



DIETER EBERLEIN
CHRISTINA MANZKE
RALPH SATTMANN

Lichtwellenleiter- Technik

12., überarbeitete
und erweiterte Auflage

expert ›

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
eMail: 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 Weitverkehrsnetzwerken 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:

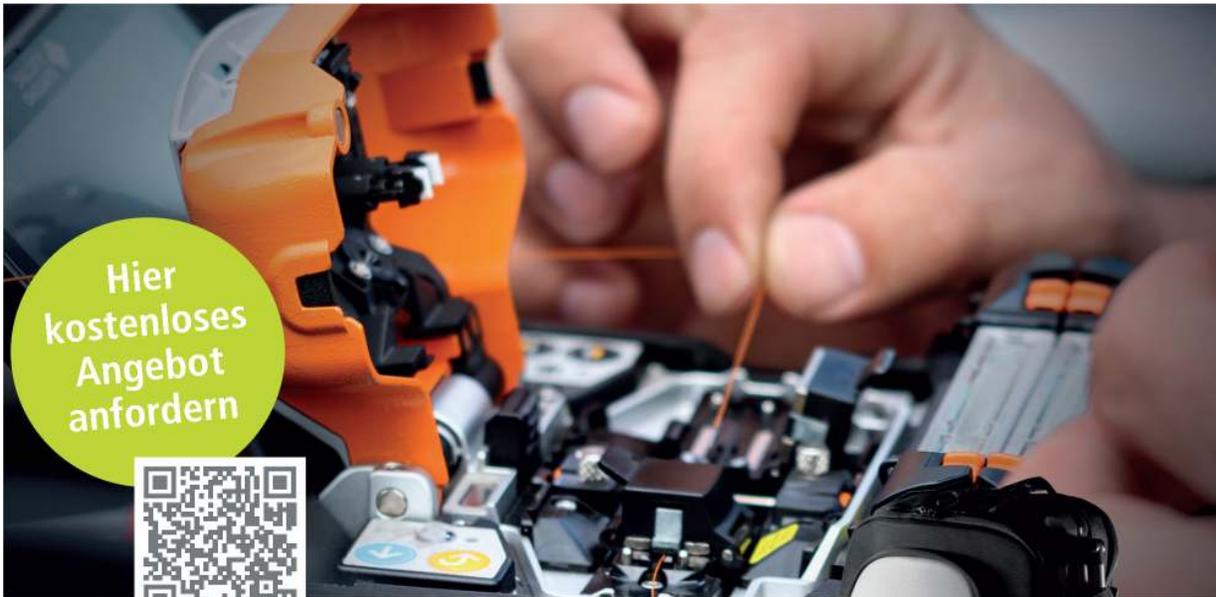
- Trends bei der Entwicklung und beim Einsatz von Transceivern
- aktualisierte Messvorschrift der Deutschen Telekom zur Messung an FTTH-Netzen
- Aktualisierung der gültigen Normen

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.

Dresden, August 2020

Dieter Eberlein

Das Handwerker Paket



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, Krimppresse
- 1 x UNICO Bag
- 1 x Video Kamera P-5000i
- 2 x Vorlauffaser Multimode OM3 50/125 100m SC/SC
- 2 x Vorlauffaser Singlemode OS2 9/125 SC/SC 300m
- 1 x Starter Werkzeugkit
- 1 x Starter Reinigungskit

