



DIETER EBERLEIN  
CHRISTINA MANZKE  
RALPH SATTMANN



# Lichtwellenleiter- Technik

12., überarbeitete  
und erweiterte Auflage

expert ›



DC 06-19.000.L1



## Hohe Packungsdichte robust verpackt

### LWL-Datensteckverbinder der Serie M17 MPO

Phoenix Contact präsentiert industrietaugliche MPO-Steckverbinder für die Echtzeitdatenübertragung in intelligenten Stromnetzen. Die robusten LWL-Schnittstellen zeichnen sich durch eine hochqualitative Faseroptik aus, die stabile Bandbreiten über lange Übertragungstrecken gewährleistet.

Mehr Informationen unter [phoenixcontact.com/m17mpos](https://phoenixcontact.com/m17mpos)

 **PHOENIX  
CONTACT**

INSPIRING INNOVATIONS





Dieter Eberlein, Christina Manzke,  
Ralph Sattmann

# **Lichtwellenleiter-Technik**

12., überarbeitete und erweiterte Auflage

**expert** ›

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

© 2020 · expert verlag GmbH  
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

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

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: [www.expertverlag.de](http://www.expertverlag.de)  
eMail: [info@verlag.expert](mailto:info@verlag.expert)

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3520-9 (Print)  
ISBN 978-3-8169-8520-4 (ePDF)  
ISBN 978-3-8169-0028-3 (ePub)

## Vorwort zur 12. Auflage

---

Die Lichtwellenleiter-Technik spielt eine entscheidende Rolle in der Telekommunikation. Lichtwellenleiter werden genutzt zur Übertragung von Diensten mit hohen Datenraten sowohl über kurze als auch über lange Strecken. Cloud-basierte Anwendungen, Audio-Video-Dienste und Video-on-Demand führen zu einem unersättlichen Datenhunger. Die Nachfrage nach Lichtwellenleitern boomt.

Neben Weitverkehrsanwendungen dringt die Faser zunehmend in die Fläche ein. Die Fasern enden immer dichter an den Wohnungen, Büros und Funkmasten. Ein 1 Gbit/s bis zum Teilnehmer ist bereits Realität.

Die Errichtung von 5G-Netzen erfordert einen engmaschigen Ausbau der LWL-Netze. Die Faser wird genutzt, um die Daten an den Antennen zu sammeln und zu verarbeiten.

Der Lichtwellenleiter spielt auch eine große Rolle in Rechenzentren. Dort müssen zunehmend höhere Bandbreiten übertragen werden.

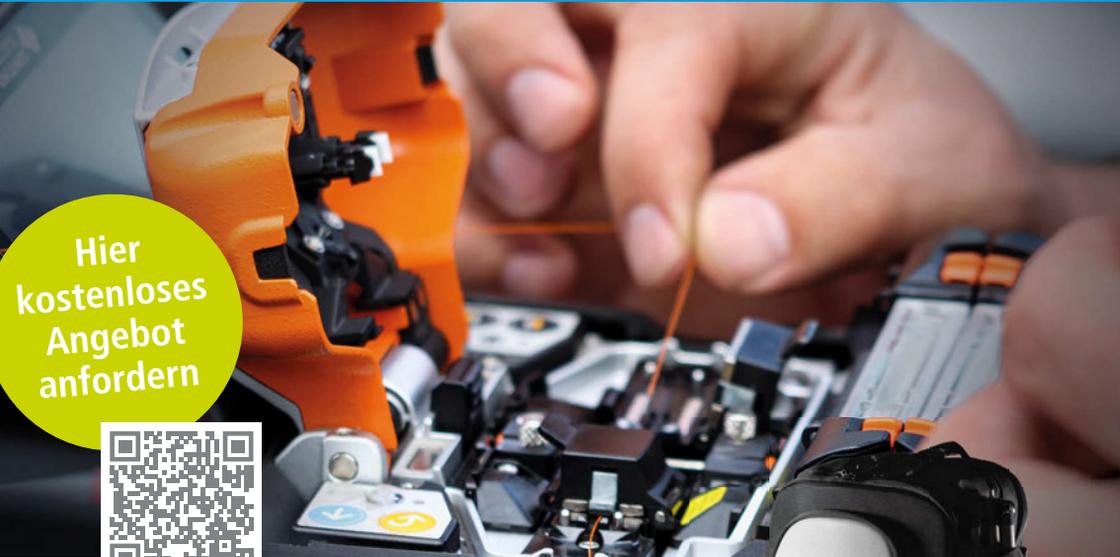
Durch Wellenlängenmultiplex, moderne Modulationsverfahren, Polarisationsmultiplex und kohärente Empfänger können riesige Datenmengen über Lichtwellenleiter übertragen werden. 400 Gbit/s-Systeme (pro Wellenlänge) sind angekündigt und werden getestet. Kommerziell verfügbare DWDM-Systeme ermöglichen eine Übertragungskapazität von 128 Wellenlängen á 100 Gbit/s je Faser (12,8 Tbit/s).

In der überarbeiteten und erweiterten 12. Auflage wurde unter anderem folgende Aspekte berücksichtigt:

- Trends bei der Entwicklung und beim Einsatz von Transceivern
- aktualisierte Messvorschrift der Deutschen Telekom zur Messung an FTTH-Netzen
- Aktualisierung der gültigen Normen

Den Mitautoren dieses Buches gilt mein Dank für die kollegiale Zusammenarbeit. Bei Herrn Christoph Schmickler (Netze BW GmbH) bedanke ich mich für seine hilfreichen Hinweise, bei meiner Tochter Julia für die Bearbeitung der Zeichnungen.

