	521
18.1.1	Das Prinzip der Lichtführung	521
18.1.2	Die numerische Apertur	521
18.1.3	Geführte Wellenleitermoden	522
18.1.4	Dämpfung und Dispersion	525
18.1.4.1	Die Dämpfungskonstante	525
18.1.4.2	Absorption und Streuung in Quarzglas	525
18.1.4.3	Extrinsische Effekte	526
18.1.4.4	Werkstoffe für Polymerfasern	526
18.1.4.5	Dispersion	527
18.2	Optische Fasern	528
18.2.1	Lichtführung in Stufen- und Gradientenindexfasern	528
18.2.2	Moden in Glasfasern	530
18.2.3	Fasertypen	532
18.2.3.1	Multimodefasern	532
18.2.3.2	Singlemodefasern	533
18.2.4	Faserbündel	536
18.2.4.1	Verlustmechanismen in Faserbündeln	536
18.2.4.2	Abstrahlcharakteristik von Faserbündeln	537
18.2.4.3	Ungeordnete Faserbündel	538
18.2.4.4	Geordnete Faserbündel/Faseroptische Bildleiter	538
18.3	Integriert-optische Wellenleiter	540
18.3.1	Technologien der integrierten Optik	541
18.3.2	Passive integriert-optische Komponenten	542
18.3.3	Aktive integriert-optische Komponenten	546
18.4	Lichtwellenleitersensoren	546
18.4.1	Grundprinzip faseroptischer Sensoren	547
18.4.2	Intensitätsänderung als Sensorprinzip	548
18.4.3	Phasenänderung als Sensorprinzip	550
18.4.4	Polarisationsänderung als Sensorprinzip	551
18.4.5	Wellenlängenverschiebung als Sensorprinzip	551
19	Kameratechnik und digitale Bildverarbeitung	555
	<i>Jürgen Bretschneider, Markus Keinath, Henning Haider</i>	
19.1	Analoge und digitale Standards der Kamerainterfaces	557
19.1.1	Analoge Schnittstellen	557
19.1.2	Digitale parallele Schnittstelle RS-422 und LVDS	558
19.1.3	Camera Link	559
19.1.4	Camera Link HS	560

19.1.5	CoaXPress	560
19.1.6	FireWire (IEEE 1394)	561
19.1.7	Gigabit Ethernet	563
19.1.8	USB 2.0	565
19.1.9	USB 3.0	566
19.1.10	Tabellarischer Vergleich der Schnittstellen	567
19.2	Aufbau einer digitalen Kamera, Kamerafunktionen	567
19.2.1	Vergleichende Betrachtungen Consumerkameras versus Industriekamera (von Markus Keinath)	567
19.2.2	Frontend mit Mount (von Markus Keinath)	568
19.2.3	Blockdiagramm einer IEEE 1394b-Farbkamera	571
19.2.4	Erklärung des Datenpfades und der Funktionen	571
19.2.5	Sondermodelle digitaler Kameras	577
19.3	Kamerarauschen und EMVA 1288 Standard	578
	<i>(Kapitel 19.3.1 - 19.3.3 von Henning Haider)</i>	
19.3.1	Rauschquellen	578
19.3.1.1	Photonen Schrotrauschen (Photon Shot Noise)	578
19.3.1.2	Dunkelstrom Schrotrauschen (Dark Current Shot Noise)	579
19.3.1.3	Dark Current Nonuniformity (DSNU)	579
19.3.1.4	Photo Response Nonuniformity (PRNU)	579
19.3.1.5	Fixed-Pattern-Noise (FPN)	579
19.3.1.6	Reset Noise	579
19.3.1.7	1/f-Noise (Amplifier Noise)	580
19.3.1.8	Quantization Noise	580
19.3.1.9	Noise Floor (Grundrauschen)	580
19.3.2	Dynamic Range (DNR, Kontrastumfang)	580
19.3.3	Signal to Noise Ratio (SNR, Signal-Rauschabstand)	580
19.3.4	EMVA 1288 Standard	581
19.4	Ansteuerung über den PC und Software Interfaces	582
19.4.1	Steuerung der Bildaufnahme	582
19.4.2	Pixeldaten	583
19.4.3	Driver Software (Software Development Kit)	585
19.4.4	Kamera API (AVT FirePackage)	585
19.4.5	GenICam-Standard	586
19.4.6	Bildverarbeitungs-Bibliotheken (Third-Party Software)	587
19.5	Auswahl einer geeigneten Kamera und Einsatzfälle	587
19.5.1	Komponenten eines Bildverarbeitungssystems	587
19.5.2	Auswahlkriterien für eine Kamera	588
19.5.3	Sichtfeld (FOV) und Auflösung	589
19.5.4	Bilddatenrate, Bildwiederholrate und Bandbreite der Schnittstelle	590
19.5.5	Aufgabenstellungen in der industriellen Bildverarbeitung	591
20	Bildaufnahme- und Bildwiedergabesysteme; Infrarottechnik	595
	<i>Joachim Hauck</i>	
20.1	Optik in Bildaufnahmesystemen	597
20.1.1	Bildaufnahmeröhren	597
20.1.2	CCD-Sensoren	598
20.1.3	Farbteiler	598