***Auf Wunsch sind auch andere Ausstattungen möglich!**



the fiber experts

tso GmbH

Hermann-Köhler-Str. 13
58553 Halver

T 02353/66987 - 0

info@tso-gmbh.de

www.tso-gmbh.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 12. Auflage

Inhaltsverzeichnis

- 1 Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik**
Dieter Eberlein, Ralph Sattmann (Abschnitt 1.2)
- 1.1 Physikalische Grundlagen der Lichtwellenleiter-Technik
 - 1.1.1 Prinzip der optischen Informationsübertragung
 - 1.1.2 Vor- und Nachteile der LWL-Übertragung
 - 1.1.3 Elektromagnetisches Spektrum
 - 1.1.4 Signalausbreitung im Lichtwellenleiter
 - 1.1.5 Dämpfung im Lichtwellenleiter
 - 1.1.5.1 Definition der Dämpfung
 - 1.1.5.2 Dämpfungseffekte im Lichtwellenleiter
 - 1.1.6 Zusammenfassung
- 1.2 Materialien und Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter
 - 1.2.1 Quarzglas
 - 1.2.2 Herstellung von Quarzglas-Lichtwellenleitern
 - 1.2.2.1 Herstellung eines Kernstabes
 - 1.2.2.2 Herstellung der Vorform
 - 1.2.2.3 Faserziehen
 - 1.2.2.4 Verkabelung
- 1.3 Lichtwellenleiter-Typen und Dispersion
 - 1.3.1 Stufenprofil-Lichtwellenleiter und Modendispersion
 - 1.3.1.1 Strahlausbreitung im Stufenprofil-LWL

- 1.3.1.2 Dispersion im Stufenprofil-LWL
- 1.3.1.3 Typen von Stufenprofil-LWL
- 1.3.2 Gradientenprofil-Lichtwellenleiter und Profildispersion
 - 1.3.2.1 Strahlausbreitung im Gradientenprofil-LWL
 - 1.3.2.2 Dispersion im Gradientenprofil-LWL
 - 1.3.2.3 Numerische Apertur im Gradientenprofil-LWL
 - 1.3.2.4 Typen von Gradientenprofil-LWL
- 1.3.3 Vergrößerung Bandbreite-Längen-Produkt
 - 1.3.3.1 Parabelprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil
 - 1.3.3.2 Materialdispersion
- 1.3.4 Biegeunempfindlicher Multimode-LWL
- 1.3.5 Standard-Singlemode-Lichtwellenleiter und chromatische Dispersion
 - 1.3.5.1 Wellenausbreitung im Singlemode-LWL
 - 1.3.5.2 Dispersion im Singlemode-LWL
 - 1.3.5.3 Wellenleiter Dispersion
 - 1.3.5.4 Chromatische Dispersion
 - 1.3.5.5 Eigenschaften des Singlemode-LWL
 - 1.3.5.6 Parameter Standard-Singlemode-LWL
- 1.3.6 Singlemode-LWL mit reduziertem Wasserpeak
- 1.3.7 Dispersionsverschobener Singlemode-LWL
- 1.3.8 Cut-off shifted Lichtwellenleiter
- 1.3.9 Non-zero dispersion shifted Lichtwellenleiter
- 1.3.10 NZDSF für erweiterten Wellenlängenbereich
- 1.3.11 Lichtwellenleiter mit reduzierter Biegeempfindlichkeit
 - 1.3.11.1 Kategorie A
 - 1.3.11.2 Kategorie B
 - 1.3.11.3 Praktische Aspekte
- 1.3.12 Kategorien von Singlemode-LWL
- 1.3.13 Trends bei der Faserentwicklung

- 1.3.13.1 Weiterentwicklung des Standard-Singlemode-LWL
- 1.3.13.2 Fasern mit reduziertem Coating-Durchmesser
- 1.3.13.3 Fasern für Raummultiplex
- 1.3.14 Polarisationsmodendispersion (PMD)
 - 1.3.14.1 PMD-Effekt
 - 1.3.14.2 PMD-Koeffizient
 - 1.3.14.3 Polarisationsmodendispersion optischer Bauelemente
 - 1.3.14.4 Auswahl der zu messenden Fasern
 - 1.3.14.5 PMD-Koeffizient langer Strecken
- 1.3.15 Alterung von Lichtwellenleitern
 - 1.3.15.1 Materialeigenschaften
 - 1.3.15.2 Durchlaufzeit und Risswachstum
 - 1.3.15.3 Statistische Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit
 - 1.3.15.4 Richtlinien für zulässige Faserspannungen
 - 1.3.15.5 Richtlinien für zulässigen Biegeradien
 - 1.3.15.6 Effekte, die die Lebensdauer der Faser herabsetzen
 - 1.3.15.7 Allgemeine Hinweise zur Faserhandhabung
 - 1.3.15.8 Faserhandhabung beim Spleißen
- 1.3.16 Zusammenfassung
- 1.4 Optoelektronische Bauelemente
 - 1.4.1 Elektrooptische Wechselwirkungen im Halbleiter
 - 1.4.2 Lumineszenzdioden
 - 1.4.3 Laserdioden
 - 1.4.3.1 Arten von Laserdioden
 - 1.4.3.2 Kenngrößen und Eigenschaften von Laserdioden
 - 1.4.4 Empfängerdioden
 - 1.4.4.1 PIN-Photodiode
 - 1.4.4.2 Lawinen-Photodiode
 - 1.4.4.3 Wichtige Eigenschaften von Empfängerdioden

