

HANSER



Leseprobe

zu

„Handbuch Bauelemente der Optik“

von Martin Löffler-Mang et al.

Print-ISBN: 978-3-446-46032-4
E-Book-ISBN: 978-3-446-46126-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46032-4>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 8. Auflage

Die Leser und Anwender des „Handbuch Bauelemente der Optik“ haben der 7., vollständig überarbeiteten und erweiterten Auflage mit neuem Konzept die Treue gehalten und damit zum anhaltenden Erfolg des Werkes beigetragen. Dafür sind der Verlag und die Autoren dankbar.

Diese positive Resonanz hat es bereits nach fünf Jahren nötig und möglich gemacht, die 8. Auflage in Angriff zu nehmen. Die Autoren haben dafür ihre Kapitel überarbeitet, aktualisiert, alte Zöpfe abgeschnitten und neue Entwicklungen aufgenommen. Zu den Themen Spektralgeräte (Kapitel 16) und Bildgebende Verfahren (Kapitel 20) wurden komplett neue Beiträge erstellt. Außerdem wurden Kapitel 2 (Bewertung der Strahlung), Kapitel 9 (Beleuchtung in optischen Geräten und Projektoren) und Kapitel 10 (Optische Beobachtungsinstrumente) von neuen Autoren bearbeitet. Und schließlich haben ein paar ganz neue Themen Eingang in die 8. Auflage gefunden. Stellvertretend seien hier zwei Beispiele genannt: Datenbrillen (Kapitel 10.6) und die nicht visuelle Wirkung von Licht (Kapitel 6.8).

Ich bin der Überzeugung, dass die nun vorliegende 8., überarbeitete Auflage durch das Zusammenwirken aller Co-Autoren noch besser geworden ist als die vorangegangene. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Co-Autoren ganz herzlich für ihre reibungslose Mitarbeit bedanken. Außerdem möchte ich mich bei Frau Stepp vom Hanser Verlag für die effektive Unterstützung bedanken. Ohne ihre tatkräftige und kompetente Hilfe wäre die 8. Auflage noch lange nicht fertig. Wir alle hoffen, dass das neu gestaltete Werk seine Funktion als Übersichts- und Anregungsbuch bei der Suche nach Lösungswegen weiterhin gut erfüllen kann. Verlag, Herausgeber und Co-Autoren sind nach wie vor interessiert an Ihren Rückmeldungen, Hinweisen und Ergänzungen!

Saarbrücken im November 2019

Martin Löffler-Mang

Inhalt

Vorwort zur 8. Auflage	V
Vorwort zur 7. Auflage	VI
Autorenverzeichnis	XXIII
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	25
<i>Dietrich Gall (†), Jürgen P. Weißhaar</i>	
2.1 Licht und Spektrum	27
2.2 Licht- und strahlungsphysikalische Größen	30
2.2.1 Lichttechnische Größen	30
2.2.2 Lichttechnische Stoffkennzahlen	35
2.2.3 Bewertete, strahlungsphysikalische und photonentechnische Größen	37
2.3 Farbbewertung	39
2.3.1 Niedere Farbmeterik	39
2.3.2 Farbmischungen und -transformationen	42
2.3.3 Höhere Farbmeterik (Farbempfindungsmeterik)	45

2.4	Licht-, Strahlungs- und Farbmessung	47
2.4.1	Spektrale und räumliche Bewertung durch Sensoren	47
2.4.2	Messung von lichttechnischen Größen (Photometrie)	48
3	Optische Werkstoffe und Herstellungsverfahren von optischen Bauelementen	55
	<i>Jens Bliedtner</i>	
3.1	Optische Werkstoffe	57
3.1.1	Mineralische Gläser	57
3.1.2	Kunststoffe (organische Gläser)	58
3.1.3	Kristalle und Sonderwerkstoffe	60
3.2	Ausgewählte Werkstoffeigenschaften	62
3.2.1	Optische Eigenschaften	62
3.2.2	Chemische Eigenschaften	65
3.2.3	Mechanische Eigenschaften	67
3.3	Spiegelwerkstoffe	72
3.4	Fertigungsverfahren für optische Bauelemente	74
3.4.1	Urformen von mineralischen Gläsern	74
3.4.1.1	Fertigung von Gobs und Presslingen	74
3.4.1.2	Blockglasfertigung	75
3.4.2	Urformen von organischen Gläsern	75
3.4.2.1	Gießen	76
3.4.2.2	Spritzgießen	77
3.4.2.3	Heißprägen	78
3.5	Umformen mineralischer Gläser	79
3.5.1	Pressen	80
3.5.2	Faserherstellung	82
3.6	Trennen von mineralischen Gläsern und Kristallen	83
3.6.1	Zerteilen/Zurichten	83
3.6.2	Schleifen	84
3.6.3	Polieren	87
3.6.4	Ultrapräzisionszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide	89
3.7	Beschichtungsverfahren	92
3.8	Ausgewählte Fertigungstechnologien für optische Bauelemente	96
3.8.1	Plane und prismatische Bauteile	97
3.8.2	Displaygläser	97
3.8.3	Sphärische Linsen	99
3.8.4	Asphärische Bauelemente	100
3.8.5	Freiformoptische Bauelemente	101

4	Optische Abbildung	107
	<i>Norbert Aldiek</i>	
4.1	Grundlagen	109
4.1.1	Begriffe	109
4.1.2	Vorzeichenregel	110
4.1.3	Kardinalelemente eines optischen Systems: Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte	111
4.1.4	Abbildungsmaßstab und Vergrößerung	112
4.2	Matrizenformalismus	113
4.2.1	Translationsmatrix	113
4.2.2	Brechungsmatrix	113
4.2.3	Reflexionsmatrix	114
4.3	Abbildungsgleichungen	115
4.3.1	Allgemeines Bezugssystem	115
4.3.2	Scheitelpunkte als Bezugssystem	116
4.3.3	Wechsel auf andere Bezugssysteme	116
4.3.4	Brennpunkte als Bezugssystem	117
4.3.5	Hauptpunkte als Bezugssystem	117
4.3.6	Scheimpflugbedingung	118
4.3.7	Zeichnerische Bildkonstruktion	119
4.4	Begrenzung der Strahlengänge	119
4.4.1	Aperturblende und Pupillen	119
4.4.2	Feldblende und Luken	121
4.4.3	Vignettierung	122
4.5	Abbildungsfehler	123
4.6	Schärfentiefe	134
4.7	Abbildung Gaußscher Strahlen	136
5	Bauelemente auf der Basis von Reflexion und Brechung	143
	<i>Norbert Aldiek</i>	
5.1	Paraxiale und vollständige Durchrechnung einer Flächenfolge	145
5.1.1	Paraxiale Durchrechnung	145
5.1.2	Vektorielle Strahldurchrechnung (raytracing)	146
5.2	Sphärische Linsen	149
5.3	Spiegel	152
5.4	Systeme mit mehreren Gliedern	155
5.5	Bauelemente mit asphärischen Flächen	157
5.6	Planplatten	165
5.7	Reflexionsprismen	167

5.8	Strahlteiler	173
5.9	Dispersions- und Ablenkprismen, Keile	175
5.10	Normung und Zeichnungsangaben	178
6	Strahlungsquellen und Empfänger	185
	<i>Martin Löffler-Mang, Dieter Lang</i>	
6.1	Allgemeine Eigenschaften von Strahlungsquellen	187
6.2	Glühlampen und Entladungslampen	189
6.3	Leuchtdioden	193
6.4	Laser und Laserdioden	196
6.5	Allgemeine Eigenschaften von Empfängern	202
6.6	Lichtelektrische Empfänger	204
6.7	Das menschliche Auge	207
6.8	Nicht visuelle Wirkung von Licht	212
6.8.1	Neue Photorezeptoren im Auge	213
6.8.2	Biologische Rhythmen	215
6.8.3	Wirkungsmechanismen	216
6.8.4	Folgerungen für Lichtquellen	216
6.8.5	Normen	220
6.8.6	Human Centric Lighting (HCL)	224
6.8.7	Photobiologische Sicherheit	226
7	Filter und dünne Schichten	233
	<i>Markus Michler</i>	
7.1	Optische Dünnschichten	235
7.1.1	Materialsysteme	235
7.1.1.1	Metalle	235
7.1.1.2	Dielektrika	235
7.1.2	Beschichtungsverfahren	236
7.2	Das Konzept der äquivalenten Brechzahl	238
7.2.1	Viertelwellenschichten ($\lambda/4$ -Schicht; QWOT)	238
7.2.2	Die äquivalente Brechzahl einer Viertelwellenschicht (n_{1e})	239
7.2.3	Die äquivalente Brechzahl eines Systems mit m Viertelwellenschichten (n_{me})	240
7.3	Schichtsysteme zur Reflexminderung	240
7.3.1	Die Einschicht-AR (das Q-Design)	240
7.3.2	Die Zweischicht-AR (das QQ-Design)	241

7.4	Schichtsysteme zur Reflexionserhöhung	242
7.4.1	Metallische Reflektoren	243
7.4.2	Verbesserte Metallspiegel (enhanced metal mirrors)	243
7.4.3	Dielektrische Hochreflektorsysteme (HR)	244
7.4.4	Rugate-Spiegel	245
7.5	Spektrale Eigenschaften und Kenngrößen optischer Filter	247
7.6	Absorptionsfilter	251
7.6.1	Farbglasfilter	253
7.6.2	Organische Filter	254
7.6.3	Flüssigkeitsfilter – Flüssigkeiten in Küvetten	256
7.7	Interferenzfilter	256
7.7.1	Dielektrische Kantenfilter (Langpass-/Kurzpassfilter)	257
7.7.1.1	Beispiel: Gelbfilter (Langpassfilter)	257
7.7.1.2	Beispiel: Zyanfilter (Kurzpassfilter)	258
7.7.2	Dielektrische breitbandige Bandpassfilter	259
7.7.3	Schmalbandige Bandpassfilter (Fabry-Perot-Filter)	259
7.7.3.1	Das Fabry-Perot-Etalon	259
7.7.3.2	Dünnschicht-Fabry-Perot-Schmalbandfilter	260
8	Mechanische Bauelemente	265
	<i>Thomas Thöniß, Matthias Ulrich</i>	
8.1	Fassen optischer Komponenten	267
8.1.1	Axiales Klemmen rotationssymmetrischer Bauteile	267
8.1.2	Radiale Federklemmung	270
8.1.3	Klemmen von Planplatten und prismatischen Bauteilen	271
8.1.4	Gratfassungen	272
8.1.5	Fassen mit radial federnden Ringen	273
8.1.6	Kleben	273
8.1.7	Löten	274
8.2	Montage optischer Systeme	275
8.2.1	Passspielmontage	275
8.2.2	Justierkleben	279
8.2.3	Justierdrehen	280
8.2.4	Systemjustage	282
8.3	Falschlicht in optischen Systemen	282
8.3.1	Entstehung und Unterdrückung von Falschlicht	283
8.3.2	Bauelemente zur Reduzierung von Falschlicht	284
8.4	Mechanische Aufbausysteme für optische Komponenten	286
8.4.1	Schienensysteme	286
8.4.2	Profilsysteme	286
8.4.3	Käfig- und Stangensysteme	288
8.4.4	Tubussysteme	288
8.4.5	Tischaufbausysteme	289

8.5	Optische Tische	290
8.5.1	Aufbau von optischen Tischen	291
8.5.2	Dämpfungselemente	292
8.6	Positionierelemente	293
8.6.1	Linearversteller	293
8.6.2	Fokussier- und Zoommechanik	295
8.6.3	Kippversteller	296
9	Beleuchtung in optischen Geräten und Projektoren, Beleuchtungssysteme	301
	<i>Christoph Schierz, Karsten Lindig, Gottfried Schröder (†)</i>	
9.1	Grundlagen der Beleuchtungstechnik	303
9.2	Kondensoren und Objektive	305
9.3	Bildwände; Retroreflektoren	307
9.4	Projektoraufbau	311
9.5	Projektoren für technische Anwendungen	314
9.6	Spezielle Beleuchtungseinrichtungen; Scanner	317
9.7	Scheinwerfer	322
10	Optische Beobachtungsinstrumente	329
	<i>Norbert Aldiek, Martin Löffler-Mang, Gottfried Schröder (†)</i>	
10.1	Lupen	331
10.2	Grundlagen der Brillenoptik	333
10.3	Fernrohre	336
10.4	Objektive und Okulare für Teleskope	341
10.5	Bildleitung durch enge Rohre und Öffnungen	344
10.6	Datenbrillen	346
10.6.1	Mikrodisplays	346
10.6.2	Optische Architektur für Datenbrillen	347
11	Mikroskopie	355
	<i>Rolf Wartmann, Lothar Schreiber</i>	
11.1	Grundlagen des Mikroskops	357
11.2	Mikroskop-Beleuchtung und Beobachtungsverfahren	361
11.2.1	Hellfeldbeleuchtung	362

11.2.2	Dunkelfeldbeleuchtung	363
11.3	Objektive und Okulare für Mikroskope	364
11.3.1	Mikroskop-Objektiv-Typen	364
11.3.2	Okulare für den direkten Mikroskop-Einblick	367
11.4	Spezielle Mikroskopie-Verfahren (Auswahl)	368
11.4.1	Phasenkontrast	368
11.4.2	Differentieller Interferenzkontrast (DIC)	369
11.4.3	Fluoreszenz-Mikroskopie	371
11.4.4	Konfokale Mikroskop-Verfahren	372
11.4.5	Ultra-Mikroskop und Überauflösung	373
11.5	Mikroskope und Ausrüstungen	375
11.5.1	Mikroskop-Stative	375
11.5.2	Kamera-Schnittstellen	375
11.6	Digital-Mikroskope	376
11.7	Stereomikroskope	379
11.7.1	Stereomikroskop nach Greenough	379
11.7.2	Stereomikroskop als Fernrohr-Typ	380
11.7.3	Stereoskopische Mikroskop-Bilder mit Pupillen-Shutter	380
12	Optoelektronische Sensorik	385
	<i>Jürgen Bretschneider, Markus Keinath, Martin Löffler-Mang</i>	
12.1	Spektrale Sensoren	387
12.1.1	Thermische Detektoren	387
12.1.2	Quantendetektoren aus Halbleitermaterial	391
12.1.3	InGaAs-Halbleiterdetektoren	393
12.1.4	Silizium-Halbleiterdetektoren	394
12.1.4.1	CCD-Sensoren	394
12.1.4.2	Bildartefakte bei CCD-Aufnahmen	398
12.1.4.3	CMOS-Sensoren	399
12.2	Sensoren für Flächenbild- und Zeilenkameras	404
12.2.1	Sensorgößen und -formate	405
12.2.2	Sensorauflösung und Bildwiederholrate (Framerate)	405
12.2.3	Farbsensoren	407
12.2.4	Rolling Shutter und Global Shutter (CMOS)	408
12.2.5	Ausleseverfahren bei CCD-Sensoren – Interlaced und Progressive Scan	409
12.2.6	Sensoren für Zeilenkameras	410
12.3	Lichtschrankensysteme	412
12.3.1	Rauchmelder	412
12.3.2	Trübungsmessung	412
12.3.3	Nebelsensor	414
12.3.4	PARSIVEL	417
12.4	Triangulationssensor	419

