

XIII Lichtwellenleiter

XIII.1 Lichtwellenleiter

In einem Lichtwellenleiter (kurz: LWL) werden Daten in Form von moduliertem Licht übertragen. Mit "Licht" ist hier Strahlung im nahen Infrarot ($\lambda = 850 - 1600 \text{ nm}$) gemeint. Dabei werden auf der Sendeseite die elektrischen Signale in Licht umgewandelt, das in den LWL eingekoppelt wird. Im LWL wird das Licht geführt und kann ihn nicht verlassen. Verluste treten nur auf durch Dämpfung des Lichts an Farbzentren und durch Streuung an Inhomogenitäten. Der LWL selbst ist relativ dünn und kann wie ein Kabel verlegt werden. Auf der Empfangsseite wird das austretende Licht in elektrische Signale verwandelt, aus denen die Daten zurückgewonnen werden.

XIII.2 Lichtwellenleiter Typen

Lichtwellenleiter sind Fasern aus optisch hochtransparentem Material, in denen sich eingekoppeltes Licht sehr verlustarm ausbreitet. In der Regel wird extrem reines Quarzglas eingesetzt. Durch den radialen Verlauf des Brechungsindex n wird das Licht im Kern der Faser geführt. Verluste durch Streuung und Absorption werden durch die Wahl des Fasermaterials und extreme Sauberkeit und Sorgfalt bei der Herstellung minimal gehalten.

Nach dem radialen Verlauf des Brechungsindex unterscheidet man die 3 heute gebräuchlichen Fasertypen:

a) Stufenindexfaser

Totalreflexion tritt an der Grenzfläche zwischen 2 Materialien mit verschiedenem Brechungsindex n auf. Kommt das Licht aus dem Material mit höherem n und trifft so flach auf, daß nach dem Brechungsgesetz kein gebrochener Lichtstrahl mehr existiert, so wird das Licht verlustlos reflektiert. In einer Stufenindexfaser wird der Faserkern konzentrisch vom Mantel mit einem kleineren Brechungsindex umgeben. Bis zu einem Maximalwinkel gegen die Faserachse wird das Licht an der Grenzfläche totalreflektiert und kann den Kern nicht verlassen. Die Strahlen mit verschiedenen Winkeln gegen die Achse haben aber verschiedene optische Weglängen und dadurch Laufzeitunterschiede.

Vorteile: Einfache Herstellung, große Kerndurchmesser möglich, dadurch einfache Einkopplung des Lichts.

Nachteile: Verschieden lange Lichtwege bei verschiedenen Winkeln (Dispersion), hohe Dämpfung

Anwendung: Kurze Übertragungstrecken, geringe Bandbreite (bis ca. 100 kBit/s)

