

TAE

Dieter Eberlein
und drei Mitautoren

Lichtwellenleiter- Technik

10. Auflage

Kontakt & Studium Band 596

expert  verlag®

Dr. rer. nat. Dieter Eberlein
und drei Mitautoren

Lichtwellenleiter-Technik

Lichtwellenleiter-Technik

Dr. rer. nat. Dieter Eberlein

Dipl.-Ing. Christian Kutza,
Dr. sc. techn. Jürgen Labs,
Dr.-Ing. Christina Manzke

Mit 210 Bildern und 59 Tabellen

10. Auflage



Kontakt & Studium
Band 596

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl
Dipl.-Ing. Elmar Wippler

expert  **verlag**®

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the internet at <http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8169-3423-3

10. Auflage 2018
- 9., neu überarbeitete Auflage 2013
- 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2010
7. Auflage 2007
- 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2006
5. Auflage 2003
- 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2002
3. Auflage 2001
2. Auflage 2001
1. Auflage 2000

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2000 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0)71 59-92 65-0, Fax: +49 (0)71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herausgeber-Vorwort

Bei der Bewältigung der Zukunftsaufgaben kommt der beruflichen Weiterbildung eine Schlüsselstellung zu. Im Zuge des technischen Fortschritts und angesichts der zunehmenden Konkurrenz müssen wir nicht nur ständig neue Erkenntnisse aufnehmen, sondern auch Anregungen schneller als die Wettbewerber zu marktfähigen Produkten entwickeln.

Erstausbildung oder Studium genügen nicht mehr – lebenslanges Lernen ist gefordert! Berufliche und persönliche Weiterbildung ist eine Investition in die Zukunft:

- Sie dient dazu, Fachkenntnisse zu erweitern
und auf den neuesten Stand zu bringen
- sie entwickelt die Fähigkeit, wissenschaftliche Ergebnisse
in praktische Problemlösungen umzusetzen
- sie fördert die Persönlichkeitsentwicklung und die Teamfähigkeit.

Diese Ziele lassen sich am besten durch die Teilnahme an Seminaren und durch das Studium geeigneter Fachbücher erreichen.

Die Fachbuchreihe *Kontakt & Studium* wird in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Akademie Esslingen und dem expert verlag herausgegeben.

Mit über 700 Themenbänden, verfasst von über 2.800 Experten, erfüllt sie nicht nur eine seminarbegleitende Funktion. Ihre eigenständige Bedeutung als eines der kompetentesten und umfangreichsten deutschsprachigen technischen Nachschlagewerke für Studium und Praxis wird von der Fachpresse und der großen Leserschaft gleichermaßen bestätigt. Herausgeber und Verlag freuen sich über weitere kritisch-konstruktive Anregungen aus dem Leserkreis.

Möge dieser Themenband vielen Interessenten helfen und nützen.

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

Dipl.-Ing. Elmar Wippler

Vorwort

Internet, Video, Faser bis ins Haus oder die Wohnung sowie viele weitere Anwendungen treiben den Bandbreitenbedarf in die Höhe. Derzeit verdoppelt sich dieser etwa alle zwei Jahre.

Im Sinne einer wirtschaftlich vertretbaren und langfristigen Investition können die wachsenden Anforderungen nur mit Lichtwellenleitern als Übertragungsmedium erfüllt werden. Der Kupferleiter erlaubt vergleichsweise geringe Streckenlängen und verfügt nur über einen Bruchteil der Bandbreitenkapazität des Lichtwellenleiters.

Kanaldatenraten von 40 Gbit/s und 100 Gbit/s sind mittlerweile Realität geworden. Durch Wellenlängenmultiplex und Nutzung moderner Modulationsverfahren können riesige Datenmengen über den Lichtwellenleiter übertragen werden. Für das Jahr 2025 werden im Weitverkehr die Datenraten pro Lichtwellenleiter auf mindestens (50...100) Tbit/s geschätzt.

In der grundlegend überarbeiteten 9. Auflage wurden neue Aspekte berücksichtigt:

- aktuelle Normen
- neue Fasertypen
- Fiber-to-the-Home/Building
- besondere Anforderungen bei der Realisierung von 40/100 Gigabit-Ethernet über Multimode-LWL
- neue Aspekte bei der lösbaren und nichtlösbaren Verbindungstechnik

Allen Mitautoren dieses Buches gilt mein Dank für die kollegiale Zusammenarbeit. Bei Herrn Dr. Wolfgang Hämmerle (j-fiber) möchte ich mich für die Hinweise zur Aktualisierung des Abschnittes 3.2 bedanken. Mein Dank gilt auch meiner Tochter Julia für die Bearbeitung der Zeichnungen.

Dieter Eberlein

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik.....	1
	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	Durchlaufzeit 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
2	Lösbare Verbindungstechnik von Lichtwellenleitern	89
	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 lösbaren 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

3 Nichtlösbare Glasfaserverbindung - Fusionsspleißen 135 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
4	Lichtwellenleiter-Messtechnik	183
	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 Rückstredämpfung 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 Rückstreckurve	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

5	Optische Übertragungssysteme	259
	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
6	Anhang	329
	Dieter Eberlein	
6.1	Abkürzungen	329
6.2	Formelzeichen und Maßeinheiten	333
6.3	Fachbegriffe	336
7	Stichwortverzeichnis	349
8	Autorenverzeichnis	356

1 Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik

Dieter Eberlein

Der Lichtwellenleiter (LWL) durchdringt alle Lebensbereiche und löst zunehmend den Kupferleiter ab:

- Der Kunststoff-LWL (POF: Polymer Optical Fiber) dient der Kurzstreckenübertragung. Er wird millionenfach im PKW oder im Wohnbereich eingesetzt.
- Der PCF-LWL (PCF: Polymer Cladded Fiber) wird vor allem im industriellen Bereich mit starken elektromagnetischen Störungen verwendet.
- Herkömmliche Gradientenprofil-LWL dienen der Inhouse-Verkabelung bei geringen Anforderungen an die Bandbreite.
- Gradientenprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil sind für die breitbandige Inhouse-Verkabelung geeignet (Gigabit-Ethernet, 10 Gigabit-Ethernet, 40/100 Gigabit-Ethernet), speziell in Rechenzentren.
- Mit Hilfe des Wellenlängenmultiplex (WDM: Wavelength Division Multiplex, CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplex, DWDM: Dense Wavelength Division Multiplex) gelingt es, die Übertragungskapazität des Lichtwellenleiters zu vervielfachen und damit riesige Übertragungskapazitäten zu erreichen.
- Weltweit erlangt zunehmend FTTH (Fiber to the Home) bzw. FTTB (Fiber to the Building) Bedeutung. Privathaushalte erhalten über einen Lichtwellenleiter direkt breitbandige Dienste wie Sprache, Daten und Video. International werden derzeit 100 Mbit/s als Standard-Zugangsrate betrachtet.

