

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort zur 9. Auflage

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik</b> .....	<b>1</b>
	Dieter Eberlein	
1.1	Physikalische Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik .....	1
1.1.1	Prinzip der optischen Informationsübertragung .....	2
1.1.2	Vor- und Nachteile der LWL-Übertragung .....	3
1.1.3	Elektromagnetisches Spektrum .....	5
1.1.4	Signalausbreitung im Lichtwellenleiter .....	6
1.1.5	Dämpfung im Lichtwellenleiter .....	10
1.1.5.1	Definition der Dämpfung .....	10
1.1.5.2	Dämpfungseffekte im Lichtwellenleiter .....	12
1.1.6	Zusammenfassung .....	16
1.2	Lichtwellenleiter-Typen und Dispersion .....	16
1.2.1	Stufenprofil-Lichtwellenleiter und Modendispersion .....	17
1.2.1.1	Strahlausbreitung im Stufenprofil-LWL .....	17
1.2.1.2	Dispersion im Stufenprofil-LWL .....	18
1.2.1.3	Typen von Stufenprofil-LWL .....	19
1.2.2	Gradientenprofil-Lichtwellenleiter und Profildispersion .....	22
1.2.2.1	Strahlausbreitung im Gradientenprofil-LWL .....	22
1.2.2.2	Dispersion im Gradientenprofil-LWL .....	23
1.2.2.3	Numerische Apertur im Gradientenprofil-LWL .....	24
1.2.2.4	Typen von Gradientenprofil-LWL .....	25
1.2.3	Vergrößerung Bandbreite-Längen-Produkt .....	28
1.2.3.1	Parabelprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil .....	28
1.2.3.2	Materialdispersion .....	29
1.2.4	Standard-Singlemode-Lichtwellenleiter und chromatische Dispersion ...	33
1.2.4.1	Wellenausbreitung im Singlemode-LWL .....	34
1.2.4.2	Dispersion im Singlemode-LWL .....	35
1.2.4.3	Wellenleiter-Dispersion .....	35
1.2.4.4	Chromatische Dispersion .....	36
1.2.4.5	Eigenschaften des Singlemode-LWL .....	38
1.2.4.6	Singlemode-LWL-Typen .....	40
1.2.4.7	Parameter Standard-Singlemode-LWL .....	40
1.2.5	Singlemode-LWL mit reduziertem Wasserpeak .....	42
1.2.6	Dispersionsverschobener Singlemode-LWL .....	43
1.2.7	Cut-off shifted Lichtwellenleiter .....	44
1.2.8	Non-zero dispersion shifted Lichtwellenleiter .....	44
1.2.9	NZDSF für erweiterten Wellenlängenbereich .....	47

1.2.10	Lichtwellenleiter mit reduzierter Krümmungsempfindlichkeit .....	48
1.2.10.1	Klasse A .....	49
1.2.10.2	Klasse B .....	50
1.2.10.3	Praktische Aspekte .....	51
1.2.11	Polarisationsmodendispersion (PMD) .....	52
1.2.11.1	PMD-Effekt.....	53
1.2.11.2	PMD-Koeffizient .....	56
1.2.11.3	Polarisationsmodendispersion optischer Bauelemente.....	58
1.2.11.4	Auswahl der zu messenden Fasern .....	59
1.2.11.5	PMD-Koeffizient langer Strecken .....	60
1.2.12	Alterung von Lichtwellenleitern .....	60
1.2.12.1	Materialeigenschaften .....	61
1.2.12.2	Durchlauftest und Risswachstum .....	62
1.2.12.3	Statistische Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit .....	63
1.2.12.4	Richtlinien für zulässige Faserspannungen .....	64