- 1.4.5 Transceiver
 - 1.4.5.1 Übersicht Transceiver
 - 1.4.5.2 Gigabit Interface Converter (GBIC)
 - 1.4.5.3 Small Form Factor Pluggable (SFP)
 - 1.4.5.4 Nomenklatur von Ethernet-Transceivern
 - 1.4.5.5 Reichweiten entsprechend Ethernet-Standard IEEE 802.3
 - 1.4.5.6 Ausblick
- 1.4.6 Zusammenfassung
- 1.5 Literatur

2 Lösbare Verbindungstechnik von Lichtwellenleitern

Dieter Eberlein

- 2.1 Allgemeine Eigenschaften
- 2.2 Koppelverluste zwischen Lichtwellenleitern
 - 2.2.1 Verluste zwischen Multimode-LWL
 - 2.2.2 Verluste zwischen Singlemode-LWL
- 2.3 Stirnflächenkontakt
 - 2.3.1 Stecker mit ebener Stirnfläche
 - 2.3.2 Stecker mit physischem Kontakt
 - 2.3.3 Schrägschliffstecker
 - 2.3.4 APC/HRL-Stecker
- 2.4 Verdrehsicherung
- 2.5 Stift-Hülse-Prinzip
- 2.6 Verringerung der Steckerdämpfung
 - 2.6.1 Ablageverfahren
 - 2.6.2 Prägeverfahren
- 2.7 Dämpfungs- und Reflexionsklassen
- 2.8 Steckertypen
 - 2.8.1 Farbmarkierungen

- 2.8.2 Herkömmliche Steckertypen
- 2.8.3 Small-Form-Factor-Stecker
- 2.8.4 Spezielle Steckerlösungen
- 2.9 Trends der lösbaren Verbindungstechnik
 - 2.9.1 Stecker für den Outdoorbereich
 - 2.9.2 Erhöhung der Faserpackungsdichte
 - 2.9.2.1 Datenübertragung in Rechenzentren
 - 2.9.2.2 Mehrfaserstecker
 - 2.9.2.3 URM-Stecker
 - 2.9.2.4 CS-, SN- und MDC-Stecker
 - 2.9.3 Stecker für die Leiterplattenkopplung
 - 2.9.4 Selbstreinigende Steckeroberflächen
- 2.10 Sorgfalt im Umgang mit Steckverbindern
 - 2.10.1 Auswirkungen von Verschmutzungen
 - 2.10.2 Ursachen für Verunreinigungen
 - 2.10.3 Steckerreinigung
 - 2.10.4 Sichtprüfung an Steckerstirnflächen
- 2.11 Literatur

3 Nichtlösbare Glasfaserverbindung - Fusionsspleißen

Christina Manzke

- 3.1 Einführung
- 3.2 Fusionsspleißen
 - 3.2.1 Einflussfaktoren
 - 3.2.1.1 Intrinsische Faktoren
 - 3.2.1.2 Extrinsische Faktoren
 - 3.2.2 Spleißvorbereitung
 - 3.2.2.1 Vorbereitung des Arbeitsplatzes
 - 3.2.2.2 Kabelvorbereitung
 - 3.2.2.3 Faservorbereitung