1.1 Physikalische Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik

In diesem Abschnitt beschreiben wir die physikalischen Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik. Ausgehend vom Prinzip der optischen Informationsübertragung werden die wesentlichen Bestandteile eines solchen Systems erläutert und die wichtigsten Vorteile gegenüber herkömmlichen Übertragungssystemen herausgestellt. Auch die Ursachen für die Begrenzung der Leistungsfähigkeit von LWL-Systemen werden erwähnt.

Die Darstellung des elektromagnetischen Spektrums zeigt, wo der optische Bereich, der für die LWL-Übertragung genutzt wird, einzuordnen ist.

Das Prinzip der Signalausbreitung im Multimode-LWL wird anhand der Totalreflexion veranschaulicht. Um diese zu gewährleisten, müssen bestimmte Anforderungen bei der Einkopplung des Lichts in den Lichtwellenleiter erfüllt werden.

So ist innerhalb eines Akzeptanzkegels einzukoppeln. Die Einführung des Begriffes der numerischen Apertur des Lichtwellenleiters zeigt, wodurch dieser Akzeptanzkegel beeinflusst wird.

Schließlich wird die Dämpfung im Lichtwellenleiter definiert, typische Dämpfungseffekte im Lichtwellenleiter erläutert und ihre Auswirkungen auf den spektralen Dämpfungsverlauf des Lichtwellenleiters gezeigt [1.1].

1.1.1 Prinzip der optischen Informationsübertragung

Die optische Informationsübertragung ist mit Hilfe von Lichtwellenleitern oder über die Freiraumausbreitung möglich. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich im Wesentlichen auf den Lichtwellenleiter. Kurze Entfernungen können unter gewissen Bedingungen auch mit der optischen Freiraumübertragung überbrückt werden (Abschnitt 5.8).

Ein elektrisches Signal moduliert in einem Sendemodul einen optischen Träger und erzeugt damit ein optisches Signal. Die Modulation kann analog oder digital erfolgen. Herkömmliche Bauelemente (zum Beispiel Glühlampe) erfüllen nicht die Anforderungen an die sehr kleinen Abmessungen sowie die Modulierbarkeit bis in den Gigabit-Bereich. Optoelektronische Bauelemente auf der Basis von Halbleitermaterialien wurden entwickelt. Als Sender kommen Lumineszenzdiode oder Laserdioden zum Einsatz (Abschnitt 1.3.2 und 1.3.3).

Das optische Signal der Senderdiode wird in den Lichtwellenleiter eingekoppelt. Es ist auf eine hohe Qualität der Einkopplung zu achten, um die Koppelverluste möglichst gering zu halten. Das Prinzip der optischen Informationsübertragung wird in Bild 1.1 dargestellt.

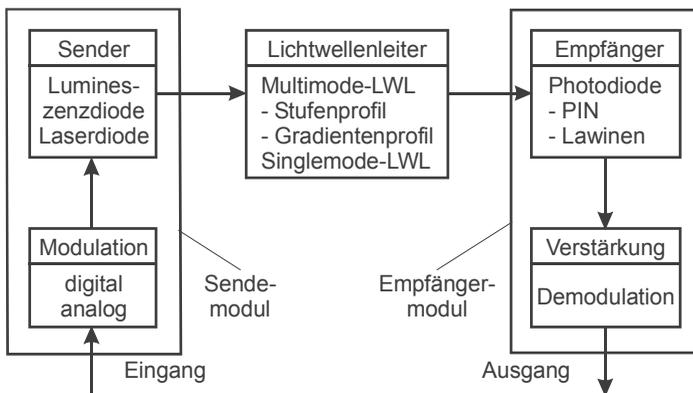


Bild 1.1: Prinzip der optischen Informationsübertragung

Der Lichtwellenleiter kann für geringe Anforderungen ein Multimode-Stufenprofil-LWL, beispielsweise ein Kunststoff-LWL oder ein PCF (Polymer Cladding Fiber) sein.

Für höhere Anforderungen kommt der Gradientenprofil-LWL zum Einsatz. Höchste Anforderungen bezüglich Dämpfung und Dispersion erfüllen Singlemode-LWL (vergleiche Abschnitt 1.2.4).

Am Ende der Übertragungsstrecke wird das optische Signal mit Hilfe des Empfängers in ein elektrisches Signal gewandelt, gegebenenfalls verstärkt und demoduliert. Die optisch-elektrische Wandlung übernimmt eine PIN- bzw. Lawinen-Photodiode (vergleiche Abschnitt 1.3.4).

Das Übertragungssystem kann dämpfungsbegrenzt oder dispersionsbegrenzt sein. Dämpfungsbegrenzung heißt, dass die maximal realisierbare Streckenlänge durch die Dämpfung im System begrenzt wird. Genauer gesagt: Die am Empfänger ankommende Leistung darf einen bestimmten Wert nicht unterschreiten, damit das Signal noch fehlerfrei oder mit einer noch zulässigen Fehlerrate detektiert werden kann.

Die **Dämpfungsbegrenzung** wird nicht nur durch eine hohe LWL-Dämpfung oder eine lange zu überbrückende Strecke verursacht, auch die Höhe der eingekoppelten Leistung und die Empfindlichkeit des Empfängers spielen eine wichtige Rolle. Die Empfängerempfindlichkeit nimmt mit wachsender Bandbreite ab.

