

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Allgemeines | 13 |
| 1.1 | Dämpfung und Leistung | 13 |
| 1.2 | Vorsätze bei Einheiten | 14 |
| 1.3 | Umrechnungsfaktoren zwischen Längeneinheiten | 14 |
| 1.4 | Verzeichnis wichtiger Abkürzungen | 14 |
| 1.5 | Formelzeichen und Maßeinheiten | 23 |
| 1.6 | Fachbegriffe | 27 |
| 2 | Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik | 49 |
| 2.1 | Prinzip der optischen Informationsübertragung | 50 |
| 2.2 | Wellenlänge, Frequenz und Geschwindigkeit | 50 |
| 2.3 | Spektrum der elektromagnetischen Wellen | 51 |
| 2.4 | Brechungsgesetz, Totalreflexion und numerische Apertur | 51 |
| 2.5 | Dämpfung | 53 |
| 2.6 | Beispiele für Dämpfungskoeffizienten | 53 |
| 2.7 | Dämpfungskoeffizient als Funktion der Wellenlänge | 54 |
| 3 | Kopplung von optischen Komponenten | 55 |
| 3.1 | Kopplung Sender an Lichtwellenleiter | 55 |
| 3.2 | Koppelverluste zwischen Lichtwellenleitern | 55 |
| 3.2.1 | Multimode-Lichtwellenleiter | 56 |
| 3.2.2 | Singlemode-Lichtwellenleiter | 58 |
| 3.2.3 | Dämpfungen bei Kopplung unterschiedlicher Singlemode-LWL | 59 |
| 3.3 | Reflexionen | 60 |
| 3.3.1 | Steckerstirnflächengeometrien | 61 |
| 3.3.2 | Größenordnungen typischer Reflexionen | 62 |
| 3.4 | Stufen im Rückstreudiagramm | 62 |
| 3.5 | Koppelverluste, Reflexionen und Stufen | 64 |
| 4 | Lichtwellenleiter-Steckverbinder | 66 |
| 4.1 | Grundlagen | 66 |
| 4.2 | Normung | 68 |
| 4.3 | Kernzentrierung | 69 |
| 4.3.1 | Toleranzen und radialer Versatz | 69 |
| 4.3.2 | Ablageverfahren | 70 |
| 4.3.3 | Prägeverfahren (aktive Kernzentrierung) | 70 |
| 4.4 | Herkömmliche Steckerkonzepte | 72 |
| 4.4.1 | Bauformen | 72 |
| 4.4.2 | Crimp & Cleave-Verfahren | 74 |
| 4.4.3 | Stecker mit Fusionsspleißgerät anspleißen | 74 |
| 4.4.4 | Stecker mit mechanischem Spleiß konfektionieren | 76 |
| 4.4.5 | Linienstecker | 76 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5 | Neue Steckerkonzepte | 77 |
| 4.5.1 | Das URM-Stecksystem..... | 77 |
| 4.5.2 | Steckverbinder mit geringen Einfügedämpfungen | 78 |
| 4.5.3 | High-Power-Stecker | 79 |
| 4.6 | Sorgfalt im Umgang mit Steckverbindern | 80 |
| 4.6.1 | Auswirkungen von Verunreinigungen | 80 |
| 4.6.2 | Reinigung | 81 |
| 4.6.3 | Lichtwellenleiter-Mikroskope | 82 |
| 4.6.4 | Automatische Stirnflächenanalyse | 83 |
| 5 | Spleißtechnik | 86 |
| 5.1 | Prinzip des Spleißens | 86 |
| 5.2 | Praktische Hinweise | 87 |
| 5.3 | Grenzwerte für Spleißdämpfungen und Fehlerquellen | 88 |
| 5.4 | Passive Kernzentrierung..... | 89 |
| 5.5 | Aktive Kernzentrierung | 89 |
| 5.5.1 | LID-Verfahren..... | 89 |
| 5.5.2 | PAS-Verfahren..... | 90 |
| 5.6 | Mechanischer Spleiß | 91 |
| 5.7 | Gerätetechnik | 92 |
| 5.8 | Glasfaser-Muffen | 94 |
| 6 | Lichtwellenleiter-Fasern | 96 |
| 6.1 | Herstellung..... | 96 |
| 6.2 | Normung..... | 97 |
| 6.3 | Stufenprofil-Lichtwellenleiter | 99 |
| 6.3.1 | Physikalische Grundlagen..... | 99 |
| 6.3.2 | Kunststoff-Lichtwellenleiter | 99 |
| 6.3.3 | Polymer Cladded Fiber | 100 |
| 6.4 | Gradientenprofil-Lichtwellenleiter | 101 |
