
Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis, physikalische Konstanten und Materialdaten	1
	<i>E. Voges, K. Petermann</i>	
1.1	Verzeichnis der Abkürzungen	1
1.2	Physikalische Konstanten und Materialdaten	5
1.2.1	Physikalische Konstanten	5
1.2.2	Brechzahl ausgewählter Gläser	6
1.2.3	Komplexe Brechzahl $n - j\kappa$ von Metallen	7
1.2.4	Komplexe Brechzahl $n - j\kappa$ und Amplitudendämpfungskonstante $\alpha = 2\pi \kappa/\lambda$ von Silizium	8
1.2.5	Materialparameter Si, Ge, GaAs, InP	8
1.2.6	Materialparameter Lithiumniobat	10
2	Elektromagnetische Wellen: Grundlagen	12
	<i>R. Ulrich</i>	
2.1	Übersicht	12
2.2	Grundbegriffe	12
2.2.1	Elektrische Ladung, Strom	12
2.2.2	Elektrische, magnetische Felder	13
2.2.3	Feldzerlegungen	15
2.2.4	Maxwell-Gleichungen	15
2.3	Materie im Feld	15
2.3.1	Materialgleichungen	15
2.3.2	Parameter-Abhängigkeiten	18
2.3.3	Randbedingungen	19
2.4	Feldenergie	20
2.5	Wellenausbreitung	21
2.5.1	Wellengleichung	21
2.5.2	Eindimensionale Ausbreitung	23
2.5.3	Ebene Welle im Raum	25
2.5.4	Interferenzfeld im Raum	25
2.5.5	Dispersion	26
2.5.6	Ebene Wellen in anisotropen und gyrotropen Medien	28
2.5.7	Wellenbündel	31
2.5.8	Beugung	32
2.6	Polarisation ebener Wellen	34
2.6.1	Polarisationsellipse	34
2.6.2	Jones-Formalismus	36
2.6.3	Poincaré-Darstellung	38
2.6.4	Stokes/Mueller-Formalismus	40
2.7	Reflexion und Brechung ebener Wellen	42
2.7.1	Reflexion, Brechung	42
2.7.2	Totalreflexion	45

2.7.3	Anisotrope Medien	45
2.8	Geometrische Optik	46
2.8.1	Eikonal	47
2.8.2	Strahlenoptik	47
2.8.3	Strahlenbündel-Überlagerung	48
2.8.4	Optik paraxialer Strahlen	48
2.8.5	Optische Komponenten	50
2.8.6	Gaußsche Strahlwellen	52
	Spezielle Literatur	54
3	Optische Fasern: Grundlagen	56
	<i>E. Brinkmeyer</i>	
3.1	Aufbau optischer Fasern	56
3.1.1	Grundstruktur	56
3.1.2	Faser-Materialien	57
3.2	Fasertypen	57
3.2.1	Stufenprofilfasern als Einmoden- und Vielmodenfasern	57
3.2.2	Vielmodenfasern mit Gradientenprofil und dispersionsmodifizierte Einmodenfasern	58
3.3	Beschreibung der Lichtausbreitung in optischen Fasern	59
3.3.1	Geometrisch-optische Beschreibung der Lichtausbreitung in Vielmodenfasern	59
3.3.2	Modenkonzentration	60
3.3.3	Vereinfachte Modenbeschreibung bei schwacher Wellenführung	60
3.3.4	Die LP_{01} -Grundmode	63
3.3.5	Individuelle Moden in Vielmodenfasern und Modenkopplung	64
3.3.6	Polarisationseigenschaften von Einmodenfasern	64
3.4	Übertragungseigenschaften	65
3.4.1	Dämpfung	65
3.4.2	Einkopplung in Fasern und lokalisierte Verluste an Koppelstellen	68
3.4.3	Pulsverzerrung durch intermodale Dispersion in Vielmodenfasern	70
3.4.4	Pulsverzerrung durch chromatische Dispersion	71
3.4.5	Pulsverzerrung durch Polarisationsmodendispersion	75
3.4.6	Einfluß nichtlinearer Effekte	76
	Spezielle Literatur	78
4	Einmodenfasern	80
	<i>H. Renner</i> (Abschn. 4.1–4.13), <i>R. Ulrich</i> (Abschn. 4.14–4.15), <i>J.-P. Elbers, C. Glingener</i> (Abschn. 4.16)	
4.1	Einleitung	80
4.2	Exakte Eigenwellen in Fasern, Moden	80
4.2.1	Vektorielle Wellengleichungen	80
4.2.2	Eigenwellen, Moden	81
4.2.3	Orthogonalität und Vollständigkeit der Moden	82
4.2.4	Modenanregung	83
4.2.5	Exakte Lösungen in Stufenprofil-Fasern	83
4.3	Linear polarisierte Näherungslösungen für schwach führende Fasern	84
4.3.1	Schwache Führung, Skalare Näherung	84
4.3.2	Linear polarisierte Moden der runden Faser	85
4.4	Moden in realen Fasern und Modenkopplung	86
4.4.1	Normale Moden und Modenkopplungs-Gleichungen für längenabhängige Störungen	86
4.4.2	Schwach verkoppelter Grundmodus	87
4.4.3	Regellose schwache Störungen	88