Dispersionsbegrenzung heißt, dass die maximal realisierbare Streckenlänge durch die Dispersion im System begrenzt wird. Dispersion verursacht eine Impulsverbreiterung während der Ausbreitung entlang des Lichtwellenleiters (vergleiche Bild 1.10).

Die Auswahl der geeigneten Komponenten (Typ des Senders, Lichtwellenleiters und Empfängers) wird durch die jeweiligen Anforderungen an das Übertragungssystem bestimmt. Dabei ist es sinnlos, einen hohen Aufwand zur Reduktion der Dämpfung zu treiben, wenn das System dispersionsbegrenzt ist und umgekehrt. Bei der Erfüllung der beiden Forderungen sollte man optimieren (Abschnitt 5.1).

1.1.2 Vor- und Nachteile der LWL-Übertragung

LWL-Übertragungs-Systeme haben im Vergleich zu konventionellen, also auf Kupferkabeln basierenden Systemen eine Reihe gravierender **Vorteile**.

Mit elektrischen Multiplexverfahren werden heute 2,5 Gbit/s-, 10 Gbit/s-, 40 Gbit/s- oder 100 Gbit/s-Signale erzeugt. Mit optischen Multiplexverfahren (Wellenlängenmultiplex) können diese Signale erneut gebündelt werden, so dass bereits Übertragungskapazitäten von mehr als 10 Tbit/s auf einem einzigen Lichtwellenleiter realisiert werden konnten.

Die theoretische Übertragungskapazität des Koaxialkabels liegt bei 1 GHz, die des Lichtwellenleiters bei 50 THz. Das entspricht eine Faktor 50.000! Deshalb ist der Lichtwellenleiter das Übertragungsmedium der Zukunft!

Die geringen Verluste des Lichtwellenleiters ermöglichen eine rein optische Übertragung über mehr als 100 km. In Verbindung mit optischen Verstärkern ist es möglich, mehrere 1000 km über einen Lichtwellenleiter rein optisch zu übertragen.

Die Dämpfung des Lichtwellenleiters hängt im Gegensatz zum Kupferleiter nicht von der Frequenz des übertragenen Signals ab. Hier zeigt der Lichtwellenleiter seine Überlegenheit vor allem im Teilnehmerbereich, wo über einige hundert Meter Datenraten bis zu 100 Mbit/s übertragen werden müssen. Die Dämpfung des Kupferleiters steigt bei derart hohen Datenraten extrem an und ermöglicht nur sehr kurze Streckenlängen.

Da der Lichtwellenleiter ein Isolator ist, ermöglicht er eine Potenzialtrennung zwischen Sender und Empfänger. Es treten keine Potenzialausgleichsströme auf. Es besteht kein Zerstörungsrisiko der angeschlossenen Geräte bei Blitzeinschlägen.

Aber auch in Systemen, die an Datenraten und Streckenlängen nur geringe Anforderungen stellen, wird der Kupferleiter zunehmend durch den Lichtwellenleiter ersetzt. Vor allem in Umgebungen mit starken Störstrahlungen (Kraftwerke, Produktionsbetriebe) kommt die Unempfindlichkeit des Lichtwellenleiters gegenüber elektrischer Störstrahlung vorteilhaft zur Geltung. Selbst im PKW wird der Kunststoff-LWL zur Vermeidung möglicher Störbeeinflussungen verwendet (Abschnitt 5.6).

Die Tatsache, dass Lichtwellenleiter keine Signale abstrahlen, hat den Vorteil, dass LWL-Systeme prinzipiell abhörsicher sind.

Bei hinreichend kleinen Leistungen (<(15...150) mW) ist ein Einsatz in explosionsgefährdeten Räumen ist möglich, da nicht die Gefahr der Funkenbildung besteht.

Der Lichtwellenleiter hat ein geringes Gewicht und Volumen. Der Materialeinsatz ist minimal. Mit einem Gramm Glas kann etwa die gleiche Informationsmenge übertragen werden, wie mit zehn Kilogramm Kupfer! Unter dem Gesichtspunkt „Green-IT“ (Energie und Ressourcen sparen) ist das ein sehr wichtiger Aspekt.

Die **Nachteile** der LWL-Technik ergeben sich aus den erhöhten technologischen Anforderungen und einer aufwändigeren Messtechnik. Die erhöhten technologischen Anforderungen sind vor allem bedingt durch die geringen Abmessungen des Lichtwellenleiters. Werden zwei Lichtwellenleiter miteinander verbunden, müssen die LWL-Kerne exakt zueinander positioniert werden.

Wegen der sehr kleinen Kerndurchmesser (Multimode-LWL: Kerndurchmesser typisch 50 µm oder 62,5 µm; Singlemode-LWL: Kerndurchmesser typisch 8 µm) ist das eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die lösbare Verbindungstechnik (Steckerkonfektionierung: Kapitel 2) bzw. an die nichtlösbare Verbindungstechnik (Spleißtechnik: Kapitel 3).

Ein weiterer Nachteil ist, dass über LWL-Verkabelung keine Stromversorgung möglich ist. Eine zusätzliche Kupferverkabelung ist erforderlich.

Das Kabel kann im Erdreich nicht geortet werden, sofern es kein Kupfer enthält.

Die Komponenten sind teurer, da zusätzlich elektrisch-optische bzw. optisch-elektrische Wandler benötigt werden.

1.1.3 Elektromagnetisches Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum überstreicht hinsichtlich Frequenz bzw. Wellenlänge 24 Zehnerpotenzen, beginnend vom niederfrequenten Bereich über die Rundfunkwellen, die optische Strahlung, die Röntgen- und γ -Strahlung bis zu den hochenergetischen kosmischen Strahlen.

In diesem riesigen Bereich nimmt das sichtbare Licht nur wenig Raum ein: Das ist der Wellenlängenbereich von 380 nm (violett) bis 780 nm (rot).

Daran schließt sich zu kleineren Wellenlängen hin die ultraviolette Strahlung und zu größeren Wellenlängen hin die infrarote Strahlung an.