# Das Handwerker Paket



Hier  
kostenloses  
Angebot  
anfordern



## Diese Kombi ist unschlagbar!

Mit dem High-End Spleißgerät, dem modularen OTDR und dem passenden Zubehör sind Sie für die Installation, Inbetriebnahme und Wartung von Glasfasernetzen bestens ausgestattet.



### Im Paket enthalten\*:



- 1 x MTS2000 Quad, VFL, SLM
- 1 x T-72C, WKS, FC-8, Akku, Krimmpresse
- 1 x UNICO Bag
- 1 x Video Kamera P-5000i
- 2 x Vorlaufaser Multimode OM3 50/125 100m SC/SC
- 2 x Vorlaufaser Singlemode OS2 9/125 SC/SC 300m
- 1 x Starter Werkzeugkit
- 1 x Starter Reinigungskit



the fiber experts

tso GmbH  
Hermann-Köhler-Str. 13  
58553 Halver  
T 02353/66987 - 0  
info@tso-gmbh.de  
www.tso-gmbh.de

\*Auf Wunsch sind auch andere Ausstattungen möglich!

# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort zur 12. Auflage

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik</b> .....	<b>1</b>
	Dieter Eberlein, Ralph Sattmann (Abschnitt 1.2)	
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 .....	13
1.1.6	Zusammenfassung .....	16
1.2	Materialien und Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter .....	17
1.2.1	Quarzglas .....	17
1.2.2	Herstellung von Quarzglas-Lichtwellenleitern .....	19
1.2.2.1	Herstellung eines Kernstabes .....	19
1.2.2.2	Herstellung der Vorform .....	23
1.2.2.3	Faserziehen .....	24
1.2.2.4	Verkabelung .....	26
1.3	Lichtwellenleiter-Typen und Dispersion .....	27
1.3.1	Stufenprofil-Lichtwellenleiter und Modendispersion .....	27
1.3.1.1	Strahlausbreitung im Stufenprofil-LWL .....	27
1.3.1.2	Dispersion im Stufenprofil-LWL .....	28
1.3.1.3	Typen von Stufenprofil-LWL .....	30
1.3.2	Gradientenprofil-Lichtwellenleiter und Profildispersion .....	32
1.3.2.1	Strahlausbreitung im Gradientenprofil-LWL .....	32
1.3.2.2	Dispersion im Gradientenprofil-LWL .....	34
1.3.2.3	Numerische Apertur im Gradientenprofil-LWL .....	34
1.3.2.4	Typen von Gradientenprofil-LWL .....	35
1.3.3	Vergrößerung Bandbreite-Längen-Produkt .....	39
1.3.3.1	Parabelprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil .....	39
1.3.3.2	Materialdispersion .....	39
1.3.4	Biegeunempfindlicher Multimode-LWL .....	43
1.3.5	Standard-Singlemode-Lichtwellenleiter und chromatische Dispersion ...	44
1.3.5.1	Wellenausbreitung im Singlemode-LWL .....	45
1.3.5.2	Dispersion im Singlemode-LWL .....	46
1.3.5.3	Wellenleiter Dispersion .....	46

1.3.5.4	Chromatische Dispersion .....	47
1.3.5.5	Eigenschaften des Singlemode-LWL .....	49
1.3.5.6	Parameter Standard-Singlemode-LWL .....	51
1.3.6	Singlemode-LWL mit reduziertem Wasserpeak .....	53
1.3.7	Dispersionsverschobener Singlemode-LWL .....	54
1.3.8	Cut-off shifted Lichtwellenleiter .....	55
1.3.9	Non-zero dispersion shifted Lichtwellenleiter .....	55
1.3.10	NZDSF für erweiterten Wellenlängenbereich .....	58
1.3.11	Lichtwellenleiter mit reduzierter Biegeempfindlichkeit .....	59
1.3.11.1	Kategorie A .....	60
1.3.11.2	Kategorie B .....	61
1.3.11.3	Praktische Aspekte .....	62
1.3.12	Kategorien von Singlemode-LWL .....	63
1.3.13	Trends bei der Faserentwicklung .....	64
1.3.13.1	Weiterentwicklung des Standard-Singlemode-LWL .....	64
1.3.13.2	Fasern mit reduziertem Coating-Durchmesser .....	65
1.3.13.3	Fasern für Räummultiplex .....	67
1.3.14	Polarisationsmodendispersion (PMD) .....	68
1.3.14.1	PMD-Effekt .....	69
1.3.14.2	PMD-Koeffizient .....	73
1.3.14.3	Polarisationsmodendispersion optischer Bauelemente .....	75
1.3.14.4	Auswahl der zu messenden Fasern .....	75
1.3.14.5	PMD-Koeffizient langer Strecken .....	76
1.3.15	Alterung von Lichtwellenleitern .....	77
1.3.15.1	Materialeigenschaften .....	77
1.3.15.2	Durchlaufzeit und Risswachstum .....	78
1.3.15.3	Statistische Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit .....	80
1.3.15.4	Richtlinien für zulässige Faserspannungen .....	81
1.3.15.5	Richtlinien für zulässigen Biegeradien .....	83
1.3.15.6	Effekte, die die Lebensdauer der Faser herabsetzen .....	85
1.3.15.7	Allgemeine Hinweise zur Faserhandhabung .....	86
1.3.15.8	Faserhandhabung beim Spleißen .....	87
1.3.16	Zusammenfassung .....	88
1.4	Optoelektronische Bauelemente .....	89
1.4.1	Elektrooptische Wechselwirkungen im Halbleiter .....	90
1.4.2	Lumineszenzdiode .....	92
1.4.3	Laserdioden .....	93
1.4.3.1	Arten von Laserdioden .....	93
1.4.3.2	Kenngrößen und Eigenschaften von Laserdioden .....	96
1.4.4	Empfängerdioden .....	100
1.4.4.1	PIN-Photodiode .....	100
1.4.4.2	Lawinen-Photodiode .....	103
1.4.4.3	Wichtige Eigenschaften von Empfängerdiode .....	103
1.4.5	Transceiver .....	104
1.4.5.1	Übersicht Transceiver .....	104
1.4.5.2	Gigabit Interface Converter (GBIC) .....	104
1.4.5.3	Small Form Factor Pluggable (SFP) .....	104
1.4.5.4	Nomenklatur von Ethernet-Transceivern .....	106
1.4.5.5	Reichweiten entsprechend Ethernet-Standard IEEE 802.3 .....	106