13	Optische Übertragungsfunktion und Bildgüte	427
	<i>Martin Buchholz</i>	
13.1	Optische Übertragungsfunktion	429
13.2	Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion	436
13.3	Auflösungsvermögen und Gütezahl	439
14	Interferometrie	445
	<i>Andreas Ettemeyer</i>	
14.1	Grundlagen von Interferometern	447
14.1.1	Zweistrahlinterferenz	447
14.1.2	Bestimmung der Phase	448
14.1.3	Demodulation	449
14.1.3.1	Zeitliche Demodulation	449
14.1.3.2	Örtliche Demodulation	450
14.1.4	Kontrast eines Interferometers	450
14.1.4.1	Intensitätsverhältnis	450
14.1.4.2	Polarisation	451
14.1.4.3	Zeitliche (longitudinale) Kohärenz	451
14.1.4.4	Räumliche Kohärenz	451
14.1.4.5	Mechanische Einflüsse	452
14.1.5	Mehrstrahlinterferenz	452
14.2	Ausführungsformen von Interferometern	454
14.2.1	Michelson-Interferometer	454
14.2.2	Twyman-Green-Interferometer	455
14.2.2.1	Messen ebener Flächen	456
14.2.2.2	Messung sphärischer Flächen	457
14.2.2.3	Messung von Asphären	458
14.2.3	Fizeau-Interferometer	459
14.2.4	Mach-Zehnder-Interferometer	459
14.2.5	Scher-Interferometer (Shear Interferometer)	460
14.2.6	Schräglicht-Interferometer	462
14.2.7	Point-Diffraction-Interferometer	463
14.2.8	Weißlicht-Interferometer	464
14.2.9	Fabry-Perot-Interferometer	464
15	Diffraaktive Optiken	471
	<i>Steffen Reichel</i>	
15.1	Grundlagen diffraktiver Optiken	473
15.1.1	Fraunhofer-Beugung am Einzelspalt	473
15.1.2	Das Beugungsgitter	474
15.1.3	Einzelspalt und Gitter als mikrostrukturierte Oberfläche	477
15.1.4	Die Blazetechnik	478
15.1.5	Binäre Optik als eine Realisierung von Oberflächenstrukturen	479
15.2	Diffraktive Linse – die Fresnelzonenlinse	481

15.3	Diffraktive optische Elemente	482
15.4	Anwendung von diffraktiven Optiken	483
15.4.1	Fresnelzonenlinse	483
15.4.2	Laserstrahlformung mittels DOE	486
16	Spektralgeräte	491
	<i>Wilfried Neumann, René Heine</i>	
16.1	Allgemeine Grundlagen der optischen Spektroskopie	493
16.1.1	Baugruppen für ein optisches Spektrometrie-System	493
16.2	Prinzipieller Aufbau optischer Spektrometer	494
16.3	Beugungsgitter	495
16.3.1	Die Herstellung von Beugungsgittern	495
16.3.2	Gitterfunktionen	496
16.3.2.1	Generelle Anmerkungen zur Gitterfunktion	497
16.3.3	Wellenlängen- und Polarisationsverhalten von Beugungsgittern	497
16.3.4	Grundversionen von Dispersionsgittern	498
16.4	Dispensionsprisma	499
16.5	Filter	500
16.6	Spektrometer-Konzepte	501
16.6.1	Littrow-Aufbau	501
16.6.2	Ebert-Fastie-Spektrometer	503
16.6.2.1	Doppelpass-Spektrometer	503
16.6.3	Czerny-Turner-Spektrometer	504
16.6.4	Doppelspektrometer	505
16.6.5	Spektrometer für das tiefe UV/Vakuum-UV	506
16.6.6	Prismen-Spektrometer	508
16.6.7	Kompakte faseroptisch beleuchtete Spektrometer	508
16.6.8	Flexible Multifunktionsspektrometer	508
16.7	Die optische Kopplung von Spektrometern	509
16.7.1	Einkopplung per Transferoptik	510
16.7.1.1	Der Raumwinkel der Quelle ist größer als der Raumwinkel der Lichtsammlung	510
16.7.1.2	Einkopplung von Quellen, deren Abstrahlwinkel schlanker ist als die Öffnung des Spektrometers	511
16.7.1.3	Einkopplung von Lichtleitern und Querschnittswandlern	511
16.8	Leistungsparameter und Abbildungsfehler	512
16.8.1	Aberrationen und deren Korrektur	513
16.8.2	Dispersion, Bandbreite und Auflösung	514
16.8.2.1	Die spektrale Bandbreite von Monochromatoren	514
16.8.2.2	Die Beugungsgrenze	514
16.8.2.3	Definition der Auflösung optischer Spektrometer	515
16.8.2.4	Die spektrale Bandbreite von Spektrographen	515
16.8.3	Störungen, Streulicht, Falschlicht, Signaldynamik	516

16.9	Spektrometrie	518
16.9.1	Breitbandige Lichtquellen	518
16.9.2	Strahlführung und Lichtleiter	519
16.9.3	Detektoren	519
16.9.3.1	SEV/PMT und Szintillatoren	519
16.9.3.2	Mikrokanalplatten-Bildverstärker	520
16.9.3.3	Einzelpunkt-Festkörper-Detektoren	521
16.9.3.4	Registrierende Messungen (Scanning Spectrometry)	522
16.9.4	Spektrographen-Messungen (Parallel Spectrometry)	523
16.9.5	Bildgebende Verfahren (Imaging Spectroscopy)	523
16.9.5.1	Die Technologien von CCD und CMOS (APS)	523
16.9.6	Strahlführung und Ausleseverfahren multispektraler Systeme	524
16.9.6.1	Auslesen eines Full-Frame-CCD	525
16.9.6.2	CCD mit interner Verstärkung: EM-CCD	527
16.9.6.3	CMOS- oder APS-Sensoren	527
16.9.6.4	CCD mit MCP-Bildverstärker	527
16.9.6.5	Optimierter Spektrograph für Imaging Spectroscopy	528
16.9.7	Hyperspektrale Messungen	528
16.9.7.1	Registrierende hyperspektrale Messtechnik	528
16.9.7.2	Hyperspektrale Flächenmessungen	530
17	Polarisationsoptik	537
	<i>Alexander Hornberg</i>	
17.1	Polarisationszustände	539
17.1.1	Polarisationsellipse	539
17.1.2	Klassifizierung der Polarisationszustände	543
17.1.2.1	Zirkulare Polarisation	543
17.1.2.2	Lineare Polarisation	543
17.1.2.3	Elliptische Polarisation	543
17.1.3	Jones-Vektoren	543
17.1.3.1	Zirkular polarisierte Welle	544
17.1.3.2	Linear polarisierte Welle	544
17.1.3.3	Elliptisch polarisierte Welle	544
17.1.4	Poincaré-Kugel	545
17.1.5	Partiell polarisiertes Licht	547
17.2	Polarisationsoptische Bauteile	549
17.2.1	Polarisatoren	549
17.2.2	Eigenzustände eines Polarisators	551
17.2.3	Spektraleigenschaften der Intensitätsmatrix	552
17.2.3.1	Abschätzungen der Intensität	553
17.2.3.2	Polarzerlegung der Jones-Matrix	555
17.2.4	Drehung von Polarisatoren	556
17.2.5	Normale Polarisatoren	557
17.2.5.1	Pauli-Algebra für Jones-Matrizen	558
17.2.5.2	Stokes-Parameter des Ausgangszustands	558
17.2.6	Polarisatoren	560
17.2.6.1	Idealer Polarisator	560
17.2.6.2	Realer Polarisator	561
17.2.7	Verzögerer	562
17.2.7.1	Zirkularer Verzögerer	562

17.2.7.2	Linearer Verzögerer	563
17.3	Physik der Polarisatoren	565
17.3.1	Polarisationseigenschaften von Flächen	565
17.3.1.1	Jones-Matrix der Fläche	565
17.3.1.2	Reflexions- und Transmissionsgrad	567
17.3.1.3	Verhalten am optisch dichteren Medium	567
17.3.1.4	Verhalten am optisch dünneren Medium	568
17.3.2	Kristalloptiken	570
17.3.2.1	Materialgesetze optisch anisotroper Werkstoffe	570
17.3.2.2	Phasenverzögerungsplatten	572
17.3.2.3	Wellengleichung	573
17.3.2.4	Dispersionsrelation	574
17.3.2.5	Geometrische Interpretation	575
17.3.2.6	Uniaxiale Kristalle	576
17.3.2.7	Reflexion und Brechung an einer Ebene	577
17.3.2.8	Polarisationsprismen	580
17.3.3	Dünnschichtpolarisatoren	582
17.3.4	Gitterpolarisatoren	582
17.3.5	Nanopartikel-Polarisatoren	584
17.3.6	Folienpolarisatoren	585
17.3.7	Optische Aktivität von Kristallen und Flüssigkeiten	586
17.3.8	Faradayrotator als Phasenmodulator	587
18	Lichtwellenleiter: Faseroptik, Integrierte Optik, Sensorik	593
	<i>Markus Michler</i>	
18.1	Grundbegriffe der Wellenleiteroptik	595
18.1.1	Das Prinzip der Lichtführung	595
18.1.2	Die numerische Apertur	595
18.1.3	Geführte Wellenleitermoden	596
18.1.4	Dämpfung und Dispersion	599
18.1.4.1	Die Dämpfungskonstante	599
18.1.4.2	Absorption und Streuung in Quarzglas	599
18.1.4.3	Extrinsische Effekte	600
18.1.4.4	Werkstoffe für Polymerfasern	600
18.1.4.5	Dispersion	601
18.2	Lichtführung in optischen Fasern	602
18.2.1	Stufen- und Gradientenindexfasern	602
18.2.2	Moden in Glasfasern	604
18.3	Fasertypen	606
18.3.1	Multimodefasern	606
18.3.2	Singlemodefasern	607
18.3.3	Polarisationserhaltende Fasern	610
18.3.4	Double-Clad-Fasern	611
18.3.5	Multicore-Fasern	611
18.4	Faserbündel	612
18.4.1	Verlustmechanismen in Faserbündeln	612
18.4.2	Abstrahlcharakteristik von Faserbündeln	613

18.4.3	Ungeordnete Faserbündel	613
18.4.4	Geordnete Faserbündel/Faseroptische Bildleiter	614
18.5	Integriert-optische Wellenleiter	616
18.5.1	Technologien der integrierten Optik	617
18.5.2	Passive integriert-optische Komponenten	618
18.5.3	Aktive integriert-optische Komponenten	621
18.6	Lichtwellenleitersensoren	622
18.6.1	Grundprinzip faseroptischer Sensoren	623
18.6.2	Intensitätsänderung als Sensorprinzip	624
18.6.3	Phasenänderung als Sensorprinzip	625
18.6.4	Polarisationsänderung als Sensorprinzip	626
18.6.5	Wellenlängenverschiebung als Sensorprinzip	627
19	Kameratechnik und digitale Bildverarbeitung	631
	<i>Jürgen Bretschneider, Henning Haider, Markus Keinath</i>	
19.1	Analoge und digitale Standards der Kamerainterfaces	633
19.1.1	Analoge Schnittstellen	633
19.1.2	Digitale parallele Schnittstelle RS-422 und LVDS	634
19.1.3	Camera Link	635
19.1.4	Camera Link HS	636
19.1.5	CoaXPress	636
19.1.6	FireWire (IEEE 1394)	637
19.1.7	Gigabit Ethernet	640
19.1.8	USB 2.0	642
19.1.9	USB 3.0	642
19.1.10	Tabellarischer Vergleich der Schnittstellen	643
19.2	Aufbau einer digitalen Kamera, Kamerafunktionen	645
19.2.1	Vergleichende Betrachtungen: Consumerkameras versus Industriekamera	645
19.2.2	Frontend mit Mount	646
19.2.3	Blockdiagramm einer IEEE 1394b-Farbkamera	648
19.2.4	Erklärung des Datenpfades und der Funktionen	649
19.2.5	Sondermodelle digitaler Kameras	655
19.3	Kamerarauschen und EMVA 1288-Standard	656
19.3.1	Rauschquellen	656
19.3.1.1	Photonen-Schrotrauschen (Photon Shot Noise)	656
19.3.1.2	Dunkelstrom-Schrotrauschen (Dark Current Shot Noise)	656
19.3.1.3	Dark Current Nonuniformity (DSNU)	656
19.3.1.4	Photo Response Nonuniformity (PRNU)	657
19.3.1.5	Fixed-Pattern Noise (FPN)	657
19.3.1.6	Reset Noise	657
19.3.1.7	1/f-Noise (Amplifier Noise)	657
19.3.1.8	Quantization Noise	657
19.3.1.9	Noise Floor (Grundrauschen)	657
19.3.2	Dynamic Range (DNR, Kontrastumfang)	657
19.3.3	Signal to Noise Ratio (SNR, Signal-Rauschabstand)	658
19.3.4	EMVA 1288-Standard	658

19.4	Ansteuerung über den PC und Software Interfaces	663
19.4.1	Steuerung der Bildaufnahme	663
19.4.2	Pixeldaten	665
19.4.3	Driver Software (Software Development Kit)	665
19.4.4	Kamera API (AVT FirePackage)	666
19.4.5	GenICam-Standard	667
19.4.6	Bildverarbeitungsbibliotheken (Third-Party Software)	668
19.5	Auswahl einer geeigneten Kamera und Einsatzfälle	668
19.5.1	Komponenten eines Bildverarbeitungssystems	668
19.5.2	Auswahlkriterien für eine Kamera	669
19.5.3	Sichtfeld (FOV) und Auflösung	670
19.5.4	Bilddatenrate, Bildwiederholrate und Bandbreite der Schnittstelle	671
19.5.5	Aufgabenstellungen in der industriellen Bildverarbeitung	672
20	Bildgebende Verfahren	677
	<i>Martin Gerken, Harry Schlemmer</i>	
20.1	Video-Kamerasysteme	679
20.1.1	Prinzipieller Aufbau	679
20.1.2	Übersicht der Spektralbereiche	679
20.1.3	Eigenschaften der Strahlquelle	679
20.1.4	Einfluss der Atmosphäre	681
20.1.5	Optische Gläser	682
	20.1.5.1 Transmissionseigenschaften	682
	20.1.5.2 Dispersionsverhalten	683
	20.1.5.3 Antireflexbeschichtung	683
20.1.6	Bildsensoren	684
	20.1.6.1 Sensoren für den visuellen Spektralbereich	684
	20.1.6.2 Sensoren mit interner Verstärkung	685
	20.1.6.3 Sensoren für den NIR- und SWIR-Bereich	685
20.1.7	Anwendungen	686
	20.1.7.1 Überwachung im Nahfeld	686
	20.1.7.2 Zoomsysteme für weiträumige Überwachung	686
	20.1.7.3 Multispektrale Systeme	687
	20.1.7.4 Ausblick und Trends	688
20.2	Wärmebilderzeugung	689
20.2.1	Einführung	689
20.2.2	Bildgebungsprozess	690
20.2.3	Eigenschaften der Wärmestrahlung	691
20.2.4	Atmosphärische Transmission	692
20.2.5	Infrarotoptik	692
	20.2.5.1 Optische Materialien für das Infrarot	693
	20.2.5.2 Thermische Änderungen der Brechkraft	694
	20.2.5.3 Asphärische und diffraktive Oberflächen	694
20.2.6	Gekühlte und ungekühlte Infrarotdetektoren	695
	20.2.6.1 Gekühlte Infrarotdetektoren	695
	20.2.6.2 Ungekühlte Infrarotdetektoren	698
	20.2.6.3 Vergleich von gekühlten und ungekühlten Detektoren	698
20.2.7	Spezielle Probleme der Wärmebildgeräte	699
	20.2.7.1 Dunkelkammerproblem	699

20.2.7.2	Detektorinhomogenität	699
20.2.7.3	Narziss-Effekt	701
20.2.8	Bewertung von Wärmebildgeräten	701
20.2.9	Typische Anwendungen der Wärmebildgeräte	702
20.2.9.1	Aufklärung und Überwachung	702
20.2.9.2	Thermografie	703
21	Holografie	707
	<i>Andreas Ettemeyer</i>	
21.1	Grundlagen der Holografie	709
21.1.1	Einführung	709
21.1.2	Hologrammaufnahme	709
21.1.3	Hologrammrekonstruktion	710
21.2	Klassische Holografie	711
21.2.1	Off-Axis-Hologramm	711
21.2.2	Reflexions-Hologramm	712
21.2.3	Bildebenen-Hologramm	713
21.2.4	Regenbogen-Hologramm	713
21.2.5	Holografische Interferometrie	715
21.3	Digitale Holografie	716
21.3.1	Aufbau eines digitalen Holografie-Mikroskops	716
21.3.2	Numerische Hologrammrekonstruktion	717
21.3.3	Objektrekonstruktion	717
21.3.4	Mehrwellenlängen-Holografie	719
21.3.5	Anwendungen	720
21.3.5.1	Reflexionsmessung	720
21.3.5.2	Transmissionsmessungen	721
21.4	Speckle-Interferometrie	721
21.4.1	Empfindlichkeitsvektor	722
21.4.2	Oberflächenmessung mit Speckle-Interferometrie	723
21.4.3	Verformungsmessung mit Speckle-Interferometrie	723
21.4.4	Bestimmung der in-plane-Verformung	725
22	Gradientenoptik	729
	<i>Bernhard Messerschmidt</i>	
22.1	Grundlagen der Gradientenoptik	731
22.2	Herstellungsverfahren	733
22.3	GRIN-Linsen in Applikationen	734

23 Lasermesstechnik	743
<i>Martin Löffler-Mang</i>	
23.1 Laser-Doppler-Velocimetrie	745
23.1.1 Interferenzstreifenmodell	745
23.1.2 Doppler-Modell	746
23.1.3 Frequenzshift und mehrere Geschwindigkeitskomponenten	748
23.1.4 Anwendungsbeispiele	749
23.2 Phasen-Doppler-Partikelanalyse	751
23.2.1 Qualitatives Modell	751
23.2.2 Quantitatives Modell	752
23.2.3 Systemaufbau	754
23.2.4 Messvolumenkorrektur	754
23.2.5 Anwendungsbeispiele	756
23.2.6 Stromdichte und Konzentration	757
Stichwortverzeichnis	761

11.1 Grundlagen des Mikroskops

Das Mikroskop ist die konsequente Weiterentwicklung der Lupe (Kap. 10.1), um kleine Details höher vergrößert abzubilden. Dafür wird die Brennweite der Lupe stark reduziert. Kleinere Objektstrukturen erfordern größere numerische Apertur, um im Bild dargestellt zu werden. Die Fokussierung wird empfindlicher und erfordert feinfühligere Bewegung. Auch die Augenposition so dicht am Objekt ist unangenehm.