- 3.2.3 Spleißen
 - 3.2.3.1 Justage der Fasern
 - 3.2.3.2 V-Nut-Geräte
 - 3.2.3.3 3-Achsen-Geräte
 - 3.2.3.4 Verschmelzen der Fasern
 - 3.2.3.5 Selbstjustageeffekt
 - 3.2.3.6 Becksche Linie
- 3.2.4 Bestimmen der Spleißdämpfung
- 3.2.5 Zugfestigkeit
- 3.2.6 Spleiße mit hoher Festigkeit
- 3.2.7 Schutz des Spleißes
- 3.3 Spezielle Spleiße
 - 3.3.1 Faserbändchen
 - 3.3.1.1 Vorbereiten der Faserbändchen
 - 3.3.1.2 Spleißen der Faserbändchen
 - 3.3.1.3 Grenzwerte für die Spleißdämpfung
 - 3.3.1.4 Schutz des Spleißes
 - 3.3.1.5 Abschluss der Strecke
 - 3.3.2 Spleißen unterschiedlicher Fasern
 - 3.3.2.1 Standard-Singlemode-LWL auf biegeoptimierte Lichtwellenleiter (BIF)
 - 3.3.2.2 Standard-Singlemode-LWL auf NZDS-LWL
 - 3.3.2.3 Singlemode-LWL auf hochdotierte Spezialfasern
 - 3.3.2.4 Singlemode-LWL auf Multimode-LWL
 - 3.3.3 Spleißen polarisationserhaltender Fasern
- 3.4 Ausblick
- 3.5 Literatur

4 Lichtwellenleiter-Messtechnik

Dieter Eberlein

- 4.1 Allgemeine Hinweise

- 4.2 Messung von Leistungen und Dämpfungen
 - 4.2.1 Definierte Anregung des Multimode-LWL
 - 4.2.2 Leistungsmessung
 - 4.2.3 Dämpfungsmessung
 - 4.2.3.1 Praktische Hinweise
 - 4.2.3.2 Auswertung der Messergebnisse
 - 4.2.3.3 Normen zur Dämpfungsmessung
 - 4.2.3.4 Dämpfungsmessungen an Steckern
 - 4.2.3.5 Dämpfungsmessungen an Leitungen
 - 4.2.3.6 Hoch genaue Dämpfungsmessung
 - 4.2.3.7 Allgemeine Hinweise nach DIN ISO/IEC 14763-3
 - 4.2.4 Zusammenfassung
- 4.3 Optische Rückstremessung
 - 4.3.1 Prinzip der Rückstremessung
 - 4.3.2 Rückstrekurve als Messergebnis
 - 4.3.3 Interpretation der Ereignistabelle
 - 4.3.4 Gestreute und reflektierte Leistungen
 - 4.3.4.1 Rayleighstreuung
 - 4.3.4.2 Reflektierende Ereignisse
 - 4.3.5 Zusammenfassung
- 4.4 Analyse von Rückstreudiagrammen
 - 4.4.1 Interpretation der Rückstrekurve
 - 4.4.1.1 Längenmessung
 - 4.4.1.2 Dämpfungsmessung
 - 4.4.2 Auswertung problematischer Rückstreudiagramme
 - 4.4.2.1 Prinzip der bidirektionalen Messung
 - 4.4.2.2 Vorteile der bidirektionalen Messung
 - 4.4.2.3 Änderung der Rückstredämpfung an der Koppelstelle
 - 4.4.2.4 Quasibidirektionalen Rückstremessung
 - 4.4.3 Kopplung von SM-LWL mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern

- 4.4.4 Zusammenfassung
- 4.5 Interpretation der Messergebnisse
 - 4.5.1 Vergleich zwischen Dämpfungs- und Rückstreucurve
 - 4.5.2 Mittelung der Messergebnisse
 - 4.5.3 Zusammenfassung
- 4.6 Parameter und Definitionen
 - 4.6.1 Dynamik
 - 4.6.2 Impulswiederholrate
 - 4.6.3 Impulslänge und Auflösungsvermögen
 - 4.6.4 Totzonen
 - 4.6.5 Weitere Parameter
 - 4.6.6 Zusammenfassung
- 4.7 Praktische Hinweise zur Rückstremessung
 - 4.7.1 Allgemeine Hinweise
 - 4.7.2 Vor- und Nachlaufprüfschnur
 - 4.7.2.1 Vorteile
 - 4.7.2.2 Einseitige Messung mit Vorlauf-LWL
 - 4.7.2.3 Beidseitige Messung mit Vor- und Nachlauf-LWL
 - 4.7.3 Geisterreflexionen
 - 4.7.4 Auswertung und Dokumentation
 - 4.7.5 Fehlanpassungen
 - 4.7.5.1 Unterschiedliche LWL-Parameter
 - 4.7.5.2 Unterschiedliche Steckerstirnflächen
 - 4.7.5.3 Unterbrochener physischer Kontakt
 - 4.7.5.4 Gleiche Steckerstirnflächen
 - 4.7.5.5 Zusammenfassung
 - 4.7.6 Kriterien zur Beurteilung der Qualität der installierten Strecke
 - 4.7.6.1 Allgemeine Hinweise Abnahmevorschriften
 - 4.7.6.2 Vorschlag Abnahmevorschrift Multimode-LWL
 - 4.7.6.3 Vorschlag Abnahmevorschrift Singlemode-LWL

