

# Inhalt

1	Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik . . . . .	11
1.1	Physikalische Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik . . . . .	11
1.1.1	Prinzip der optischen Informationsübertragung . . . . .	12
1.1.2	Vor- und Nachteile der LWL-Übertragung . . . . .	13
1.1.3	Elektromagnetisches Spektrum . . . . .	15
1.1.4	Signalausbreitung im Lichtwellenleiter . . . . .	17
1.1.5	Dämpfung im Lichtwellenleiter . . . . .	20
1.1.6	Zusammenfassung . . . . .	27
1.2	Lichtwellenleiter-Typen und Dispersion . . . . .	28
1.2.1	Stufenprofil-Lichtwellenleiter und Modendispersion . . . . .	28
1.2.2	Gradientenprofil-Lichtwellenleiter und Profildispersion . . . . .	33
1.2.3	Vergrößerung Bandbreite-Längen-Produkt . . . . .	39
1.2.4	Biegeunempfindliche Multimode-LWL . . . . .	45
1.2.5	Standard-Singlemode-LWL und chromatische Dispersion . . . . .	47
1.2.6	Singlemode-Lichtwellenleiter mit reduziertem Wasserpeak . . . . .	56
1.2.7	Dispersionsverschobener Singlemode-Lichtwellenleiter . . . . .	57
1.2.8	Cut-off shifted Lichtwellenleiter . . . . .	58
1.2.9	Non-zero dispersion shifted Lichtwellenleiter . . . . .	59
1.2.10	NZDSF für erweiterten Wellenlängenbereich . . . . .	62
1.2.11	Lichtwellenleiter mit reduzierter Biegeempfindlichkeit . . . . .	62
1.2.12	Kategorien von Singlemode-LWL . . . . .	66
1.2.13	Trends bei der Faserentwicklung . . . . .	67
1.2.14	Polarisationsmodendispersion (PMD) . . . . .	72
1.2.15	Alterung von Lichtwellenleitern . . . . .	84
1.2.16	Zusammenfassung . . . . .	94
1.3	Optoelektronische Bauelemente . . . . .	95
1.3.1	Elektrooptische Wechselwirkungen im Halbleiter . . . . .	96
1.3.2	Sender und Empfänger . . . . .	98
1.3.3	Transceiver . . . . .	99
1.4	Literatur . . . . .	105
2	Lösbare Verbindungstechnik von Lichtwellenleitern . . . . .	107
2.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	107

2.2	Koppelverluste zwischen Lichtwellenleitern . . . . .	108
2.2.1	Verluste zwischen Multimode-LWL . . . . .	109
2.2.2	Verluste zwischen Singlemode-LWL . . . . .	110
2.3	Stirnflächenkontakt . . . . .	111
2.3.1	Stecker mit ebener Stirnfläche . . . . .	111
2.3.2	Stecker mit physischem Kontakt . . . . .	112
2.3.3	Schrägschliffstecker . . . . .	113
2.3.4	APC/HRL-Stecker . . . . .	114
2.4	Verdrehsicherung . . . . .	114
2.5	Stift-Hülse-Prinzip . . . . .	115
2.6	Verringerung der Steckerdämpfung . . . . .	117
2.6.1	Ablageverfahren . . . . .	117
2.6.2	Prägeverfahren . . . . .	118
2.7	Zur Kompatibilität von geprägten und getunten 0,1 dB-Steckern . . . . .	120
2.7.1	Einfluss der Technologie auf die geometrischen Parameter . . . . .	120
2.7.2	Mischung von geprägten Steckern mit getunten Steckern . . . . .	122
2.8	Dämpfungs- und Reflexionsklassen . . . . .	124
3	Lichtwellenleiter-Messtechnik . . . . .	127
3.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	127
3.2	Messung von Leistungen und Dämpfungen . . . . .	129
3.2.1	Definierte Anregung des Multimode-LWL . . . . .	129
3.2.2	Leistungsmessung . . . . .	130
3.2.3	Dämpfungsmessung . . . . .	132
3.2.4	Zusammenfassung . . . . .	139
3.3	Optische Rückstreuung . . . . .	139
3.3.1	Prinzip der Rückstreuung . . . . .	140
3.3.2	Rückstreuurve als Messergebnis . . . . .	142
3.3.3	Interpretation der Ereignistabelle . . . . .	148
3.3.4	Reflektierende Ereignisse . . . . .	150
3.3.5	Überlagerung mehrerer Reflexionen . . . . .	151
3.3.6	Zusammenfassung . . . . .	152
3.4	Analyse von Rückstreudiagrammen . . . . .	152
3.4.1	Interpretation der Rückstreuurve . . . . .	152
3.4.2	Auswertung problematischer Rückstreudiagramme . . . . .	156
3.4.3	Kopplung von Singlemode-LWL mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern . . . . .	161
3.4.4	Geisterreflexionen . . . . .	165
3.4.5	Zusammenfassung . . . . .	169