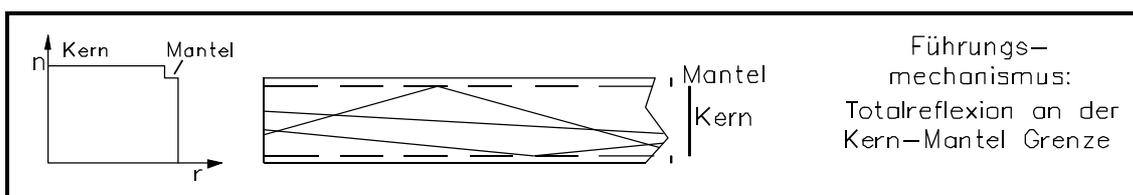


Abb. 13-1: Stufenindexfaser

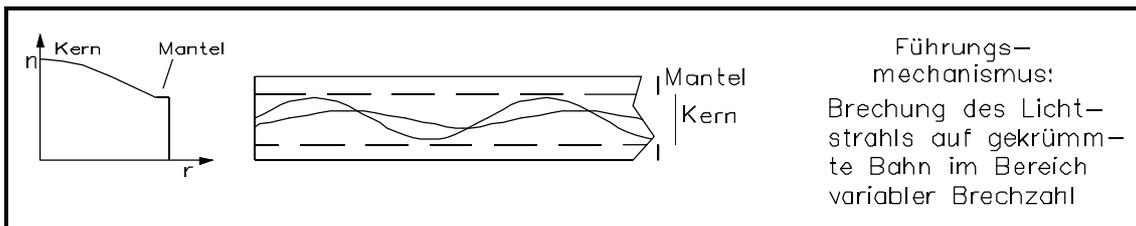


Abb. 13-2: Gradientenindexfaser

b) Gradientenindexfaser

In einem Material mit einem Gradienten (Verlauf) der Brechzahl wird ein Lichtstrahl zum Material mit höherem n hin gebrochen. Dafür hat die Faser eine vom Kern zum Mantel hin stetig abnehmende Brechzahl. Wenn die Brechzahl einen exakt parabelförmigen Verlauf hat, so bewegt sich das Licht im Faserkern auf einer sinusförmigen Bahn. In diesem Fall ist die Laufzeit für verschiedene Winkel gegen die Achse gleich lang, da der längere Lichtweg durch die kleinere Brechzahl am Rande des Faserkerns kompensiert wird. Dort ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts höher, als auf der Faserachse. Der Herstellungsprozeß dieser Faser ist sehr aufwendig, da der Brechzahlverlauf sehr genau eingehalten werden muß. Bei allen Arbeitsgängen ist extreme Sauberkeit und Sorgfalt erforderlich.

Vorteile: Minimale Dispersion, geringere Dämpfung

Nachteile: Aufwendige Herstellung, kleiner Kerndurchmesser (typ. 50 μm) erschwert Einkopplung

Anwendung: Längere Übertragungstrecken, mittlere Bandbreite (bis ca. 560 MBit/s)

c) Monomodefaser

Im extrem dünnen Kern (2-5 μm) dieser Faser erlaubt die Wellennatur des Lichts (Beugung) nur eine Ausbreitung des Lichts parallel zur Faserachse. Die Lichtwege sind exakt gleich lang, es verbleibt eine geringe Dispersion durch die spektrale Bandbreite des Senders zusammen mit der wellenlängenabhängigen Brechzahl.

Vorteile: Geringste Dämpfung bei größter Bandbreite

Nachteile: Schwierige Einkopplung, höchste Präzision für Verbindungen erforderlich

Anwendung: Lange Übertragungstrecken mit Bandbreiten >1 GBit/s.

XIII.3 Vorteile von Lichtwellenleitern

Der Mehraufwand für die Hin- und Rückwandlung zwischen Strom und Licht wird durch die großen, damit erzielten Vorteile gerechtfertigt. Diese sind unter anderem:

- Die Dämpfung des Lichts ist sehr gering und unabhängig von der Modulationsfrequenz. Das erspart auf langen Strecken viele Zwischenverstärker.
- Die Bandbreite ist sehr groß und

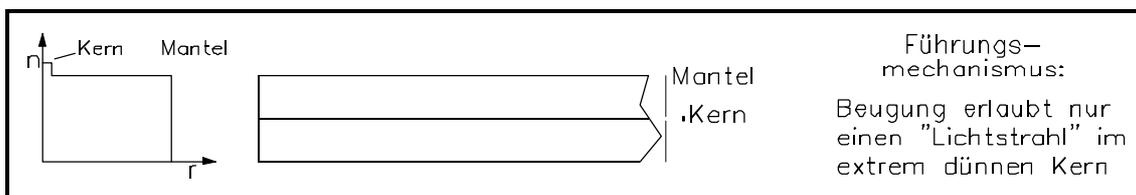


Abb. 13-3: Monomodefaser

wird erst bei sehr hohen Modulationsfrequenzen durch das Verschmieren der Impulse begrenzt. Eine einzige Faser kann ein Vielfaches der Bandbreite eines Koaxkabels übertragen.

- Die Fasern sind sehr dünn und leicht. Ein -zig adriges LWL-Kabel ist nicht dicker als ein herkömmliches Koaxkabel.

- Die Fasern isolieren elektrisch und sind damit immun gegen Blitzschlag und elektromagnetische Störungen. Sie überbrücken Potentialunterschiede, z.B. in der Hochspannungstechnik.

- Es gibt kein Übersprechen zwischen Fasern und das Abhören ist sehr schwierig.

- Das Ausgangsmaterial ist überwiegend Quarz, also Sand. Dieser ist reichlich vorhanden und die Kupfervorräte der Erde werden geschont.

XIII.4 LWL Kabel und Verbindungen

Die Lichtleitfaser ist durch ihren geringen Durchmesser sehr empfindlich gegen Zug. Ihre Oberfläche darf nicht verletzt werden, schon kleinste Kratzer können zur Keimstelle eines Faserbruchs werden. Für die Verlegung in Kabelkanälen und in der Erde muß die nackte Faser geschützt werden.

Der erste Schutz ist ein sofort nach dem Faserziehen aufgebracht "Cladding" aus einem nachgiebigen Kunststoff. Als weiterer Schutz wird die Faser zumindest mit einer Umhüllung umspritzt. Solche Fasern können innerhalb von Geräten eingesetzt werden.