1.4.5.6	Ausblick.....	108
1.4.6	Zusammenfassung .....	109
1.5	Literatur .....	109
<b>2</b>	<b>Lösbare Verbindungstechnik von Lichtwellenleitern .....</b>	<b>111</b>
	Dieter Eberlein	
2.1	Allgemeine Eigenschaften.....	111
2.2	Koppelverluste zwischen Lichtwellenleitern .....	112
2.2.1	Verluste zwischen Multimode-LWL .....	113
2.2.2	Verluste zwischen Singlemode-LWL.....	114
2.3	Stirnflächenkontakt.....	115
2.3.1	Stecker mit ebener Stirnfläche .....	115
2.3.2	Stecker mit physischem Kontakt.....	116
2.3.3	Schrägschliffstecker .....	116
2.3.4	APC/HRL-Stecker .....	117
2.4	Verdrehsicherung .....	118
2.5	Stift-Hülse-Prinzip .....	118
2.6	Verringerung der Steckerdämpfung.....	120
2.6.1	Ablageverfahren .....	121
2.6.2	Prägeverfahren .....	121
2.7	Dämpfungs- und Reflexionsklassen .....	123
2.8	Steckertypen .....	124
2.8.1	Farbmarkierungen.....	124
2.8.2	Herkömmliche Steckertypen .....	125
2.8.3	Small-Form-Factor-Stecker.....	127
2.8.4	Spezielle Steckerlösungen.....	128
2.9	Trends der lösbaren Verbindungstechnik .....	130
2.9.1	Stecker für den Outdoorbereich .....	130
2.9.2	Erhöhung der Faserpackungsdichte .....	131
2.9.2.1	Datenübertragung in Rechenzentren .....	131
2.9.2.2	Mehrfaserstecker .....	132
2.9.2.3	URM-Stecker.....	133
2.9.2.4	CS-, SN- und MDC-Stecker .....	134
2.9.3	Stecker für die Leiterplattenkopplung.....	135
2.9.4	Selbstreinigende Steckeroberflächen .....	136
2.10	Sorgfalt im Umgang mit Steckverbindern.....	137
2.10.1	Auswirkungen von Verschmutzungen.....	137
2.10.2	Ursachen für Verunreinigungen .....	138
2.10.3	Steckerreinigung .....	139
2.10.4	Sichtprüfung an Steckerstirnflächen .....	143
2.11	Literatur .....	146
<b>3</b>	<b>Nichtlösbare Glasfaserverbindung - Fusionsspleißen .....</b>	<b>147</b>
	Christina Manzke	
3.1	Einführung .....	147

3.2	Fusionsspleißen .....	148
3.2.1	Einflussfaktoren .....	148
3.2.1.1	Intrinsische Faktoren .....	149
3.2.1.2	Extrinsische Faktoren .....	150
3.2.2	Spleißvorbereitung .....	150
3.2.2.1	Vorbereitung des Arbeitsplatzes .....	150
3.2.2.2	Kabelvorbereitung .....	151
3.2.2.3	Faservorbereitung .....	152
3.2.3	Spleißen .....	158
3.2.3.1	Justage der Fasern .....	158
3.2.3.2	V-Nut-Geräte .....	159
3.2.3.3	3-Achsen-Geräte .....	160
3.2.3.4	Verschmelzen der Fasern .....	164
3.2.3.5	Selbstjustageeffekt .....	167
3.2.3.6	Becksche Linie .....	168
3.2.4	Bestimmen der Spleißdämpfung .....	168
3.2.5	Zugfestigkeit .....	169
3.2.6	Spleiße mit hoher Festigkeit .....	171
3.2.7	Schutz des Spleißes .....	172
3.3	Spezielle Spleiße .....	174
3.3.1	Faserbändchen .....	174
3.3.1.1	Vorbereiten der Faserbändchen .....	176
3.3.1.2	Spleißen der Faserbändchen .....	177
3.3.1.3	Grenzwerte für die Spleißdämpfung .....	177
3.3.1.4	Schutz des Spleißes .....	178
3.3.1.5	Abschluss der Strecke .....	178
3.3.2	Spleißen unterschiedlicher Fasern .....	178
3.3.2.1	Standard-Singlemode-LWL auf biegeoptimierte Lichtwellenleiter (BIF)..	178
3.3.2.2	Standard-Singlemode-LWL auf NZDS-LWL .....	181
3.3.2.3	Singlemode-LWL auf hochdotierte Spezialfasern .....	182
3.3.2.4	Singlemode-LWL auf Multimode-LWL .....	184
3.3.3	Spleißen polarisationserhaltender Fasern .....	185
3.4	Ausblick .....	189
3.5	Literatur .....	190
<b>4</b>	<b>Lichtwellenleiter-Messtechnik .....</b>	<b>191</b>
	Dieter Eberlein	
4.1	Allgemeine Hinweise .....	191
4.2	Messung von Leistungen und Dämpfungen .....	193
4.2.1	Definierte Anregung des Multimode-LWL .....	193
4.2.2	Leistungsmessung .....	194
4.2.3	Dämpfungsmessung .....	196
4.2.3.1	Praktische Hinweise .....	196
4.2.3.2	Auswertung der Messergebnisse .....	197
4.2.3.3	Normen zur Dämpfungsmessung .....	198
4.2.3.4	Dämpfungsmessungen an Steckern .....	198
4.2.3.5	Dämpfungsmessungen an Leitungen .....	199