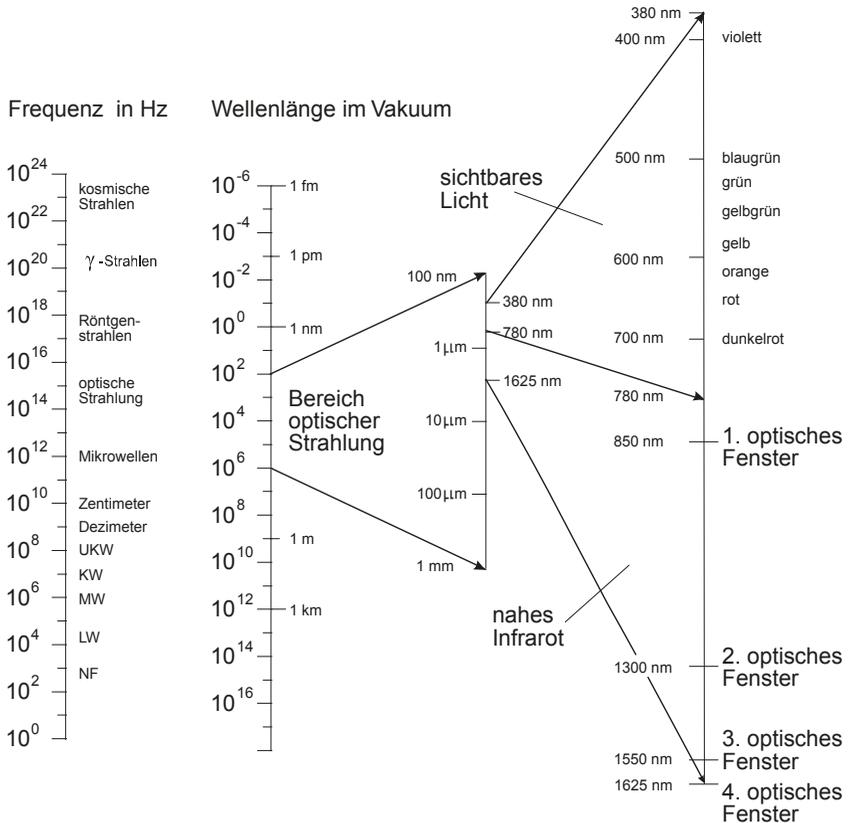


Bild 1.2: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Während die Übertragung mit Kunststoff-LWL vorzugsweise bei 570 nm bzw. 650 nm, also im sichtbaren Bereich erfolgt, liegen die Übertragungswellenlängen bei Anwendungen für die Telekommunikation bei 850 nm, 1300 nm, 1550 nm und 1625 nm, also im nahen Infrarotbereich und sind deshalb unsichtbar.

Einen Überblick über das Spektrum der elektromagnetischen Wellen gibt Bild 1.2. Man beachte die logarithmische Darstellung der Frequenz- bzw. Wellenlängenskala.

Die jeweiligen Übertragungswellenlängen ergeben sich aus den (bei modernen Lichtwellenleitern allerdings kaum noch bemerkbaren) Dämpfungsminima der Lichtwellenleiter und werden optische Fenster des Lichtwellenleiters genannt.

1.1.4 Signalausbreitung im Lichtwellenleiter

Der Lichtwellenleiter besteht aus einem Kern mit dem Durchmesser d_K und einem Mantel mit dem Durchmesser d_M (Bild 1.3). Der Durchmesser des Glasmantels beträgt bei Telekommunikationsfasern 125 μm . Unmittelbar nach dem Ziehen des Lichtwellenleiters wird eine Schutzschicht auf den Mantel aufgebracht (Durchmesser 250 μm).

Diese so genannte Primärbeschichtung (Schutzschicht) soll das Eindringen von OH-Ionen in den Lichtwellenleiter verhindern, was zu einer Dämpfungserhöhung führen würde. Außerdem gewährleistet die Primärbeschichtung einen mechanischen Schutz. Die Faser lässt sich problemlos biegen. Ohne Schutzschicht ist die Faser spröde und bricht sehr schnell.

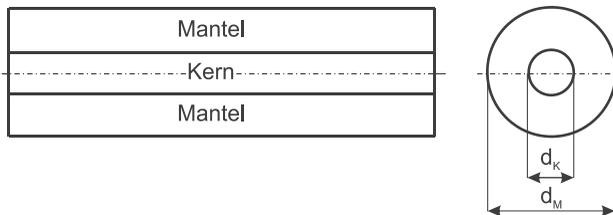


Bild 1.3: Struktur des Lichtwellenleiters



Die Schutzschicht ist eine zweischichtig aufgebaute Kunststoffhülle, die die Festigkeit des Lichtwellenleiters verbessert, nach innen Mikrokrümmungen verhindert und nach außen eine einfachere Handhabung ermöglicht.

Bild 1.4: Aufbau der LWL-Faser

Das Prinzip der Signalausbreitung im Stufenprofil-LWL beruht auf der **Totalreflexion**.

Fällt ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen einem optisch dichteren Medium mit der Brechzahl n_1 und einem optisch dünneren Medium mit der Brechzahl n_2 , so wird dieser Strahl in Abhängigkeit von seinem Einfallswinkel gebrochen oder reflektiert (Bild 1.5).

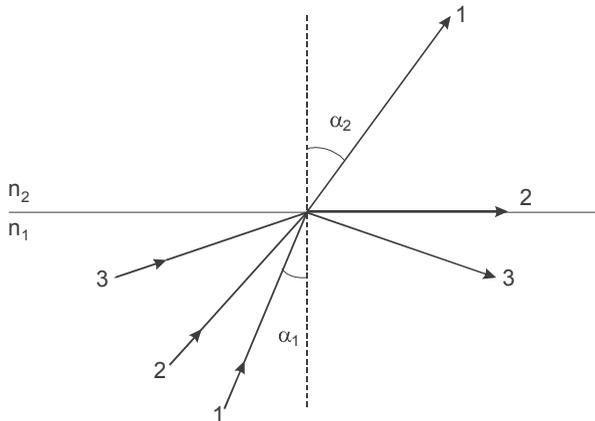


Bild 1.5: Änderung der Strahlrichtung zwischen zwei Medien

Dabei bedeutet optisch dichteres Medium eine höhere Brechzahl und optisch dünneres Medium eine geringere Brechzahl, also $n_1 > n_2$. Unter dem Einfallswinkel versteht man den Winkel zwischen dem Lot auf die Grenzfläche und dem einfallenden Strahl.