Für eine Verlegung in der Erde oder im Freien muß ein LWL-Kabel unbedingt Elemente zur Zugentlastung haben. Das Problem liegt darin, daß Glas einen relativ hohen E-Modul hat. Eine Möglichkeit ist die Verwendung einer Zugentlastung mit einem höhe-

ren E-Modul als Glas, wie z.B. Kevlar. Diese Fasern wirken auch als Polster bei mechanischer Beanspruchung. Alternativ kann die Faser etwas spiralförmig in eine Hohlader eingebracht werden und dadurch immer etwas Reservelänge haben. Natürlich muß die Zugentlastung bei Verbindungen oder Steckern korrekt abgefangen werden.

Hohe Präzision ist bei der Verbindung von Lichtwellenleitern erforderlich. Jeder Versatz der Faserachsen oder Verkippen führt zu Lichtverlust, also zu Dämpfung. Sind die Toleranzen bei Stufenindexfasern noch erträglich, so stellen insbesondere Monomodefasern mit ihrem wenige μm dicken Kern extreme Forderungen an die Genauigkeit der Verbindungselemente und die Konzentrität von Faser und Verbindungselement.

Fasern werden mit Steckern oder Spleißen verbunden. Stecker werden nur verwendet, wenn eine lösbare Verbindung unverzichtbar ist. In allen anderen Fällen, besonders bei Monomodefaser, wird gespleißt, also Faser direkt mit Faser verbunden. Einfache Spleißgeräte drücken die beiden Faserenden in einer exakt kalibrierten Hülse (=Ferrule) oder einer V-förmigen Nut gegeneinander und verankern sie mit Kleber oder aufgepreßten elastischen Formstücken.

Höchsten Anforderungen genügen Spleißgeräte, welche die aufeinander einjustierten Faserenden in einem HF-Lichtbogen miteinander verschmelzen. Diese Geräte sind aber sehr kostspielig und erfordern sorgfältige Bedienung. Die Dämpfung eines guten Spleißes liegt unter 0,5 dB.

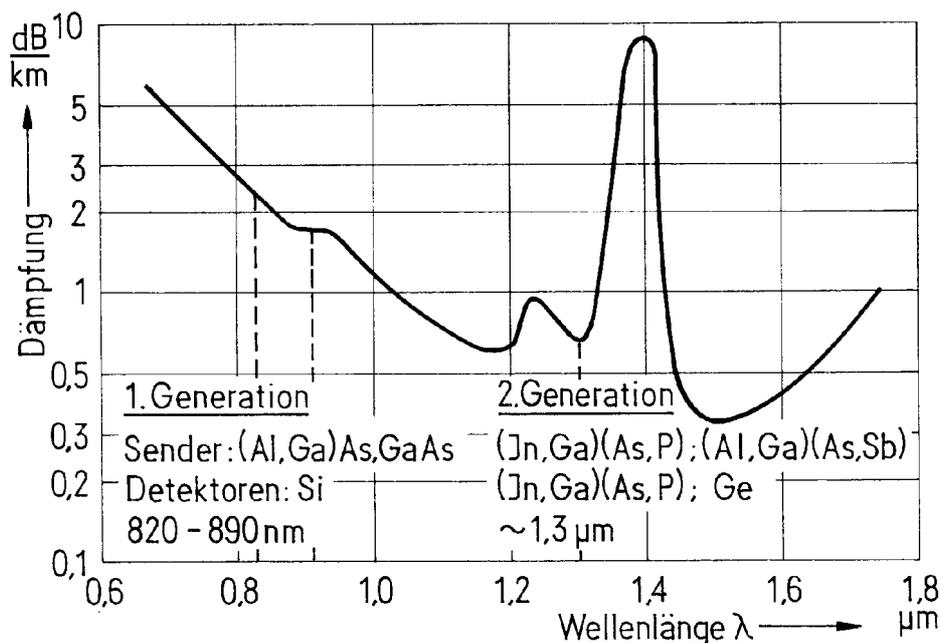


Abb. 13-4: Faserdämpfung und Wellenlänge

XII.5 Daten von Lichtwellenleitern

Abb. 13-4 zeigt den Verlauf der Faserdämpfung in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Wellenlängenbereiche der 1. und 2. Generation von Sende- und Empfangselementen sind markiert. Bauteile der 3. Generation arbeiten bei 1,6 μm . Diese Bereiche spiegeln die zeitlichen Entwicklung der Halbleitertechnik wieder, welche immer längere Wellenlängen und damit kleinere Dämpfungen erschloß.

