

2.2 Lichtwellenleiter/Übertragung

2.2.1 Aufbau einer Stufenindex-Glasfaser

- Kern: Durchmesser ca. 50...100 μm ; Quarzglas (SiO_2) mit Brechungsindex 1,527
- Mantel: Durchmesser ca. 100...120 μm ; Quarzglas mit Brechungsindex 1,517
- Unterschiedliche Brechungsindices durch Dotierung (GeO_2 u.a.)
- Coating: Kunststoff, undurchsichtig
- Beispiel: Stufenindex-Glasfaser Hirschmann OKE-1000A
 - Kern: Durchmesser 980 μm ; Material: Polymer
 - Mantel: Durchmesser 1000 μm ; Material: Polymer
 - Coating: undurchsichtig, Außendurchmesser 2mm, Material: Kunststoff
 - Verwendung: Low-Cost-Bereich, kurze Strecken $l < 50$ m

2.2.2 Normierte Brechzahldifferenz

- Die normierte Brechzahldifferenz einer Faser gibt den prozentualen Unterschied der Brechzahlen von Kern und Mantel der Faser an.

$$\Delta = 100\% \cdot \frac{n_K - n_M}{n_K} = 100\% \cdot \left(1 - \frac{n_K}{n_M}\right) \quad (1)$$

2.2.3 Leistungsdämpfung in der Glasfaser

Die in der Glasfaser fließende Lichtleistung (Lichtstrom) wird mit dem Symbol Φ bezeichnet (statt mit dem Symbol P). Einheit von Φ ist damit Watt.

Bei einer LWL-Übertragungsstrecke wird die Lichtleistung am Anfang der Faser mit Φ_1 und am Ende der Faser mit Φ_2 bezeichnet.

Am Ende eines LWLs ist weniger Lichtenergie vorhanden als am Anfang ($\Phi_1 > \Phi_2$). Wie bei jeder realen Übertragung tritt Dämpfung auf.

Der Dämpfungsfaktor wird berechnet mit:

$$D = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (2)$$

Wie in der elektrischen Übertragungstechnik rechnet man allgemein mit dem Dämpfungsmaß A :

$$A = 10 \log \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad \text{in} \quad \text{dB} \quad (3)$$

Ebenso wie in der elektrischen Übertragungstechnik nimmt das Dämpfungsmaß längs eines LWLs linear zu:

$$A = l \cdot \alpha \quad (4)$$

α ist dann für eine bestimmte Faser eine Konstante.

So kann man zu jeder Faser einen Dämpfungskoeffizienten α angeben:

$$\alpha = \frac{A}{l} \quad \text{in} \quad \text{dB/km} \quad (5)$$

Die Tabelle 1 zeigt die Dämpfungswerte verschiedener Materialien und verschiedener Generationen von Lichtwellenleitern¹

¹Quellen: S. W. Best: Nachrichtentechnik mit Lichtwellenleitern; Hüthig 1987 und H. J. Krause: Glasfasertechnik verständlich gemacht; Philips AG 1983.

Material	α in dB/km
Flusswasser	100.000
Fensterglas	50.000
Brillenglas	3.000
Nebel	500
Stadtluft	10
LWL 1962	1.100
LWL 1966	800
LWL 1970	10
LWL 1974	2
LWL 1977	0,5
LWL 2003	0,2

Tabelle 1: Dämpfungskoeffizienten verschiedener Materialien

Der Dämpfungskoeffizient ist stark frequenzabhängig (und damit wellenlängenabhängig). Bei niedrigen Frequenzen (rot-Seite) wirkt sich die IR-Absorption aus, bei hohen Frequenzen (violett-Seite) die UV-Absorption und vor allem sehr stark die Rayleigh-Streuung. Diese Art der Streuung wächst bei verdoppelter Frequenz um den Faktor 16 (!):

$$\alpha_{Rayleigh} = konst \cdot f^4 \quad (6)$$

Während IR- und UV-Absorption sich technisch beeinflussen lassen, ergibt die Rayleigh-Streuung für die Dämpfung eine nicht überwindbare physikalische Grenze.