1.2.12.5	Richtlinien für zulässigen Krümmungsradien .....	66
1.2.12.6	Effekte, die die Lebensdauer der Faser herabsetzen .....	68
1.2.12.7	Allgemeine Hinweise zur Faserhandhabung.....	69
1.2.12.8	Faserhandhabung beim Spleißen .....	70
1.2.13	Zusammenfassung .....	71
1.3	Optoelektronische Bauelemente.....	72
1.3.1	Elektrooptische Wechselwirkungen im Halbleiter .....	73
1.3.2	Lumineszenzdioden .....	75
1.3.3	Laserdioden .....	77
1.3.3.1	Arten von Laserdioden .....	77
1.3.3.2	Kenngößen und Eigenschaften von Laserdioden .....	79
1.3.4	Empfängerdioden .....	84
1.3.4.1	PIN-Photodiode .....	84
1.3.4.2	Lawinen-Photodiode .....	86
1.3.4.3	Wichtige Eigenschaften von Empfängerdioden .....	87
1.3.5	Zusammenfassung .....	88
1.4	Literatur.....	88
<b>2</b>	<b>Lösbare Verbindungstechnik von Lichtwellenleitern .....</b>	<b>89</b>
	Christian Kutza	
2.1	Lösbare Verbindungstechnik in optischen Übertragungssystemen.....	89
2.1.1	Allgemeine Anforderungen an lösbare Koppelstellen .....	90
2.1.2	Optisch ideale Koppelstellen .....	91
2.1.3	Kopplung von Multimode-Lichtwellenleitern .....	91
2.1.4	Kopplung von Singlemode-Lichtwellenleitern.....	93
2.2	Reale Koppelstellen .....	93
2.2.1	Multimode-Lichtwellenleiter-Kopplung .....	94
2.2.2	Singlemode-Lichtwellenleiter-Kopplung .....	96
2.2.3	Faser-Aktivelement-Kopplung .....	96
2.2.4	Ursachen optischer Verluste an lösbaren Koppelstellen.....	99
2.2.5	Intrinsische Verluste .....	100
2.2.6	Extrinsische Verluste .....	102

2.3	Technologien für lösbare Lichtwellenleiter-Verbindungen.....	107
2.3.1	Übersicht der Verbindungstechnologien .....	108
2.3.2	Optische Steckverbinder .....	109
2.3.3	Stecker mit direkter Stirnflächenkopplung.....	110
2.3.4	Stecker mit Strahlaufweitung .....	110
2.3.5	Power-Solution-Stecker .....	111
2.3.6	Mehrfasersysteme.....	112
2.3.7	Quasilösbare Verbindungen.....	114
2.4	Kenngößen von lösbbaren optischen Koppelstellen.....	115
2.4.1	Optische Kenngößen der Koppelstelle .....	116
2.4.2	Einfügedämpfung .....	117
2.4.3	Reflexionsdämpfung .....	118
2.4.4	Mechanische und Umgebungsparameter .....	122
2.5	Steckverbinderstandards und Montagetechnologien.....	122
2.5.1	Standardisierung und Normung.....	122
2.5.2	Übersicht aktueller Steckerstandards .....	124
2.5.3	Neuentwicklungen .....	126
2.5.4	Montagetechnologien .....	128
2.5.5	Klebertechnologien.....	128
2.5.6	Crimp- & Cleave-Technologie .....	131
2.5.7	Lösungen für Feldmontage.....	132
2.6	Literatur.....	134
<b>3</b>	<b>Nichtlösbare Glasfaserverbindung - Fusionsspleißen .....</b>	<b>135</b>
	Christina Manzke, Jürgen Labs (Abschnitt 3.2)	
3.1	Einführung .....	135
3.2	Werkstoffe und Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter .....	136
3.2.1	Werkstoffe für Lichtwellenleiter .....	136