Der Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel α_1 und dem Austrittswinkel α_2 wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben:

$$n_1 \cdot \sin\alpha_1 = n_2 \cdot \sin\alpha_2 \quad (1.1)$$

Da $n_2 < n_1$ ist, muss entsprechend Gleichung (1.1) $\alpha_2 > \alpha_1$ sein, der Strahl wird vom Lot weg gebrochen (Strahl 1 in Bild 1.5). Falls $\alpha_2 = 90^\circ$ (Strahl 2) folgt für den Grenzwinkel der Totalreflexion aus (1.1):

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.2)$$

Wird dieser Winkel überschritten, geht die Brechung in eine Totalreflexion über (Strahl 3). Dann gilt das normale Reflexionsgesetz. Das Licht tritt nicht aus dem Medium mit der Brechzahl n_1 aus sondern bleibt in ihm gefangen.

Um das zu gewährleisten, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Ein Glas mit höherer Brechzahl muss von einem Glas mit geringerer Brechzahl umgeben sein.
- Der Strahl muss auf die Grenzfläche zwischen den beiden Materialien hinreichend flach auftreffen.

Diese beiden Anforderungen wurden beim Entwurf des Lichtwellenleiters umgesetzt:

Auf das optisch dichtere Kernmaterial mit der Brechzahl n_1 wird ein optisch dünnerer Mantel mit der Brechzahl n_2 aufgebracht (Bild 1.6). So ist die Brechzahl des Kerns stets höher als die des Mantels. Die höhere Kernbrechzahl erreicht man durch Dotierung des Quarzglas (SiO_2) mit Fremdatomen (meist GeO_2).

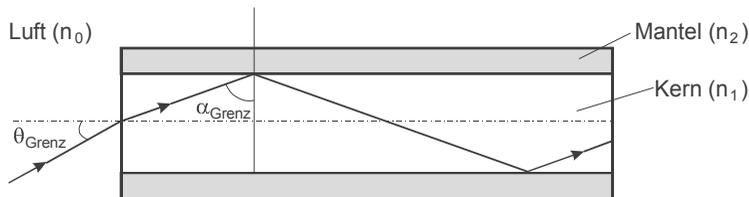


Bild 1.6: Totalreflexion im Stufenprofil-LWL

Damit der Strahl hinreichend flach auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel trifft, das heißt damit der Grenzwinkel der Totalreflexion im Lichtwellenleiter α_{Grenz} nicht unterschritten wird, darf der Einfallswinkel θ_{Grenz} (Akzeptanzwinkel) für die nochmalige Anwendung des Brechungsgesetzes auf die Stirnfläche und unter Berücksichtigung der Winkelverhältnisse entsprechend Bild 1.6 gilt:

$$n_0 \sin \theta_{\text{Grenz}} = n_1 \sin(90^\circ - \alpha_{\text{Grenz}}) \quad (1.3)$$

Unter Berücksichtigung von $n_0 = 1$ (Luft) und Gleichung (1.2) ergibt sich:

$$\sin \theta_{\text{Grenz}} = n_1 \cos \alpha_{\text{Grenz}} = n_1 \cos \left[\arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \right] = n_1 \cos \left(\arccos \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \right) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.4)$$

Als **numerische Apertur** NA des Lichtwellenleiters wird der Sinus des Grenzwinkels θ_{Grenz} definiert. Sie ist ein Maß dafür, wie groß der maximale Einfallswinkel auf die Stirnfläche sein darf, damit das Licht im Lichtwellenleiter noch geführt wird.

$$\text{NA} = \sin \theta_{\text{Grenz}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.5)$$

Strahlen, die unter einem zu großen Winkel auf die LWL-Stirnfläche auftreffen, werden im Lichtwellenleiter nicht total reflektiert, sondern in den Mantel hinein gebro-

chen. Das Licht gelangt zur Primärbeschichtung (diese hat eine größere Brechzahl als der Mantel) und wird stark gedämpft. Um das zu vermeiden, muss das Licht innerhalb des so genannten Akzeptanzkegels eingekoppelt werden (Bild 1.7).

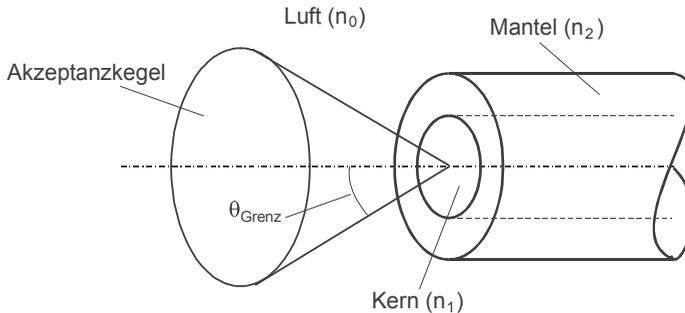


Bild 1.7: Akzeptanzkegel beim Multimode-LWL

Erfolgt die Einkopplung mit einem Winkel, der kleiner als θ_{Grenz} ist, wird das Licht an der Kern-Mantel-Grenze reflektiert, durchläuft den LWL-Kern, wird an der gegenüberliegenden Kern-Mantel-Grenze reflektiert und breitet sich so zickzackförmig durch den Lichtwellenleiter aus. Mit der Definition für die relative Brechzahldifferenz

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

kann man die numerische Apertur auch folgendermaßen darstellen:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

Die numerische Apertur ist eine entscheidende Größe bei der Einkopplung von Licht in den Lichtwellenleiter und bei Kopplung von Lichtwellenleitern miteinander. Sie wird durch die Unterschiede zwischen den Brechzahlen von Kern und Mantel beeinflusst.

Das Prinzip der Totalreflexion, wie in Bild 1.6 dargestellt, funktioniert prinzipiell auch unter Verzicht auf den Glasmantel, da ja Luft eine deutlich kleinere Brechzahl (≈ 1) als das Kernglas hat und folglich die Funktion des Glasmantels übernehmen kann.