Der Verlauf der Faserdämpfung über der Wellenlänge zeigt 3 Dämpfungsminima bei Wellenlängen um 850, 1300 und 1600 nm. Diese 3 Bereiche haben sich für den LWL Einsatz eingebürgert. 850 nm hat den Vorteil, Empfangsdioden aus Silizium einsetzen zu können. Die mit wachsender Wellenlänge deutlich abnehmende Dämpfung rechtfertigte die Entwicklung zu 1300 und 1600 nm.

Die wichtigsten Eigenschaften einer Lichtleitfaser sind:

Fasertyp:

Stufenindex, Gradientenindex, Monomode

Kerndurchmesser:

Stufenindex: 100 - 350 μm
 Gradientenindex: 50 - 65 μm
 Monomode: 5 - 10 μm

Betriebswellenlänge:

850, 1300, 1600 nm

Dämpfung:

dB/km bei Betriebswellenlänge

Brechzahl des Kerns:

Dispersion:

ns/km Breite eines Nadelimpulses nach Durchlaufen der Faser

Numerische Apertur:

Maximalwinkel gegen die Achse für geführtes Licht

XIII.6 Elektrooptische Bauelemente für LWL

a) Lichtempfänger

Als Lichtempfänger werden heute PIN-Photodioden und Avalanche-(Lawinen-) Photodioden (APD) eingesetzt. Diese Dioden geben einen zur Lichtintensität proportionalen Photostrom ab. Avalanche-Photodioden verstärken diesen Strom in der Diode selbst durch den Lawineneffekt breitbandig um Faktoren von 50 - 200. Sie erfordern aber eine hohe Betriebsspannung (ca. 150-300 V). Beide Empfängertypen erfordern schnelle rauscharme Nachverstärker.

Die für den Einsatz wichtigsten Eigenschaften sind:

- Wellenlängenbereich der Empfindlichkeit
- Schaltzeit und Sperrschichtkapazität
- Größe der Empfangsfläche
- Verstärkungsfaktor und empfohlene Betriebsspannung bei APD
- Dunkelstrom, Rauschdaten

b) Lichtsender

Auch bei den Lichtsendern gibt es 2 Typen, die Lumineszenzdiode und die Laserdiode. Lumineszenzdioden strahlen ihr Licht isotrop in alle Raumrichtungen ab. Besondere Ausführungen mit extrem kleiner Strahlfläche (Burros-Dioden) erzielen hohe Leuchtdichten für eine gute Einkopplung von möglichst viel Licht in den Faserkern.

Laserdioden arbeiten im Laserbetrieb mit den Spaltflächen des Diodenkristalls als Spiegeln. Die gerichtete Abstrahlung und die extrem kleine Austrittsfläche an den Spiegeln resultiert in etwa der 100-fache Strahldichte mit entsprechend besserer Einkopplung. Für Monomodefaser sind nur Laserdioden als Sender einsetzbar.

Die wichtigsten Eigenschaften von Lichtsendern sind:

- Wellenlänge (850-900 nm, ca. 1300 nm, ca. 1600 nm)
- Spektrale Bandbreite der Ausstrahlung
- Abgestrahlte Leistung bzw. die in einen bestimmten Fasertyp eingekoppelte Leistung
- Obere Grenzfrequenz der Modulierbarkeit
- Einsatzstrom der Laserwirkung bei Laserdioden

Die Information wird heute durch digitale Modulation der Lichtintensität übertragen und beim Empfang der Fotostrom des Empfängers ausgenutzt. Man wertet also nur die Lichtmenge aus, nicht die Lichtschwingung. Dies ergibt zwar bereits eine deutliche Verbesserung gegenüber Koaxkabeln, ist aber noch weit vom theoretischen Optimum entfernt.

c) Verstärker

Bei sehr langen Strecken, z.B. Seekabeln erfordert die Faserdämpfung eine Verstärkung des Lichtsignals. In der Anfangszeit wurde dafür in Repeatern das Licht empfangen und die Information einem Sendeelement für den neuen Streckenabschnitt aufmoduliert. Mittlerweile gibt es spezielle, nach dem Laserprinzip funktionierende Fasern, in denen das Lichtsignal direkt beim Durchlaufen verstärkt wird.

Das brachte eine gewaltige Vereinfachung langer LWL-Strecken. Die Dispersion der Faser verschmiert aber die Impulse, was in gewissen Abständen Repeater zur Regeneration des Signals erfordert.