4.5	Feldcharakterisierung und Feldradius	89
4.5.1	Gaußsche Feldnäherung und Feldradius	90
4.5.2	Feldradien für Nicht-Gaußsche Felder	92
4.6	Nah- und Fernfeld von Einmodenfasern	93
4.6.1	Nahfeld	93
4.6.2	Fernfeld und Öffnungswinkel	93
4.6.3	Gaußstrahl	94
4.7	Faser-Faser-Kopplung	95
4.7.1	Gaußähnliche Grundmodenfelder	96
4.7.2	Beliebige Grundmodenfelder	97
4.7.3	Endflächenreflexion an Faserstoßstellen	97
4.8	Chromatische Dispersion und Dispersionskompensation	98
4.8.1	Dispersion	98
4.8.2	Materialdispersion	100
4.8.3	Wellenleiterdispersion	101
4.8.4	Dispersion in kaskadierten Fasern	102
4.8.5	Dispersion Management	102
4.9	Impulsübertragung und Übertragungsfunktion	103
4.9.1	Impulsübertragung	103
4.9.2	Übertragungsfunktion	107
4.10	Dispersionsoptimierte Fasern	108
4.10.1	Standardfasern (SF: standard fibers)	109
4.10.2	Dispersionsverschobene Fasern (DSF: dispersion-shifted fibers)	109
4.10.3	Dispersionsgeglättete Fasern (DF: dispersion-flattened fibers)	110
4.10.4	Dispersionskompensierende Fasern (DCF: dispersion-compensating fibers)	112
4.10.5	Non-Zero-Dispersion-Shifted Fibers (NZ-DSF)	114
4.10.6	Fasern mit großer effektiver Führungsfläche	114
4.11	Fasern mit Mehrstufen- und Gradientenprofil, äquivalente Ersatzfasern	115
4.11.1	Fasern mit Mehrstufen-Profil	115
4.11.2	Fasern mit Gradientenprofil	115
4.11.3	Äquivalente Ersatzfasern	116
4.12	Faserdämpfung	116
4.12.1	Gekrümmte Fasern: Äquivalentes Brechzahlprofil	117
4.12.2	Makrokrümmungsverluste	117
4.12.3	Mikrokrümmungsverluste	121
4.12.4	Übergangsverluste zwischen gekrümmten und geraden Fasern	123
4.12.5	Leckwellenverluste in Depressed-Cladding-Fasern	124
4.13	Grenzwellenlängen	125
4.13.1	Theoretische Grenzwellenlängen	126
4.13.2	Effektive Grenzwellenlänge	129
4.14	Polarisation und Doppelbrechung in Einmodenfasern	131
4.14.1	Polarisation in Einmoden-Fasern	132
4.14.2	Polarisations-Darstellung	133
4.14.3	Polarisationsentwicklung in Einmoden-Fasern	137
4.14.4	Doppelbrechung und Polarisationsentwicklung	143
4.14.5	Polarisations-Hauptzustände	149
4.15	Ursachen der Doppelbrechung	152
4.15.1	Doppelbrechung aufgrund innerer Ursachen	154
4.15.2	Doppelbrechung aufgrund äußerer Ursachen	156
4.15.3	Messung von Polarisation und Doppelbrechung entlang einer Faser	161
4.15.4	Polarisationserhaltende Fasern	163
4.15.5	Faserpolarisatoren	168
4.15.6	Polarisationsmodendispersion	169
4.15.7	Messung und Simulation der PMD	176

4.15.8	Kompensation der PMD	181
4.16	Nichtlineare Effekte in Einmodenfasern	187
4.16.1	Mathematische Beschreibung	189
4.16.2	Numerische Lösung der Ausbreitungsgleichung	194
4.16.3	Selbstphasenmodulation (SPM)	195
4.16.4	Kreuzphasenmodulation (XPM)	197
4.16.5	Vierwellenmischung (FWM)	199
4.16.6	Stimulierte Raman-Streuung (SRS)	201
4.16.7	Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS)	203
4.16.8	Solitonen	204
	Spezielle Literatur	205
5	Vielmodenfasern	214
	<i>W. Freude</i>	
5.1	Einführung	214
5.2	Wellen und Moden	216
5.3	Strahlen und Moden	219
5.3.1	Freiraum-Moden	219
5.3.2	Phasenraum	221
5.3.3	Strahlen und Moden in Fasern	221
5.3.4	Modenanregung	229
5.3.5	Gradientenlinse	231
5.4	Nahfeld und Fernfeld	233
5.4.1	Strahldichte	234
5.4.2	Strahlleistung	234
5.4.3	Nah- und Fernfeldintensität	234
5.4.4	Modenleistungsverteilung	236
5.5	Gruppenlaufzeitdispersion	236
5.5.1	Gruppenlaufzeit	236
5.5.2	Profiloptimierung	236
5.5.3	Gruppenlaufzeitdifferenz	237
5.5.4	Impulsantwort	237
5.6	Impulsantwort und Übertragungsfunktion	238
5.6.1	Lineare zeitinvariante Systeme	239
5.6.2	Eigenschaften der Lichtquelle	239
5.6.3	Einmoden-Impulsantwort	240
5.6.4	Einmoden-Leistungs-Impulsantwort	240
5.6.5	Vielmoden-Leistungs-Impulsantwort	242
5.6.6	Laufzeit-Leistungs-Übertragungsfunktion	243
5.7	Faserstörungen und Modenkopplung	244
5.7.1	Störungstypen	244
5.7.2	Makrokrümmungen	246
5.7.3	Mikrokrümmungen	246
5.7.4	Modengleichgewichtsverteilung	247
5.8	Koppelemente	249
5.8.1	Lichtquellen und Fasern	250
5.8.2	Stirnflächenkopplung	251
5.9	Modenrauschen	254
5.9.1	Modenüberlagerung	254
5.9.2	Leistungsfluktuation	255
5.9.3	Signal-Geräusch-Verhältnis	256
	Spezielle Literatur	257

6 Herstellungsverfahren von Lichtwellenleitern	261
<i>K. Kemeter</i>	
6.1 Herstellung von Quarzglas	261
6.2 Eigenschaften von Quarzgläsern	262
6.3 Herstellungsverfahren von Vorformen	265
6.3.1 Reinheit der Ausgangsmaterialien	265
6.3.2 Außendampfabcheidung	266
6.3.3 Innendampfabcheidung	269
6.4 Faserzug	270
6.5 Mechanische Eigenschaften von Lichtwellenleitern	271
6.5.1 Faserfestigkeit	272
6.5.2 Faserbruch	273
6.5.3 Lebensdauer von Lichtwellenleitern	274
Spezielle Literatur	275
7 Lichtwellenleiterkabel	277
<i>R. Engel</i>	
7.1 Bauprinzipien	277
7.1.1 Anforderungen	278
7.1.2 Aufbauregeln	278
7.2 Bauelemente	287
7.2.1 Hohlader	287
7.2.2 Kammer	289
7.3 Bauformen	291
Spezielle Literatur	294
8 Optische Polymerfasern Plastic Optical Fibres (POF)	295
<i>A. Neyer</i>	
8.1 Übersicht über Fasertypen	295
8.2 Stufenindex-Polymerfaser (SI-POF)	296
8.2.1 Aufbau und Herstellung	296
8.2.2 Materialsystem und Dämpfungsverhalten	297
8.2.3 Dispersion und Bandbreite	298
8.2.4 Stufenindexfaser mit verringerter numerischer Apertur (Low-NA-POF)	299
8.2.5 Vielkernfaser (Multicore bzw. MC-POF)	300
8.2.6 Verkabelung der Stufenindexfaser	300
8.3 Gradientenindex-Polymerfaser (GI-POF)	301
8.3.1 Aufbau und Herstellung	301
8.3.2 Materialsysteme und Dämpfungsverhalten	302
8.3.3 Bandbreite	302
8.4 Umweltbeständigkeit von Polymerfasern	302
8.4.1 Biegeempfindlichkeit und mechanische Belastbarkeit	303
8.4.2 Temperatur/Luftfeuchte/Chemische Beständigkeit	303
8.5 Verbindungstechniken und Stirnflächenbearbeitung	304
8.5.1 Verlustmechanismen an der Koppelstelle	304
8.5.2 Stecksysteme	304
8.5.3 Stirnflächenbearbeitung	305
8.6 Komponenten für Übertragungssysteme mit Polymerfasern	306
8.6.1 Sendeelemente	306
8.6.2 Empfangselemente	306
8.6.3 Passive Komponenten: Leistungsteiler und Sternkoppler	306
8.7 Anwendungen von POF-Systemen	307
Spezielle Literatur	308

