

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	Linsenstecker	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 Empfängerdioden	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	Rückstreumessung am PON nach der Installation	209
11.11.5	Rückstreumessung 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