

# Inhalt

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

<b>3</b>	<b>Optische Werkstoffe und Herstellungsverfahren von optischen Bauelementen . . . . .</b>	<b>47</b>
<i>Jens Bliedtner</i>		
<b>3.1</b>	<b>Optische Werkstoffe . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1.1	Mineralische Gläser . . . . .	49
3.1.2	Kunststoffe (organische Gläser) . . . . .	50
3.1.3	Kristalle und Sonderwerkstoffe . . . . .	52
<b>3.2</b>	<b>Ausgewählte Werkstoffeigenschaften . . . . .</b>	<b>54</b>
3.2.1	Optische Eigenschaften . . . . .	54
3.2.2	Chemische Eigenschaften . . . . .	57
3.2.3	Mechanische Eigenschaften . . . . .	59
<b>3.3</b>	<b>Spiegelwerkstoffe . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>3.4</b>	<b>Fertigungsverfahren für optische Bauelemente . . . . .</b>	<b>66</b>
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
<b>3.5</b>	<b>Umformen mineralischer Gläser . . . . .</b>	<b>71</b>
3.5.1	Pressen . . . . .	72
3.5.2	Faserherstellung . . . . .	74
<b>3.6</b>	<b>Trennen von mineralischen Gläsern und Kristallen . . . . .</b>	<b>75</b>
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
<b>3.7</b>	<b>Beschichtungsverfahren . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>4</b>	<b>Optische Abbildung . . . . .</b>	<b>91</b>
<i>Norbert Aldiek</i>		
<b>4.1</b>	<b>Grundlagen . . . . .</b>	<b>93</b>
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	Abbildungsmäßstab und Vergrößerung . . . . .	96
<b>4.2</b>	<b>Matrizenformalismus . . . . .</b>	<b>97</b>
4.2.1	Translationsmatrix . . . . .	97
4.2.2	Brechungsmatrix . . . . .	97
4.2.3	Reflexionsmatrix . . . . .	98
<b>4.3</b>	<b>Abbildungsgleichungen . . . . .</b>	<b>99</b>
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
<b>4.4</b>	<b>Begrenzung der Strahlengänge . . . . .</b>	<b>103</b>
4.4.1	Aperturblende und Puppen . . . . .	103
4.4.2	Feldblende und Luken . . . . .	105
4.4.3	Vignettierung . . . . .	106
<b>4.5</b>	<b>Abbildungsfehler . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>4.6</b>	<b>Schärfentiefe . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>4.7</b>	<b>Abbildung Gaußscher Strahlen . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>5</b>	<b>Bauelemente auf der Basis von Reflexion und Brechung . . . . .</b>	<b>127</b>
	<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
<b>6</b>	<b>Strahlungsquellen und Empfänger . . . . .</b>	<b>167</b>
	<i>Martin Löffler-Mang</i>	
6.1	Allgemeine Eigenschaften von Strahlungsquellen . . . . .	169
6.2	Glühlampen und Entladungslampen . . . . .	171
6.3	Leuchtdioden . . . . .	175