Aus diesem Grunde versuchte man erfolgreich, mit der Frequenz in den Rot- und Infrarot-Bereich auszuweichen. Im Laufe der Zeit erreichte man so mehrere optische Fenster (=Bereiche mit niedriger Dämpfung), die in der Reihenfolge ihres Erreichens nummeriert wurden:

- 1. optisches Fenster (noch meistverwendet): $\lambda_1 = 850$ nm (nahes infrarot)
- 2. optisches Fenster: $\lambda_2 = 1300$ nm (infrarot)
- 3. optisches Fenster: $\lambda_3 = 1550$ nm (infrarot)

Diese Wellenlängenangaben beziehen sich auf die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts im Vakuum! Im Lichtwellenleiter ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit um den Faktor n kleiner, also auch die Wellenlänge ($\lambda = \frac{c}{f}$):

- 1. optisches Fenster: $f_0 = 355$ THz
- 2. optisches Fenster: $f_1 = 230$ THz
- 3. optisches Fenster: $f_3 = 195$ THz

2.2.4 LWL-Sender

Zunächst ist für einen LWL-Sender jede (technische) Lichtquelle (also keine offene Flamme) denkbar:

- Glühlampe
- Glimmlampe
- Vakuum-Fluoreszenz-Lampe (bekannt durch VF-Displays)
- Plasma-Lampe (bekannt durch Plasma-Displays)

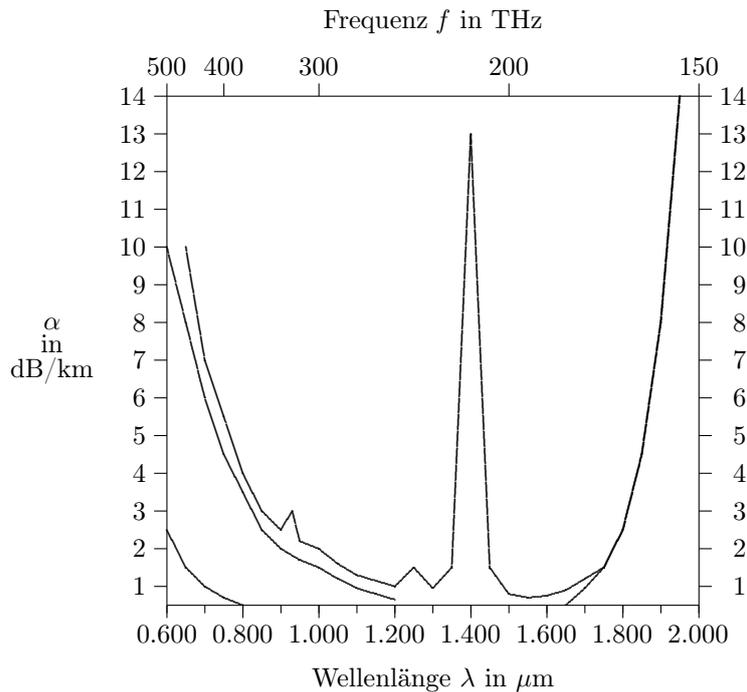


Abbildung 1: Typischer Dämpfungsverlauf eines LWLs

- LED
- Laserdiode
- Helium-Neon-Laser

An einen LWL-Sender werden jedoch einige besondere Anforderungen gestellt:

