

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines</b> .....	<b>13</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik</b> .....	<b>49</b>
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
<b>3</b>	<b>Kopplung von optischen Komponenten</b> .....	<b>55</b>
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
<b>4</b>	<b>Lichtwellenleiter-Steckverbinder</b> .....	<b>66</b>
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
<b>5</b>	<b>Spleißtechnik .....</b>	<b>86</b>
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
<b>6</b>	<b>Lichtwellenleiter-Fasern .....</b>	<b>96</b>
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

<b>7</b>	<b>Lichtwellenleiter-Kabel</b> .....	<b>122</b>
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
<b>8</b>	<b>Dispersion</b> .....	<b>131</b>
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
<b>9</b>	<b>Sender für die optische Nachrichtenübertragung</b> .....	<b>151</b>
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
<b>10</b>	<b>Empfänger für die optische Nachrichtenübertragung</b> .....	<b>160</b>
10.1	PIN-Photodioden .....	160
10.2	Lawinen-Photodioden .....	161
10.3	Eigenschaften von Empfängerdioden .....	162
10.4	Transceiver.....	162

<b>11</b>	<b>Lichtwellenleiter-Messtechnik</b>	<b>164</b>
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
<b>12</b>	<b>Koppler .....</b>	<b>226</b>
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
<b>13</b>	<b>Optische Verstärker .....</b>	<b>234</b>
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
<b>14</b>	<b>Faseroptische Bauelemente .....</b>	<b>240</b>
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

<b>15</b>	<b>Wellenlängenmultiplex</b> .....	<b>255</b>
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
<b>16</b>	<b>Faser bis zum Teilnehmer</b> .....	<b>267</b>
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

<b>17</b>	<b>Optische Übertragungssysteme</b>	<b>289</b>
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
<b>18</b>	<b>Weitere Aspekte</b>	<b>309</b>
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
<b>19</b>	<b>Normen</b>	<b>318</b>
<b>20</b>	<b>Literatur</b>	<b>320</b>
<b>21</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>322</b>