Es gelingt kaum die Austrittspupille des Objektivs soweit außerhalb nach der letzten Linse anzuordnen, dass sie für das Auge direkt zugänglich ist. Deshalb wird für visuelle Mikroskope eine zusätzliche Abbildungsstufe eingeführt; es entsteht das *Mikroskop*.

Nach Abbildung der Objektiv-Pupille kann das Auge nun ein ausgedehntes Objektfeld entspannt überblicken (Abb. 11.2). Das Zwischenbild ist ein umgekehrtes und seitenverkehrtes Abbild des Objektes, im Gegensatz zur Lupe, deren virtuelles Bild die Orientierung des Objektes beibehält. Durch Prismen-Anordnungen oder Zwischenabbil-

dung entstehen je nach Mikroskop-Ausführung verschiedenen abgewandelte Bildorientierungen.

Liefert das Objektiv bis zum Zwischenbild einen Abbildungsmaßstab β'_{Obj} und das Okular eine Lupenvergrößerung Γ'_{Ok} , so ergibt sich für die *Mikroskop-Vergrößerung* Γ'_M :

$$\Gamma'_M = \Gamma'_{\text{Ok}} \cdot \beta'_{\text{Obj}} \quad (11.1)$$

Für die Abbildung der kleinsten Objekt-Strukturen ist es notwendig, dass mindestens die erste Beugungsordnung aus der *Beugung* (Abb. 11.3) an den Objektstrukturen innerhalb der Apertur-Begrenzung übertragen wird

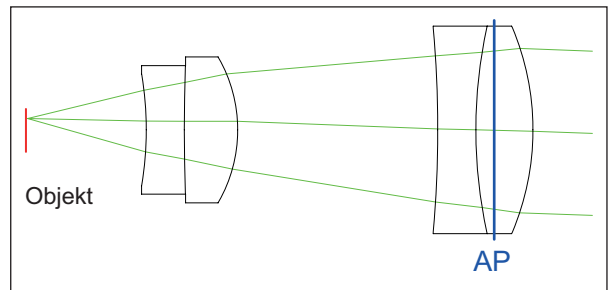


Abb. 11.1 Mikroskop-Objektiv als Lupe: Die optimale Augenposition wäre in der Austrittspupille AP.

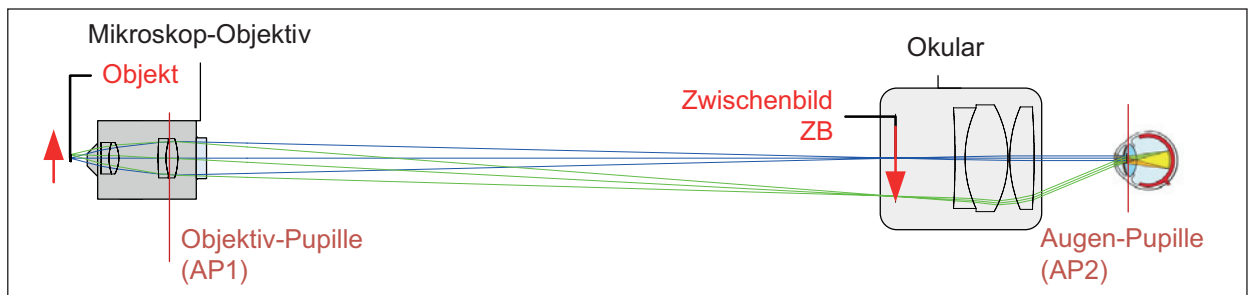


Abb. 11.2 Strahlengang vom Objekt mit Objektiv, Zwischenbild ZB, Okular bis zum Auge in der Position der Austrittspupille nach dem Okular AP2

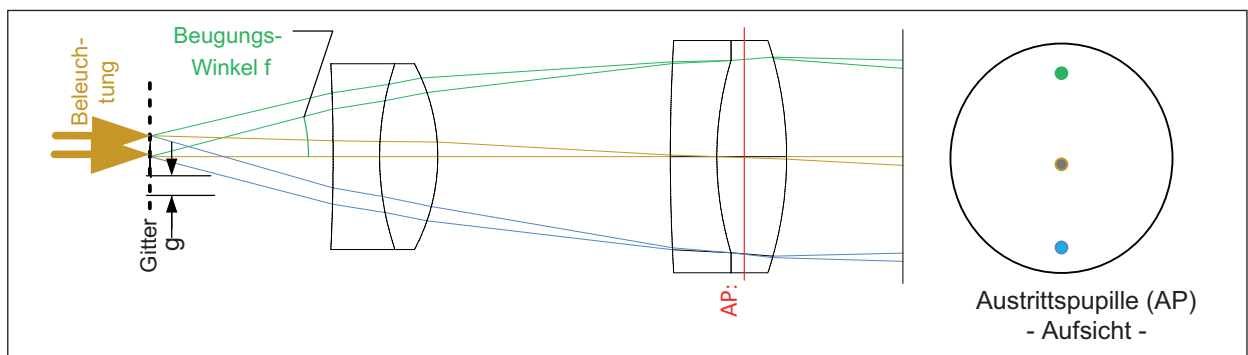


Abb. 11.3 Achszentral beleuchtetes Gitter als Objekt des Mikroskop-Objektivs mit einem Gitterabstand $g = \lambda / (n \cdot \sin(\phi)) > \lambda / \text{NA}$; erzeugt durch Beugung in der Objektiv-Pupille einen Fokus (auch erste Beugungsordnung bei Wellenlänge λ genannt): Der rechte Kreis stellt die Austrittspupille dar, mit einem Fokus des ungebeugten Lichtes im Zentrum. Wenn der Beugungswinkel ϕ kleiner als der Öffnungswinkel α ist, liegen die beiden ersten Beugungsordnungen des Gitters innerhalb der Objektivpupille.

(Abbe 1989). Als Maß für die Öffnung der Objektive am Mikroskop wird die *numerische Apertur NA* verwendet:

$$NA = n \cdot \sin(\alpha); \tag{11.2}$$

α – halber Öffnungswinkel,
 n – Objektraumbrechzahl

Die NA eines Mikroskop-Objektives stellt das grundlegende Leistungsmerkmal für die Erkennbarkeit von Objektdetails dar.

Damit in Abbildung 11.3 nicht nur die Gitterperiode übertragen wird, sondern auch eine Objekt-Ähnlichkeit entsteht (Form der Gitterkanten), kann die Beleuchtung mit einer angemessenen Beleuchtungs-Apertur nA_{Bel} erfolgen (Abb. 11.9). Als gute Abschätzung der *Mikroskop-Auflösung* für die bei Hellfeld-Beleuchtung unterscheidbaren Strukturgrößen Δy gilt das Rayleigh-Kriterium zur Auflösung zweier Objektpunkte (Gross 2008) mit 15% Kontrast:

$$\Delta y = \frac{1,22 \cdot \lambda}{nA_{\text{Bel}} + nA_{\text{Obj}}} \tag{11.3}$$

mit $nA_{\text{Bel}} < nA_{\text{Obj}}$

Für andere Kontrastwerte, Objektstrukturen, Beleuchtungsarten oder Mikroskop-Verfahren ändern sich oft nur die Vorfaktoren (statt 1,22) in Formel (11.3). Aus der Kontrast-Definition

$$K = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \tag{11.4}$$

ergibt sich für einen Intensitätsunterschied I_{min} zu I_{max} von 26,5% der Bild-Kontrast $K = 15,3\%$ (Abb. 11.4).

Die „förderliche“ *Mikroskop-Vergrößerung* soll die gerade noch auflösbaren Details soweit vergrößern, dass sie mit dem Auge oder einem anderen Empfänger gut dargestellt werden können. Sie hängt somit direkt von der NA des Objektives ab.

Wir wollen die förderliche Mikroskop-Vergrößerung Γ'_M mit Okular-Beobachtung unter der Annahme einer typischen Augenauflösung $\delta_\Delta = 0,58 \text{ mrad}$ ($\approx 2'$ Winkel-Minuten) ermitteln. Dabei sei Δy die objektseitige Auflösungsgrenze, NA die numerische Apertur des Objektives und $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ als mittlere sichtbare Wellenlänge angenommen, sowie auf Analogien zu Formel (11.10) bis Formel (11.12) verwiesen:

$$\delta_\Delta = \frac{\Delta y \cdot \Gamma'_M}{250 \text{ mm}} \tag{11.5}$$

und

$$\Delta y = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA} \tag{11.6}$$

$$\Gamma'_M = \frac{\delta_\Delta \cdot 250 \cdot 1000 \mu\text{m}}{0,61 \cdot \lambda} \cdot NA = 432 \cdot NA \tag{11.7}$$

Für $1' \dots 2'$ Winkel-Minuten Augenauflösung hat sich daraus die Orientierung für die förderliche Vergrößerung am visuellen Mikroskop ergeben:

$$\Gamma'_M < 500 \cdot NA \dots 1000 \cdot NA$$

Ist die Vergrößerung deutlich höher als die Möglichkeiten des Empfängers (z. B. des Auges), so sind die auflösbaren Strukturen zu groß, so dass sie wie bei übermäßiger Nachvergrößerung fotografischer Bilder in den Details ver-

11

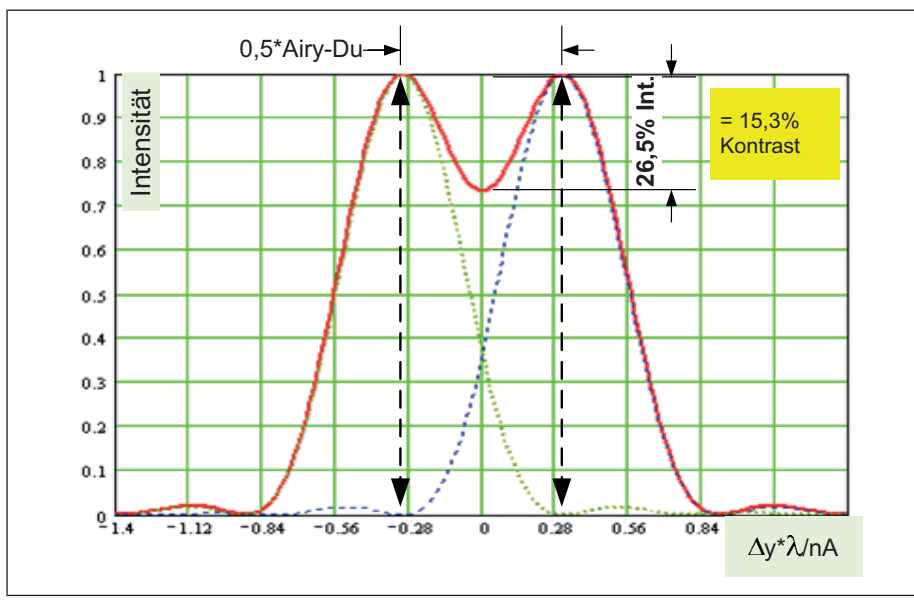


Abb. 11.4
 Rayleigh-Kriterium für Punktauflösung mit 15,3% Bild-Kontrast: zwei leuchtende Punkte im Abstand von $0,61 \cdot \lambda / NA$, was dem halben Airy-Durchmesser entspricht

schwommen, also nicht mehr aufgelöst erscheinen. Zur Veranschaulichung soll die Tatsache dienen, dass bei einer Mikroskop-Vergrößerung $500 \cdot NA$ und Verwendung eines Okulares $10\times$ der beleuchtete Durchmesser in der Augenpupille nur noch 1 mm beträgt.

Angepasste Vergrößerungen am Mikroskop für fotografische Bilder (z.B. bezogen auf die Körnigkeit des Filmes), wie für digitale Empfänger, sind ebenso bezogen auf deren Auflösungsvermögen notwendig. Für klassische Mikroskope mit Okular-Abbildung erfolgt diese Anpassung ge-

gebenfalls durch Foto- und Kamera-Adapter mit Vergrößerungen von $0,5 \dots 2\times$ bezogen auf das Okularzwischenbild ZB.

Für eine Auflichtbeleuchtung oder das Einbringen von weiteren Bauelementen nach dem Mikroskop-Objektiv sollen nahezu keine störenden Bildfehler erzeugt werden. Deshalb entsteht das Zwischenbild nach dem Objektiv virtuell im Unendlichen und wird erst durch eine Tubuslinse in ein reales Zwischenbild ZB geformt.