- Die Lichtquelle muss den Lichtstrom sehr schnell ein- und ausschalten können, damit sehr hohe Frequenzen übertragen werden können (bzw. sehr hohe Datenraten erreicht werden können). Damit fallen Glühlampe ($f_{max} = 100$ Hz), Glimmlampe ($f_{max} = 20$ kHz), VF-Anzeige (je nach Nachleuchtdauer), Plasma-Lampe und alle Kombinationen mit LCD ($f_{max} = 10$ Hz) und optomechanischen Spiegeln/Schaltern heraus.
- Die Lichtquelle muss lichtstark sein. Damit schränken sich die Möglichkeiten für LEDs ein.
- Die Lichtquelle soll Licht in einem der optischen Fenster der Faser übertragen. Rote bis blaue LEDs fallen damit ebenfalls heraus.
- Die Lichtquelle soll preisgünstig sein. Helium-Neon-Laser scheidet aus Kostengründen aus.
- Der LWL-Sender soll wartungsarm sein und eine lange Lebensdauer aufweisen. Langzeituntersuchungen gibt es für viele Elemente noch nicht.

Daher werden für industrielle LWL-Sender zur Zeit nur LEDs und Laserdioden verwendet.

2.2.5 Betrieb des LWL-Senders

LEDs und Laserdioden unterscheiden sich durch ihre Arbeitsweise:

- LEDs sind Rauschquellen. Ihr Frequenzspektrum (bzw. Wellenlängenspektrum) ist kontinuierlich mit einem Maximum. Die ausgesandten Wellenzüge sind statistisch verteilt, vergleichbar mit einem Rauschgenerator, an dessen Ausgang ein sehr schmalbandiges Filter angeschlossen wurde.
- LDs sind Oszillatoren. Ihr Frequenzspektrum besteht näherungsweise aus einer oder mehreren Linien. Die ausgesandten Wellenzüge gehören zusammen, vergleichbar mit dem Ausgang eines Frequenzgenerators.

Bei Leuchtdioden ist die Spannung annähernd konstant (z.B. bei roten LEDs $U \approx 1,6V$); die Steuerung erfolgt daher über den Strom:

$$P_S = I \cdot U \approx \cdot const \quad (7)$$

2.2.6 Kopplung Lichtquelle – Faser

Mitentscheidend für die Qualität einer LWL-Übertragung ist die Frage, wie viel von der von der Lichtquelle ausgestrahlten Energie in den Lichtwellenleiter gelangt und wieviel von dieser Energie durch Totalreflexion im Lichtwellenleiter weitergeleitet wird.

Die Höhe dieses Anteils wird im Ankoppelwirkungsgrad η beschrieben:

$$\eta = 100\% \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_{Sender}} \quad (8)$$

2.2.7 Akzeptanzwinkel und Numerische Apertur

Der Ankoppelwirkungsgrad hängt nun u.a. davon ab, wie groß der Winkel ist, innerhalb dessen die Faser eingestrahlt Licht (per Totalreflexion) akzeptiert.

Dazu braucht man folgende Größen (siehe Abbildung 2):