4	Fiber to the Home/Building . . . . .	171
4.1	Anforderungen an die Bandbreite . . . . .	171
4.2	Netzstrukturen . . . . .	174
4.2.1	Ethernet-Punkt-zu-Punkt (EP2P) . . . . .	174
4.2.2	Punkt-zu-Multi-Punkt . . . . .	175
4.2.3	Vergleich der Varianten . . . . .	181
4.3	Offene Infrastruktur . . . . .	182
4.4	Wellenlängenbelegung bei FTTx . . . . .	182
4.5	Normen . . . . .	183
4.5.1	Gigabit-PON . . . . .	184
4.5.2	Gigabit-Ethernet-PON . . . . .	184
4.5.3	Next-Generation PON . . . . .	185
4.5.4	Downstream 10 Gbit/s . . . . .	185
4.5.5	TWDM-PON . . . . .	186
4.5.6	Wellenlängenmultiplex-PON (P2P WDM-PON) . . . . .	187
4.5.7	Zusammenfassung FTTx-Varianten . . . . .	190
5	Planen von LWL-Strecken aus physikalischer Sicht . . . . .	191
5.1	Allgemeine Regeln . . . . .	191
5.2	Planung des Dämpfungsbudgets . . . . .	192
5.3	Pegeldiagramm . . . . .	195
5.4	Dispersion in Lichtwellenleitern . . . . .	198
5.4.1	Chromatische Dispersion . . . . .	198
5.4.2	Dispersionstoleranz . . . . .	200
5.4.3	Kompensation der chromatischen Dispersion . . . . .	201
5.4.4	Chromatische Dispersion bei Fasermischungen . . . . .	203
5.5	Systemplanung . . . . .	203
5.5.1	Einkanalübertragung . . . . .	203
5.5.2	Grobes Wellenlängenmultiplex . . . . .	205
5.5.3	Dichtes Wellenlängenmultiplex . . . . .	206
5.6	Zusammenfassung . . . . .	207
6	Trends der optischen Nachrichtenübertragung . . . . .	209
6.1	Wichtige aktuelle Entwicklungen . . . . .	209
6.2	Dichtes Wellenlängenmultiplex . . . . .	210
6.2.1	Zwei Wege zum hochbitratigen System . . . . .	210
6.2.2	Grundlagen Dichtes Wellenlängenmultiplex . . . . .	213
6.2.3	Bandbreite und Wellenlänge . . . . .	214
6.2.4	Genormtes Raster . . . . .	216
6.2.5	Anforderungen an die Komponenten . . . . .	218

6.3	Grobes Wellenlängenmultiplex . . . . .	230
6.3.1	Einsatzfälle für Grobes Wellenlängenmultiplex . . . . .	230
6.3.2	Normung Grobes Wellenlängenmultiplex . . . . .	232
6.3.3	Erschließung des gesamten Wellenlängenbereiches . . . . .	233
6.3.4	Anforderungen an die Komponenten . . . . .	235
6.3.5	DWDM-over-CWDM-Technik . . . . .	236
6.3.6	Zusammenfassung . . . . .	237
6.4	Passives und aktives Wellenlängenmultiplex . . . . .	239
6.5	Probleme beim Übergang zu höheren Datenraten . . . . .	240
6.6	Bauelemente für flexible optische Netze . . . . .	241
6.7	Weiterentwicklung der Modulationsverfahren . . . . .	242
6.7.1	Grundlagen der Modulation . . . . .	242
6.7.2	Herkömmliche Modulation . . . . .	243
6.7.3	Höherwertige Modulation . . . . .	244
6.7.4	Beispiel für Modulationsverfahren . . . . .	244
6.7.5	Fortgeschrittene Übertragungsverfahren . . . . .	247
6.8	Datenraten größer als 100 Gbit/s . . . . .	248
6.9	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	249
7	Anhang . . . . .	251
7.1	Abkürzungen . . . . .	251
7.2	Formelzeichen und Maßeinheiten . . . . .	256
7.3	Fachbegriffe . . . . .	259
	Register . . . . .	272
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	278
	Tabellenverzeichnis . . . . .	285