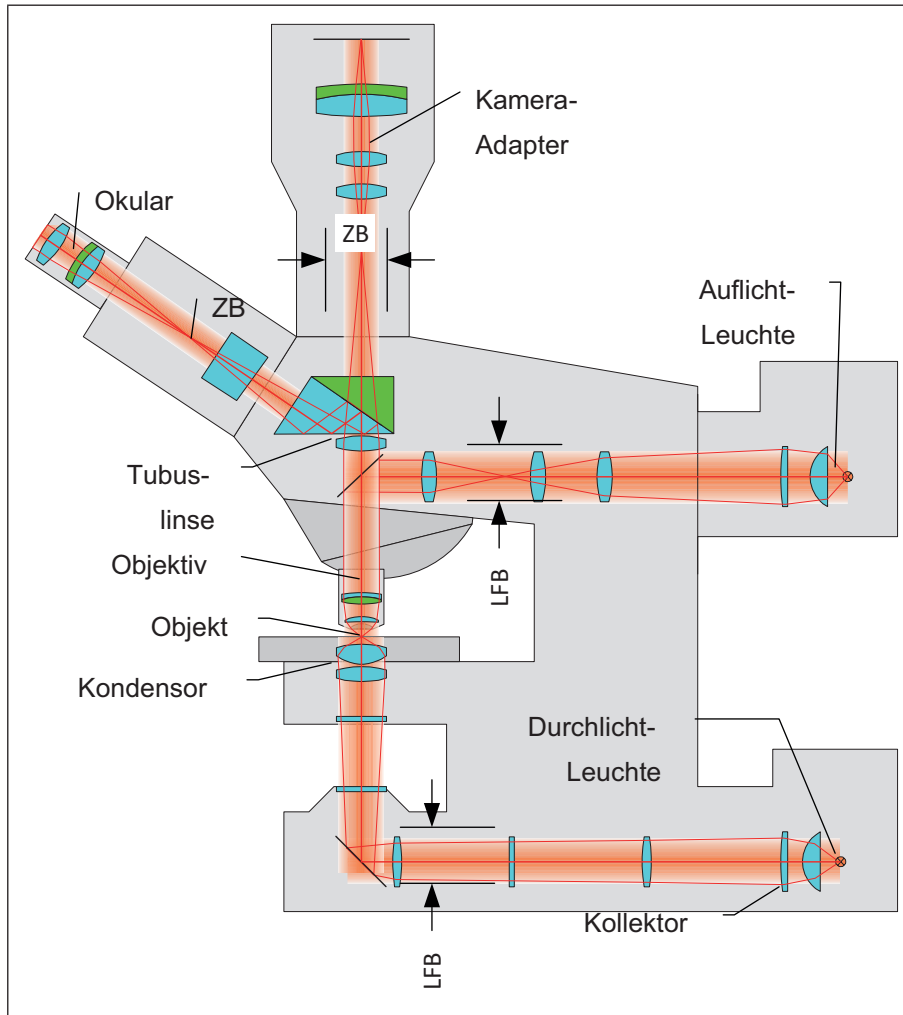


Abb. 11.5 Strahlengänge in einem Mikroskop; konjugierte Ebenen zum Objekt sind: LFB - Leuchtblende (in Beleuchtung), ZB - Zwischenbild (in Abbildung)

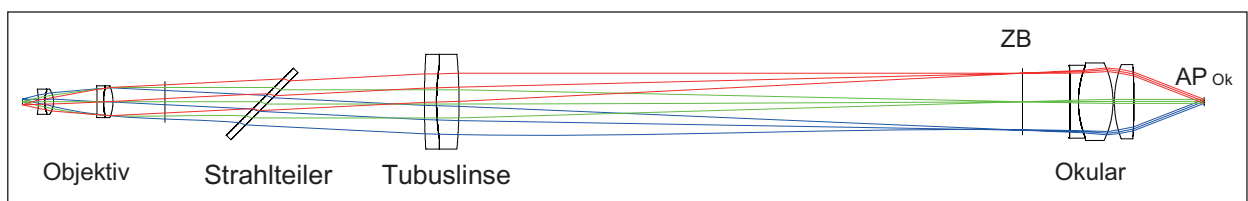


Abb. 11.6 Objektiv $10\times/0,25$ oo/- ($f'_{\text{obj}} = 18\text{ mm}$) ergibt Mikroskop-Vergrößerung $\Gamma'M = 100\times$ mit Tubuslinse $f'_{\text{Tul}} = 180\text{ mm}$ und Okular $10\times$ ($f'_{\text{ok}} = 25\text{ mm}$)

Dann ergibt sich der Abbildungsmaßstab β'_{Obj} im Zwischenbild aus dem Verhältnis der Brennweiten von Tubuslinse und Objektiv:

$$\beta'_{Obj} = f'_{Tul} / f'_{Obj} \quad (11.8)$$

Für die Mikroskop-Vergrößerung folgt dann (ISO 8039):

$$\Gamma'_M = \frac{250 \cdot f'_{Tul}}{f'_{Ok} \cdot f'_{Obj}} \quad (11.9)$$

Das Modell der optischen Abbildung im Mikroskop geht auf Ernst Abbe zurück (Abbe, E. 1873) und kann in drei Abbildungsschritte geteilt werden (ISO 10934-1: Abbe theory)

- a) Das Objekt beugt das Licht einer Quelle (Abb. 11.3).
- b) Das Mikroskop-Objektiv sammelt einen Teil des gebeugten Lichtes und fokussiert es in seine hintere Brennebene (Abb. 11.3 Austrittspupille). Hier entsteht das primäre Beugungsbild des Objektes.
- c) Das gebeugte Licht wird im Mikroskop weitergeleitet und führt durch Interferenz der Lichtanteile zum primären Bild ZB (Abb. 11.2 und Abb. 11.6).

Eine ausführliche Betrachtung zu den Details der physikalischen Effekte in diesen Schritten ist für die Berechnung und Diskussion der erreichbaren Auflösung und Bildverbesserung notwendig (Singer et al. 2005, Beyer/Riesenberg 1988, Hoffmann 1980).

Wegen der hohen Anforderung an die Abbildungsgüte von Koma und Öffnungs-Fehler im mikroskopischen Bild hal-

ten die Mikroskop-Objektive die Sinus-Bedingung (Kap. 4.5) gut ein.

Damit folgt (vgl. Abb. 1.8):

$$n \cdot \sin(\alpha) = \frac{APD}{2 \cdot f'_{Obj}} \quad (11.10)$$

nicht nur für den Öffnungswinkel α , sondern auch für jede abgeblendete Öffnung.

Für den Zusammenhang zwischen der Objekthöhe y und dem Feldwinkel δ nach dem Objektiv gilt wegen der zu minimierenden tan-Verzeichnung aber eher Folgendes (Abb. 11.7):

$$\tan(\delta) = \frac{y}{f'_{Obj}} \quad (11.11)$$

Sehen wir uns den Abbildungsmaßstab β'_{Obj} von Objekt bis Zwischenbild ZB an.

Sei $NA' = n' \cdot \sin(\alpha')$ die numerische Apertur im Zwischenbild, so folgt mit der Sinusbedingung:

$$\beta'_{Obj} = \frac{y'}{y} = \frac{f'_{Tul}}{f'_{Obj}} = \frac{n \cdot \sin(\alpha)}{n' \cdot \sin(\alpha')} = \frac{NA}{NA'} \quad (11.12)$$

Für den Tiefenabbildungsmaßstab m_z gilt für kleine Öffnungswinkel α ein quadratischer Zusammenhang zum lateralen Abbildungsmaßstab β'_{Obj} (Kap. 4.2):

$$m_z = \frac{\Delta z'}{\Delta z} \approx \frac{n'}{n} \cdot \beta'^2_{Obj} \quad (11.13)$$

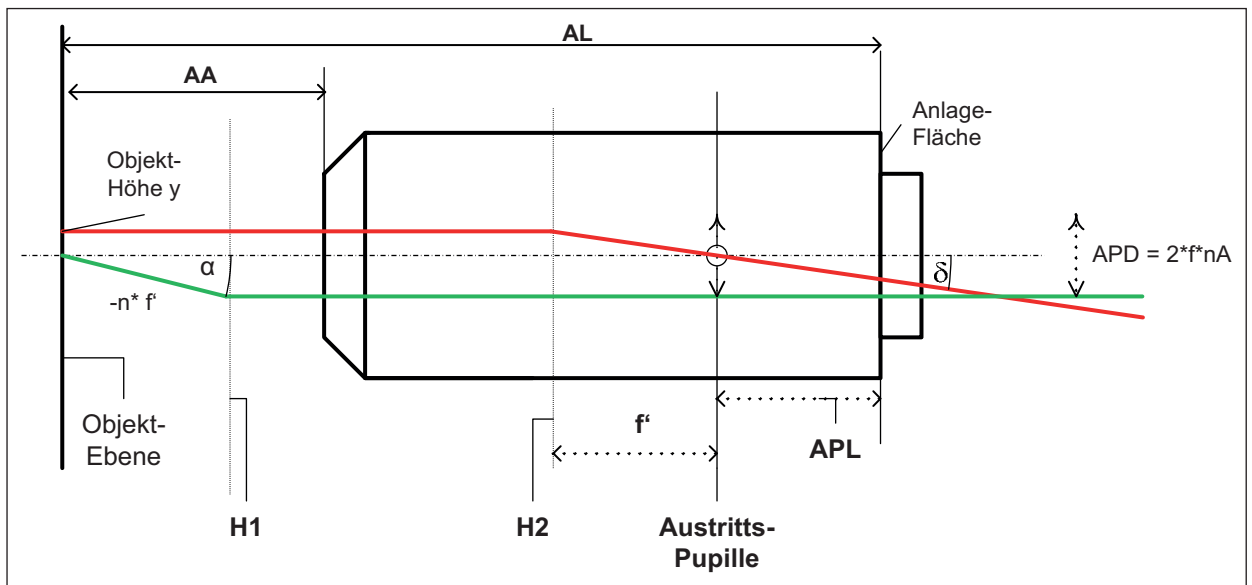


Abb. 11.7 Bezeichnungen und Zusammenhänge zwischen den Grundgrößen eines Mikro-Objektives mit unendlicher Bild-Lage: H1 objektseitige Hauptebene, H2 bildseitige Hauptebene, f' hintere Brennweite; n Brechzahl zwischen Objekt und Objektiv, APL Maß zur Lage der Austrittspupille, AL Abgleichlänge des Objektives (Objekt bis Anlage); AA Arbeitsabstand, APD Durchmesser der Austrittspupille, α halber Öffnungswinkel; δ halber bildseitiger Feldwinkel

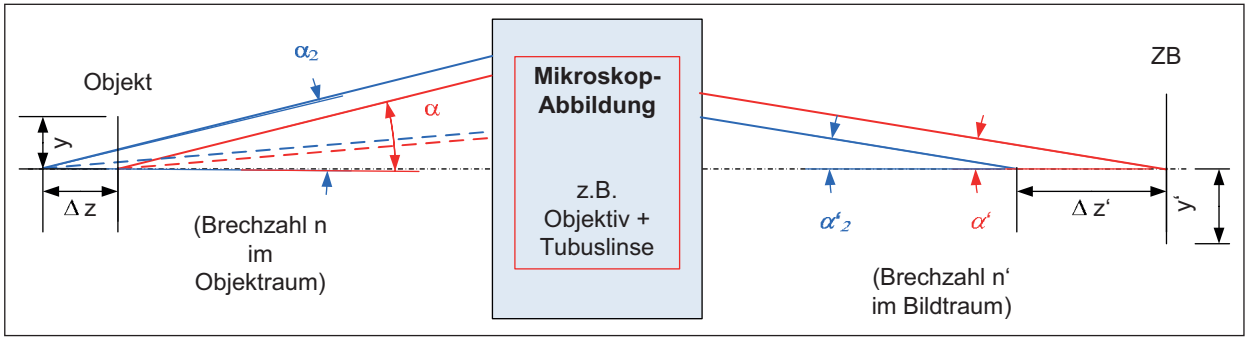


Abb. 11.8 Prinzip-Bild zur Erläuterung der Größen für die Herschel-Bedingung

Bei Einhaltung der Sinus-Bedingung für das Objektiv ergibt sich das Problem mit sphärischen Aberrationen (Abb. 11.8; im blauen Δz -defokussierten Fall). Für eine ausgeglichene aberrationsfreie Tiefenabbildung gilt

$$n \cdot \Delta z \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = n' \cdot \Delta z' \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha'}{2}\right) \quad (11.14)$$

weswegen die Herschel-Bedingung erfüllt werden muss, die im Widerspruch zu der Sinus-Bedingung steht. Außer für $\beta' = 1$ oder -1 entstehen keine exakten Lösungen für beide Bedingungen. In (Braat 1998) ist dargestellt, wie ein Optik-Entwurf mit einem Kompromiss zur Verletzung von Sinus- und Herschel-Bedingung angelegt werden kann.

11.2 Mikroskop-Beleuchtung und Beobachtungsverfahren

Wir unterscheiden am Mikroskop-Stativ zwischen Durchlichtbeleuchtung für lichtdurchlässige Proben (wie Objekte in Wasser oder dünne Schnitte) und Auflichtbeleuchtung für undurchsichtige Objekte. Während im ersten Fall ein Kondensator die Aufgabe der direkten Objekt-Beleuchtung übernimmt, erfolgt dies im zweiten Fall durch das Objektiv selber.

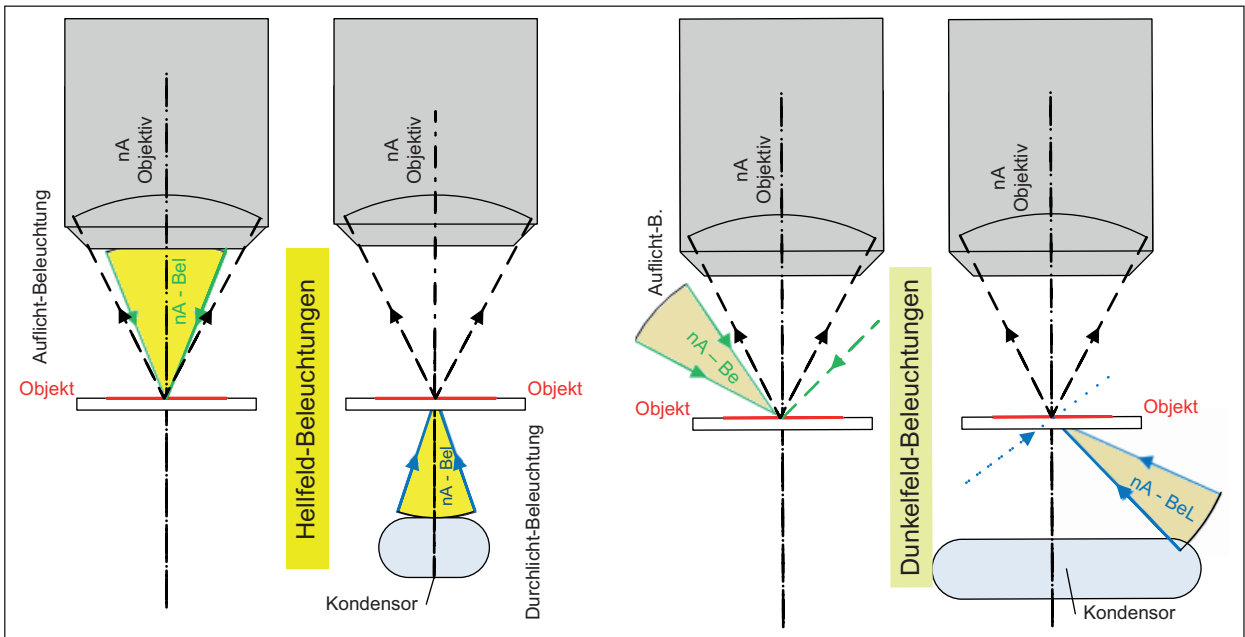


Abb. 11.9 Hellfeld- und Dunkelfeld-Beleuchtung des Objektes, jeweils im Durchlicht DL und Auflicht AL: Bei Dunkelfeld trifft das direkte Beleuchtungslicht nicht in die Beobachtungspertur.

11.2.1 Hellfeldbeleuchtung

Die Anforderungen an die Mikroskop-Beluchtungen ergeben sich aus den zu realisierenden Mikroskop-Verfahren. Einige noch gültige Grundsätze für die Hellfeld-Beleuchtung gehen dabei auf Köhler (1893) zurück (Haferkorn 1994):

- Das Objekt soll gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Dazu wird angestrebt, dass alle Objektpunkte die gleiche Beleuchtungsapertur erhalten.
- Die Größe des beleuchteten Feldes ist auf das abzubildende Objektdetail (Objektfeld) zu beschränken, um Streulicht zu minimieren. Dazu wird eine *Leuchtfeldblende*, möglichst einstellbar, im Beleuchtungsstrahlengang vorgesehen.

Die Beleuchtungsapertur soll an die Abbildungsapertur angepasst sein und kann zur Helligkeits- und Kontrast-Steuerung benutzt werden. Dazu wird eine *Apertur-Blende* vorgesehen. Aus Abbildungs-Simulationen, wie dem Experiment, lassen sich für das *Kohärenz-Parameter*¹ S genannte Verhältnis (Haferkorn 1994) im Bereich 0,7 ... 0,8

kontrastreiche Mikroskop-Bilder mit noch guter Detail-Betonung erwarten:

$$S = nA_{\text{Bel}}/nA_{\text{Obj}} \approx 0,7 \dots 0,8 \quad (11.15)$$

Da in der Auflichtbeleuchtung das Objektiv auch gleichzeitig der Kondensor ist, erfolgt bei einem Objektiv-Wechsel automatisch eine Brennweiten-Anpassung auch für den Beleuchtungsstrahlengang. Nur die Apertur-Blende der Auflichtbeleuchtung sollte angepasst werden, da die Objektive unterschiedliche bildseitige numerische Aperturen erzeugen.