| 6.4.1 | Physikalische Grundlagen..... | 101 |
| 6.4.2 | Typische Parameter herkömmlicher Gradientenprofil-LWL | 103 |
| 6.4.3 | Gradientenprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil..... | 104 |
| 6.5 | Singlemode-Lichtwellenleiter | 105 |
| 6.5.1 | Physikalische Grundlagen..... | 105 |
| 6.5.2 | Eigenschaften des Singlemode-Lichtwellenleiters | 106 |
| 6.5.3 | Standard-Singlemode-Lichtwellenleiters (G.652)..... | 107 |
| 6.5.4 | Singlemode-LWL mit reduziertem Wasserpeak (G.652.C&D) | 109 |
| 6.5.5 | Dispersionsverschobener Singlemode-Lichtwellenleiter (G.653) | 110 |
| 6.5.6 | Lichtwellenleiter mit verschobener Grenzwellenlänge (G.654) | 111 |
| 6.5.7 | Non-Zero Dispersion Shifted Lichtwellenleiter (G.655) | 111 |
| 6.5.8 | NZDSF für erweiterten Wellenlängenbereich (G.656) | 113 |
| 6.5.9 | Krümmungsunempfindlicher Lichtwellenleiter (G.657) | 114 |
| 6.5.10 | Polarisationserhaltender Singlemode-Lichtwellenleiter..... | 118 |
| 6.5.11 | Singlemode-LWL für geringe Übertragungswellenlängen | 119 |
| 6.6 | Photonische Kristallfasern | 120 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7 | Lichtwellenleiter-Kabel | 122 |
| 7.1 | Nomenklatur der Faser- und Kabelcodierung | 122 |
| 7.2 | Lichtwellenleiter-Ader | 124 |
| 7.3 | Lichtwellenleiter-Kabel | 126 |
| 7.3.1 | Kabelaufbau | 126 |
| 7.3.2 | Bauformen..... | 126 |
| 7.3.3 | Verlegehinweise | 128 |
| 7.4 | Verkabelungstechnik | 129 |
| 7.5 | Rohrsysteme | 129 |
| 7.6 | Normen | 130 |
| | | |
| 8 | Dispersion | 131 |
| 8.1 | Physikalische Grundlagen | 131 |
| 8.2 | Dispersion im Multimode-Lichtwellenleiter | 132 |
| 8.2.1 | Modendispersion im Stufenprofil-Lichtwellenleiter | 132 |
| 8.2.2 | Profildispersion im Parabelprofil-Lichtwellenleiter | 132 |
| 8.3 | Materialdispersion..... | 133 |
| 8.3.1 | Physikalische Grundlagen..... | 133 |
| 8.3.2 | Materialdispersion im Multimode-Lichtwellenleiter | 135 |
| 8.3.3 | Materialdispersion im Singlemode-Lichtwellenleiter | 136 |
| 8.4 | Dispersion im Singlemode-Lichtwellenleiter | 136 |
| 8.4.1 | Wellenleiterdispersion | 136 |
| 8.4.2 | Chromatische Dispersion | 136 |
| 8.4.3 | Polarisationsmodendispersion | 141 |
| 8.5 | Dispersionskompensation | 146 |
| 8.5.1 | Kompensation der chromatischen Dispersion | 146 |
| 8.5.2 | Kompensation der Polarisationsmodendispersion | 150 |
| 8.5.3 | Zusammenfassung | 150 |
| | | |
| 9 | Sender für die optische Nachrichtenübertragung | 151 |
| 9.1 | Bauformen | 151 |
| 9.1.1 | Lumineszenzdioden | 152 |
| 9.1.2 | Laserdioden | 153 |
| 9.2 | Eigenschaften von Laserdioden | 154 |
| 9.2.1 | Kennlinie | 154 |
| 9.2.2 | Optisches Spektrum..... | 155 |
| 9.2.3 | Abstrahlcharakteristik..... | 155 |
| 9.2.4 | Temperaturverhalten..... | 156 |
| 9.2.5 | Module | 157 |
| 9.2.6 | Modulationsverhalten | 157 |
| 9.2.7 | Rauschen und Rückwirkungsempfindlichkeit..... | 158 |
| 9.2.8 | Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang..... | 158 |
| 9.3 | Trends..... | 158 |
| | | |
| 10 | Empfänger für die optische Nachrichtenübertragung | 160 |