20.1.4	Vario-Objektive	599
20.1.5	Lichtfeld-Kamera	600
20.2	Optik in Monitor und Displaysystemen	601
20.2.1	Kathodenstrahlröhre	601
20.2.2	LCD-Liquid Crystal Display	601
20.2.3	DLP-Projektor	603
20.2.4	Plasma-Display	605
20.2.5	Elektronisches Papier	605
20.2.5.1	Elektrophorese	605
20.2.5.2	Elektrochromie	605
20.2.5.3	Elektrobenetzung	606
20.2.6	3D-Display	607
20.2.6.1	Stereoskopisches Display	607
20.2.6.2	Autostereoskopisches Display	607
20.2.6.3	Volumen-Display	608
20.2.6.4	Lichtfeld-Display	608
20.2.7	Virtuelle Netzhautanzeige	608
20.3	Bildverstärker und Bildwandler	609
20.3.1	Bildwandlerröhre	609
20.3.2	Mikrokanalplatte	610
20.4	Infrarottechnik	613
20.4.1	Infrarote Strahlungsquellen	615
20.4.1.1	Thermische Strahler	615
20.4.1.2	Halogen-und Lichtbogenlampen	615
20.4.1.3	IR-Dioden	615
20.4.1.4	IR-Laser	616
20.4.2	Infrarot-Detektoren	616
20.4.2.1	Thermische-Detektoren und Photonen-Detektoren	617
20.4.3	Strahlungs-Thermometrie und-Thermografie	623
21	Holografie	631
	<i>Andreas Ettemeyer</i>	
21.1	Grundlagen der Holografie	633
21.1.1	Einführung	633
21.1.2	Hologrammaufnahme	633
21.1.3	Hologrammrekonstruktion	634
21.2	Klassische Holografie	635
21.2.1	Off-Axis-Hologramm	635
21.2.2	Reflexions-Hologramm	636
21.2.3	Bildebenen-Hologramm	637
21.2.4	Regenbogen-Hologramm	637
21.2.5	Holografische Interferometrie	639
21.3	Digitale Holografie	640
21.3.1	Aufbau eines digitalen Holografie-Mikroskops	640
21.3.2	Numerische Hologrammrekonstruktion	641
21.3.3	Objektrekonstruktion	641

21.3.4	Mehrwellenlängen-Holografie	643
21.3.5	Anwendungen	644
21.3.5.1	Reflexionsmessung	644
21.3.5.2	Transmissionsmessungen	645
21.4	Speckle-Interferometrie	645
21.4.1	Empfindlichkeitsvektor	646
21.4.2	Oberflächenmessung mit Speckle-Interferometrie	647
21.4.3	Verformungsmessung mit Speckle-Interferometrie	647
21.4.4	Bestimmung der in-plane-Verformung	649
22	Gradientenoptik	653
	<i>Bernhard Messerschmidt</i>	
22.1	Grundlagen der Gradientenoptik	655
22.2	Herstellungsverfahren	657
22.3	GRIN-Linsen in Applikationen	658
23	Lasermesstechnik	667
	<i>Martin Löffler-Mang</i>	
23.1	Laser-Doppler-Velocimetrie	669
23.1.1	Interferenzstreifenmodell	669
23.1.2	Doppler-Modell	670
23.1.3	Frequenzshift und mehrere Geschwindigkeitskomponenten	672
23.1.4	Anwendungsbeispiele	673
23.2	Phasen-Doppler-Partikelanalyse	675
23.2.1	Qualitatives Modell	675
23.2.2	Quantitatives Modell	676
23.2.3	Systemaufbau	678
23.2.4	Messvolumenkorrektur	678
23.2.5	Anwendungsbeispiele	680
23.2.6	Stromdichte und Konzentration	681
	Index	685