9 Fasermeßtechnik und Fasercharakterisierung	310
<i>E. Brinkmeyer</i>	
9.1 Bestimmung von Geometrie- und Brechzahldaten optischer Fasern	310
9.1.1 Messung geometrischer Kenngrößen	310
9.1.2 Brechzahlprofil-Meßmethoden	310
9.1.3 Bestimmung der numerischen Apertur von Vielmodenfasern	312
9.1.4 Messung des nichtlinearen Brechzahl-Koeffizienten n_2	313
9.2 Bestimmung der Eigenschaften von Wellenfeldern in optischen Fasern . .	314
9.2.1 Grenzwellenlängen-Messungen an optischen Fasern	314
9.2.2 Messung des Felddurchmessers von Einmodenfasern	318
9.2.3 Messung von Polarisationszuständen und Polarisationszustands- Änderungen in einmodigen Fasern	321
9.3 Bestimmung der Übertragungseigenschaften optischer Fasern	322
9.3.1 Faser-Dämpfungsmessungen	322
9.3.2 Dispersionsmessungen	329
9.4 Bestimmung von Eigenschaften faseroptischer Komponenten	337
9.4.1 Relevante Meßgrößen faseroptischer Komponenten	337
9.4.2 Transmissions- und Reflexionsmessungen an faseroptischen N -Toren . . .	338
9.4.3 Hochauflösende Reflektometrierverfahren	339
Spezielle Literatur	344
10 Faseroptische Verbindungen	347
<i>B. Mende, K. Behm</i>	
10.1 Verbindungstechniken, Überblick	347
10.2 Grundlagen der Kopplung ein- und vielmodiger Lichtwellenleiter	348
10.2.1 Koppeldämpfung und ihre Ursachen	348
10.2.2 Einfluß geometrischer und optischer Faserparameter auf die Koppeldämpfung (Intrinsische Verluste)	349
10.2.3 Einfluß der Justage und der Oberflächengüte der Faserenden auf die Koppeldämpfung (Extrinsische Verluste)	350
10.2.4 Einfluß von Reflexionen auf die Koppeldämpfung (Fresnelsche Verluste)	353
10.3 Spleißverbindungen	353
10.3.1 Mechanische Spleißverbindungen	354
10.3.2 Thermisches Spleißen	356
10.3.3 Mehrfachspleißen	359
10.4 Optische Steckverbinder	360
10.4.1 Aufbau optischer Steckverbinder	360
10.4.2 Physikalischer Kontakt (PC)	362
10.4.3 Physikalischer Kontakt mit Winkelschliff (APC)	363
10.4.4 Technische Anforderungen an optische Steckverbinder	363
10.4.5 Steckerbauformen	365
10.4.6 Steckerkonfektionierung	372
Spezielle Literatur	377
11 Strahlenoptische Komponenten	378
<i>H. Fouckhardt</i>	
11.1 Spiegel	378
11.2 Optische spektrale Filter	382
11.3 Abbildende optische Elemente	387
11.4 Prismen und Beugungsgitter als dispersive optische Elemente	395
11.5 Polarisatoren und optische Isolatoren	400
Spezielle Literatur	404

12 Faseroptische Komponenten	405
<i>R. Zengerle (Abschn. 12.1–12.8), E. Brinkmeyer (Abschn. 12.9)</i>	
12.1 Optische Verzweigungen	405
12.1.1 Stoßgekoppelte Strukturen	406
12.1.2 Konzentrierte Koppler (Strahlteiler)	406
12.1.3 Faser-Richtkoppler	407
12.1.4 Verzweiger höherer Ordnung	409
12.1.5 Sternkoppler	410
12.2 Optische Filter	411
12.2.1 Frequenzselektive symmetrische Richtkoppler	411
12.2.2 Frequenzselektive asymmetrische Richtkoppler	411
12.2.3 Gitterunterstützte Faserrichtkoppler	412
12.2.4 Mach-Zehnder-Filter	413
12.2.5 Faser-Ringresonatoren	414
12.2.6 Fabry-Perot Faserresonatoren (Interferometer)	414
12.2.7 Faseranschliffilter	415
12.2.8 Mehrkern Faserfilter	416
12.2.9 Komplexe faseroptische Gitterfilter	416
12.3 Faseroptische Multiplexer-Komponenten	417
12.3.1 Faseroptische Mehrkanal-Demultiplexer	417
12.3.2 Add-Drop-Multiplexer	417
12.4 Faseroptische Schalter und Modulatoren	418
12.4.1 Allgemeine Hinweise	418
12.4.2 Mikromechanische Faserschalter	418
12.4.3 Faseroptische Modulatoren	420
12.5 Polarisationskomponenten	420
12.5.1 Polarisationssteller	420
12.5.2 Polarisatoren	421
12.6 Halbleiterlaser mit Fasergitter-Kopplung	421
12.6.1 Frequenzstabilisation mittels externem Fasergitter	421
12.6.2 Kurzimpuls laser	421
12.7 Dispersionskompensatoren	422
12.7.1 Kompensationsverfahren	422
12.7.2 Kompensatoren mittels Photonischer Kristall-Fasern	422
12.8 Sonstige faseroptische Komponenten	422
12.8.1 Faseroptische Dämpfungs- und Abschlußglieder	422
12.8.2 Faseroptische Koppellemente	423
12.8.3 Faserintegrierte Isolatoren	425
Spezielle Literatur (Abschn. 12.1–12.8)	426
12.9 Faseroptische Gitter	428
12.9.1 Herstellung	428
12.9.2 Berechnung von Faser-Bragg-Gittern	431
12.9.3 Gittertypen und Eigenschaften	433
12.9.4 Anwendungen	436
Spezielle Literatur (Abschn. 12.9)	440
13 Optische Aufbau- und Verbindungstechniken	442
<i>J.-R. Kropp</i>	
13.1 Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik	442
13.1.1 Charakteristische Technik in der Telekommunikation	442
13.1.2 Modultechnik für die Datenkommunikation	443
13.1.3 Einsatz im Arbeitsbereich	444
13.1.4 Allgemeine Entwicklungstrends	444
13.2 Grundlegende Typen von optischen Modulen	445