Teilweise ist der Lichtleitwert der Mikroskop-Leuchten (Produkt aus abstrahlender Fläche und Raum-Abstrahlwinkel) ausreichend groß, um auch in der Durchlichtbeleuchtung ohne Kondensor-Wechsel sowohl die großen Objektfelder der schwach vergrößernden Objektive, als auch die hohen NA, der hoch vergrößernden Objektive auszuleuchten. Dann kann die Anpassung der Lichtröhre durch Beschnitt des Lichtleitwertes des Kollektors mittels Variation von Apertur- und Leuchtfeldblendendurchmesser erfolgen. Die Anpassung der Lichtröhre kann auch durch Kondensor-Wechsel, Ausklappen der Kondensor-Frontlinse oder einem „pankratischen Kondensor“ (Zoom-System) erfolgen. Dadurch kann der Lichtleitwert an der Leuchte kleiner gehalten werden.

¹ Es muss darauf hingewiesen werden, dass $S = 0$ den kohärenten Fall bezeichnet und $S = 1$ und größer als inkohärente Abbildung angesehen werden kann, also genau umgekehrt wie zum Kohärenzgrad.

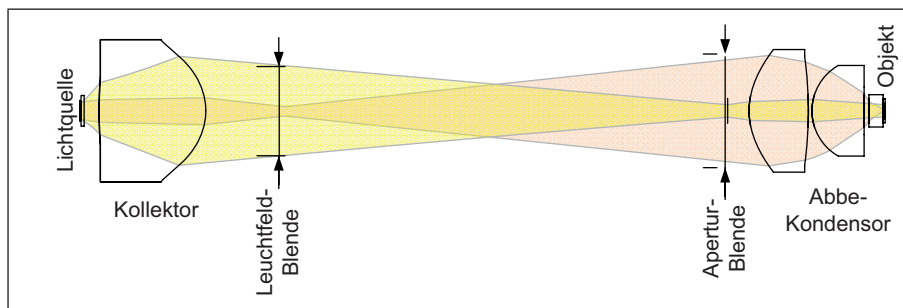


Abb. 11.10
Einfache Mikroskop-Durchlichtbeleuchtung nach Köhler mit Kollektor, Apertur- und Leuchtfeldblende und Abbe-Kondensor

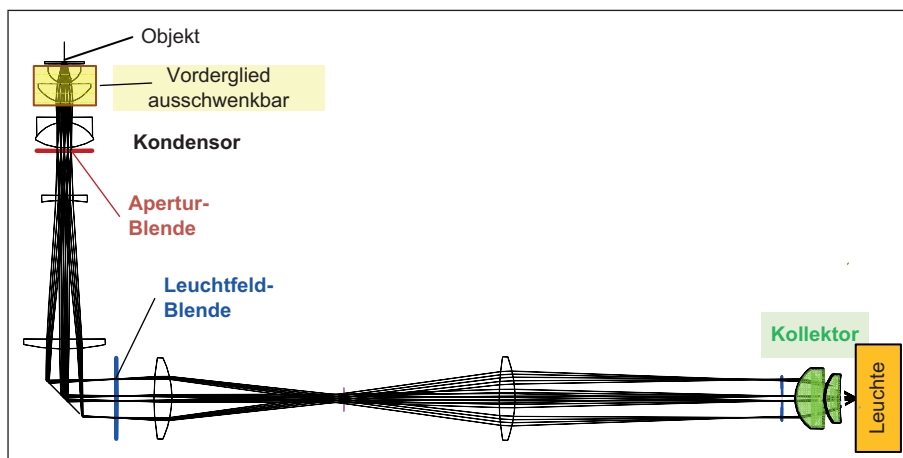
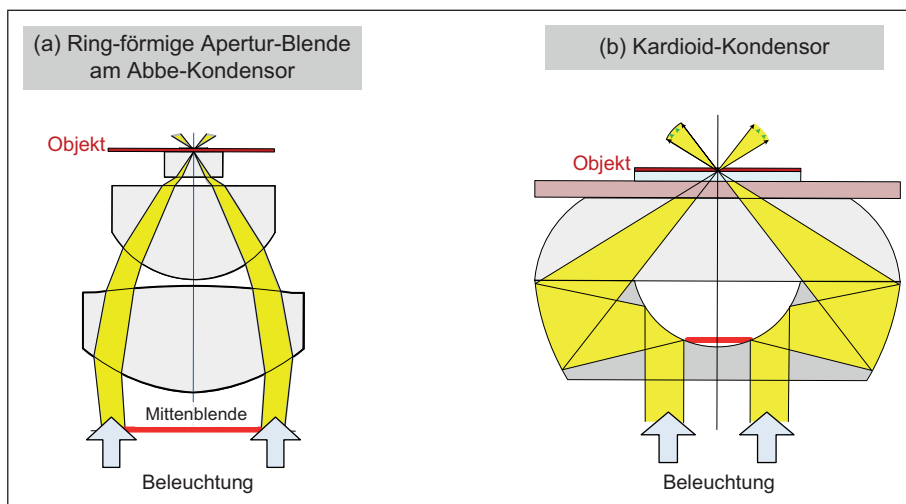


Abb. 11.11
Durchlicht-Beleuchtung mit Klapp-Kondensor und Zwischenabbildung, um die Leuchte außerhalb des Statives anzuordnen: Die ersten zwei Linsen des Kondensors werden zur Anpassung an größere Objektfelder ausgeklappt (im Bild markiert). Die Zwischenabbildung erfolgt, um die Leuchte außerhalb des Statives anzuordnen.

**Abb. 11.12**

Prinzip zur Erzeugung der Dunkelfeld-Beleuchtung: (a) mittels Ring-Blende im Kondensator und Apertur-Blende im Objektiv; (b) Kardiod-Kondensator, mit Umformung des Lichtringes an zwei sphärischen Spiegeln (namensgebend ist die näherungsweise kardioide Form am äußeren Spiegel)

11.2.2 Dunkelfeldbeleuchtung

Bei der Dunkelfeldbeleuchtung werden unstrukturierte Objektbereiche absolut dunkel abgebildet. Das Bild soll nur aus am Objekt gebeugtem oder gestreutem Licht gebildet werden. Dadurch sind ansonsten schlecht wahrnehmbare Details gut zu erkennen. Dieser Effekt ist sicher aus dem Alltag bekannt, wenn bei seitlichem Blick in einen Lichtkegel auch sonst nicht auflösbare Staubpartikel deutlich zu sehen sind.

Die Dunkelfeldbeleuchtung entsteht durch Abblenden der zentralen Beleuchtungsapertur, wenn die vorhandene Hellfeldapertur groß genug ist (Abb. 11.12 a) oder durch Methoden der Lichtführung (Abb. 11.12 b).

Extreme Sichtbarmachung kleiner Details gelingt mit einem großen Winkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und der Abbildungsrichtung. Insbesondere bei einseitiger Beleuchtung wird die Objektähnlichkeit dabei beeinträchtigt, da ja kein vollständiges Bild des Objektes entsteht. Das kann bei der einseitigen Dunkelfeldbeleuchtung eindrucksvoll nachgewiesen werden, bei der nur die Kanten von einer Seite ausgeleuchtet werden, die gegenüberliegenden aber im Schatten bleiben (Kap. 11.5, Ultra-Mikroskop).

LED-Lichtquellen können wegen ihrer Besonderheiten (Kap. 6.4) auch im Mikroskop sinnvoll eingesetzt werden. Die Vorteile kommen bei einigen Anwendungen besonders zur Wirkung:

- schnelles Ein-/Aus-Schalten, geringe Probenbelastung bei Fluoreszenzbeleuchtung,
- direkte Erzeugung ausgewählter Spektralbereiche,
- mit adaptiver Beleuchtung schnelle Rohdaten erzeugen und
- lange Lebensdauer.

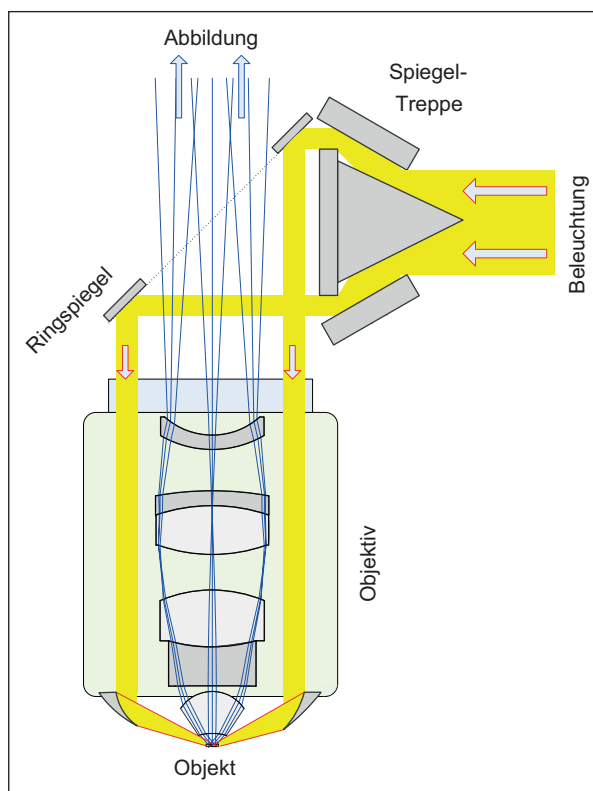


Abb. 11.13 Dunkelfeld-Beleuchtung für hochaperturiges Trocken-Objektiv, Erzeugung eines Lichtringes, mittels eines Ringspiegels: Die Fokussierung auf das Objekt ist kritisch und erfolgt mit einem Spiegel-Ausschnitt nahe der Paraboloid-Form. Für die optimale Auslegung reicht die Betrachtung des dargestellten Schnittes nicht aus.

Dabei sind folgende Schwierigkeiten zu beachten:

- Einstellung der Farbtemperatur,
- für die Applikation ausreichende Leuchtdichten.

11.3 Objektive und Okulare für Mikroskope

Die Bezeichnung von Mikroskop-Objektiven für Unendlich-Systeme, die eine Tubuslinse erfordern, soll an dem Beispiel *C-APO 40x/1,2 ∞/0,17 W* erläutert werden (Abb. 11.14).

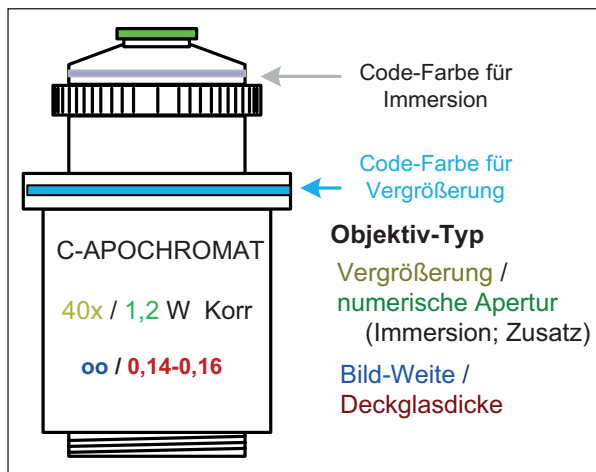


Abb. 11.14 Objektiv-Kennzeichnung nach (ISO 8578)

Vorangestellt ist eine herstellerabhängige Typ-Bezeichnung (mit Hinweis auf Farb-Korrektion (Achromat, Apochromat) und Ebnung (Plan)), hier bedeutet C: geeignet für konfokale Abbildung.

Nach Vergrößerung und numerischer Apertur erfolgt die Angabe des Immersions-Mediums zwischen Objekt und Objektiv (wenn nicht Luft; mit „W“ für Wasser), wie auch zusätzliche Angaben für Besonderheiten (Korr: Einstellung der Deckglas-Dicke) und Eignung für Kontrast-Verfahren.

Im Falle der endlichen Bildweite steht: 40/1,2 160/0,17 W

- für Abbildungsmaßstab 40; $nA = 1,2$ in Wasser;
- Tubuslänge 160 (ohne Tubuslinse verwendbar).

Die Vielfalt der Mikroskop-Objektive ergibt sich aus unterschiedlicher Abbildungsgüte, aus der Spezialisierung auf die verschiedenen Mikroskop-Verfahren und den unterschiedlichen Experiment-Umgebungen im Objektraum zwischen Objektiv und dem abzubildenden Objekt (Deckglas, Immersion, Eindring-Tiefe).

Die Objektivbezeichnungen (ISO 19012-2) beziehen sich auf den Spektralbereich des visuellen Lichtes mit dem Schwerpunkt von blau (ca. 480 nm) bis rot (640 nm). Die führenden Mikroskop-Hersteller bieten auch Objektive für einen erweiterten Spektral-Bereich von 400 – 950 nm mit guter Farb-Korrektur an, die insbesondere für einige Anwendungen der konfokalen Fluoreszenz-Mikroskopie

notwendig sind. Spezielle Applikationen erfordern auch Abbildungen im Bereich unter 400 nm oder im infraroten Spektralbereich, für die jeweils spezielle Objektiv-Ausführungen angeboten werden; so bei (Zeiss) zum Beispiel die C-Apochromate für die entsprechenden konfokalen Mikroskopie-Verfahren.

11.3.1 Mikroskop-Objektiv-Typen

Biologische Präparate werden unter einem Deckglas der Norm-Dicke 0,17 mm geschützt (Abb. 11.15). Das Deckglas muss optische Güte (Dicke, Glas-Homogenität, Brechzahl) haben, insbesondere wenn mit hoher NA gearbeitet wird (ISO 8255). Geringe Brechzahl- und Dicken-Abweichungen lassen sich durch einen am Objektiv einstellbaren Korrekturring (KORR) für die sphärische Aberration kompensieren.

Insbesondere die stärkeren Mikroskop-Vergrößerungen erfordern im Objektiv einen hohen Korrekturaufwand. Dabei sind die numerische Apertur (NA), der Arbeitsabstand (AA), die Güte der Ebnung großer Bildfelder und die Farbkorrektur treibend für den Aufwand, was die folgenden Objektivbeispiele veranschaulichen:

Achromatische Objektive sind häufig aus mindestens zwei verkitteten *Achromaten* (Kap. 4.5) aufgebaut. Bei *Plan-Objektiven* werden Bildfeldwölbung und Astigmatismus durch Menisken im Front und Hinterteil des Objektivs und/oder zusätzliche Negativ-Brennweiten im Mittelteil des Objektivs korrigiert. Um eine Verminderung des *sekundären Spektrums* (Kap. 4.5) bis hin zur apochromatischen Korrektur zu erreichen, werden (teure) Gläser mit anormalen Teil-Dispersionen verwendet und zwar in den Positiv-Linsen flussspatähnliche Gläser und in den Negativ-Linsen passende Kurzflint-Sondergläser.

Ausführliche Diskussion der Korrekionsweisen von Mikroskop-Objektiven bieten (Kap. 42.2 in Gross 2008), auch (Seward 2010). Ein Beispiel für Spiegel-Linsen-Objektive, wie es in Wafer-Inspektionsmikroskopen mit großem Zoom- und breitem Wellenlängenbereich verwendet werden kann, zeigt (Abb. 11.18).

Für die Auflicht-Hellfeld-Beobachtung kommt eine weitere Anforderung an die Mikroskop-Objektive hinzu. Da die Beleuchtung durch das Objektiv geleitet wird, kann das von den Linsen- und Fassungsflächen reflektierte Licht den Kontrast im Bild beeinträchtigen (Abb. 11.19).