3.2.2	Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter .....	138
3.2.2.1	Herstellen der Vorform .....	138
3.2.2.2	Faserziehen .....	142
3.3	Fusionsspleißen .....	143
3.3.1	Einflussfaktoren .....	144
3.3.1.1	Intrinsische Faktoren .....	144
3.3.1.2	Extrinsische Faktoren .....	145
3.3.2	Spleißvorbereitung .....	146
3.3.2.1	Vorbereitung des Arbeitsplatzes .....	146
3.3.2.2	Kabelvorbereitung .....	147
3.3.2.3	Faservorbereitung .....	147
3.3.3	Spleißen .....	152
3.3.3.1	Justage der Fasern .....	152
3.3.3.2	V-Nut-Geräte .....	153
3.3.3.3	3-Achsen-Geräte .....	154
3.3.3.4	Verschmelzen der Fasern.....	157
3.3.3.5	Selbstjustageeffekt .....	160
3.3.3.6	Becksche Linie .....	161
3.3.4	Bestimmen der Spleißdämpfung .....	162

3.3.5	Zugfestigkeit.....	163
3.3.6	Spleiße mit hoher Festigkeit.....	164
3.3.7	Schutz des Spleißes .....	165
3.4	Spezielle Spleiße .....	167
3.4.1	Faserbändchen.....	167
3.4.1.1	Vorbereiten der Faserbändchen .....	169
3.4.1.2	Spleißen der Faserbändchen .....	169
3.4.1.3	Grenzwerte für die Spleißdämpfung .....	170
3.4.1.4	Schutz des Spleißes .....	170
3.4.1.5	Abschluss der Strecke.....	170
3.4.2	Spleißen unterschiedlicher Fasern .....	171
3.4.2.1	Standard-Singlemode-LWL auf biegeoptimierte Lichtwellenleiter (BIF)..	171
3.4.2.2	Standard-Singlemode-LWL auf NZDS-LWL .....	173
3.4.2.3	Singlemode-LWL auf hochdotierte Spezialfasern.....	175
3.4.2.4	Singlemode-LWL auf Multimode-LWL .....	176
3.4.3	Spleißen polarisationserhaltender Fasern .....	177
3.5	Ausblick .....	181
3.6	Literatur.....	182
<b>4</b>	<b>Lichtwellenleiter-Messtechnik .....</b>	<b>183</b>
	Dieter Eberlein	
4.1	Allgemeine Hinweise .....	183
4.2	Messung von Leistungen und Dämpfungen .....	185
4.2.1	Verfahren zur Herstellung einer Modengleichgewichtsverteilung .....	185
4.2.2	Leistungsmessung .....	186
4.2.3	Dämpfungsmessung .....	188
4.2.3.1	Praktische Aspekte .....	188
4.2.3.2	Auswertung der Messergebnisse .....	189
4.2.3.3	Normen zur Dämpfungsmessung .....	190
4.2.3.4	Dämpfungsmessungen an Steckern .....	190
4.2.3.5	Dämpfungsmessungen an Leitungen .....	191
4.2.3.6	Allgemeine Hinweise nach DIN ISO/IEC 14763-3 .....	194
4.2.4	Zusammenfassung .....	195
4.3	Rückstreuungsmessung als universelles Messverfahren .....	195
4.3.1	Prinzip der Rückstreuungsmessung .....	195
4.3.2	Rückstreuurve als Messergebnis .....	198
4.3.3	Interpretation der Ereignistabelle .....	203
4.3.4	Gestreute und reflektierte Leistungen.....	206
4.3.4.1	Rayleighstreuung .....	206
4.3.4.2	Reflektierende Ereignisse .....	210
4.3.5	Zusammenfassung .....	211
4.4	Analyse von Rückstreudiagrammen .....	211
4.4.1	Interpretation der Rückstreuurve .....	211
4.4.1.1	Längenmessung .....	211
4.4.1.2	Dämpfungsmessung .....	214
4.4.2	Auswertung problematischer Rückstreudiagramme.....	215