4.2.3.6	Hoch genaue Dämpfungsmessung.....	202
4.2.3.7	Allgemeine Hinweise nach DIN ISO/IEC 14763-3.....	207
4.2.4	Zusammenfassung .....	207
4.3	Optische Rückstreuung .....	208
4.3.1	Prinzip der Rückstreuung.....	208
4.3.2	Rückstreucurve als Messergebnis .....	210
4.3.3	Interpretation der Ereignistabelle .....	216
4.3.4	Gestreute und reflektierte Leistungen.....	218
4.3.4.1	Rayleighstreuung .....	219
4.3.4.2	Reflektierende Ereignisse.....	223
4.3.5	Zusammenfassung .....	224
4.4	Analyse von Rückstreudiagrammen .....	224
4.4.1	Interpretation der Rückstreucurve .....	224
4.4.1.1	Längenmessung.....	224
4.4.1.2	Dämpfungsmessung.....	227
4.4.2	Auswertung problematischer Rückstreudiagramme.....	228
4.4.2.1	Prinzip der bidirektionalen Messung .....	228
4.4.2.2	Vorteile der bidirektionalen Messung.....	231
4.4.2.3	Änderung der Rückstredämpfung an der Koppelstelle .....	232
4.4.2.4	Quasibidirektionalen Rückstreuung.....	233
4.4.3	Kopplung von SM-LWL mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern	234
4.4.4	Zusammenfassung .....	238
4.5	Interpretation der Messergebnisse .....	238
4.5.1	Vergleich zwischen Dämpfungs- und Rückstreucurve .....	238
4.5.2	Mittelung der Messergebnisse .....	240
4.5.3	Zusammenfassung .....	241
4.6	Parameter und Definitionen .....	241
4.6.1	Dynamik .....	241
4.6.2	Impulswiederholrate .....	242
4.6.3	Impulslänge und Auflösungsvermögen .....	244
4.6.4	Totzonen.....	246
4.6.5	Weitere Parameter.....	247
4.6.6	Zusammenfassung .....	248
4.7	Praktische Hinweise zur Rückstreuung .....	248
4.7.1	Allgemeine Hinweise .....	248
4.7.2	Vor- und Nachlaufprüfschnur.....	250
4.7.2.1	Vorteile.....	250
4.7.2.2	Einseitige Messung mit Vorlauf-LWL .....	252
4.7.2.3	Beidseitige Messung mit Vor- und Nachlauf-LWL .....	252
4.7.3	Geisterreflexionen.....	254
4.7.4	Auswertung und Dokumentation.....	258
4.7.5	Fehlanpassungen .....	258
4.7.5.1	Unterschiedliche LWL-Parameter .....	258
4.7.5.2	Unterschiedliche Steckerstirnflächen .....	259
4.7.5.3	Unterbrochener physischer Kontakt.....	260
4.7.5.4	Gleiche Steckerstirnflächen .....	260
4.7.5.5	Zusammenfassung .....	262
4.7.6	Kriterien zur Beurteilung der Qualität der installierten Strecke .....	262
4.7.6.1	Allgemeine Hinweise Abnahmevorschriften .....	263

4.7.6.2	Vorschlag Abnahmevorschrift Multimode-LWL .....	264
4.7.6.3	Vorschlag Abnahmevorschrift Singlemode-LWL .....	264
4.7.7	Zusammenfassung .....	266
4.8	Reflexionsmessungen .....	266
4.9	LWL-Überwachungssysteme .....	267
4.9.1	Dunkelfasermessung .....	268
4.9.2	Messung der aktiven Faser .....	268
4.10	Messungen an DWDM-Systemen .....	269
4.10.1	Modifikation der herkömmlichen Messungen .....	269
4.10.2	Spektrale Messungen .....	270
4.10.3	Dispersionsmessungen .....	270
4.10.4	Zusammenfassung .....	271
4.11	Literatur .....	271
<b>5</b>	<b>Fiber-to-the-Home/Building .....</b>	<b>272</b>
	Dieter Eberlein	
5.1	Anforderungen an die Bandbreite .....	272
5.2	Netzstrukturen .....	274
5.2.1	Ethernet-Punkt-zu-Punkt (EP2P) .....	275
5.2.2	Punkt-zu-Multi-Punkt .....	276
5.2.2.1	Aktives optisches Netz (AON) .....	276
5.2.2.2	Passives optisches Netz (PON) .....	277
5.2.3	Vergleich der Varianten .....	281
5.3	Offene Infrastruktur .....	282
5.4	Wellenlängenbelegung bei FTTx .....	282
5.5	Normen .....	283
5.5.1	Breitband-PON .....	284
5.5.2	Gigabit-PON .....	284
5.5.3	Gigabit-Ethernet-PON .....	284
5.5.4	Next-Generation PON .....	285
5.5.5	Downstream 10 Gbit/s .....	285
5.5.6	TWDM-PON .....	286
5.5.7	Wellenlängenmultiplex-PON (P2P WDM-PON) .....	287
5.5.8	Zusammenfassung FTTx-Varianten .....	289
5.6	Passive Komponenten .....	290
5.6.1	Steckverbinder .....	290
5.6.2	Lichtwellenleiter .....	290
5.6.3	Kabel für FTTx-Projekte .....	291
5.6.4	Koppler .....	293
5.6.5	Ratgeber für Planung und Bau (DTAG) .....	295
5.7	Aktive Komponenten .....	296
5.7.1	Sender .....	296
5.7.2	Empfänger .....	298
5.7.3	Optische Verstärker .....	298
5.8	Faserabschluss beim Teilnehmer .....	299
5.8.1	Pigtail mit Fusionspfeißgerät anspleißen .....	299
5.8.2	Pigtail mit mechanischem Spleißgerät anspleißen .....	300