- 4.7.7 Zusammenfassung
- 4.8 Reflexionsmessungen
- 4.9 LWL-Überwachungssysteme
 - 4.9.1 Dunkelfasermessung
 - 4.9.2 Messung der aktiven Faser
- 4.10 Messungen an DWDM-Systemen
 - 4.10.1 Modifikation der herkömmlichen Messungen
 - 4.10.2 Spektrale Messungen
 - 4.10.3 Dispersionsmessungen
 - 4.10.4 Zusammenfassung
- 4.11 Literatur

5 Fiber-to-the-Home/Building

Dieter Eberlein

- 5.1 Anforderungen an die Bandbreite
- 5.2 Netzstrukturen
 - 5.2.1 Ethernet-Punkt-zu-Punkt (EP2P)
 - 5.2.2 Punkt-zu-Multi-Punkt
 - 5.2.2.1 Aktives optisches Netz (AON)
 - 5.2.2.2 Passives optisches Netz (PON)
 - 5.2.3 Vergleich der Varianten
- 5.3 Offene Infrastruktur
- 5.4 Wellenlängenbelegung bei FTTx
- 5.5 Normen
 - 5.5.1 Breitband-PON
 - 5.5.2 Gigabit-PON
 - 5.5.3 Gigabit-Ethernet-PON
 - 5.5.4 Next-Generation PON
 - 5.5.5 Downstream 10 Gbit/s
 - 5.5.6 TWDM-PON
 - 5.5.7 Wellenlängenmultiplex-PON (P2P WDM-PON)

- 5.5.8 Zusammenfassung FTTx-Varianten
- 5.6 Passive Komponenten
 - 5.6.1 Steckverbinder
 - 5.6.2 Lichtwellenleiter
 - 5.6.3 Kabel für FTTx-Projekte
 - 5.6.4 Koppler
 - 5.6.5 Ratgeber für Planung und Bau (DTAG)
- 5.7 Aktive Komponenten
 - 5.7.1 Sender
 - 5.7.2 Empfänger
 - 5.7.3 Optische Verstärker
- 5.8 Faserabschluss beim Teilnehmer
 - 5.8.1 Pigtail mit Fusionspleißgerät anspleißen
 - 5.8.2 Pigtail mit mechanischem Spleißgerät anspleißen
 - 5.8.3 Stecker mit Fusionspleißgerät anspleißen
 - 5.8.4 Stecker mit mechanischem Spleißgerät anspleißen
 - 5.8.5 Verlegung vorkonfektionierter Kabel
- 5.9 Budgetplanung
- 5.10 Normung
- 5.11 Messungen an FTTH/B-Netzen
 - 5.11.1 Allgemeine Hinweise
 - 5.11.2 Empfehlungen der Deutschen Telekom
- 5.12 Förderung durch den Bund
- 5.13 Zusammenfassung
- 5.14 Literatur

6 Optische Übertragungssysteme

Dieter Eberlein

- 6.1 Planung von LWL-Strecken aus physikalischer Sicht
 - 6.1.1 Allgemeine Regeln
 - 6.1.2 Planung des Dämpfungsbudgets