13.2.1	Optische Bauteile mit Einzelgehäusen	445
13.2.2	Optische Bauteile in Gehäusen mit integriertem Lichtwellenleiteranschluß	447
13.2.3	Gehäuse mit Steckbucht	448
13.3	Optische Kopplungsprinzipien	450
13.3.1	Stumpfkopplung	450
13.3.2	Linsenkopplung	451
13.3.3	Kopplung mit Linsentaper	451
13.4	Justier- und Fixiertechnik in optischen Modulen	452
13.4.1	Fixierung mit aktiver Justage	452
13.4.2	Justierfreie Fixierung	456
13.5	Kapselung der optischen Chipkomponenten	458
13.5.1	Hermetische Dichtung	459
13.5.2	Kapselung durch Umhüllung mit Kunststoff	459
	Spezielle Literatur	460
14	Planare optische Schaltungen	461
	<i>R. März</i>	
14.1	Einführung	461
14.1.1	Wellenleiterstrukturen	462
14.1.2	Steuerung integriert-optischer Bauelemente	463
14.2	Berechnungsverfahren	464
14.2.1	Eigenmodenanalyse	464
14.2.2	Theorie gekoppelter Moden	469
14.2.3	Theorie lokaler Normalmoden	470
14.2.4	Strahlausbreitung	470
14.2.5	Numerische Verfahren	473
14.3	Bauelemente der integrierten Optik	475
14.3.1	Gekrümmte Wellenleiter	475
14.3.2	Hornstrukturen (Taper)	476
14.3.3	Richtkoppler	477
14.3.4	Vielmodenkoppler	478
14.3.5	Beugungsgitter und Phased Arrays	480
14.3.6	Kontradirektionale Koppler	485
14.4	Integriert-optische Schaltungen	486
14.4.1	Weitere Grundkomponenten	487
14.4.2	Zusammengesetzte Komponenten und Netzwerke	489
14.4.3	Mach-Zehnder-Bauelemente	490
14.4.4	Periodische und quasiperiodische Strukturen	491
14.5	Technologien der integrierten Optik	493
14.5.1	Glasbasierte Materialsysteme	494
14.5.2	III-V Halbleiter	495
14.5.3	Lithiumniobat (LiNbO_3)	496
14.5.4	Polymere	497
14.5.5	CAD für integriert-optische Schaltungen	498
14.5.6	Vergleiche zwischen Mikrooptik und integrierter Optik	499
	Spezielle Literatur	500
15	Optische Modulatoren und Schalter	505
	<i>D. Hoffmann</i>	
15.1	Überblick	505
15.2	Physikalische Modulations- und Schalteffekte	505
15.2.1	Skalare Effekte	506
15.2.2	Tensorielle Effekte	507
15.2.3	Ladungsträgereffekte	509

15.2.4	Franz-Keldysch-Effekt (FKE)	512
15.2.5	Quanteneffekte	513
15.3	Wellenleiter und Elektroden	519
15.3.1	Wellenleiter	519
15.3.2	Elektroden	520
15.4	Technologie	525
15.4.1	LiNbO ₃	525
15.4.2	III/V-Halbleiter	527
15.4.3	SiO ₂ /Si	527
15.4.4	Polymere	529
15.4.5	Glas	529
15.5	Refraktive Bauelemente	530
15.5.1	Phasenmodulatoren	530
15.5.2	Mach-Zehnder-Modulatoren	531
15.5.3	Richtkoppler	534
15.5.4	Digitale optische Schalter (DOS)	537
15.5.5	X-Schalter	539
15.5.6	Schaltmatrizen	540
15.6	Absorptive Bauelemente	541
15.6.1	EA-Modulatoren (III/V-Halbleiter)	541
15.7	Polarisationsmodulation	544
15.7.1	TE-TM-Konverter	544
15.7.2	Polarisationsregelung	548
15.8	Ausblick	550
	Spezielle Literatur	551
16	Nichtlineare Optik und optische Signalverarbeitung	555
	<i>H. G. Weber</i>	
16.1	Einleitung	556
16.2	Grundlagen der nichtlinearen Optik	556
16.2.1	Nichtlineare Polarisation und Suszeptibilität	556
16.2.2	Zusammenstellung von nichtlinearen optischen Effekten	558
16.2.3	Phasenanpassung	560
16.2.4	Physikalische Mechanismen der Nichtlinearität	560
16.2.5	Materialien mit der Suszeptibilität $\chi^{(2)}$	562
16.2.6	Materialien mit der Suszeptibilität $\chi^{(3)}$	562
16.2.7	Summenfrequenzerzeugung, Frequenzverdopplung, Frequenzverdreifung	563
16.2.8	Differenzfrequenzerzeugung, parametrische Verstärkung, optisch parametrischer Oszillator	564
16.2.9	Vierwellenmischung	565
16.2.10	Nichtlineare Brechzahl, optischer Kerr-Effekt	566
16.2.11	Selbstphasenmodulation, Kreuzphasenmodulation	567
16.3	Der Halbleiter-Laserverstärker als Funktionselement der optischen Signalverarbeitung	568
16.3.1	Aufbau eines Halbleiter-Laserverstärkers	568
16.3.2	Funktionsweise eines Halbleiter-Laserverstärkers	569
16.3.3	Optische Nichtlinearität des Halbleiter-Laserverstärkers	571
16.3.4	Nichtlineare Brechzahl- und Gewinnmodulation im Halbleiter-Laserverstärker	572
16.3.5	Selbstphasenmodulation, Kreuzphasenmodulation, Gewinnmodulation im Halbleiter-Laserverstärker	573
16.3.6	Vierwellenmischung im Halbleiter-Laserverstärker	574
16.4	Optische Wellenlängenumsetzer/Frequenzumsetzer	575
16.4.1	Funktion und Vergleich der Wellenlängenumsetzer/Frequenzumsetzer	575