| 10.1 | PIN-Photodioden | 160 |
| 10.2 | Lawinen-Photodioden | 161 |
| 10.3 | Eigenschaften von Empfängerdiode..... | 162 |
| 10.4 | Transceiver..... | 162 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11 | Lichtwellenleiter-Messtechnik | 164 |
| 11.1 | Messhilfsmittel | 164 |
| 11.2 | Leistungsmessung | 165 |
| 11.3 | Dämpfungsmessung | 166 |
| 11.3.1 | Messverfahren | 166 |
| 11.3.2 | Prüf schnüre | 167 |
| 11.3.3 | Allgemeine Hinweise zur LWL-Messung nach ISO/IEC 14763-3 | 168 |
| 11.3.4 | Messtechnik | 168 |
| 11.4 | Optische Rückstreuung | 169 |
| 11.4.1 | Grundlagen der Rückstreuung | 169 |
| 11.4.2 | Durchführung der Rückstreuung | 172 |
| 11.4.3 | Rückstreuung nach DIN ISO/IEC 14763-3 | 173 |
| 11.4.4 | Längenmessung nach DIN ISO/IEC 14763-3 | 175 |
| 11.4.5 | Anforderungen an Vor- und Nachlauf-LWL | 175 |
| 11.4.6 | Geisterreflexionen | 176 |
| 11.4.7 | Auswertung problematischer Rückstreudiagramme | 177 |
| 11.4.8 | Praktische Hinweise zur Rückstreuung | 180 |
| 11.4.9 | Messtechnik | 181 |
| 11.4.10 | Auswertungssoftware | 182 |
| 11.5 | Abnahmevorschriften | 184 |
| 11.5.1 | Allgemeine Hinweise | 184 |
| 11.5.2 | Multimode-LWL | 185 |
| 11.5.3 | Singlemode-LWL | 185 |
| 11.6 | Messung der Bandbreite | 186 |
| 11.6.1 | Anregung mit Lumineszenzdiode | 187 |
| 11.6.2 | Anregung mit Laserdiode: RML-Bandbreite | 187 |
| 11.6.3 | Anregung mit Laserdiode: EMB-Bandbreite | 187 |
| 11.7 | Messung der chromatischen Dispersion | 188 |
| 11.7.1 | Verfahren A: Phasenverschiebung | 190 |
| 11.7.2 | Verfahren C: Differenzielle Phasenverschiebung | 190 |
| 11.7.3 | Verfahren B: Spektrale Gruppenlaufzeit im Zeitbereich | 191 |
| 11.7.4 | Multiples Wellenlängen-OTDR mit CD-Messoption | 191 |
| 11.7.5 | Auswertung und Interpretation der Messergebnisse | 193 |
| 11.7.6 | Praktische Hinweise zur CD-Messung | 193 |
| 11.8 | Messung der Polarisationsmodendispersion | 193 |
| 11.8.1 | Methode mit Festanalysator | 194 |
| 11.8.2 | Auswertung der Stokes-Parameter | 195 |
| 11.8.3 | Traditionelle interferometrische Methode (TINTY) | 196 |
| 11.8.4 | Verallgemeinerte interferometrische Methode (GINTY) | 198 |
| 11.8.5 | Ortsaufgelöste PMD-Messung | 200 |
| 11.8.6 | Auswertung und Interpretation der Messergebnisse | 201 |
| 11.8.7 | Praktische Hinweise zur PMD-Messung | 201 |
| 11.9 | Optische Spektralanalyse | 202 |
| 11.9.1 | Spektralbereiche und Kanalabstände | 202 |
| 11.9.2 | Wirkungsweise des optischen Spektralanalysators | 202 |
| 11.9.3 | Linienbreite und Auflösungsvermögen | 204 |
| 11.9.4 | Messtechnik | 205 |
| 11.10 | Spektrale Dämpfungsmessung | 207 |
| 11.11 | Messungen an verzweigten Netzen | 207 |
| 11.11.1 | Leistungsmessung und Dämpfungsmessung | 208 |
| 11.11.2 | Messung der optischen Rückflusdämpfung | 208 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 11.11.3 | Leistungsmessungen während des Betriebes | 209 |
| 11.11.4 | Rückstreuungsmessung am PON nach der Installation | 209 |
| 11.11.5 | Rückstreuungsmessung am PON während des Betriebes | 211 |