Die Risiken für *Auflicht-Reflexe* im Mikroskop-Bild entstehen insbesondere an der Frontlinse durch die häufig verwendeten konzentrischen Flächen (ohne Brechkraft), aber auch andere schwach gekrümmte Linsenflächen. Werden Objekte mit schwachem Kontrast oder großem Streuwinkel bezüglich der Objektiv- NA abgebildet, ist die Wirkung der Auflicht-Reflexe besonders deutlich.

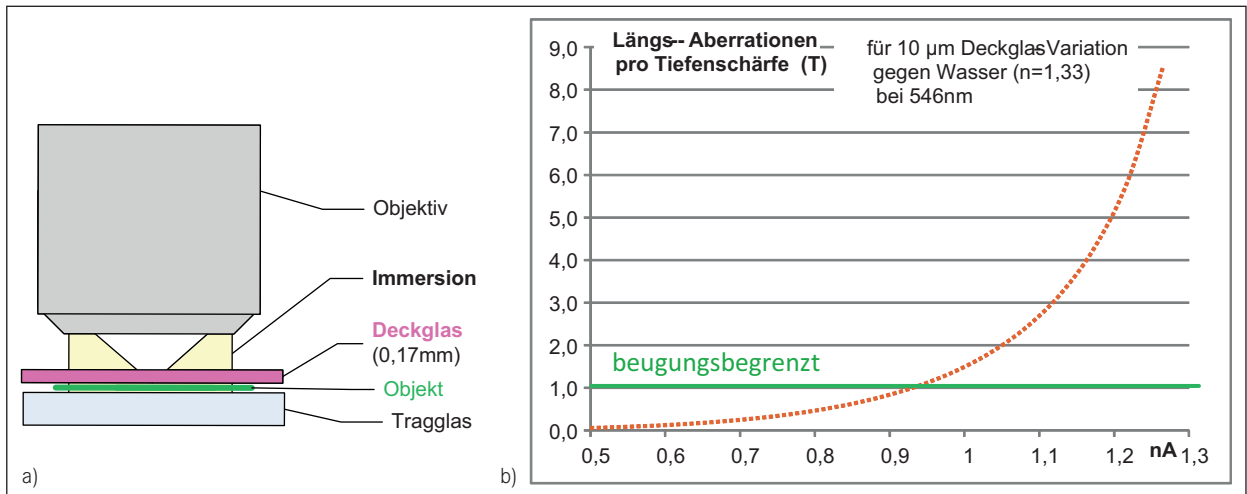


Abb. 11.15 (a) Objektiv mit Deckglas-Anordnung am aufrechten Mikroskop; (b) sphärische Aberration bei 10 µm Deckglasdickendifferenz für Objektive mit Wasser-Immersion und Deckglas-Korrektur (Soll 0,17mm); Abszisse: NA = 0,5 ... 1,3. Ab NA > 1 sollte das Objektiv mit „KORR“ zur Kompensation ausgerüstet sein, da die sphärischen Aberrationen sonst spürbar werden. (Trockenobjektive sollten diese Funktion schon für NA > 0,75 haben, wegen des größeren Brechzahl-Sprunges zwischen Deckglas und Luft.)

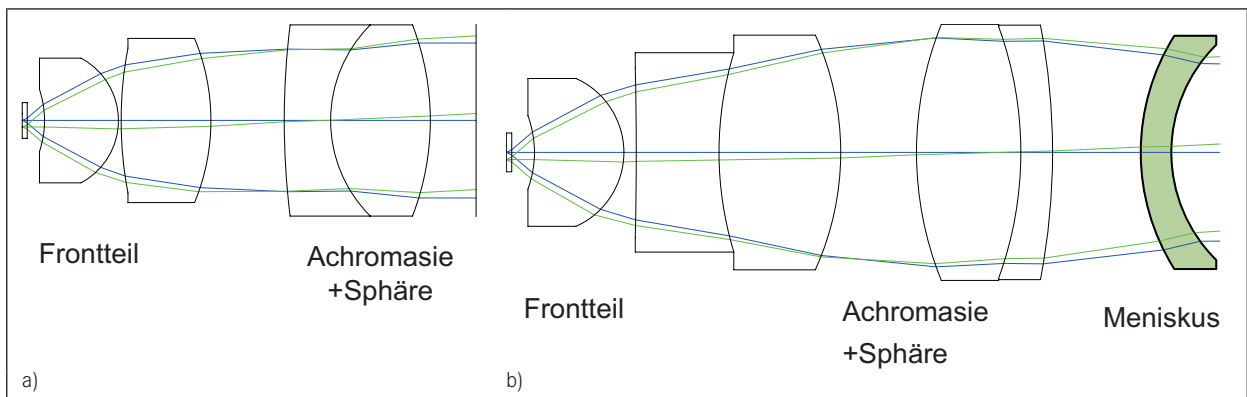


Abb. 11.16 (a) Achromat 40x/0,65, (b) Plan-Achromat 40x/0,65

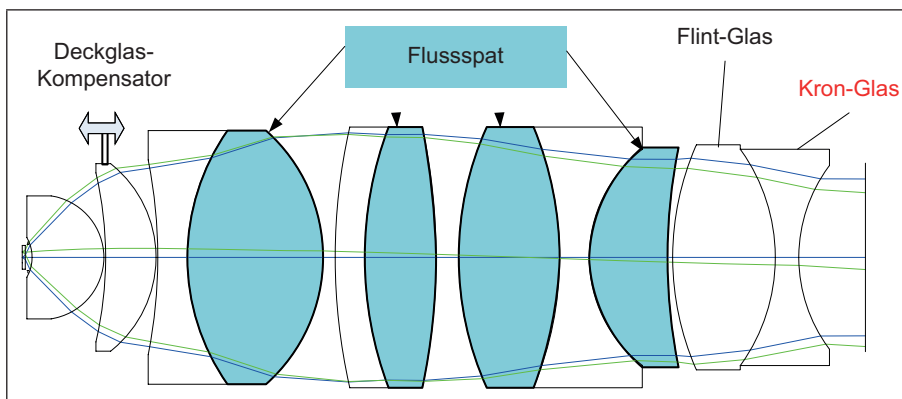
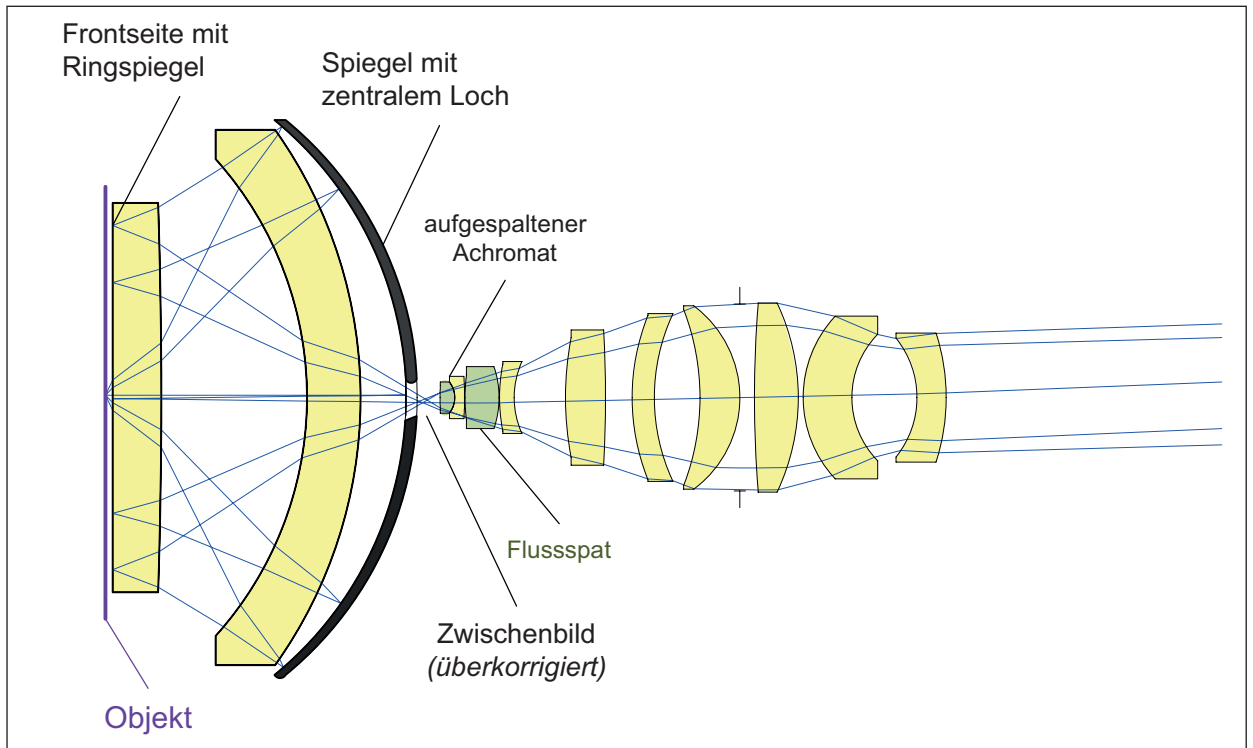


Abb. 11.17 Objektiv PlanAPOCHROMAT 40x/0,90 oo/0,17 für Tubulinse $f' = 180$ mm:
 - statt Flusspat auch ähnliche Sondergläser für die Apochromasie möglich,
 - die zweite Linse ist verschiebbar, um Deckglasdicken zu kompensieren (KORR),
 - Gläser im letzten Kittglied erlauben es, den Farbquerfehler zu korrigieren.



11

Abb. 11.18 Katadioptrisches Mikroskop-Objektiv (Spiegel-Linsen-System) aus (Lange / Shafer 2002): In dem vorderen Objektivteil mit dem Spiegel-Paar lassen sich die Aberrationen nicht nur gut korrigieren, sondern sogar etwas darüber hinaus, was im zweiten Objektivteil mit geringerer Eingangs-Apertur aufgebraucht werden kann. Es werden große Arbeitsabstände von mehr als 1 mm und Objektfelder von 1 mm bei NA 0,9 relativ breitbandig auch im UV-Wellenlängenbereich erreicht. Im dargestellten Beispiel sind nur die zwei markierten Linsen als „Kron-Glas“ aus Flussspat, alle anderen aus dem preiswerteren Quarzglas. Durch die Lage des Zwischenbildes in der Nähe des großen Spiegels kann die Mittenabschattung mit < 5% gering gehalten werden, sodass keine nennenswerte Wirkung auf die Abbildung erfolgt.

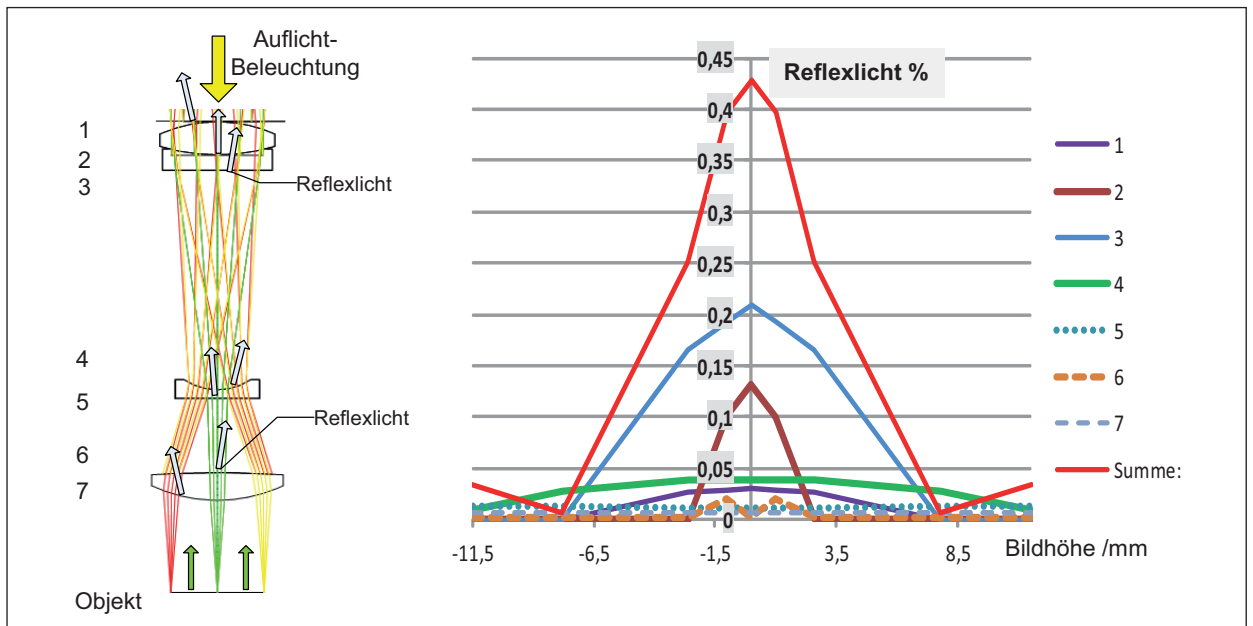


Abb. 11.19 Schnittbild eines schwachen Mikroskop-Objektivs und Tabelle mit Reflexlichtenergien der Einzelflächen, soweit sie den Empfänger erreichen und das Bild überlagern; angegeben relativ zur Abbildung bei 100% spiegelndem Objekt (besonders die Flächen 2 und 3 sind für den zentralen Reflex im Bild verantwortlich!)

Stichwortverzeichnis

Symbole

1-Chip-Farbsensoren 407
1/f-Noise (Amplifier Noise) 657
2-m-Blaskammer 318
3-CCD-Farbsensor 408
10b/8b coding 639
12-Bit-Format 665

A

Abbe-Diagramm 63
Abbe-Kondensator 362
Abbe-König-Prisma 171
Abbesche Sinusbedingung 126
Abbesche Zahl 58, 62, 482
Abbildungsfehler 123
Abbildungsgleichungen 115
Abbildungsmaßstab 112
Aberration 501
Ablenkprismen 175
Abschattungsverhältnis 14
Absorption 599
Absorptionsfilter 248, 251
Absorptionsgrad 35
Absorptionskante 64
Absorptionskoeffizient 35
Absorptionsverhalten 64
Abtragsarbeit 87
Abtragsrate 83, 85, 87
Abtragstiefe 87
Abtragungsprozess 66
Achromat 365
Active Pixel Sensor 400
ADC (Analogue Digital Converter) 649
Additive Farbmischung 39, 42
Airy-Scheibchen 13
Akkommodationsfähigkeit 209
Aktive Bauelemente 616, 621
ALD (Atomic Layer Deposition) 237
Allgemeine FWG-Index 47
Amici-Prisma 173
Amplitude 5
- reell 539
Analoge Schnittstelle 633
Anisotrope Kristalle 60
Anlaufgläser 253
Anti-Aliasing-Filter 646
Antireflexbeschichtungen (AR) 240

Antriebssystem 293
Aperturblende 13, 119, 362
Aplanomat 342
Application Programming Interface 666
Äquivalente Brechzahl 238
- Äquivalenzbrechungsindex 239
Äquivalente Rauschleistung 695
Arbeitsabstand (Working Distance) 671
Arbeitsprojektor 313
Area of Interest (AOI) 664
Argonionen-Laser 199
Aspektverhältnis 584
Asphären 157, 458
Asphärische Flächen 87
Astigmatismus 128, 334
Asynchrone Daten 639
Atmosphäre 681, 692
Auflagemaß 646f.
Auflicht-Reflexe 364
Auflösung 358, 381
Auflösung in Bewegungsrichtung 411
Auflösungsvermögen 210, 439
Aufnahmeformate 135
Aufrechtes Mikroskop 375
Auge 207
Ausbreitungskonstante 598
Ausgasverhalten 274
Auslaugungsprozess 66
Äußere Farbmischung 39
Axicon 160

B

Ballastquerschnitt 612
Bandabstand 392
Bandbreite 514, 671
- FWHM 514
Bandpassfilter 93, 247, 253, 256, 259
Bandsperrfilter 247
Bauernfeindprisma 170
BAYER Demosaicing 653
BAYER-Filter 407
Beleuchtungsstärke 34, 218, 303
Beleuchtungsstärkemessungen 48
Beleuchtungsstärkevektor 35
Beleuchtungstechnik 218, 303
Beleuchtungswirkungsgrad 38
Belichtung 35
Beschichtungsverfahren 236
Beständigkeit von Gläsern 66