16.4.2	Wellenlängenumsetzung durch Kreuzgewinnmodulation	576
16.4.3	Wellenlängenumsetzung durch Kreuzphasenmodulation	577
16.4.4	Wellenlängenumsetzung durch Vierwellenmischung	578
16.4.5	Wellenlängenumsetzung durch Differenzfrequenzerzeugung	580
16.5	Routing-Elemente mit Selbststeuerung	580
16.5.1	Selbstschalten induziert durch optische Signalleistung	580
16.5.2	Nichtlinearer Richtkoppler	580
16.5.3	Nichtlineares Faserring-Interferometer	581
16.6	Routing-Elemente mit optisch induzierter Fremdsteuerung	582
16.6.1	Optisch gesteuerte optische Schalter	582
16.6.2	Das nichtlineare Faserring-Interferometer als Schalter	582
16.6.3	Interferometer-Schalter mit Halbleiter-Laserverstärker	584
16.6.4	Schalten durch Vierwellenmischung	586
16.6.5	Soliton-Schalter	586
16.7	Optische Bistabilität	587
16.8	Optische Signalregeneration	588
16.9	Optische Phasenkongjugation (Optical-Phase Conjugation)	588
	Spezielle Literatur	589
17	Optische Sender: Grundlagen	594
	<i>H. Burkhard</i>	
17.1	Kristallstruktur	595
17.1.1	Zinkblende-Struktur	595
17.2	Reziprokes Gitter	597
17.3	Bandstruktur	597
17.3.1	Schrödinger-Gleichung, Brillouin-Zone	597
17.3.2	Elektronische Zustände in endlichen Strukturen	600
17.3.3	Leitungs- und Valenzband-Diskontinuitäten	602
17.3.4	Zustandsdichten	602
17.4	Rekombinationsmechanismen	604
17.4.1	Strahlende Übergänge	604
17.4.2	Stimulierte Emission, Verstärkung/Absorption	607
17.4.3	Spontane Emission	609
17.5	Nichtstrahlende Rekombination	612
17.5.1	Defekt-Rekombination (Störstellen-Rekombination)	612
17.5.2	Oberflächen- und Grenzschicht-Rekombination	612
17.5.3	Auger-Rekombination	612
17.6	Brechungsindex	613
17.7	α_H -Parameter	616
17.8	Verspannte Quantenfilme	617
	Spezielle Literatur	620
18	Lumineszenzdioden	622
	<i>R. Oberschmid, G. Bogner</i>	
18.1	Einleitung	622
18.2	Physikalische Grundlagen der Halbleiteremitter	623
18.2.1	Ideale Lumineszenzdiode	623
18.2.2	Reale Lumineszenzdiode	624
18.2.3	Wirkungsgrade von Leuchtdioden	625
18.2.4	Strom-Spannungs-Charakteristik von LEDs	625
18.2.5	Emissionsspektren von LED-Strukturen	626
18.3	Strahlungskopplung	626
18.3.1	Abstrahlcharakteristik, Strahldichte der Leuchtschicht	626
18.3.2	Strahlungsauskopplung aus einer LED-Oberfläche in den Halbraum	626

18.3.3	Strahlungskopplung in Ein- und Vielmodenfasern	627
18.4	Flächenemitter	629
18.4.1	Aufbau des Flächenemitters	629
18.4.2	Größe und Wirkung der Rest-Querleitfähigkeit bei einer Stromeingrenzung	629
18.4.3	Größenordnungen der Wärmeableitung, Stromdichten, Strahlungsdichten	630
18.4.4	Ersatzschaltbild	631
18.4.5	Spannungs-Stromkennlinien	632
18.4.6	Strom-Leistungskennlinie	632
18.4.7	Modulationsverhalten	633
18.4.8	Zuverlässigkeit und ihre Verkettung mit Bauteileigenschaften	634
18.4.9	Weiterentwicklungen der Flächenemitter zur gezielten Strahlungsauskopplung über Fasern	634
18.5	Eigenschaften von Kantenemittern im Vergleich zu Flächenemittern	635
18.5.1	Aufbau von Kantenemittern	635
18.5.2	Mit Flächenemittern vergleichbare Eigenschaften	636
18.5.3	Von Flächenemittern abweichende Eigenschaften	636
18.5.4	Superlumineszenz-Kantenemitter	637
18.6	Sendedioden für Plastikfasern und für Freiraumübertragung	637
18.7	Vergleich der Eigenschaften verschiedener Chip-Bauformen	637
	Spezielle Literatur	638
19	Laserdioden	639
	<i>S. Hansmann</i>	
19.1	Doppelheterostruktur als optischer Wellenleiter	639
19.1.1	Optischer Füllfaktor	641
19.1.2	Laterale Wellenführung	642
19.2	Ausführungsformen gewinn- und indexgeführter Laserdioden	644
19.2.1	Gewinngeführte Laserstrukturen	644
19.2.2	Schwach indexgeführte Laserstrukturen	645
19.2.3	Stark indexgeführte Laserstrukturen	647
19.3	F abry-Perot Laserdioden	648
19.3.1	Anschwingbedingung	648
19.3.2	Beschreibung mit Ratengleichungen	650
19.3.3	Schwellenstrom und Ausgangsleistung	651
19.3.4	Optisches Spektrum	652
19.4	Spektral einmodige Laserdioden	653
19.4.1	DFB Laser	654
19.4.2	Eigenschaften indexgekoppelter DFB Laser	656
19.4.3	Gewinngekoppelte Laser	658
19.4.4	DBR Laser	660
	Spezielle Literatur	660
20	Laserdioden mit Vertikalresonator (VCSELs) für optische Verbindungssysteme	662
	<i>K. J. Ebeling</i>	
20.1	Grundlegende Eigenschaften von VCSELs	663
20.1.1	Laserresonator	664
20.1.2	Stehwellenfeld im VCSEL	666
20.1.3	Schwellengewinn und Photonenlebensdauer	667
20.1.4	Wirkungsgrad und Strom-Spannungs-Charakteristik	669
20.2	Emissionseigenschaften von VCSELs	671
20.2.1	Bauelementstruktur von protonenimplantierten und selektiv oxidierten VCSELs	671