Jede Berührung des Glases würde aber an dieser Stelle den Effekt zerstören und einen Lichtverlust verursachen.

Außerdem wäre wegen des großen Brechzahlunterschiedes zwischen Kern und Luft die numerische Apertur und damit die Modendispersion sehr groß (vergleiche Abschnitt 1.2.1.2).

1.1.5 Dämpfung im Lichtwellenleiter

1.1.5.1 Definition der Dämpfung

Die in den Lichtwellenleiter eingekoppelte Leistung P_0 fällt entlang des Lichtwellenleiters exponentiell ab:

$$P(L) = P_0 \cdot e^{-a(L)} \quad (1.8)$$

Dabei ist a' die Dämpfung als dimensionslose Größe (in Neper), P_0 die eingekoppelte Leistung ($P_0 = P(L=0)$) und L die durchlaufene Länge des Lichtwellenleiters. Die Dämpfung ergibt sich aus einem Leistungsverhältnis. Gebräuchlich ist die Definition in Dezibel (dB):

$$a/\text{dB} = 10 \lg \frac{P_0}{P(L)} \Leftrightarrow P(L) = P_0 \cdot 10^{-\frac{a(L)}{10\text{dB}}} \quad (1.9)$$

Diese Darstellung unterscheidet sich von Gleichung (1.8). Gleichung (1.8) bezieht sich auf die Basis des natürlichen Logarithmus ($e \approx 2,7183\dots$) und Gleichung (1.9) auf die Basis des dekadischen Logarithmus (1.10). Man beachte, ob die Dämpfung in Dezibel oder Neper angegeben wird, wobei heute Neper kaum noch gebräuchlich ist. Durch Vergleich zwischen (1.8) und (1.9) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$a \text{ in Dezibel} = 10 \lg e^{a'} = 10 a' \lg e = 4,34 \cdot a' \text{ in Neper} \quad (1.10)$$

Der Dämpfungskoeffizient oder Dämpfungsbelag α ist die auf die LWL-Länge bezogene Dämpfung und damit ein wichtiger Materialparameter. Ist dieser entlang des LWL konstant, so gilt:

$$\alpha = \frac{a}{L} \quad (1.11)$$

Medium	Dämpfungskoeffizient	Abfall auf die Hälfte nach
Fensterglas	50.000 dB/km	0,00006 km
optisches Glas	3.000 dB/km	0,001 km
LWL um 1966	1.000 dB/km	0,003 km
dichter Nebel	500 dB/km	0,006 km
LWL um 1970	20 dB/km	0,15 km
MM-LWL, 850 nm	2,5 dB/km	1,2 km
MM-LWL, 1300 nm	0,7 dB/km	4,3 km
SM-LWL, 1310 nm	0,33 dB/km	9,1 km
SM-LWL, 1550 nm	0,20 dB/km	15 km
SM-LWL, 1625 nm	0,22 dB/km	13,6 km
Weltrekord SM-LWL, 1568 nm	0,151 dB/km	19,9 km

Tabelle 1.1: Beispiele für Dämpfungskoeffizienten

Die Maßeinheit ist analog zu oben dB/km oder 1/km, je nachdem, ob a oder a' im Zähler steht. Die Umrechnung zwischen diesen beiden Angaben ist zu beachten! In Tabelle 1.1 wurden typische Dämpfungskoeffizienten verschiedener Materialien zusammengestellt.

Während der Dämpfungskoeffizient von Fensterglas bei 50.000 dB/km liegt (Abfall auf die Hälfte nach 6 mm), beträgt der beste Dämpfungskoeffizient des Lichtwellenleiters 0,151 dB/km (Abfall auf die Hälfte nach 19,9 km). Dieser Wert ist mehr als fünf Größenordnungen geringer! Hieraus wird ersichtlich, welch große technologische Herausforderung es ist, ein derart reines Glas zu fertigen.

Aus der Definition entsprechend Gleichung (1.9) ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen linearer und logarithmischer Darstellung:

Beispiele:	-30 dB = 1000
	-20 dB = 100
	-10 dB = 10
	0 dB = 1
	10 dB = 0,1
	20 dB = 0,01
	30 dB = 0,001

Aus den Beispielen ist zu erkennen, dass sich das Signal alle 10 dB um einen Faktor 10 verringert. Dämpfungen werden üblicherweise als positive dB-Werte und Verstärkungen als negative dB-Werte definiert.

Neben den angegebenen Werten lassen sich auch Zwischenwerte ableiten. Dabei hilft folgender Zusammenhang: $10 \cdot \lg 2 = 3,0103$. Das heißt, ein Signalabfall auf die Hälfte ($P_0/P(L) = 2$) entspricht etwa 3 dB. Eine nochmalige Halbierung entspricht 6 dB und so weiter:

Beispiele:	3 dB \approx 0,5	
	6 dB \approx 0,25	
	9 dB \approx 0,125	
	12 dB \approx 0,0625	=> 2 dB \approx 0,625
	15 dB \approx 0,03125	=> 5 dB \approx 0,3125

Beträgt die Dämpfung 10 dB (also Abfall auf ein Zehntel) und man verdoppelt den Wert (also Abfall auf ein Fünftel), so sind 3 dB zu subtrahieren:

Beispiele:	10 dB \approx 0,1	
	7 dB \approx 0,2	
	4 dB \approx 0,4	
	1 dB \approx 0,8	
	-2 dB \approx 1,6	=> 8 dB \approx 0,16

Durch diese einfachen Überlegungen lassen sich plausible Näherungen für jeden einzelnen dB-Wert ableiten.