- 6.1.3 Pegeldiagramm
- 6.1.4 Dispersion in Lichtwellenleitern
 - 6.1.4.1 Chromatische Dispersion
 - 6.1.4.2 Dispersionstoleranz
 - 6.1.4.3 Kompensation der chromatischen Dispersion
- 6.1.5 Systemplanung
- 6.1.6 Zusammenfassung
- 6.2 Mehrkanalübertragung über MTP/MPO-Stecker
 - 6.2.1 Einsatzfälle
 - 6.2.2 Mehrkanalübertragung
 - 6.2.3 Beschaltungsmöglichkeiten
 - 6.2.4 Dämpfungsmessung an Mehrfaserkabeln
- 6.3 Realisierung hoher Bandbreiten mit Multimode-LWL
 - 6.3.1 Von Ethernet zu 10-Gigabit-Ethernet
 - 6.3.2 40/100-Gigabit-Ethernet
 - 6.3.3 Physikalische Begrenzungen
 - 6.3.4 Bandbreiten-Definitionen
 - 6.3.4.1 LED-Bandbreite
 - 6.3.4.2 EMB-Bandbreite
 - 6.3.4.3 minEMBc-Bandbreite
 - 6.3.5 Kategorien von Multimode-Lichtwellenleitern
 - 6.3.6 Zusammenfassung
- 6.4 Systeme mit Kunststoff-Lichtwellenleitern
 - 6.4.1 Eigenschaften von Kunststoff-Lichtwellenleitern
 - 6.4.2 Komponenten für Kunststoff-LWL-Systeme
 - 6.4.3 Verbindungstechnik
 - 6.4.4 Passive optische Komponenten
 - 6.4.5 Einsatz von Kunststoff-Lichtwellenleitern
 - 6.4.6 Weitere Entwicklungen
 - 6.4.7 Zusammenfassung
- 6.5 Optische Freiraumübertragung
 - 6.5.1 Vergleich mit herkömmlichen Verfahren

- 6.5.2 Einsatzfelder
- 6.5.3 Prinzip der optischen Freiraumübertragung
- 6.5.4 Besonderheiten der optischen Freiraumübertragung
- 6.5.5 Optische Freiraumübertragungssysteme
- 6.5.6 Budgetkalkulation
- 6.5.7 Zusammenfassung und Ausblick
- 6.6 Literatur

7 Anhang

Dieter Eberlein

- 7.1 Abkürzungen
- 7.2 Formelzeichen und Maßeinheiten
- 7.3 Fachbegriffe

8 Stichwortverzeichnis

9 Autorenverzeichnis

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-Zugangsrates 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 Laserdiode 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.

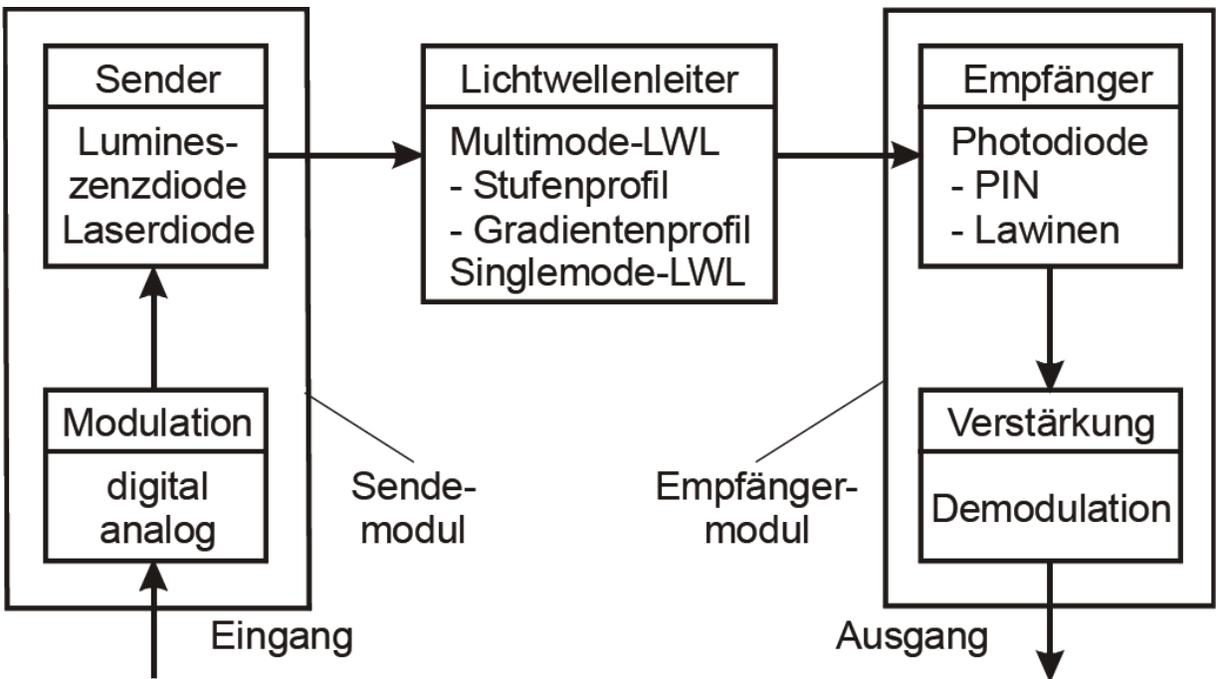


Bild 1.1: Prinzip der optischen Informationsübertragung

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 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 6.4](#)).