20.2.2	Ausgangscharakteristiken	672
20.2.3	Intensitätsverteilungen der transversalen Moden	673
20.2.4	Emissionswellenlängen transversaler Moden	675
20.2.5	Temperaturverhalten	677
20.2.6	Ein- und zweidimensionale VCSEL-Arrays	679
20.2.7	Kurz- und langwellige VCSELS	681
20.3	Modulations- und Rauschverhalten	681
20.3.1	Ratengleichungen	681
20.3.2	Kleinsignalnäherungen der Ratengleichungen	683
20.3.3	Strommodulation	684
20.3.4	Relatives Intensitätsrauschen	685
20.3.5	Großsignalmodulationseffekte	687
20.3.6	Emissionslinienbreite	689
20.4	Optische Datenverbindungen mit VCSELS	689
20.4.1	Lichteinkopplung in Einmodenfasern	689
20.4.2	Hochbitratige Datenübertragung	691
20.4.3	Rückwirkungsempfindlichkeit	692
20.5	Ausblick	693
	Spezielle Literatur	694
21	Modulations- und Rauschverhalten, Wellenlängenabstimmung und Faserkopplung	696
	<i>M.-C. Amann</i>	
21.1	Modulationsverhalten	696
21.1.1	Kleinsignalmodulationsverhalten	697
21.1.2	Longitudinales Modenspektrum	702
21.2	Rauschverhalten	703
21.2.1	Langevin-Kräfte	704
21.2.2	Intensitätsrauschen	704
21.2.3	Modenverteilungsrauschen	705
21.2.4	Frequenzrauschen und Linienbreite	705
21.3	Rückwirkungsempfindlichkeit	707
21.4	Modenkopplung von Laserdioden	708
21.5	Wellenlängenabstimmung	709
21.5.1	Monolithisch integrierte Laserdioden	710
21.5.2	Laserdioden mit externem Resonator	713
21.6	Wellenlängenstabilisierung	713
21.7	Faserkopplung	715
21.8	Augensicherheit	716
	Spezielle Literatur	718
22	Faserverstärker und Faserlaser	719
	<i>N. Schunk (Abschn. 22.1–22.8), A. Bahl, U. Unrau (Abschn. 22.9)</i>	
22.1	Grundlagen	719
22.1.1	Elektronen-Zustandsniveaus bei Seltene-Erd-Ionen	720
22.2	Modellierung von Faserverstärkern	723
22.2.1	Eingangsparameter für die Modellierung optischer Faserverstärker	726
22.2.2	Gewinn-Charakteristik eines Faserverstärkers	727
22.2.3	Gewinnsättigung	731
22.3	Rauschen des Faserverstärkers	733
22.3.1	Rauschzahl des Faserverstärkers	733
22.4	Kaskadierung von Faserverstärkern	737
22.4.1	Rauschzahl einer Übertragungsstrecke mit einem Verstärker	737
22.4.2	Rauschverhalten einer Übertragungsstrecke mit kaskadierten Faserverstärkern	738

22.5	Eigenschaften Erbium-dotierter Faserverstärker	740
22.5.1	Spektrale Eigenschaften	740
22.5.2	Glättung des Verstärkungsspektrums	743
22.5.3	EDFA für den 1560–1600 nm Bereich (L-Band)	744
22.5.4	EDFA mit hoher Signalausgangsleistung, Doppelmantel EDFA	747
22.5.5	Dynamische Eigenschaften des EDFA	749
22.6	Raman- und Brillouin-Verstärker	751
22.6.1	Gewinn und Rauschverhalten des Raman-Faserverstärkers	752
22.6.2	Gewinn und Rauschverhalten des Brillouin-Faserverstärkers	755
22.6.3	Aufbau von Raman-Faserverstärkern	756
22.7	Faserlaser	759
22.7.1	Faserlaser als Signalquelle	759
22.7.2	Faserlaser als Pumpquelle für Faserverstärker	760
22.7.3	Raman-Faserlaser	761
22.8	Faserverstärker und Faserlaser mit LPE-Gläsern	762
22.8.1	Faserverstärker mit LPE-Gläsern im Bereich 1,3 μm	762
22.8.2	Faserverstärker im Bereich der Telekommunikation	766
22.8.3	Faserlaser im Wellenlängenbereich $\lambda > 2 \mu\text{m}$	767
22.8.4	Faserlaser für den sichtbaren Wellenlängenbereich	767
22.9	Gläser mit niedriger Phononenenergie (LPE-Gläser)	768
22.9.1	Einleitung	768
22.9.2	Verlustmechanismen in Gläsern	769
22.9.3	Messung der Phononenenergie	771
22.9.4	Generelle Eigenschaften von LPE-Gläsern	773
22.9.5	LPE-Glassysteme	773
22.9.6	Vergleich der verschiedenen Glassysteme	777
22.9.7	Entwicklungsstand von LPE-Glasfasern	778
22.9.8	Ausblick	779
	Spezielle Literatur	780
23	Optische Empfänger	784
	<i>H.-G. Bach</i>	
23.1	Optische Empfangsstufen	785
23.1.1	Grundlagen zur optisch/elektrischen Signalwandlung	785
23.1.2	Detektionsempfindlichkeit beim Geradeausempfang	786
23.1.3	Detektionsbandbreite	789
23.1.4	Alternative Konzepte zum einfachen Geradeausempfang	789
23.1.5	Heterodynempfang	790
23.1.6	Prinzipieller Empfängeraufbau: Photodetektor und elektrischer Vorverstärker	790
23.1.7	Bauformen und Eigenschaften von Photodioden	790
23.1.8	Photoleiter als Photodetektoren	796
23.1.9	Einfluß des elektrischen Vorverstärkerrauschens auf die minimal detektierbare Empfangsleistung	796
23.2	Grundsaltungen optischer Empfänger für Breitband- und Schmalbandanwendungen	797
23.3	Vorverstärkerschaltungseigenschaften mit verschiedenen aktiven Elementen	800
23.3.1	Photoempfänger mit FET (Hochimpedanzschaltung, Transimpedanzschaltung)	800
23.3.2	Photoempfänger mit Bipolartransistor	803
23.3.3	Empfänger mit FETs im Vergleich zu bipolaren Transistoren	803
23.4	Hybride und monolithisch integrierte Empfangsstufen (OEICs)	805
23.4.1	Hybride Photoempfänger für 0,85 μm bis 1,55 μm Wellenlänge	805