5.8.3	Stecker mit Fusionsspleißgerät anspleißen .....	301
5.8.4	Stecker mit mechanischem Spleißgerät anspleißen .....	301
5.8.5	Verlegung vorkonfektionierter Kabel .....	301
5.9	Budgetplanung .....	302
5.10	Normung .....	304
5.11	Messungen an FTTH/B-Netzen .....	304
5.11.1	Allgemeine Hinweise .....	304
5.11.2	Empfehlungen der Deutschen Telekom .....	305
5.12	Förderung durch den Bund .....	306
5.13	Zusammenfassung .....	306
5.14	Literatur .....	307
<b>6</b>	<b>Optische Übertragungssysteme .....</b>	<b>308</b>
	Dieter Eberlein	
6.1	Planung von LWL-Strecken aus physikalischer Sicht .....	308
6.1.1	Allgemeine Regeln .....	308
6.1.2	Planung des Dämpfungsbudgets .....	309
6.1.3	Pegeldiagramm .....	312
6.1.4	Dispersion in Lichtwellenleitern .....	314
6.1.4.1	Chromatische Dispersion .....	314
6.1.4.2	Dispersionstoleranz .....	317
6.1.4.3	Kompensation der chromatischen Dispersion .....	317
6.1.5	Systemplanung .....	319
6.1.6	Zusammenfassung .....	320
6.2	Mehrkanalübertragung über MTP/MPO-Stecker .....	321
6.2.1	Einsatzfälle .....	321
6.2.2	Mehrkanalübertragung .....	322
6.2.3	Beschaltungsmöglichkeiten .....	325
6.2.4	Dämpfungsmessung an Mehrfaserkabeln .....	327
6.3	Realisierung hoher Bandbreiten mit Multimode-LWL .....	329
6.3.1	Von Ethernet zu 10-Gigabit-Ethernet .....	329
6.3.2	40/100-Gigabit-Ethernet .....	330
6.3.3	Physikalische Begrenzungen .....	331
6.3.4	Bandbreiten-Definitionen .....	331
6.3.4.1	LED-Bandbreite .....	332
6.3.4.2	EMB-Bandbreite .....	332
6.3.4.3	minEMBc-Bandbreite .....	333
6.3.5	Kategorien von Multimode-Lichtwellenleitern .....	334
6.3.6	Zusammenfassung .....	334
6.4	Systeme mit Kunststoff-Lichtwellenleitern .....	335
6.4.1	Eigenschaften von Kunststoff-Lichtwellenleitern .....	335
6.4.2	Komponenten für Kunststoff-LWL-Systeme .....	336
6.4.3	Verbindungstechnik .....	337
6.4.4	Passive optische Komponenten .....	337
6.4.5	Einsatz von Kunststoff-Lichtwellenleitern .....	338
6.4.6	Weitere Entwicklungen .....	338
6.4.7	Zusammenfassung .....	339

6.5	Optische Freiraumübertragung .....	339
6.5.1	Vergleich mit herkömmlichen Verfahren .....	339
6.5.2	Einsatzfelder .....	341
6.5.3	Prinzip der optischen Freiraumübertragung .....	341
6.5.4	Besonderheiten der optischen Freiraumübertragung .....	343
6.5.5	Optische Freiraumübertragungssysteme .....	344
6.5.6	Budgetkalkulation .....	345
6.5.7	Zusammenfassung und Ausblick .....	346
6.6	Literatur .....	347
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>348</b>
	Dieter Eberlein	
7.1	Abkürzungen .....	348
7.2	Formelzeichen und Maßeinheiten .....	352
7.3	Fachbegriffe .....	356
<b>8</b>	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>369</b>
<b>9</b>	<b>Autorenverzeichnis .....</b>	<b>376</b>

# 1 Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik

Dieter Eberlein, Ralph Sattmann (Abschnitt 1.2)

---

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 Gigabit-Ethernet, 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 hat FTTH (Fiber to the Home) bzw. FTTB (Fiber to the Building) eine sehr große Bedeutung erlangt. Privathaushalte erhalten über einen Lichtwellenleiter direkt breitbandige Dienste wie Sprache, Daten und Video. International werden derzeit 100 Mbit/s als Standard-Zugangsrate betrachtet. 1 Gbit/s-Netze sind mittlerweile verfügbar.
- 5G erfordert massiven Ausbau der LWL-Netze.

## 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 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 6.5).

Ein elektrisches Signal moduliert in einem Sendemodul einen optischen Träger und erzeugt damit ein optisches Signal. Die Modulation kann analog oder digital erfolgen.