<b>6.4</b>	<b>Laser und Laserdioden</b>	179
<b>6.5</b>	<b>Allgemeine Eigenschaften von Empfängern</b>	186
<b>6.6</b>	<b>Lichtelektrische Empfänger</b>	187
<b>6.7</b>	<b>Das menschliche Auge</b>	191
<b>7</b>	<b>Filter und dünne Schichten</b>	199
	<i>Markus Michler</i>	
<b>7.1</b>	<b>Optische Dünnschichten</b>	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 ( $\lambda/4$ -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
<b>7.2</b>	<b>Eigenschaften und Kenngrößen optischer Filter</b>	210
<b>7.3</b>	<b>Absorptionsfilter</b>	214
7.3.1	Farbglasfilter	216
7.3.2	Polyesterfilter/Filter aus Gelatine bzw. Harz	218
7.3.3	Flüssigkeitsfilter – Flüssigkeiten in Küvetten	219
<b>7.4</b>	<b>Interferenzfilter</b>	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
<b>8</b>	<b>Mechanische Bauelemente</b>	229
	<i>Thomas Thöniß, Matthias Ullrich</i>	
<b>8.1</b>	<b>Fassen optischer Komponenten</b>	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	<b>Gratfassungen</b>	236
8.1.5	<b>Fassen mit radial federnden Ringen</b>	237
8.1.6	<b>Kleben</b>	237
8.1.7	<b>Löten</b>	238
<b>8.2</b>	<b>Montage optischer Systeme</b>	239
8.2.1	<b>Passspielmontage</b>	239
8.2.2	<b>Justierkleben</b>	243
8.2.3	<b>Justierdrehen</b>	244
8.2.4	<b>Systemjustage</b>	246
<b>8.3</b>	<b>Falschlicht in optischen Systemen</b>	246
8.3.1	<b>Entstehung und Unterdrückung von Falschlicht</b>	247
8.3.2	<b>Bauelemente zur Reduzierung von Falschlicht</b>	248
<b>8.4</b>	<b>Mechanische Aufbausysteme für optische Komponenten</b>	250
8.4.1	<b>Schiensysteme</b>	250
8.4.2	<b>Profilsysteme</b>	250
8.4.3	<b>Käfig- und Stangensysteme</b>	252
8.4.4	<b>Tubussysteme</b>	252
8.4.5	<b>Tischaufbausysteme</b>	253
<b>8.5</b>	<b>Optische Tische</b>	254
8.5.1	<b>Aufbau von optischen Tischen</b>	255
8.5.2	<b>Dämpfungselemente</b>	256
<b>8.6</b>	<b>Positionierelemente</b>	257
8.6.1	<b>Linearversteller</b>	257
8.6.2	<b>Fokussier- und Zoommechanik</b>	259
8.6.3	<b>Kippversteller</b>	260
<b>9</b>	<b>Beleuchtung in optischen Geräten und Projektoren, Beleuchtungssysteme</b>	265
	<i>Karsten Lindig</i>	
<b>9.1</b>	<b>Grundlagen der Beleuchtungstechnik</b>	267
<b>9.2</b>	<b>Kondensoren und Objektive</b>	269
<b>9.3</b>	<b>Bildschirme; Retroreflektoren</b>	271
<b>9.4</b>	<b>Projektoraufbau</b>	274
<b>9.5</b>	<b>Projektoren für technische Anwendungen</b>	278
<b>9.6</b>	<b>Spezielle Beleuchtungseinrichtungen; Scanner</b>	281
<b>9.7</b>	<b>Scheinwerfer</b>	286

<b>10</b>	<b>Optische Beobachtungsinstrumente</b>	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
<b>11</b>	<b>Mikroskopie</b>	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-Stative	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
<b>12</b>	<b>Optoelektronische Sensorik</b>	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
<b>12.2</b>	<b>Sensoren für Flächenbild- und Zeilenkameras . . . . .</b>	<b>364</b>
<i>Markus Keinath</i>		
12.2.1	Sensorgrößen . . . . .	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 Zeilenkameras . . . . .	369
<b>12.3</b>	<b>Lichtschrankensysteme . . . . .</b>	<b>370</b>
<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
<b>12.4</b>	<b>Triangulationssensor . . . . .</b>	<b>377</b>
<b>13</b>	<b>Optische Übertragungsfunktion und Bildgüte . . . . .</b>	<b>385</b>
<i>Martin Buchholz</i>		
<b>13.1</b>	<b>Optische Übertragungsfunktion . . . . .</b>	<b>387</b>
<b>13.2</b>	<b>Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion . . . . .</b>	<b>394</b>
<b>13.3</b>	<b>Auflösungsvermögen und Gütezahl . . . . .</b>	<b>397</b>
<b>14</b>	<b>Interferometrie . . . . .</b>	<b>403</b>
<i>Andreas Ettemeyer</i>		
<b>14.1</b>	<b>Grundlagen von Interferometern . . . . .</b>	<b>405</b>
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

<b>14.2 Ausführungsformen von Interferometern</b>	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
14.2.3 Messung von Asphären	416
14.2.4 Fizeau-Interferometer	417
14.2.5 Mach-Zehnder-Interferometer	417
14.2.6 Scher-Interferometer (Shear Interferometer)	418
14.2.7 Schräglicht-Interferometer	420
14.2.8 Point-Diffraction-Interferometer	421
14.2.9 Weißlicht-Interferometer	422
14.2.9 Fabry-Perot-Interferometer	422
<b>15 Diffraktive Optiken</b>	429
<i>Steffen Reichel</i>	
<b>15.1 Grundlagen diffraktiver Optiken</b>	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
<b>15.2 Diffraktive Linse: die Fresnelzonenlinse</b>	439
<b>15.3 Diffraktive optische Elemente</b>	440
<b>15.4 Anwendung von diffraktiven Optiken</b>	441
15.4.1 Fresnelzonenlinse	441
15.4.2 Laserstrahlformung mittels DOE	442
<b>16 Spektralgeräte</b>	447
<i>René Michels</i>	
<b>16.1 Allgemeine Grundlagen</b>	449
<b>16.2 Spektrale Eigenschaften von Lichtquellen und Detektoren</b>	450
16.2.1 Lichtquellen	450
16.2.2 Detektoren	450
<b>16.3 Spektralapparate</b>	452
16.3.1 Feste Spektralapparate	452
16.3.2 Monochromatoren und Polychromatoren	452
16.3.3 FTIR-Spektrometer	456
<b>16.4 Spektrometer und Photometer</b>	458
16.4.1 Punktspektrometer	458
16.4.2 Ein- und Zweistrahlpotometer	458
<b>16.5 Bildgebende Spektroskopie</b>	460