Beugung 9, 357, 473
 - diffraction 514
 Beugung am Einzelspalt 473
 Beugungseffizienz 481, 485
 Beugungsgitter 475
 Beugungsscheibchen 13
 Bilddatenrate 671
 Bildebenen-Hologramm 713
 Bildfeld
 - Ausgang 502
 Bildfeldwölbung 129
 Bildleiter 612, 614
 Bildschirme 307
 Bildsensoren 684
 Bildspeicher 653
 Bildspiegelung 650
 Bildverarbeitungsbibliotheken 668
 Bildwandtypen 308
 Bildwiederholrate 405, 671
 Binäre Optik 479
 Binning 652
 Biologischer Rhythmus 214
 Bitanzahl pro Pixel 671
 Blankpressen 81
 Blasen 71
 Blaulichtschaden 226
 Blaulichtschädigung 28
 Blazetechnik 471, 477 ff.
 Blendenzahl 121
 Blockglasfertigung 75
 Blooming 398
 Boardlevel-Kamera 655
 Bolometer 51, 387
 Bördeln. *Siehe* Gratfassungen
 BOSS Mode 639
 Brachyt 337
 Brechen, manuelles 83
 Brechung 6
 Brechungsgesetz 6
 Brechungsmatrix 113
 Brechzahl 5, 62
 Brechzahlabweichung 71
 Brennpunkte 112, 117
 Brewster-Prismen 177
 Brillenoptik 333
 Brückesche Lupen 332
 Bulktrigger 664
 Bündel 5
 Bunttonwinkel 46

C

Camera Link HS 636
 CameraLink-Standard 635
 Candela 30
 CCD-Sensor 394
 CCD-Zeile 410
 CCIR 633
 CGH 482
 Chroma 46
 CIE-LAB-Farbsystem 46
 CIE-LUV-Farbsystem 46
 Circadianer Rhythmus 215
 CMOS-Sensor 399

CoaXPress 636
 Coddington 150
 Colorimetrie 50
 Compliance-Kurve 290
 Computergenerierte Hologramme (CGH) 482 f.
 Consumerkamera 645
 cos-Anpassung 47
 Cut-Off 605
 Cut-Off-Wellenlänge 606
 CVD-Beschichtung 95

D

Dachkant-Umkehrsysteme 339
 Dämmerungssehen 28
 Dämpfung 599 f.
 Dämpfungselement 292
 Dämpfungskonstante 599
 Dark Current Noise 656
 Dark Current Nonuniformity 656
 Dark Smear 399
 Datenübertragung 607
 Deckglas 364
 Defekte 62
 Defektpixelkorrektur 651
 Demodulation 449
 Detektivität D^* 696
 Detektor 493
 Diabatie 251 f.
 Diamantdrahtsägen 83
 Diamanthohlbohrverfahren 84
 Diamantwerkzeuge 90
 Dielektrika 235
 Dielektrische Dünnschichtwellenleiter 619
 Dielektrische Materialien 72
 Dielektrische Schichten 72
 Dielektrische Verschiebung 571
 Dielektrizitätstensor 570
 Differentialgewinde 296
 Differentieller Interferenz-Kontrast 370
 Diffraktive Optiken 471
 Diffraktive optische Elemente (DOE) 81, 477, 482
 Digitale Holografie 716
 Dispersion 6, 62, 601
 - reziprok 494
 Dispersionsprismen 175
 Dispersionsrelation 574
 DMA 667
 DOE 482
 Doppelbrechung 65, 570
 Doppelspektrometer
 - Doppelpass 503
 Doppler-Modell 746
 Dove-Prisma 171
 Drahtsägen 83
 Drehmatrix 540
 Drehung
 - aktiv 544
 - passiv 544
 Dreibereichsverfahren 50
 Druckfestigkeit 68
 Dunkelfeld-Beleuchtung 363
 Dünnschichten 235
 Dünnschicht-Fabry-Perot-Schmalbandfilter 260

Durchbiegung 287
 Durchlässigkeitsvermögen 63
 Durchlicht-Bildwand 310
 Durchlichtprojektion 314
 Duroplaste 58
 Dynamic Range (DNR) 657

E

Effizienz
 - Transmission 497
 EIA 633
 Eigenschaften
 - mechanische 67
 - physikalische und chemische 70
 Eindringtiefe 35
 Einfallsebene 7
 Einheitsraumwinkel 29
 Einsicht-AR 240
 Einschlüsse 71
 Einstimmung des Auges 210
 Eintrittspupille 121
 Elektronenstrahlverdampfung 94
 Elementarstrahler 33
 Elementarzellen 60
 Ellipsoid 158
 Elliptisch polarisiert 543
 ELSO-Montage 279
 Emissionsgrad 390
 Empfänger 185, 202
 - lichtelektrische 204
 Empfindlichkeit 660 f., 663
 Empfindlichkeitsschwelle 659
 EMVA 1288-Standard 658
 endlessly singlemode 609
 Endoskop 344, 736
 enhanced metal mirrors 243
 Entladungslampen 189, 192
 Erweichungs- bzw. Einfrierbereich 69
 Evaneszentes Feld 597
 Evaneszent Field Sensor 624
 Excimer-UV-Strahler 193
 Extern getriggerte Bildaufnahme 663
 Extrinsische Dämpfung 600

F

Fabry-Perot-Filter 259
 Fabry-Perot-Interferometer 454, 464
 Fadenzähler 332
 Falschfarbendarstellung 49
 Falschlicht 282
 Farbabstand 45, 47
 Farbadaptation 45
 Farbbearbeitungskette 44
 Farbbewertung 39
 Farbempfindungsmetrik 45
 Farbfehler 131
 Farbglasfilter 253
 Farbinterpolation 653
 Farbmanagement 44
 Farbmessung 50
 Farbmetrisches Grundgesetz 39
 Farbmischungen 44

Farbreiz 39
 Farbstofflaser 199
 Farbtoleranzschwellen 45
 Farbtongleiche Wellenlänge 41
 Farbtransformationen 44
 Farbumstimmung 45
 Farbunterschiede 45
 Farbvalenz 39
 Farbwertanteile 40
 Farbwiedergabe 193
 Farbwiedergabeindex 47
 Faser-Bragg-Sensor 627
 Faserbündel 612 f.
 - geordnete Bündel 614
 - ungeordnete Bündel 613
 Faser-Endoskop 615
 Faserherstellung 82
 Faser-Katheter 625
 Faserkreisel 626
 Faserlaser 83
 Fasermoden 604
 Faserrefraktometer 624
 Fasersensoren 623
 Fasertypen 606
 Fassen 267
 FBG (Fiber Bragg Grating) 627
 Federführung 294
 Feinstbearbeitungsverfahren 87
 Feldblende 121
 Feldstecher 339
 Fermat'sches Prinzip 8, 158
 Fernfeldnäherung 473
 Fernrohre 336
 Fertigungstechnologien für optische Bauelemente 96
 Festigkeit 67
 Festkörpergelenk 294
 Festkörperlaser 199
 Fiber Bragg Grating (FBG) 627
 Field Integration Mode 409
 Fill Factor 395
 Filterelemente 247
 Filterfarbmodell 42
 Filtertreiber 641
 FirePackage 666
 FireWire (IEEE 1394) 637
 Firewirezyklus 1394a 638
 Fixed-Pattern Noise (FPN) 657
 Fizeau-Interferometer 459
 Flächenprojektion 29
 Flankengetriggerte Bildaufnahme 663
 flat hat 486
 Fließtemperatur 69
 Flimmerempfindlichkeit 212
 Flimmerverschmelzungsfrequenz 43
 Fluoreszenz-Mikroskopie 371
 Fluorpolymere
 - Cytop 600
 Flycutting 90
 Fokuslänge
 - Radius 494
 Fokussierung 295
 Förderliche Vergrößerung 358
 Formfaktor 151
 Formgenauigkeiten 89

Formmasse 77
 Formschleifen 86
 Fotolack 479
 Fotolithographie 479
 Foveon X3 408
 Frame Integration Mode 410
 Frame Interline Transfer CCD 397
 Framerate 406, 664
 Frame Transfer 396
 Fraunhofer-Beugung 12, 473
 Freiformflächen 87
 Freigetropfte Gobs 74
 Frequenz 5
 Fresnel-Beugung 12
 Fresnel-Gleichungen 565
 Fresnellinsen 481
 Fresnel-Normalengleichung 575
 Fresnelzonenlinsen 471, 481, 483
 F-Theta-Objektiv 321
 Führungssystem 293
 Full Frame CCD 397
 Full Well Capacity 395

G

Galilei-Fernrohr 139, 337f.
 Galilei-Okular 343
 Gangunterschied 70
 Gaslaser 199
 Gauß-Strahl 14, 136, 140
 Gegenlichtblenden 284
 Geisterbild 283
 Generic API (GenAPI) 667
 Generic Transport Layer (GenTL) 668
 GenICam-Schichten 668
 GenICam-Standard 667
 Gesamttransmission 249
 Gesamttransmissionsgrad einer Filterkombination 36
 Gesichtsfeldblende 121
 Gießen 76
 Gigabit Ethernet 640
 GigE Vision Standard 640
 Gitter 474, 495
 Glanzkennzahl 36
 Glasarten 58
 Gläser
 - anorganische 58
 - mineralische 57
 Glasfasern 602
 Glasgemenge 57
 Gleitschraubengeräte 295
 Global Shutter 409
 Glühlampen 189, 191
 Gobs 74
 Gradientenindex 602f.
 Gradientenlinsenarrays 738
 Gradientenoptik 731
 Gradsichtprismen 171
 Gratfassungen 272
 Graufilter 253
 Greenough-Mikroskop 380
 Grenzfläche 6
 Grenzwinkel der Totalreflexion 596
 GRIN-Linse 732

GRIN-Mikrolinse 734
 Grundgläser 253
 Grundmode 598, 605, 607
 Gürtellinse 317
 Gütezahl 439
 GVCP (GigE Vision Control Protocol) 640
 GVSP (GigE Vision Streaming Protocol) 640

H

Halbduplex 642
 Halbleiterlaser 201
 Halbwertsbreite 248
 Halogenlampe mit Quarz-Noppen-Technologie 192
 Halogen-Signallampe 191
 Hardwaretrigger 663
 Härte 68
 Hauptbrechzahl 571
 Hauptpunkte 112, 117
 Heißprägen 78
 Hellbezugswert 41f.
 Helligkeit 33
 Helmholtzzahlen 41
 HeNe-Laser 199
 Herstellungsfehler 133
 Herstellungsverfahren Gradienten 733
 Heynacher-Zahl 440
 Hg-Niederdrucklampen 192
 High SNR mode 652f.
 Hochbrechende Materialien 236
 Hochreflektor 244
 Höhere Farbmeterik 45
 Holzkernbohren 84
 Hollow-Core-Faser 609
 Holografie 709
 Holografie-Mikroskop 716
 Holografische Interferometrie 715
 Hologrammaufnahme 709
 Hologrammrekonstruktion 717
 Human Centric Lighting (HCL) 224
 Huygens-Okular 343
 Huygenssches Prinzip 12, 473
 Hydrofon 8
 Hydrolytische Klasse (DIN ISO 12111) 66
 Hyperboloid 159
 hyperspektral 527

I

IEEE 1394a 637
 IEEE 1394b 637
 IEEE 1588 (Precision Time Protocol) 641
 IIDC 637
 Immersion 365
 Impermeabilitätstensor 571
 Indexellipsoid 575
 Indium-Antimonid (InSb) 695
 Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) 685
 Industriekamera 645
 Induzierte Emission 196
 Infrarotabsorption 600
 Infrarotdetektoren 695
 Infrarotoptik 692
 Infrarot-Sperrfilter 646

InGaAs-Halbleiterdetektor 393
 Inhomogenität 71
 Inhomogenitätsklassen 72
 Integrationskugel 50
 Integrationszeit 395
 Integrierte Optik 593, 616
 - Arrayed Waveguide Gratings 619
 - Demultiplexer 618
 - Multiplexer 618
 - Richtkoppler 618
 - Verzweiger 618
 Intensität 63
 Intensitätsmatrix 551
 Intensitätsverteilung 474f.
 Intensitätsverteilung eines Beugungsgitters 476
 Interferenz 9, 447
 Interferenzfilter 248, 256
 Interferenzkontrast 451
 Interferometer 447
 Interferometrischer Fasersensor 626
 Interlaced-Technik 409
 Interline Transfer 396
 Intrinsische Dämpfung 599
 Intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen (ipRGC) 213
 Inverses Mikroskop 375
 Ionenaustausch 619
 Ionengefärbte Gläser 253
 Ionenstrahlspattern (IBS) 236
 IR-Materialien 693
 Isochrone Daten 638
 Isochrones Datenpaket 665
 Isotrope Kristalle 60

J

Jones-Vektor 543
 - normiert 544
 Justage 282
 Justierdrehen 280
 Justierfräsen 281
 Justierkleben 279

K

Käfigsystem 288
 Kalibrierung in der Photometrie und Radiometrie 51
 Kamera-Adapter 375
 Kamerabajonet 646
 Kantenfilter 92, 247, 253
 - dielektrische 257
 Kantensteilheiten 248
 Katadioptrisches Objektiv 366
 Keile 175
 Kellner-Okular 343
 Kenngrößen optischer Filter 247
 Kepler-Fernrohr 16, 139, 337
 Kernel Mode-Treiber 666
 Kfz-Scheinwerfer 324
 Kinematische Wirkprinzipien 83
 Kippversteller
 - kardanisch 297
 - kinematisch 296
 Kirchhoffsches Beugungsintegral 473

Kleben 273
 Klebespaltdicke 279
 Klemmung
 - axial 267
 - axiale Federklemmung 270
 - mit Schraubring 268
 - radiale Federklemmung 270
 Koeffizientensatz nach J. v. Kries 45
 Kohärenz 451
 Kohärenzmatrix 548
 Koma 128
 Kompensationsokular 343
 Kompensatoren 282
 Komplementär-Farbfiler 407
 Komplettbearbeitung 86
 Kondensoren 305
 Konfokale Abbildung 372
 Konfokales Mikroskop 372
 Kontinuierliche Bildaufnahme 663
 Kontrast 430
 Konturfräsen 90
 Körperfarben 40
 Korrektur 503
 Kristallgitterstrukturen 60
 Kryoradiometer 51
 Kugelfaktor 50
 Kunststoffe 58
 Kunststoffoptiken 58
 Kurvenhülse 296
 Kurzpassfilter 247, 253, 258

L

Ladungstransfer 396
 Ladungstransport 395
 Lambert-Beersches Gesetz 35
 Lambertstrahler 33, 187
 Lampentypen 189
 Längenausdehnung 278
 Langpassfilter 247, 253, 257
 Längsabweichung 124
 Laser 196
 Laserdioden 196, 201
 Laser-Doppler-Velocimetrie 745
 Lasermesstechnik 743
 Laseroptisches Messsystem 417
 Laser-Scanning-Mikroskop 373
 Laserstrahlformung 486
 Laserstrahlung 196
 Laterale Auflösung 485
 Laugenklasse (DIN ISO 52322) 66
 Leuchtdichte 30, 33
 Leuchtdiode 193, 217
 Leuchtenbetriebswirkungsgrad 38
 Leuchtfeldblende 362
 Licht 27
 - unpolarisiert 548
 - Wirkungsmechanismen 216
 Lichtausbeute 38
 Lichtfarben 40
 Lichtgeschwindigkeit 5, 27
 Lichtleiter
 - Faser 505
 Lichtplanung

