
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 Hochortsauflösende 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 Faseranschlußfilter | 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 Übertragungstrecke mit einem Verstärker | 737 |
| 22.4.2 | Rauschverhalten einer Übertragungstrecke 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 Empfänger Aufbau: 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 |