4.4.2.1	Prinzip der bidirektionalen Messung .....	215

4.4.2.2	Vorteile der bidirektionalen Messung .....	218
4.4.2.3	Änderung der Rückstreuämpfung an der Koppelstelle .....	219
4.4.3	Kopplung von SM-LWL mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern .....	220
4.4.4	Zusammenfassung .....	223
4.5	Interpretation der Messergebnisse .....	224
4.5.1	Vergleich zwischen Dämpfungs- und Rückstreu Kurve .....	224
4.5.2	Mittelung der Messergebnisse .....	225
4.5.3	Zusammenfassung .....	226
4.6	Parameter und Definitionen .....	226
4.6.1	Dynamik .....	226
4.6.2	Impulswiederholrate .....	228
4.6.3	Impulslänge und Auflösungsvermögen .....	230
4.6.4	Totzonen .....	232
4.6.5	Weitere Parameter .....	233
4.6.6	Zusammenfassung .....	234
4.7	Praktische Hinweise zur Rückstremessung .....	234
4.7.1	Allgemeine Hinweise .....	234
4.7.2	Vor- und Nachlauf-LWL .....	235
4.7.2.1	Vorteile .....	235
4.7.2.2	Einseitige Messung mit Vorlauf-LWL .....	237
4.7.2.3	Beidseitige Messung mit Vor- und Nachlauf-LWL .....	238
4.7.3	Geisterbilder .....	239
4.7.4	Auswertung und Dokumentation .....	243
4.7.5	Fehlanpassungen .....	244
4.7.5.1	Unterschiedliche LWL-Parameter .....	244
4.7.5.2	Unterschiedliche Steckerstirnflächen .....	245
4.7.5.3	Unterbrochener physischer Kontakt .....	245
4.7.5.4	Gleiche Steckerstirnflächen .....	246
4.7.5.5	Zusammenfassung .....	247
4.7.6	Kriterien zur Beurteilung der Qualität der installierten Strecke .....	248
4.7.6.1	Allgemeine Hinweise Abnahmevorschriften .....	249
4.7.6.2	Vorschlag Abnahmevorschrift Multimode-LWL .....	249
4.7.6.3	Vorschlag Abnahmevorschrift Singlemode-LWL .....	250
4.7.7	Zusammenfassung .....	251
4.8	Reflexionsmessungen .....	251
4.9	LWL-Überwachungssysteme .....	253
4.9.1	Dunkelfasermessung .....	253
4.9.2	Messung der aktiven Faser .....	254
4.10	Messungen an DWDM-Systemen .....	255
4.10.1	Modifikation der herkömmlichen Messungen .....	255
4.10.2	Spektrale Messungen .....	256
4.10.3	Dispersionsmessungen .....	257
4.10.4	Zusammenfassung .....	257
4.11	Literatur .....	257

<b>5</b>	<b>Optische Übertragungssysteme .....</b>	<b>259</b>
	Dieter Eberlein	
5.1	Systemparameter .....	259
5.2	Planung des Dämpfungsbudgets .....	260
5.3	Systemplanung .....	266
5.3.1	Übertragungskapazität .....	266
5.3.2	Zeitverhalten des Gesamtsystems .....	266
5.3.3	Zeitverhalten der Faser .....	267
5.3.3.1	Arten der Dispersion .....	267
5.3.3.2	Zeitverhalten Multimode-LWL .....	268
5.3.3.3	Zeitverhalten Singlemode-LWL .....	269
5.3.4	Berücksichtigung Dämpfung und Dispersion.....	270
5.3.4.1	Übertragung hoher Datenraten über Multimode-LWL .....	271
5.3.4.2	CWDM-System, Standard-Singlemode-LWL, 2,5 Gbit/s .....	271
5.3.4.3	Standard-Singlemode-LWL, 10 Gbit/s .....	272
5.3.5	Zusammenfassung.....	273
5.4	Lichtwellenleiter bis zum Kunden .....	273