- Normen 220
 Lichtquanten 27
 Lichtquellen 216
 Lichtschrankensysteme 412
 Lichtstärke 30
 Lichtstärkemessungen 48
 Lichtstrahl 5
 Lichtstrom 30
 Lichtstrommessungen 49
 Lichtstromnormal 50
 Lichttechnische Größen 30
 Lichttechnische Stoffkennzahlen 35
 Licht- und Strahlungsfeld 29
 Lichtwellenleiter 593
 Lichtwirkung
 - nicht visuell 212
 Lineares Phasenelement 482
 Linear polarisiert 543
 Linearverstärker 293
 Link Aggregation Group-Technik 641
 Linsenformen 151
 Linsenscheinwerfer 323
 Linsen, sphärische 149
 Lithiumniobat-Wellenleiter 621
 Lochkamera 14
 Look-up-Tabelle (LUT) 650
 Lösen 66
 Lötten 274
 LP-Moden 605
 Luken 121
 Lumen 30
 Lumineszenzdiode 193
 Lumineszenzstrahler 187
 Lupen 331
 Lux 34
 LVDS 634

M

MacAdam-Ellipsen 45
 Mach-Zehnder-Interferometer 459
 Magnetfeldsensor 627
 Maske 479
 Massenoptik 58
 Maßstabsprojektor 314
 Maß- und Toleranzangaben 179
 Materialdispersion 601
 Matrixmethode 113
 Matrixsensoren 404
 Maximum 474
 Maxwell-Gleichungen 14
 MCVD-Verfahren 82
 Medium 5
 Mehrkomponentenspritzgießen 78
 Melanopic Daylight Efficacy Ratio (MDER) 221
 Melanopsin 214
 Meridionalstrahlen 602
 Mesopischer Bereich 28
 Messprojektor 315
 Metalle 235, 237f., 243
 Metallische Reflektoren 243
 Metallische Verunreinigungen 600
 Metallspiegel 154
 Michelson-Interferometer 454

Mikrobolometer 387, 698
 Mikrokanalplatte 521
 Mikrolinsen 395
 Mikroscooperspiegel 154
 Mikroskop 357, 359
 Mikroskop-Beleuchtung 361
 Mikroskop-Objektive 364
 Mikroskop-Vergrößerung 357
 Mikrostrukturierte Glasfasern 608
 Mikrostrukturierte Oberflächenschicht 477
 Mikrostrukturierverfahren 478
 Mikrozerspanungsprozess 89
 Minimum 474
 Mittelbrechende Materialien 236
 Moden 598, 604
 Modenbrechzahl 598, 605
 Modendispersion 601
 Modenfelddurchmesser 608
 Modenzahl 605
 Modulation 551
 Modulationsübertragungsfunktion 432
 Monochromator 509
 MRTD 701
 MTF-Messanordnung 438
 M-TIR (Modified Total Internal Reflection) 609
 Multi-Layer-DOEs 485
 Multimodefaser 606
 Multiplexer 735
 Multiplikative Farbmischung 42
 Multispektrale Systeme 688
 Multi-Tap-Technik 406

N

Nachtsehen 28
 Narziss-Effekt 701
 Nebelsensor 414
 Nebenmaximum 474
 NETD 388, 696
 Neutralfilter 247
 Nicht visuelle Lichtwirkung 212
 Niederbrechende Materialien 235
 Niederdrucklampen 192
 Niedere Farbmimetrik 39
 Niedervolt-Überdrucklampe 191
 Nipkow-Scheibe 373
 Noise Floor 657
 Normlichtarten 42
 Normspektralwertfunktionen 40
 Normspektralwertkurve 42
 Normung 178
 Notch-Filter 247
 NTSC 633
 Nullphase 539
 Numerische Apertur 358, 595

O

Oberflächendeformation 271
 Oberflächenmessung 723
 Oberflächenstruktur 477
 Oberflächenvergütungen 92
 Objektive 341
 Objektpunkt 112

Öffnungsfehler 125
 OH-Verunreinigungen 600
 Okulare 332, 341 f., 367
 OLED 195, 218
 Optische Abbildung 107
 Optische Dichte 6, 35
 Optische Kristallachsen 575
 Optische Medien 6
 Optischer Nutzeffekt 38
 Optischer Tisch 290
 Optisches Fenster 599
 Optische spektrale Dichte 249
 Optisches System 111
 Optische Strahlung 27
 Optische Übertragungsfunktion 429
 Optische Werkstoffe 57
 Optisch klare Medien 35
 Optronische Plattformen 703
 Ordnung einer Phasenplatte 572
 Organische Filter 254
 Organische LED 195
 Orthoskopische Okulare 343
 Ortsfrequenz 430
 Overheadprojektor 313

P

Packed 12-Bit Mode 665
 PAL 633
 Paraboloid 158
 Paraxiale Durchrechnung 145
 Paraxiale Näherung 482
 PARSIVEL 417
 Passive Bauelemente 616, 618
 Passiv-Pixel-Sensoren 399
 Passspiel 275
 Passspielmontage 275
 PBG (Photonic Band Gap) 608
 PCF (Photonic Crystal Fiber) 608
 PDT-Farbwertkurven 45
 Pegelgesteuerte Bildaufnahme 663
 Pentaprisma 170
 Periskop 346
 Perlwände 309
 Phase 5
 Phasendifferenz 542
 Phasen-DOEs 477
 Phasen-Doppler-Partikelanalyse 751
 Phasengeschwindigkeit 598
 Phasen-Kontrast 368
 Phasenshiftverfahren 449
 Photobiologische Sicherheit 226
 Photodetektor 387
 Photonen 27
 Photonendichte 27
 Photonenenergie 27
 Photonentechnische Größen 37
 Photon Noise 656
 Photontransferkurve 660
 Photopischer Bereich oder Tagessehen 28
 Photo Response Nonuniformity (PRNU) 657
 Photorezeptoren 213
 Physical Vapour Deposition (PVD) 93
 Piezo-Scanner 320

Pixeldaten 665
 Pixelgröße 394, 487
 PlanAPOCHROMAT 365
 Planck'sche Strahlungsformel 389
 Planplatten 165
 PlasDIC-Kontrast 370
 POF (Polymere Optical Fiber) 600
 Point-Diffraction-Interferometer 463
 Polarisation 17, 451
 Polarisationsbeeinflussende Schichten 93
 Polarisationsdispersion 601
 Polarisationsellipse 539
 - Orientierung 546
 Polarisationsgrad 548
 Polarisationskontrast 551
 Polarzerlegung 555
 Polieren 87
 Polierkonstante 88
 Polychromator
 - subtraktiv 494
 Polykondensation 59
 Polymerfaser 600
 Polymerisation 59
 Polymerwellenleiter 620
 Porro-Prisma 170
 Power over Camera Link (PoCL) 636
 Precision Gobs 74
 Pressen 80
 Prism 499
 Prismen 168, 341
 Profilsystem 286
 Projektor 306
 Prozesskette 74
 Punktauflösung 358
 Pupillen 120
 Purpurgeraden 41
 PVD-Verfahren 94

Q

Q-Design 240
 Quantenausbeute 395
 Quantendetektor 387
 Quantization Noise 657
 Quecksilberdampf-Kurzbogenlampe 193
 Quecksilber-Kadmium-Tellurid (HgCdTe) 695
 Quellen 66
 Queraberration 124
 Querschnittswandler 614
 QWOT 238

R

Radiometrie 51
 Radiometrische Bildgrößen 123
 Radiosity 38
 Raleigh-Streuung 682
 Ramsden-Okular 343
 Randabfall 122
 Rasterfräsen 90
 Rauchmelder 412
 Raumwinkel 29
 - Konus 495
 Raumwinkelprojektion 29

- Rauschquellen 656
 Rautiefe, theoretische 90
 Rayleigh-Länge 15
 Rayleigh-Quotienten 550
 Rayleighstreuung 599
 Raytracing 146
 Reaktionsgießverfahren 76
 Reales Beugungsgitter 475
 Reflektivität 235
 Reflexion 6
 Reflexionsbänder höherer Ordnung 247
 Reflexionserhöhung 242
 Reflexionsfaktor 251
 Reflexionsgesetz 7
 Reflexionsgrad 35, 453
 Reflexions-Hologramm 712
 Reflexionsmatrix 114
 Reflexionsmesskopf 624
 Reflexionsprismen 167
 Reflexminderung 240
 Regenbogen-Hologramm 713
 Reichweitenberechnung 702
 Re-Imager 699
 Reintransmissionsgrad 35, 63, 251
 Relative Übergangsbreite 248
 Replikation 78
 Reset Noise 657
 Restreflexion 283
 Retroreflektor 172
 Rhomboidprisma 170
 Richtungsempfindlichkeit
 - von Empfängern 203
 Ringbuffer 667
 Rolling Shutter 408
 Rowland 507
 RS422 634
 Rückflächenspiegel 154
 Rugate 245
 Rugate-Spiegel 247
- S**
- S400 637
 Sagnac-Effekt 626
 Sättigung 46
 Scanner 317
 Schädigungswirkung 28
 Schärfentiefe 134
 Scheimpflugbedingung 118
 Scheinwerfer 322
 Scheitelpunkte 116
 Scher-Interferometer 460
 Schichtsysteme 240
 Schichtwellenleiter 596
 Schiefdrehen 280
 Schiefe Strahlen 603
 Schienensysteme 286
 Schleifen 84
 Schlieren 71
 Schmalbandfilter 260
 Schmale Bandpassfilter 259
 Schmidt-Pechan-Prisma 171
 Schnittweite 112
 Schräglicht-Interferometer 462
 Schrumpf 274
 Schwarzer Empfänger 51
 Schwarzer Körper 691
 Schwarzer Strahler 51, 187
 Schwärzung 35
 Sehschärfe 210
 Sekundäres Spektrum 364
 Sensorauflösung 405, 664
 Sensoren 622
 Sensorgröße 405
 Sensorprinzip
 - Intensitätsänderung 624
 - Phasenänderung 625
 - Polarisationsänderung 626
 - Wellenlängenverschiebung 627
 Shadingkorrektur 650
 Sichtfeld (FOV) 670
 Siemensstern 431
 Signal to Noise Ratio (SNR) 658
 Silizium-Halbleiterdetektor 394
 Singlemodedfasern 607
 Singularwertzerlegung 555
 Sinusbedingung 360
 Skalenprojektor 314
 Skotopischer Bereich 28
 Smeareffekt 399
 Software Development Kit 665
 Spalt 509
 Spannungsdoppelbrechung 70
 Speckle-Interferometrie 721
 Spektrale Anpassung 47
 Spektrale Eigenschaften des Auges 211
 Spektrale Empfindlichkeit 28
 Spektralfarbenzug 41
 Spektrallinien 188
 Spektralmessgeräte 51
 Spektralverfahren 50
 Spektralwertfunktionen 39
 Spektralzerlegung 552
 Spektrograph 512
 Spektrometer 513
 Spektroskopielampe 191
 Spektrum 5
 Spezieller FWG-Index 47
 Spezifische Drehung 586
 Spezifische Lichtausstrahlung 30
 Sphärische Aberration 125
 Spiegel 72, 152
 Spiegelnde Reflexion 36
 Spiegelpolygon-Scanner 321
 Spiegelscheinwerfer 322
 Spiegelwerkstoffe 72
 Spinning Disk 373
 Spritzgießen 77
 Spritzprägen 78
 Sprödelastisches Verhalten 67
 Sputtern 94, 236
 Stäbchen 213
 Standard Features Naming Convention (SFNC)
 667
 Stangensystem 288
 Stehwellenmuster 598
 Steifigkeit 290
 Stereo-Mikroskop 380

Stokes-Parameter 543, 548
 Strahlaberrationen 124
 Strahlaufweitung 16, 139
 Strahldurchrechnung 145
 Strahlengang 5, 119
 Strahlenoptik 5
 Strahlfallen 285
 Strahlradius 15
 Strahlteiler 173
 Strahlteilerplatten
 - polarisierend 582
 Strahlteilerwürfel
 - polarisierend 582
 Strahlungsausbeute 38
 Strahlungsempfänger 202
 Strahlungsfunktion 39
 Strahlungsgleichung nach Schwarzschild
 35
 Strahlungskonstante 187
 Strahlungsmessung 51
 Strahlungsquellen 185, 679
 Strahlungsthermoelement 251
 Streueigenschaften 36
 Streulicht
 - Falschlicht 499
 Streulichtblenden 285
 Streulichtkoeffizient 415
 Streuscheiben 310
 Streuung 284, 599
 Streuvermögen 36
 Strömungsfeldmessung 750
 Stufenindex 602
 Stufenindexfaser 602
 Stufenzahl 71
 Subject Quality Factor 440
 Subsampling 652
 Subtraktive Farbmischung 42
 SuperHAD 404
 Systeme mit mehreren Gliedern 155

T

Teleskope 341
 thermal imager 689
 Thermischer Detektor 387
 Thermografie 703
 Thermoplaste 58
 Tiefenabbildungsmaßstab 360
 Tischaufbausystem 289
 TIS (Total Integrated Scattering) 283
 Toleranzangaben 181
 Topfzeit 273
 top hat 486
 Torus 162
 Totalreflexion 7, 595 f.
 Totalreflexionswinkel 595
 Transfergleichung
 - Polarisationsgrad 550
 Transformationsbereich 57
 Transformationsmatrizen 44
 Translationsmatrix 113
 Transmissionsgrad 35, 60, 63, 550
 Transmissionsgradmessungen 50
 Transmissionskoeffizient 551

Transmissionskurve 655
 Transmissionsmessungen 721
 Trennen 83
 Trennschleifen 84
 Triangulationssensor 419
 Tripelspiegel 455
 Trübungsmessung 412
 Tubussystem 288
 Twyman-Green-Interferometer 455

U

Überauflösung 373
 UDP/IP Protokoll 640
 Ulbrichtkugel 50
 Ultra-Mikroskop 373
 Ultrapräzisionszerspannung 89
 Umformen 79
 Umkehrsysteme 172, 340, 344
 Unbuntpunkt 41
 Unified Glare Rating-Wert (UGR) 220
 Unterschiedsempfindlichkeit 210
 Urformen 75
 Urprimärvalenzen 39
 USB 2.0 642
 USB 3.0 642
 User Mode-Treiber 666

V

Vakuumbedampfung 94
 Vakuumlampen 190
 Vektorielle Strahldurchrechnung 146
 Verbesserte Metallspiegel 243
 Verdampfen 236
 Verformungsmessung 723
 Verformungsverhalten 69
 Vergrößerung 14, 112
 Verwitterungsklasse 66
 Verzeichnung 130 f.
 Viertelwellenschichten 238, 240
 Vignettierung 122
 Viskosität-Temperatur-Kurven 80
 Voll- oder Partialfilterung 47
 Volumenoptik 58
 Vorderflächenspiegel 154
 Vorspannung 271
 Vorzeichenregel 110
 V-Parameter 598, 605
 v(λ)-Kurve 28

W

Wälzführung 293
 Wärmebildgeräte 689
 Wärmestrahlung 689
 Wegmessung 454
 Weißabgleich 650
 Weißlicht-Interferometer 464
 Weißlicht-LED 194
 Weitwinkelokular 343
 Wellenaberration 125
 Wellenausbreitung 5
 Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit 5

Wellenfront 5
Wellenfrontaberration 133
Wellenfrontebene 539
Wellengleichung 14
Wellenlänge 5, 27
Wellenleiter 595 f.
Wellenleiterdispersion 601
Wellenleitermoden 596
Wellenoptik 5
Wellenzahl 27
Wendeprisma 345
Wiensches Verschiebungsgesetz 389
Windmessgerät 750
Winkelspiegel 169
Wollaston-Reflexionsprisma 170

Z

Zapfen 213
Zeichnerische Bildkonstruktion 119
Zeichnungsangaben 178
Zeilensensoren 404
Zeitspannungsvolumen 83
Zersetzungstemperaturbereich 69
Zerstreuungskreisdurchmesser 135
Zerteilen 83
Ziehen 80
Zielfernrohr 340
Zirkular polarisiert
- links 543
- rechts 543
Zoom 295
Zugfestigkeit 67
Zurichten 83
Zweischicht-AR 241
Zwischenfokus 283
Zylinderlinsen 737