Der Sender muss sehr kleine Abmessungen haben, um effektiv in den kleinen Kern des Lichtwellenleiters einkoppeln zu können. Darüber hinaus muss das Bauelement mit sehr hohen Datenraten (bis in den Gigabit-Bereich) modulierbar sein. Diese Anforderungen werden nicht von herkömmlichen Bauelementen (zum Beispiel Glühbirne) erfüllt.

Es wurden optoelektronische Bauelemente auf der Basis von Halbleitermaterialien entwickelt, die die genannten Kriterien erfüllen. Als Sender kommen Lumineszenzdiode oder Laserdioden zum Einsatz (Abschnitt 1.4.2 und 1.4.3).

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.

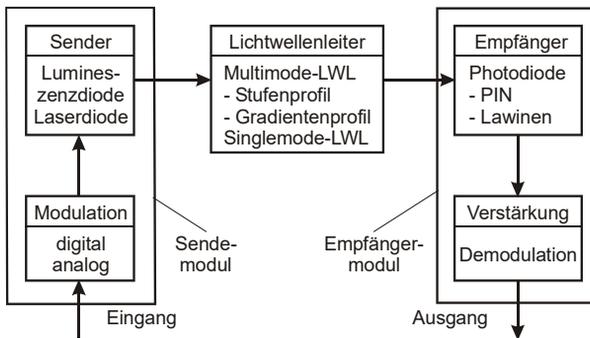


Bild 1.1: Prinzip der optischen Informationsübertragung

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 1.3.5).

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 1.4.4).

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 zu hohe Streckendämpfung verursacht, auch die Höhe der eingekoppelten Leistung und die Empfindlichkeit des Empfängers spielen eine wichtige Rolle.

**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 1.17).

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 6.1).

## 1.1.2 Vor- und Nachteile der LWL-Übertragung

LWL-Übertragungssysteme 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 Bandbreite des Koaxialkabels liegt bei 1 GHz, die des Lichtwellenleiters bei 50 THz. Das entspricht einem Faktor 50.000! Deshalb ist der Lichtwellenleiter das Übertragungsmedium der Zukunft!

Die geringen Verluste des Lichtwellenleiters ermöglichen eine 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 Bandbreite des übertragenen Signals ab. Hier zeigt der Lichtwellenleiter seine Überlegenheit vor allem im Teilnehmerbereich. Die Dämpfung des Kupferleiters steigt mit zunehmender Bandbreite an und ermöglicht nur Streckenlängen von wenigen hundert Metern.

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 Blitzschlägen.

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 6.4).

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

Bei hinreichend kleinen Leistungen ( $< (15 \dots 150) \text{ mW}$ ) ist ein Einsatz in explosionsgefährdeten Räumen 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 technischen Anforderungen und einer aufwändigeren Messtechnik. Die Anforderungen ergeben sich aus den 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  $50 \mu\text{m}$  oder  $62,5 \mu\text{m}$ ; Singlemode-LWL: Kerndurchmesser typisch  $8 \mu\text{m}$ ) 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 LWL-Kabel kann im Erdreich nicht geortet werden, sofern es kein Metall 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  $\gamma$ -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.

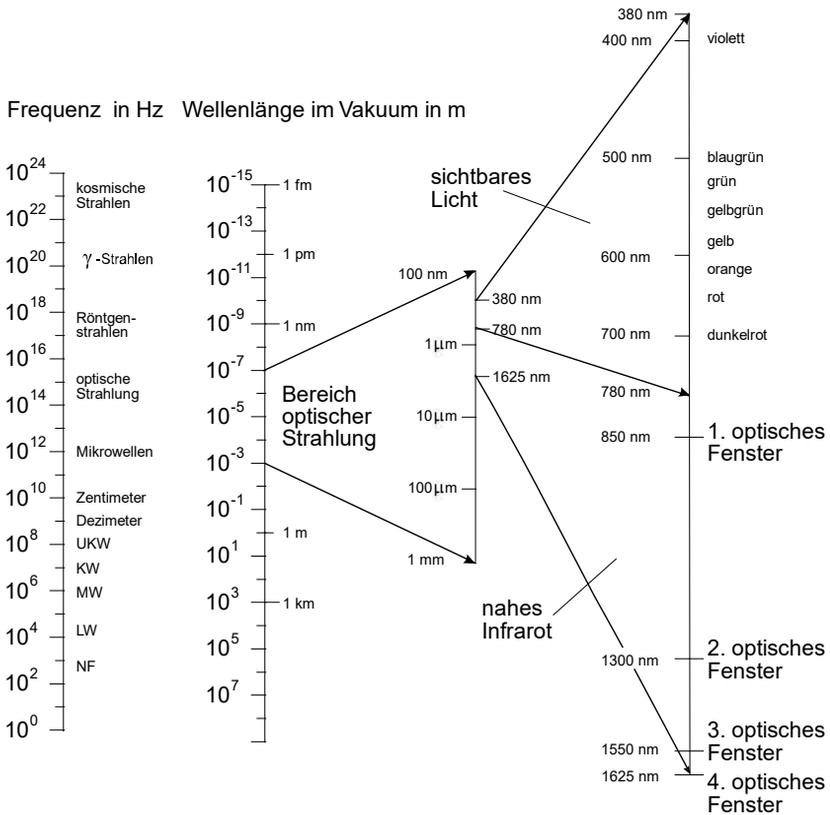


Bild 1.2: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

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/1650 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  $\mu\text{m}$ . Unmittelbar nach dem Ziehen des Lichtwellenleiters wird eine zweistufige Schutzschicht auf den Mantel aufgebracht (Durchmesser 250  $\mu\text{m}$ , neuerdings auch 200  $\mu\text{m}$  (Abschnitt 1.3.13.2)).