5.4.1	Anforderungen an die Bandbreite .....	274
5.4.2	Netzstrukturen .....	276
5.4.2.1	Ethernet-Punkt-zu-Punkt (EP2P) .....	277
5.4.2.2	Punkt-zu-Multi-Punkt .....	278
5.4.3	Vergleich der Varianten.....	284
5.4.3.1	Vergleich der technischen Aspekte.....	285
5.4.3.2	Vergleich der wirtschaftlichen Aspekte.....	286
5.4.3.3	Schlussfolgerungen .....	287
5.4.4	Offene Infrastruktur (Open Access) .....	288
5.4.5	Wellenlängenbelegung bei FTTx.....	289
5.4.6	Normen .....	290
5.4.7	Komponenten .....	291
5.4.7.1	Steckverbinder.....	291
5.4.7.2	Lichtwellenleiter .....	292
5.4.7.3	Kabel .....	293
5.4.7.4	Koppler .....	294
5.4.7.5	Weitere Komponenten.....	296
5.4.8	Faserabschluss beim Teilnehmer .....	297
5.4.9	Zusammenfassung .....	297
5.5	Topologien .....	298
5.6	Systeme mit Kunststoff-Lichtwellenleitern.....	300
5.6.1	Eigenschaften von Kunststoff-Lichtwellenleitern.....	300
5.6.2	Komponenten für Kunststoff-LWL-Systeme .....	301
5.6.3	Verbindungstechnik .....	302
5.6.4	Passive optische Komponenten .....	303
5.6.5	Einsatz von Kunststoff-Lichtwellenleitern .....	303
5.6.6	Weitere Entwicklungen .....	304
5.6.7	Zusammenfassung .....	305
5.7	Gigabit-, 10-Gigabit-, 40-Gigabit-, 100-Gigabit-Ethernet.....	305
5.7.1	Von Ethernet zu 10-Gigabit-Ethernet.....	305
5.7.2	40/100-Gigabit-Ethernet.....	307

5.7.3	Physikalische Begrenzungen .....	309
5.7.4	Zusammenhang zwischen Einkopplung und Bandbreite .....	309
5.7.5	Außermittigte Einkopplung .....	310
5.7.6	Vergleich der beiden optischen Fenster .....	311
5.7.7	Laseroptimierte Multimode-Lichtwellenleiter .....	313
5.7.7.1	LED-Bandbreite (BLP) .....	313
5.7.7.2	EMB-Bandbreite .....	313
5.7.7.3	minEMBc-Bandbreite .....	315
5.7.8	Klassen von Multimode-Lichtwellenleitern .....	315
5.7.9	Zusammenfassung .....	316
5.8	Optische Freiraumübertragung .....	316
5.8.1	Vergleich mit herkömmlichen Verfahren .....	317
5.8.2	Einsatzfelder .....	318
5.8.3	Prinzip der optischen Freiraumübertragung .....	319
5.8.4	Besonderheiten der optischen Freiraumübertragung .....	320
5.8.5	Optische Freiraumübertragungssysteme .....	321
5.8.6	Zusammenfassung .....	323
5.9	Weitere Systeme .....	323
5.9.1	Digitale Hierarchien .....	323
5.9.1.1	Plesiochrone Digitale Hierarchie .....	323
5.9.1.2	Synchrone Digitale Hierarchie .....	324
5.9.1.3	Optisches Transportnetz .....	325
5.9.2	Netzstrukturen .....	325
5.9.3	Weitverkehrsnetze .....	327
5.9.4	Netze mit optischen Verstärkern .....	327
5.10	Literatur .....	328
<b>6</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>329</b>
	Dieter Eberlein	
6.1	Abkürzungen .....	329
6.2	Formelzeichen und Maßeinheiten .....	333
6.3	Fachbegriffe .....	336
<b>7</b>	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>349</b>
<b>8</b>	<b>Autorenverzeichnis .....</b>	<b>356</b>