23.4.2	Hybrid-Empfänger für den 40 Gbit/s-Bitratenbereich	805
23.4.3	Optoelektronische Integration von Empfängerschaltkreisen für 1,3 µm bis 1,55 µm Wellenlänge	806
23.5	Modultechnik optischer Empfänger	811
23.5.1	Mechanischer Aufbau der Chips (Detektor, Verstärker, etc.)	811
23.5.2	Gestaltung der optischen Kopplung zur Photodiode (Faser-Chip-Kopplung)	812
23.5.3	Gestaltung der elektrischen Anschlüsse (HF-Ausgänge, DC-Versorgungen)	813
23.5.4	Hochfrequenzaspekte in der Modultechnik	813
23.5.5	Trends in der Modultechnik	813
23.6	Empfänger mit optischen Vorverstärkern	814
23.7	Empfänger für digitale Signale	815
23.7.1	Aufbau eines digitalen optischen Empfängers	815
23.7.2	Modulationsformate: RZ und NRZ	816
23.7.3	Detektionsempfindlichkeit digitaler Signale	817
23.7.4	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	817
23.7.5	Zusammenhang: Signal-Rausch-Verhältnis und Bitfehlerwahrscheinlichkeit	817
23.7.6	Empfindlichkeit von Photoempfängern für digitale optische Signale, Personick-Theorie	818
23.7.7	Taktrückgewinnung (Schmalbandfilter oder PLL)	820
23.7.8	Entscheider- und Retimingstufe	821
23.7.9	Mehrstufige (multi-level) Modulationsformate	821
23.8	Kohärente optische Empfänger	821
23.8.1	Vergleich: Heterodyn/Homodyn-Empfang vs. Geradeausempfang	822
23.8.2	OEIC-Technologie eines optischen Heterodynempfängers	822
	Spezielle Literatur	823
24	Photonische Kommunikationsnetze	828
	<i>H. R. van As, N. Hanik</i>	
24.1	Entwicklung der optischen Übertragungstechnik	828
24.2	Modulationsverfahren der optischen Übertragungstechnik	829
24.2.1	Mathematische Beschreibung modulierter optischer Signale	830
24.2.2	Leistungsfähigkeit der optischen Modulationsverfahren	832
24.2.3	Direktempfang	832
24.2.4	Überlagerungsempfang	834
24.3	Elektronische Systeme der Übertragungstechnik	836
24.3.1	Die Plesiochrone Digitale Hierarchie (PDH)	836
24.3.2	Die Synchrone Digitale Hierarchie (SDH)	837
24.4	Techniken und Komponenten photonischer Netze	840
24.4.1	Multiplextechniken	840
24.4.2	Komponenten photonischer Netze	840
24.4.3	Optisches Schichtenmodell	843
24.4.4	Struktur photonischer Netze	843
24.4.5	Universelle Glasfasernetze	844
24.5	Breitbandnetze	844
24.5.1	Trends in Telekommunikationsnetzen	844
24.5.2	Netzarchitektur und Netzbereiche	846
24.5.3	Protokollstrukturen	854
24.5.4	Asynchroner Transfer Modus (ATM)	856
24.5.5	Die Internet-Technik	859
24.5.6	IP über WDM	861
24.6	Optische Paketvermittlung	862

24.7	Photonische lokale Netze	864
24.7.1	Photonisches LAN mit einer Sterntopologie	864
24.7.2	Photonisches Multihop-LAN	865
	Spezielle Literatur	866
25	Übertragungsstrecken mit Zeitmultiplex	868
	<i>G. Veith, B. Wedding, H. Bülow</i>	
25.1	Technologien und Begrenzungen hochbitratiger optischer Übertragungssysteme	868
25.1.1	Zeitmultiplexechniken	868
25.1.2	Übertragungsbedingte Systembegrenzungen	869
25.2	Übertragungssysteme mit optischen Verstärkern	872
25.2.1	Signal-Rausch-Verhältnis eines optisch verstärkten Signals	873
25.2.2	Empfänger-Q-Faktor mit EDFAs	875
25.3	Dispersionskompensationsverfahren	876
25.3.1	Dispersionsbegrenzung der Systemreichweiten	876
25.3.2	Passive optische Dispersionskompensationsverfahren	879
25.3.3	Elektronische Entzerrung dispersionsbedingter Störungen	883
25.3.4	Nichtlineare optische Dispersionskompensationsverfahren	886
25.4	Einfluß der Polarisationsmodendispersion	889
25.4.1	Durch PMD hervorgerufene Signalverzerrung	889
25.4.2	Zeitliche Fluktuation der PMD	890
25.4.3	PMD-Grenzwert	891
25.4.4	Die PMD installierter Faserstrecken	892
25.4.5	PMD höherer Ordnung	892
25.4.6	Reduzierung der PMD-Verzerrung	893
25.5	Hochbitratige Übertragung über globale Distanzen	895
	Spezielle Literatur	895
26	Übertragungsstrecken mit Wellenlängenmultiplexbetrieb	898
	<i>P. Krummrich, E. Gottwald, K. Kotten, H. Geiger, C. Glingener, C. Scheerer, G. Fischer</i>	
26.1	Grundlegender Systemaufbau	898
26.2	Komponenten	899
26.2.1	Sender	899
26.2.2	Empfänger	901
26.2.3	Filter	902
26.2.4	Optische Verstärker	904
26.2.5	Übertragungsfasern	906
26.2.6	Dispersionskompensatoren	907
26.3	Systemauslegung	908
26.3.1	Pegel-Management	909
26.3.2	Lineare und nichtlineare Verzerrungen	911
26.3.3	Gezielte Nutzung nichtlinearer Effekte	914
26.3.4	Dispersions-Management	914
26.3.5	Dynamische Systemregelung und Überwachung	915
26.4	Systemvarianten	917
26.4.1	Terrestrische Systeme	917
26.4.2	Metro-Strecken	918
26.4.3	Transozeanische Systeme	918
26.5	ITU-Festlegungen	919
	Spezielle Literatur	920