| 11.11.6 | Interpretation Rückstreudiagramm eines verzweigten Netzes | 214 |
| 11.11.7 | Messtechnik | 219 |
| 11.12 | Fasersensorik | 220 |
| 11.13 | Bitfehlerraten-Messung | 222 |
| 11.14 | Messung der zurück fließenden Leistungen | 223 |
| 11.15 | Messung geometrischer und optischer Parameter | 224 |
| 11.16 | Übersicht Messverfahren | 224 |
| 12 | Koppler | 226 |
| 12.1 | Definitionen | 226 |
| 12.2 | Multimode-Koppler | 227 |
| 12.3 | Singlemode-Schmelzkoppler | 228 |
| 12.3.1 | Herstellung von Singlemode-Schmelzkopplern | 228 |
| 12.3.2 | Typen von Singlemode-Schmelzkopplern..... | 230 |
| 12.4 | Planare Wellenleiter-Strukturen | 231 |
| 12.5 | Koppler für FTTx | 232 |
| 13 | Optische Verstärker | 234 |
| 13.1 | Notwendigkeit des Einsatzes optischer Verstärker..... | 234 |
| 13.2 | Faserverstärker | 235 |
| 13.3 | Weitere Verstärkertypen | 237 |
| 13.4 | Einsatzfälle für Faserverstärker | 238 |
| 13.5 | Genormte Streckenlängen | 238 |
| 13.6 | Parameter von Strecken mit optischen Verstärkern | 239 |
| 14 | Faseroptische Bauelemente | 240 |
| 14.1 | Elementare Bauelemente | 240 |
| 14.1.1 | Taper | 240 |
| 14.1.2 | Dämpfungsglieder..... | 241 |
| 14.1.3 | Selfoc-Linsen..... | 241 |
| 14.1.4 | Monitoring-Module..... | 242 |
| 14.2 | Optische Drehübertrager | 242 |
| 14.2.1 | Drehübertrager mit begrenzter Anzahl von Umdrehungen..... | 243 |
| 14.2.2 | Drehübertrager mit unbegrenzter Anzahl von Umdrehungen .. | 243 |
| 14.3 | Nichtreziproke Bauelemente | 245 |
| 14.3.1 | Optischer Isolator..... | 245 |
| 14.3.2 | Optischer Zirkulator | 246 |
| 14.4 | Wellenlängenselektive Bauelemente | 247 |
| 14.4.1 | Multiplexer und Demultiplexer | 247 |
| 14.4.2 | Dünnschichtfilter | 248 |
| 14.4.3 | Faser-Bragg-Gitter (FBG) | 248 |
| 14.4.4 | Arrayed Waveguide Gratings (AWG) | 250 |
| 14.4.5 | Add-Drop-Multiplexer | 251 |
| 14.4.6 | Reflektoren..... | 251 |
| 14.4.7 | Interleaver | 252 |
| 14.4.8 | Bauelemente für flexible optische Netze | 252 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 15 | Wellenlängenmultiplex | 255 |
| 15.1 | Klassisches Wellenlängenmultiplex | 255 |
| 15.2 | Grobes Wellenlängenmultiplex | 256 |
| 15.2.1 | Spezifikation der Übertragungswellenlängen..... | 257 |
| 15.2.2 | Spezifikation von CWDM-Systemen | 257 |
| 15.2.3 | DWDM-over-CWDM-Technik | 259 |
| 15.2.4 | Einsatzfälle für die CWDM-Technik..... | 260 |
| 15.3 | Dichtes Wellenlängenmultiplex | 261 |
| 15.3.1 | Übertragungskapazität der Faser | 261 |
| 15.3.2 | Spezifikation der Übertragungsfrequenzen | 262 |
| 15.3.3 | Vierwellenmischung | 264 |
| 15.3.4 | Realisierung eines DWDM-Systems | 265 |
| 15.4 | Vergleich der Wellenlängenmultiplex-Technologien | 265 |
| 16 | Faser bis zum Teilnehmer | 267 |
| 16.1 | Netzstrukturen | 267 |
| 16.1.1 | Ethernet-Punkt-zu-Punkt (EP2P) | 268 |
| 16.1.2 | Punkt-zu-Multipunkt (P2MP) | 268 |
| 16.1.3 | Zusammenfassung und Vergleich | 269 |
| 16.2 | Übertragung der Dienste | 270 |
| 16.2.1 | Triple Play über zwei Fasern P2P („Zweifaserlösung“) | 270 |