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

Bei hinreichend kleinen Leistungen ($< (15...150) \text{ mW}$) 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. optischelektrische 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.

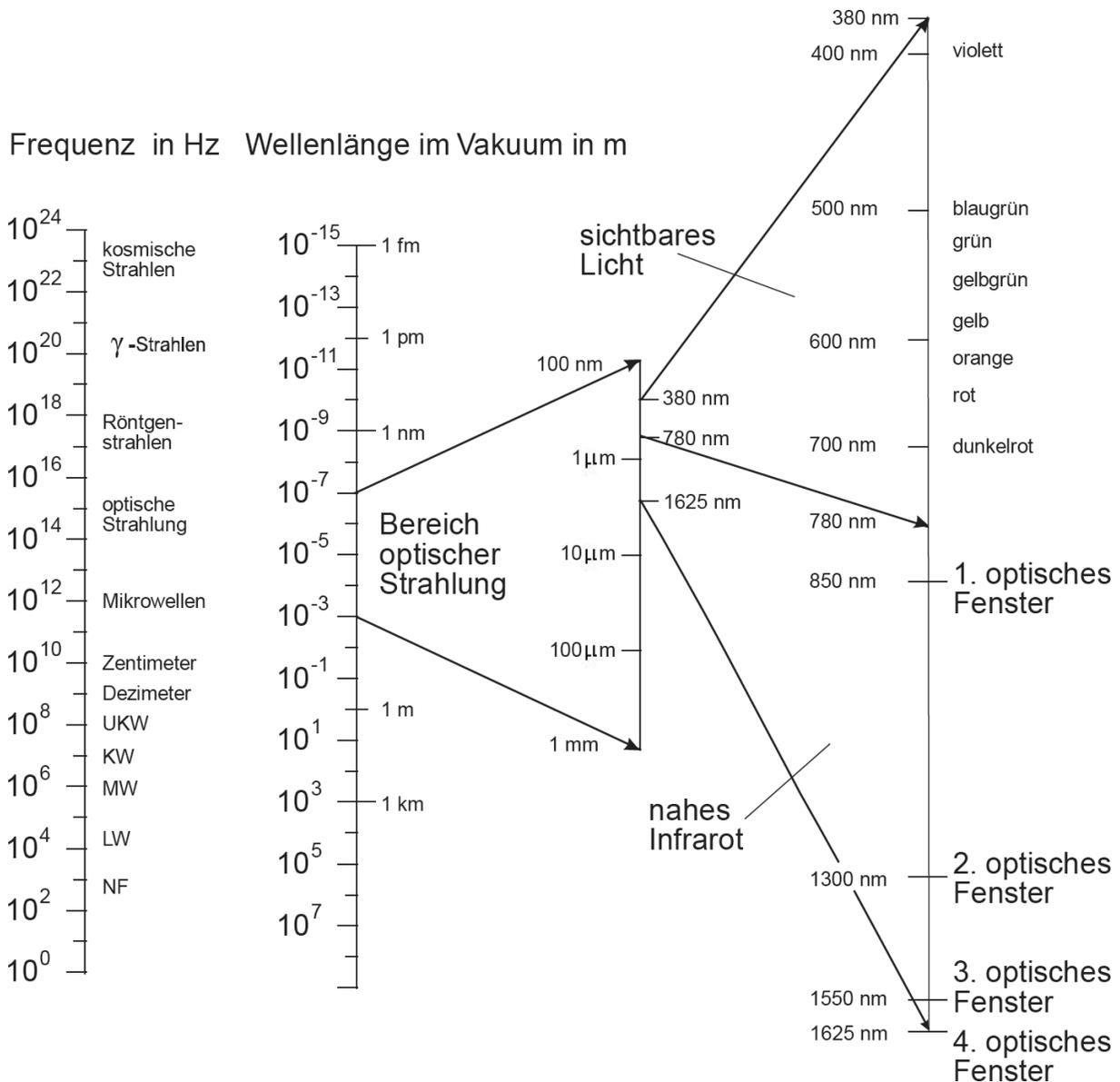


Bild 1.2: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

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/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.