27 Netze mit Wellenlängenmultiplex	922
<i>A. Gladisch</i>	
27.1 Einführung	922
27.2 Allgemeine Betrachtung von Transportnetzen	922
27.2.1 Die Struktur von Kommunikationsnetzen	922
27.2.2 Funktionale Modellierung von Transportnetzen	923
27.2.3 Die architektonischen Komponenten eines Layer Networks	925
27.3 WDM-Netze	927
27.3.1 Struktur und Elemente der WDM-Netze	927
27.3.2 Das funktionale Modell des WDM-Netzes	930
27.3.3 Einsatzpotentiale von WDM-Systemen und Netzen	931
27.3.4 Offene Probleme von WDM-Netzen	933
27.4 Ausblick	937
Spezielle Literatur	941
Akronyme	942
28 Optische Zugangsnetze	943
<i>N. Gieschen</i>	
28.1 Was sind Zugangsnetze?	943
28.2 Netzinfrastruktur für Zugangsnetze	945
28.2.1 Infrastruktur existierender Telefon-Zugangsnetze	945
28.2.2 Netzinfrastruktur optischer Zugangsnetze	947
28.2.3 Der Einfluß der Netzinfrastruktur auf die Entwicklung der Zugangsnetze	949
28.3 Gestaltung optischer Zugangsnetze	951
28.3.1 Topologien für den Netzzugang	951
28.3.2 Netzelemente und Komponenten	954
28.3.3 Passive optische Netze (PON)	956
28.3.4 Aktive optische Netze (AON)	959
28.3.5 Hybridnetze	960
28.4 Übertragungsverfahren für optische Zugangsnetze	962
28.4.1 Bi-direktionale Übertragung auf Glasfasern	963
28.4.2 Übertragungs- und Kanalzugriffsverfahren für PON	967
28.4.3 Störeinflüsse	973
28.5 Der Glasfaseranschluß	975
28.5.1 Transceiver	976
28.6 Fiber in the loop (FITL) Realisierungen	979
28.6.1 Schmalband-Universalnetz OPAL	979
28.6.2 Breitband-Universalnetz FSAN	981
28.7 Ausblick oder wann kommt FTTH	982
Spezielle Literatur	983
Liste spezieller Abkürzungen	983
29 Optische Datennetze	985
<i>J. Lenge, C. Schwantes</i>	
29.1 Einführung	985
29.2 Eingliederung von Datennetzen in die Netzwerk-Architektur	985
29.3 Das ISO/OSI-Referenzmodell und die IEEE-802-Standards	987
29.4 Datenraten und Leitungscodierung	990
29.5 Topologien	993
29.5.1 Punkt-zu-Punkt-Verbindung	993
29.5.2 Bustopologie	994
29.5.3 Ringtopologie	994

29.5.4	Sterntopologie	994
29.5.5	Baumtopologie	995
29.6	Netzkopplung (Internetworking)	995
29.6.1	Repeater	995
29.6.2	Bridges	995
29.6.3	Router	996
29.6.4	Hubs	996
29.6.5	Switches	997
29.6.6	Gateways	997
29.7	Systemnetze (SANs)	998
29.7.1	Fibre Channel	999
29.7.2	ESCON/SBCON	1001
29.7.3	FICON	1002
29.7.4	Optische Parallelverbindungen	1003
29.8	Lokale Netze (LANs)	1003
29.8.1	Ethernet	1004
29.8.2	Token Ring	1010
29.8.3	FDDI	1016
	Spezielle Literatur	1027
30	Optische Mikrowellentechniken in Zugangnetzen für die Mobilkommunikation	1029
	<i>G. Grosskopf</i>	
30.1	Hybride Glasfaser-Funksysteme (hybrid fibre radio systems, HFR)	1029
30.1.1	HFR-Systeme mit direkter und externer Intensitätsmodulation	1031
30.1.2	Mikrowellenerzeugung mit optischen Heterodynverfahren	1035
30.2	Komponenten für die optische Mikrowellentechnik	1039
30.3	Beispiele von drahtlosen Zugangnetzen mit optischer Mikrowellenerzeugung und Übertragung	1043
	Spezielle Literatur	1044
31	Optische Freiraumverbindungen	1046
	<i>T. Wiesmann, G. Ohm</i>	
31.1	Einführung	1046
31.1.1	Anwendungen in der Satellitenkommunikation	1046
31.1.2	Anforderungen beim Weltraumeinsatz	1048
31.2	Streckenauslegung	1049
31.2.1	Besonderheiten des Freiraumkanals	1049
31.2.2	Übersicht über das Gesamtsystem	1049
31.2.3	Komponenten und Kenngrößen des Kommunikations-Subsystems (Direktempfang)	1051
31.2.4	Komponenten und Kenngrößen des Kommunikations-Subsystems (Überlagerungsempfang)	1053
31.2.5	Optische Baugruppen und optische Aspekte	1057
31.3	Ausrichtung und Nachführung	1059
31.3.1	Gesamtaufbau des Ausricht- und Nachführsubsystems	1059
31.3.2	Verbindungsaufbau	1060
31.3.3	Schwenkmechanismen	1064
31.4	Terminal-Beispiele	1065
31.4.1	Direktempfang bei 850 nm und 1550 nm	1065
31.4.2	Homodynempfang bei 1064 nm	1066
	Spezielle Literatur	1070
	Liste spezieller Abkürzungen	1071

32 Infrarot-Datenübertragung	1072
<i>C. von Helmholtz, U. Krüger</i>	
32.1 Einführung	1072
32.2 Komponenten für die IR Freistrahübertragung und Augensicherheitsaspekte	1073
32.2.1 Strahlenphysikalische Größen	1073
32.2.2 Sendekomponenten	1074
32.2.3 Empfangselemente	1075
32.2.4 Sicherheitsaspekte	1076
32.3 Charakterisierung des optischen Freiraumkanals	1077
32.3.1 Atmosphärische Übertragung	1077
32.3.2 Störungen durch Fremdlicht	1078
32.3.3 Ungerichtete Übertragung	1078
32.3.4 Gerichtete Übertragung	1079
32.4 Modulationsverfahren und Systeme	1080
32.4.1 Modulationsverfahren	1080
32.4.2 Systeme	1081
Spezielle Literatur	1081
Sachverzeichnis	1083