Eine logarithmische Darstellung der Dämpfung ist sinnvoll, da die Leistung viele Zehnerpotenzen überstreichen kann. Auch Leistungen werden logarithmisch definiert, indem sie auf 1 mW bezogen werden:

$$P/\text{dBm} = 10\lg\left(\frac{P}{1\text{mW}}\right) \quad (1.12)$$

Entsprechend dieser Definition gelten die folgenden Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} 20 \text{ dBm} &= 100 \text{ mW} \\ \mathbf{0 \text{ dBm}} &= \mathbf{1 \text{ mW}} \\ -30 \text{ dBm} &= 1 \mu\text{W} \\ -60 \text{ dBm} &= 1 \text{ nW} \end{aligned}$$

Gemäß der Definition nach Gleichung (1.12) haben Leistungen kleiner als 1 mW negative und Leistungen größer als 1 mW positive dBm-Werte. So wird es möglich, Leistungsverhältnisse als Differenzen darzustellen (ergibt sich aus den Logarithmengesetzen) und auf einfache Weise die Dämpfung zu berechnen:

$$a/\text{dB} = P_0/\text{dBm} - P(L)/\text{dBm} \quad (1.13)$$

Beispiel: Ein Sender hat eine Ausgangsleistung von 0,5 mW (entspricht -3 dBm), der Empfänger misst eine Leistung von 0,188 mW (entspricht -7,268 dBm). Zur Berechnung der Dämpfung aus den Leistungen in Milliwatt benötigt man Gleichung (1.9) und damit (wegen der Logarithmierung) einen Taschenrechner:

$$a = 10\lg(0,5 \text{ mW}/0,188 \text{ mW}) = 4,268 \text{ dB.}$$

Werden die Dämpfungen aus den Leistungen in dBm berechnet, reicht eine einfache Subtraktion entsprechend Gleichung (1.13) aus:

$$a = -3 \text{ dBm} - (-7,268 \text{ dBm}) = 4,268 \text{ dB.}$$

In einem weiteren Schritt zur Vereinfachung, kann bei vielen Messgeräten die Leistung bei Normierung auf Null gesetzt werden und die Leistung bei Messung erfolgt in relativen dB (bezogen auf die Normierung). Es wird direkt die Dämpfung der Strecke angezeigt.

Am Leistungsmesser kann eingestellt werden, ob die Anzeige in Milliwatt, dBm oder relativen dB erfolgen soll.

1.1.5.2 Dämpfungseffekte im Lichtwellenleiter

Die LWL-Dämpfung begrenzt die Leistungsfähigkeit optischer Nachrichtenübertragungssysteme. Deshalb ist das Verständnis der Ursachen für die Dämpfung wichtig, um leistungsfähige Systeme zu entwickeln. Die Dämpfung wird durch Absorption, Streuung und Strahlungsverluste infolge Modenwandlung verursacht.

Verunreinigungen durch Ionen der Metalle Cu, Fe, Ni, V, Cr, Mn können **Absorptionen** bei bestimmten Wellenlängen bewirken. Mit den heutigen technischen Möglichkeiten liegen die relativen Gewichtsanteile dieser Verunreinigungen unter 10^{-9} , so dass die dadurch verursachten Dämpfungen nicht mehr stören.

Problematischer sind die Verunreinigungen durch Hydroxyl-Ionen, das heißt durch Wasser und dessen OH-Radikal. Dadurch steigt die Absorption vor allem bei folgenden Wellenlängen stark an: 0,945 μm , 1,24 μm und 1,383 μm .

Da die Dämpfungsspitzen eine endliche Breite besitzen, werden auch benachbarte Wellenlängenbereiche beeinflusst. Deshalb müssen die für die optische Übertragung genutzten optischen Fenster einen möglichst großen Abstand von diesen Dämpfungsmaxima haben.

Außer diesen mehr oder weniger diskreten Störungen bewirken Molekülschwingungen Eigenabsorptionen des LWL-Materials im ultravioletten und im längerwelligen Infrarotbereich. Letztere begrenzen den nutzbaren Wellenlängenbereich nach oben.

Hieraus ergibt sich, dass (bei älteren Lichtwellenleitern) immer nur bestimmte Wellenlängenbereiche (optische Fenster) nutzbar sind.

Während die bisher behandelten Dämpfungseffekte infolge Absorption durch Verbesserung der Technologie zunehmend unterdrückt werden, kann man die Verluste durch **Streueffekte** mit technologischen Maßnahmen nur bis zu einer physikalisch bedingten Grenze reduzieren.

Nichtlineare Streueffekte (Raman- oder Brillouinstreuung) können bei hohen Leistungen bzw. Leistungsdichten im Lichtwellenleiter auftreten (beispielsweise in Wellenlängenmultiplex-Systemen in Verbindung mit optischen Verstärkern) und sollen hier nicht weiter betrachtet werden.

Unvermeidbar ist jedoch die **Rayleighstreuung**, die durch Brechzahl- und Dichtefluktuationen im Glas hervorgerufen wird (vergleiche Kapitel 4). Sie wächst mit zunehmender Dotierung des Quarzglas mit Fremdatomen an, tritt jedoch auch im undotierten Quarzglas auf.

Bemerkenswert ist die starke Wellenlängenabhängigkeit der Rayleighstreuung: Sie fällt mit der vierten Potenz der Wellenlänge ab. Da in einem guten Lichtwellenleiter die Dämpfung im Wesentlichen durch die Rayleighstreuung bewirkt wird, nimmt die Dämpfung des Lichtwellenleiters vom ersten (850 nm) bis zum vierten (1625 nm) optischen Fenster stark ab.

Bild 1.8 zeigt den Dämpfungskoeffizient des Lichtwellenleiters als Funktion der Übertragungswellenlänge sowie die oben besprochenen dämpfungserhöhenden Effekte.

Der Dämpfungskoeffizient wurde logarithmisch dargestellt. Dadurch wird die Rayleighstreu-Kurve eine Gerade. Deutlich sind die lokalen Minima für die optischen Fenster (850 nm = 0,85 μm , 1300 nm = 1,3 μm , 1550 nm = 1,55 μm) zu erkennen.