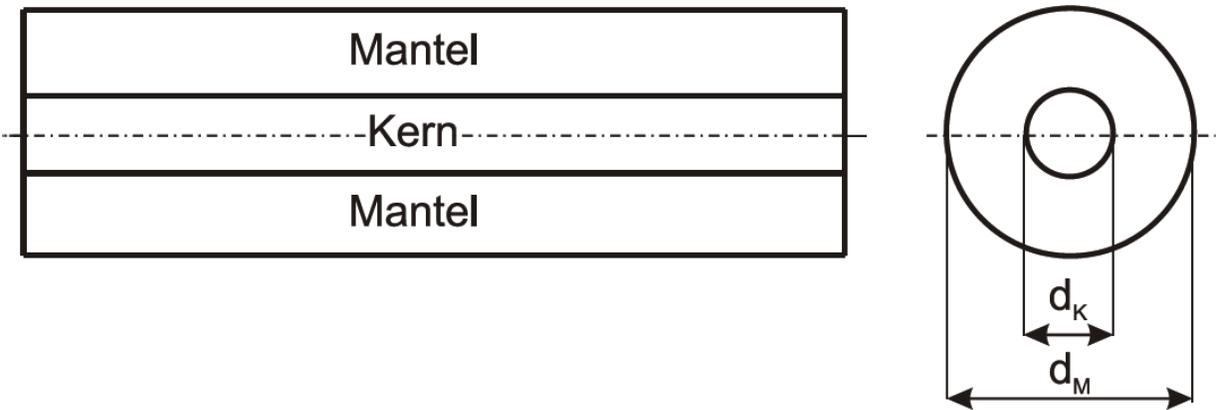


Bild 1.3: Struktur des Lichtwellenleiters

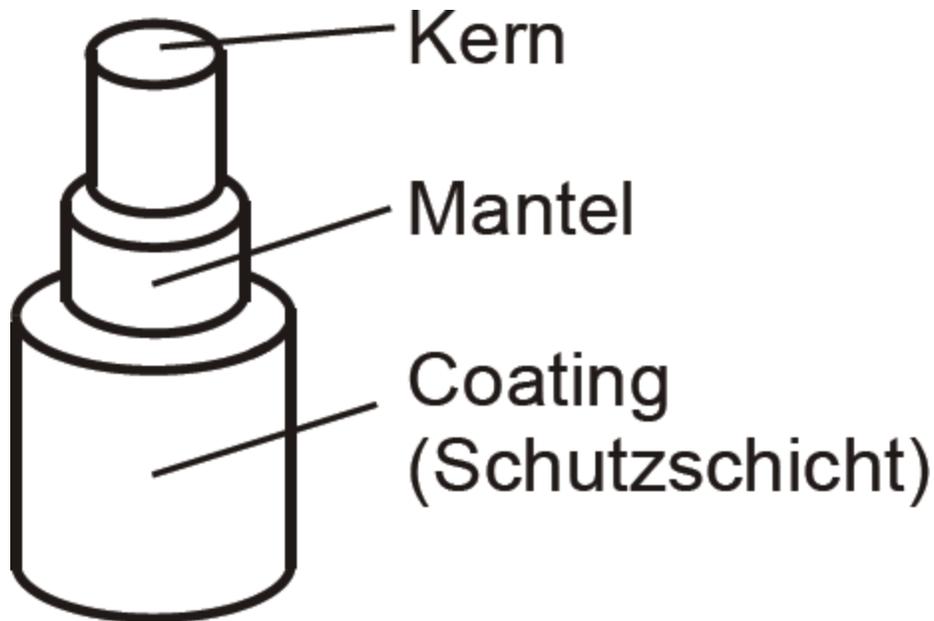


Bild 1.4: Aufbau der LWL-Faser

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**.