| 16.2.2 | Triple Play über eine Faser P2P („Einfaserlösung“) | 270 |
| 16.2.3 | Passives optisches Netz, eine Faser pro Teilnehmer | 271 |
| 16.2.4 | Passives optisches Netz, zwei Fasern pro Teilnehmer | 272 |
| 16.2.5 | PON, zwei Fasern pro Teilnehmer, Video separat..... | 272 |
| 16.2.6 | Mischung Punkt-zu-Punkt und Punkt-zu-Multipunkt | 272 |
| 16.2.7 | Weitere Strukturen..... | 273 |
| 16.3 | Videosignale | 274 |
| 16.4 | Offene Infrastruktur..... | 274 |
| 16.5 | Wellenlängenbelegung bei FTTx | 275 |
| 16.6 | Normen | 276 |
| 16.7 | Passive optische Netze der nächsten Generation (NG-PON)..... | 277 |
| 16.7.1 | 10GEPON (10 Gbit/s-Ethernet-PON) und 10GPON (XPON) .. | 277 |
| 16.7.2 | WDM-PON | 278 |
| 16.8 | Ausblick | 279 |
| 16.9 | Komponenten | 281 |
| 16.9.1 | Steckverbinder | 281 |
| 16.9.2 | Lichtwellenleiter | 281 |
| 16.9.3 | Kabel..... | 281 |
| 16.9.4 | Sender | 282 |
| 16.9.5 | Empfänger | 283 |
| 16.9.6 | Optische Verstärker..... | 283 |
| 16.9.7 | Komponenten für Haus- bzw. Wohnungseinsatz | 283 |
| 16.9.8 | Weitere Komponenten | 285 |
| 16.10 | Faserabschluss beim Teilnehmer | 285 |
| 16.10.1 | Pigtail mit Fusionsspleißgerät anspleißen | 285 |
| 16.10.2 | Verlegung vorkonfektionierter Kabel | 286 |
| 16.11 | Empfehlungen | 286 |
| 16.11.1 | VDE-Anwendungsempfehlung | 286 |
| 16.11.2 | Empfehlung der BAKOM | 286 |
| 16.12 | Managementsoftware für FTTx | 288 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 17 | Optische Übertragungssysteme | 289 |
| 17.1 | Planung..... | 289 |
| 17.1.1 | Allgemeine Regeln | 289 |
| 17.1.2 | Planung des Dämpfungsbudgets | 290 |
| 17.1.3 | Pegelplanung | 292 |
| 17.1.4 | Systemplanung | 293 |
| 17.1.5 | Zusammenfassung | 295 |
| 17.2 | Planung von FTTx-Netzen | 297 |
| 17.3 | Ethernet | 298 |
| 17.3.1 | Gigabit-Ethernet..... | 298 |
| 17.3.2 | 10-Gigabit-Ethernet | 299 |
| 17.3.3 | 40- und 100-Gigabit-Ethernet | 299 |
| 17.4 | Modulationsverfahren..... | 300 |
| 17.4.1 | Herkömmliche Modulationsverfahren..... | 300 |
| 17.4.2 | Grundlagen Modulation | 301 |
| 17.4.3 | Höherwertige Modulationsverfahren | 302 |
| 17.5 | LWL-Überwachungssysteme | 304 |
| 17.5.1 | Dunkelfasermessung | 304 |
| 17.5.2 | Messung der aktiven Faser | 305 |
| 17.6 | Optische Freiraumübertragungssysteme | 305 |
| 17.7 | Trends | 307 |
| 17.7.1 | 100-Gigabit-Technik | 307 |
| 17.7.2 | Bauelemente-Integration | 308 |
| 17.7.3 | Energieeffiziente optische Netze | 308 |
| 18 | Weitere Aspekte | 309 |
| 18.1 | Nichtlineare Effekte..... | 309 |
| 18.2 | Solitonen | 309 |
| 18.3 | Arbeitssicherheit | 310 |
| 18.3.1 | Allgemeine Hinweise zum Umgang mit Fasern und Licht..... | 310 |
| 18.3.2 | Physikalische Grundlagen..... | 311 |
| 18.3.3 | Klassifizierung | 311 |
| 18.3.4 | Schutzmaßnahmen | 313 |
| 18.4 | Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Lichtwellenleitern | 313 |
| 18.4.1 | Materialeigenschaften | 313 |
| 18.4.2 | Durchlaufzeit | 314 |
| 18.4.3 | Abschätzung der Lebensdauer | 315 |
| 19 | Normen..... | 318 |
| 20 | Literatur..... | 320 |
| 21 | Stichwortverzeichnis..... | 322 |