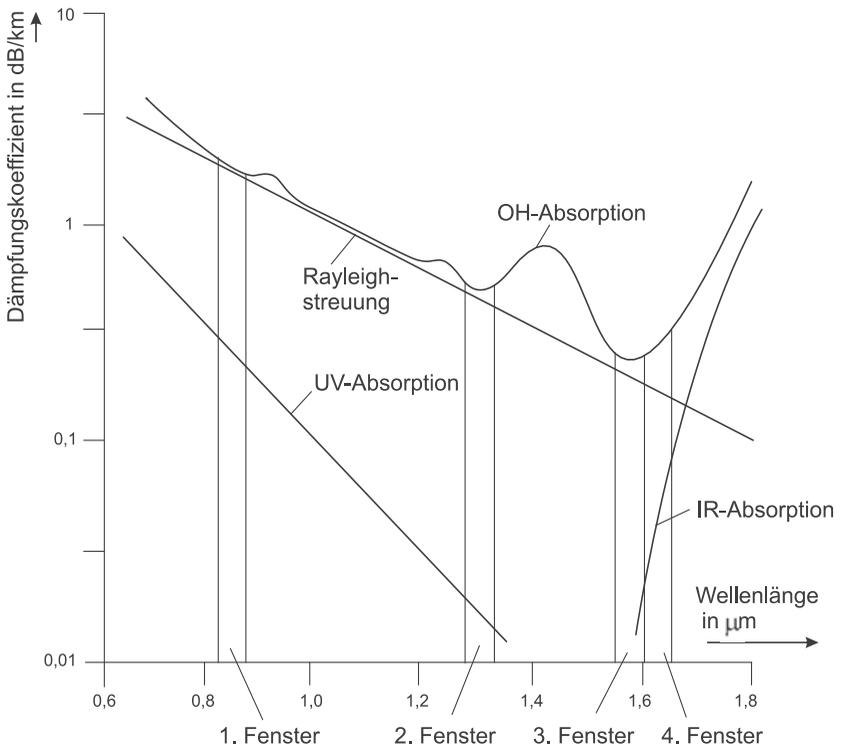


Bild 1.8: Dämpfungskoeffizient des Lichtwellenleiters als Funktion der Wellenlänge und typische Dämpfungseffekte

Prinzipiell vermeidbar sind die Strahlungsverluste durch Modenwandlungsprozesse. Hier unterscheidet man Makro- und Mikrokrümmungsverluste. **Makrokrümmungsverluste** treten bei einer Biegung des Lichtwellenleiters mit einem über eine größere Länge (sehr viele Lichtwellenlängen) konstanten Krümmungsradius auf.

Durch sorgfältige Verlegung und Installation sind zu enge Krümmungsradien vermeidbar. Die Dämpfungen durch Makrokrümmungen sind im Singlemode-LWL besonders hoch. Sie wachsen mit zunehmender Übertragungswellenlänge an. Die primärgeschützte Faser (Durchmesser 250 μm) darf einen Krümmungsradius von 30 mm nicht unterschreiten. Das wird durch geeignete Abmessungen der Spleißkassetten gewährleistet.

Auch wenn Dämpfungen durch Makrokrümmungen im Multimode-LWL erst bei geringeren Krümmungsradien auftreten, darf auch dieser nicht in zu engen Radien abgelegt werden. Zu kleinere Krümmungsradien können längerfristig zu Mikrorissen und damit zum Faserbruch führen (Abschnitt 1.2.12).

Das bedeutet, dass der Multimode-LWL mit der gleichen Sorgfalt wie der Singlemode-LWL verlegt werden muss. Während man einen zu geringen Krümmungsradius beim Singlemode-LWL an einer erhöhten Dämpfung insbesondere bei Messung mit einer höheren Wellenlänge erkennt, ist dieser Installationsmangel beim Multimode-LWL oder beim biegeoptimiertem Singlemode-LWL unter Umständen durch eine Messung nicht nachweisbar.

Die Faser kann, vor allem in Verbindung mit Feuchtigkeit, noch nach Jahren brechen. Deshalb ist unbedingt auf die Einhaltung der zulässigen Krümmungsradien zu achten.

Mikrokrümmungsverluste werden durch Krümmungen verursacht, die sich entlang des Lichtwellenleiters periodisch oder statistisch verteilt, laufend ändern. Typische Krümmungsamplituden liegen bei 1 μm . Sie können zum Beispiel durch die Rauigkeit der Kunststoffhüllen um den Lichtwellenleiter hervorgerufen werden, sind im Allgemeinen durch technologische Mängel im Herstellungsprozess der Fasern/Kabel bedingt und durch die Installation nicht beeinflussbar.

Meist wird heute die Technik zur Herstellung der Fasern/Kabel so gut beherrscht, dass Mikrokrümmungsverluste keine Rolle mehr spielen.

Die optischen Fenster des Lichtwellenleiters werden folgendermaßen genutzt:

- erstes optisches Fenster: Multimode-LWL (850 nm)
- zweites optisches Fenster: Multimode-LWL (1300 nm)
Singlemode-LWL (1310 nm)
- drittes optisches Fenster: Singlemode-LWL (1550 nm)
- viertes optisches Fenster: Singlemode-LWL (1625 nm).

Wegen der hohen Krümmungsempfindlichkeit des Lichtwellenleiters bei dieser Wellenlänge nutzt man das vierte optische Fenster zur Faserüberwachung und zur OTDR-Messung, um Installationsmängel zu erkennen.

Das erste optische Fenster wird ausschließlich vom Multimode-LWL und das dritte bzw. vierte optische Fenster ausschließlich vom Singlemode-LWL genutzt.

Im zweiten optischen Fenster erfolgt die Übertragung sowohl über Multimode- als auch Singlemode-LWL. Zur Kennzeichnung der Fasern/Kabel und Komponenten wurde vereinbart, dass die Angabe „1300 nm“ sich stets auf Multimode-Anwendungen und die Angabe „1310 nm“ auf Singlemode-Anwendungen bezieht. Die tatsächliche Wellenlänge des Senders kann von diesen Nennwerten abweichen.

Das Grobe Wellenlängenmultiplex (CWDM) nutzt auch den Wellenlängenbereich zwischen dem zweiten und dritten optischen Fenster (1271 nm, 1291 nm, ..., 1611 nm). Das Anwachsen des Dämpfungskoeffizienten infolge der OH-Absorptionen stört.

Durch Modifikation des Herstellungsprozesses gelingt es, diesen Effekt zu vermeiden und den OH-Peak zwischen dem zweiten und dritten optischen Fenster stark zu unterdrücken. Diese neue Faserfamilie trägt den Namen Low-Water-Peak-Faser (LWP)-Faser (vergleiche Abschnitt 1.2.5).