16.5.1	Scannende hyperspektrale Bildgebung . . . . .	461
16.5.2	Hyperspektrale Flächenkameras . . . . .	462

<b>17</b>	<b>Polarisationsoptik . . . . .</b>	<b>467</b>
<i>Alexander Hornberg</i>		
<b>17.1</b>	<b>Polarisationszustände . . . . .</b>	<b>469</b>
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
<b>17.2</b>	<b>Polarisationsoptische Bauteile . . . . .</b>	<b>477</b>
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
<b>17.3</b>	<b>Physik der Polarisatoren . . . . .</b>	<b>493</b>
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	Kristallopptiken . . . . .	497
17.3.2.1	Materialgesetze optisch anisotroper Werkstoffe . . . . .	498
17.3.2.2	Phasenverzögerungssplatten . . . . .	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	Dünnenschichtpolarisatoren . . . . .	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
<b>18</b>	<b>Lichtwellenleiter: Faseroptik, Integrierte Optik, Sensorik . . . . .</b>	<b>519</b>
<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 Bildeiter . . . . .	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
<b>19</b>	<b>Kameratechnik und digitale Bildverarbeitung . . . . .</b>	<b>555</b>
<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
<b>19.2</b>	<b>Aufbau einer digitalen Kamera, Kamerafunktionen . . . . .</b>	<b>567</b>
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
<b>19.3</b>	<b>Kamerarauschen und EMVA 1288 Standard . . . . .</b>	<b>578</b>
<i>(Kapitel 19.3.1 – 19.3.3 von Henning Haider)</i>		
19.3.1	Rauschquellen . . . . .	578
19.3.1.1	Photonen Schrottrauschen (Photon Shot Noise) . . . . .	578
19.3.1.2	Dunkelstrom Schrottrauschen (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
<b>19.4</b>	<b>Ansteuerung über den PC und Software Interfaces . . . . .</b>	<b>582</b>
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
<b>19.5</b>	<b>Auswahl einer geeigneten Kamera und Einsatzfälle . . . . .</b>	<b>587</b>
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
<b>20</b>	<b>Bildaufnahme- und Bildwiedergabesysteme; Infrarottechnik . . . . .</b>	<b>595</b>
<i>Joachim Hauck</i>		
<b>20.1</b>	<b>Optik in Bildaufnahmesystemen . . . . .</b>	<b>597</b>
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
<b>20.2</b>	<b>Optik in Monitor und Displaysystemen . . . . .</b>	<b>601</b>
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
<b>20.3</b>	<b>Bildverstärker und Bildwandler . . . . .</b>	<b>609</b>
20.3.1	Bildwandlerröhre . . . . .	609
20.3.2	Mikrokanalplatte . . . . .	610
<b>20.4</b>	<b>Infrarottechnik . . . . .</b>	<b>613</b>
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
<b>21</b>	<b>Holografie . . . . .</b>	<b>631</b>
<i>Andreas Ettemeyer</i>		
<b>21.1</b>	<b>Grundlagen der Holografie . . . . .</b>	<b>633</b>
21.1.1	Einführung . . . . .	633
21.1.2	Hologrammaufnahme . . . . .	633
21.1.3	Hologrammrekonstruktion . . . . .	634
<b>21.2</b>	<b>Klassische Holografie . . . . .</b>	<b>635</b>
21.2.1	Off-Axis-Hologramm . . . . .	635
21.2.2	Reflexions-Hologramm . . . . .	636
21.2.3	Bildeckenen-Hologramm . . . . .	637
21.2.4	Regenbogen-Hologramm . . . . .	637
21.2.5	Holografische Interferometrie . . . . .	639
<b>21.3</b>	<b>Digitale Holografie . . . . .</b>	<b>640</b>
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
<b>21.4</b>	<b>Speckle-Interferometrie .....</b>	<b>645</b>
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
<b>22</b>	<b>Gradientenoptik .....</b>	<b>653</b>
	<i>Bernhard Messerschmidt</i>	
22.1	Grundlagen der Gradientenoptik .....	655
22.2	Herstellungsverfahren .....	657
22.3	GRIN-Linsen in Applikationen .....	658
<b>23</b>	<b>Lasermesstechnik .....</b>	<b>667</b>
	<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
<b>Index</b>	.....	<b>685</b>