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

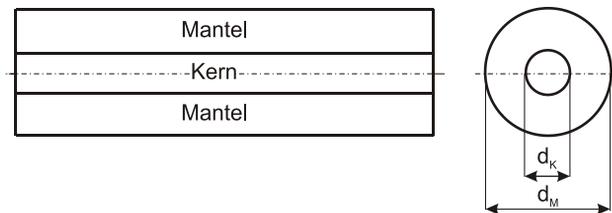


Bild 1.3: Struktur des Lichtwellenleiters



Bild 1.4: Aufbau der LWL-Faser

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

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).

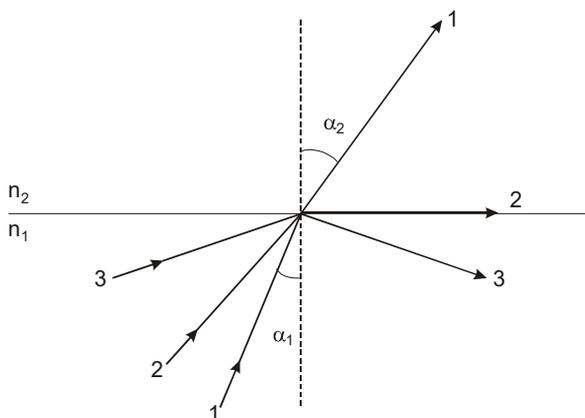


Bild 1.5: Änderung der Strahlrichtung zwischen zwei Medien

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  $\alpha_1$  und dem Austrittswinkel  $\alpha_2$  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). Vergrößert man den Einfallswinkel (Strahl 2), wächst auch der Austrittswinkel. Mit  $\alpha_2 = 90^\circ$  ist der Grenzwinkel der Totalreflexion erreicht. Das ist der maximal mögliche Brechungswinkel. Für den **Grenzwinkel der Totalreflexion** folgt aus (1.1) mit  $\sin 90^\circ = 1$ :

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

Wird dieser Winkel überschritten, geht die Brechung in eine Totalreflexion über (Strahl 3). Dann gilt das normale Reflexionsgesetz. Das Licht tritt nicht mehr 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 ( $\text{SiO}_2$ ) mit Fremdatomen (meist  $\text{GeO}_2$ ).

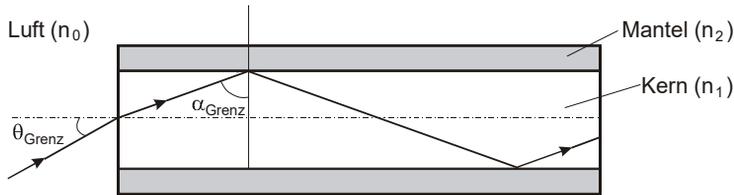


Bild 1.6: Totalreflexion im Stufenprofil-LWL

Damit der Strahl hinreichend flach auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel trifft, das heißt, damit der Grenzwinkel der Totalreflexion im Lichtwellenleiter  $\alpha_{\text{Grenz}}$  nicht unterschritten wird, darf der Einfallswinkel  $\theta_{\text{Grenz}}$  (Akzeptanzwinkel) nicht überschritten werden. Durch 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  $\theta_{\text{Grenz}}$  definiert. Sie ist ein Maß dafür, wie groß der maximale Einfallswinkel auf die Stirnfläche sein darf, damit das Licht im Lichtwellenleiter noch geführt wird.

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

Strahlen, die unter einem zu großen Winkel auf die LWL-Stirnfläche auftreffen, werden im Lichtwellenleiter nicht total reflektiert, sondern in den Mantel hinein gebrochen. Das Licht gelangt zum Coating (dieses 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).

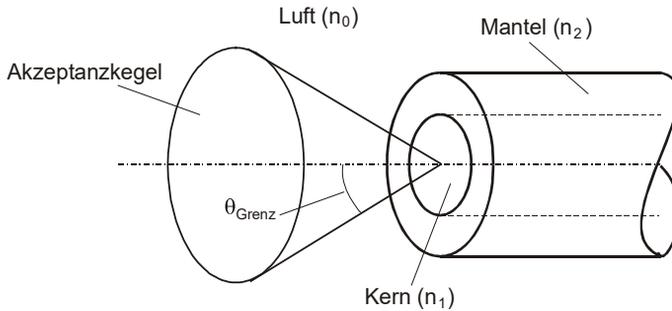


Bild 1.7: Akzeptanzkegel beim Multimode-LWL

Erfolgt die Einkopplung mit einem Winkel, der kleiner als  $\theta_{\text{Grenz}}$  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 ( $\approx 1$ ) 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 1.3.1.2).

## 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. 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:

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

Der **Dämpfungskoeffizient** oder Dämpfungsbelag  $\alpha$  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	25.000 dB/km	0,00012 km
LWL um 1966	1.000 dB/km	0,003 km
modernes optisches Glas	700 dB/km	0,004 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 25.000 dB/km liegt (Abfall auf die Hälfte nach 12 cm), 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:

<b>Beispiele:</b>	-30 dB = 1000
	-20 dB = 100
	-10 dB = 10
	<b>0 dB = 1</b>
	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 meist 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:

<b>Beispiele:</b>	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:

<b>Beispiele:</b>	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 Leistung ist sinnvoll, da diese viele Zehnerpotenzen überstreichen kann. Dabei wird die Leistung auf 1 mW bezogen. Das Ergebnis ist der Leistungspegel  $L$  oder einfach der Pegel. Dieser hat die Maßeinheit dBm:

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

Entsprechend dieser Definition gelten die folgenden Zusammenhänge zwischen Pegel und Leistung:

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

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

$$a / \text{dB} = L_0 / \text{dBm} - L_1 / \text{dBm} \quad (1.13)$$

**Beispiel:** Ein Sender hat eine Ausgangsleistung von  $P_0 = 0,5 \text{ mW}$  ( $L_0 = -3 \text{ dBm}$ ), der Empfänger misst eine Leistung von  $P_1 = 0,188 \text{ mW}$  ( $L_1 = -7,268 \text{ dBm}$ ). 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 Pegeln 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 der Pegel bei der Referenzierung auf null gesetzt werden und das Ergebnis der Messung sind dann relative dB (bezogen auf die Referenzierung). Es wird direkt die Dämpfung der Strecke angezeigt.

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

#### Zusammenfassung und Beispiele:

- Angabe Leistung  $P$  in mW (absoluter Wert)
- Angabe Pegel  $L$  in dBm (relativer Wert; bezogen auf 1 mW)
- Leistung  $> 1 \text{ mW}$ : Pegel ist positiv; Beispiel: 2 mW entspricht  $\approx 3 \text{ dBm}$
- Leistung  $< 1 \text{ mW}$ : Pegel ist negativ; Beispiel: 0,5 mW entspricht  $\approx -3 \text{ dBm}$
- 3 dB entspricht 0,5 (50 %)

- -3 dB entspricht 2 (200 %)
- 13 dB = 10 dB + 3 dB  $\approx 0,1 \cdot 0,5 = 0,05$

**Beachte:**

10 dBm + 3 dBm  $\neq$  13 dBm = 20 mW, sondern

$$10 \text{ dBm} + 3 \text{ dBm} = 10 \lg \left( \frac{10 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) + 10 \lg \left( \frac{2 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) = 10 \lg \left( \frac{20 (\text{mW})^2}{1 (\text{mW})^2} \right) \approx 13 \text{ mW}$$

Vorsicht bei der Umrechnung zwischen Pegeln und Leistungen!

**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 kann man hochreines Glas realisieren, so dass die Absorptionsverluste keine Rolle mehr spielen.

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  $\mu\text{m}$ , 1,24  $\mu\text{m}$  und 1,383  $\mu\text{m}$ .

Da die so genannten **Wasserpeaks** eine endliche Breite besitzen, werden auch benachbarte Wellenlängenbereiche beeinflusst. Deshalb müssen die für die optische Übertragung genutzten Wellenlängen einen möglichst großen Abstand von diesen Dämpfungsmaxima haben.

Daraus ergeben sich begrenzte Wellenlängenbereiche, die genutzt werden können, die optischen Fenster. Bei Fasern, die ab dem Jahr 2000 gefertigt wurden, sind die Wasserpeaks sehr klein (Low-Water-Peak-LWL) und ein großer Wellenlängenbereich wird nutzbar (Abschnitt 1.3.6).

Außerdem bewirken Molekülschwingungen Eigenabsorptionen des LWL-Materials im ultravioletten und im längerwelligen Infrarotbereich. Letztere begrenzen den nutzbaren Wellenlängenbereich nach oben.

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  $\mu\text{m}$ , 1300 nm = 1,3  $\mu\text{m}$ , 1550 nm = 1,55  $\mu\text{m}$ ) zu erkennen.

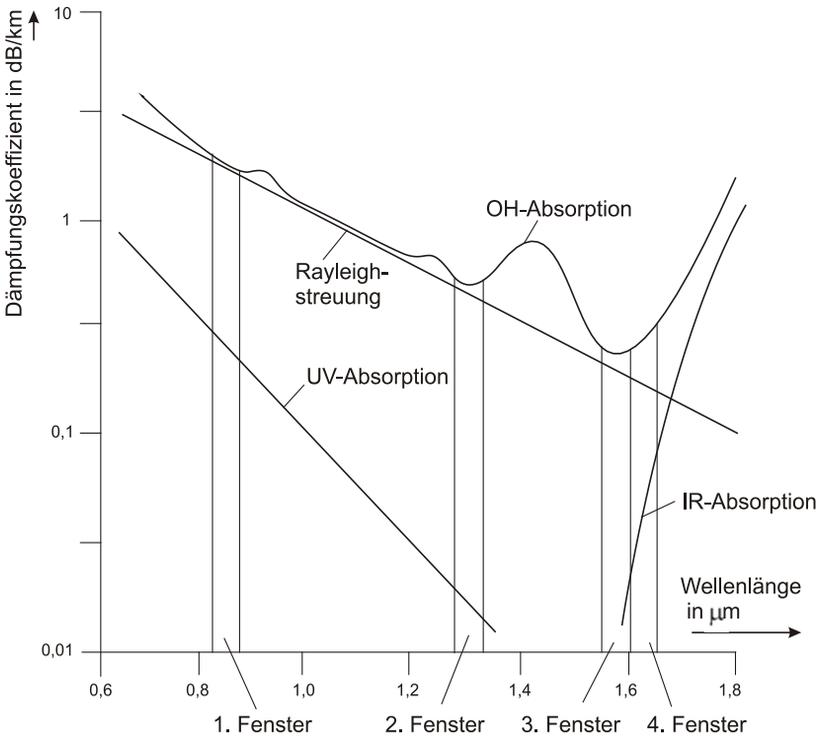


Bild 1.8: Dämpfungskoeffizient eines Lichtwellenleiters mit Wasserpeak als Funktion der Wellenlänge und typische Dämpfungseffekte