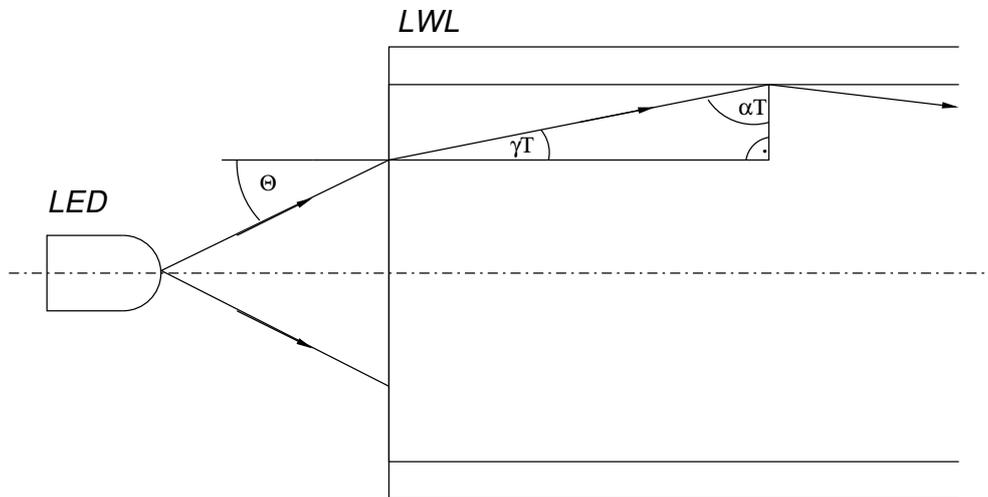


Abbildung 2: Akzeptanzwinkel und Numerische Apertur

- Θ : Der Akzeptanzwinkel ist der maximale (äußere) Einfallswinkel, bei dem *in* der Faser Totalreflexion auftritt.
- $NA = \sin \Theta$: Numerische Apertur, Sinus des Akzeptanzwinkels, Wert kleiner als 1.

Aus der Numerischen Apertur kann man die normierte Brechzahldifferenz berechnen und umgekehrt:

$$NA = \sqrt{2 \cdot \Delta} \cdot n_K \quad (9)$$

Also kann man sagen:

- Je kleiner die normierte Brechzahlendifferenz, desto kleiner sind Θ und NA und desto geringer ist damit der Anteil des eingekoppelten Lichts.

2.2.8 Ankoppelwirkungsgrad

Wie groß der Anteil ist, kann man näherungsweise ausrechnen (Abbildung 3). Der Sender wirft

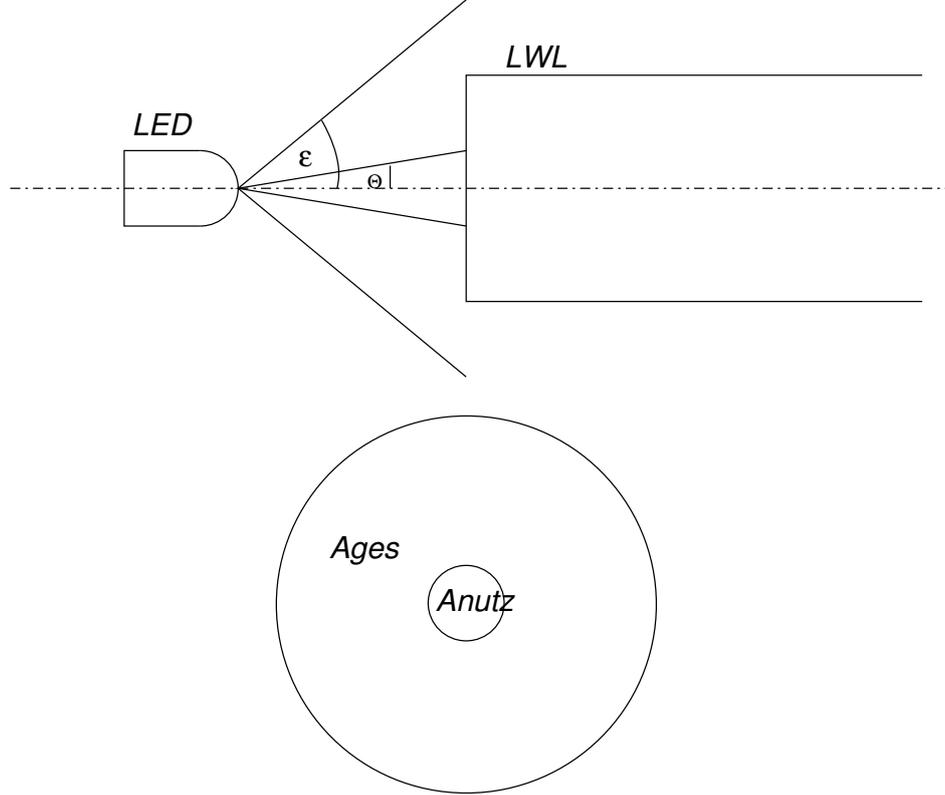


Abbildung 3: Ankopplung LED an Faser

idealerweise einen runden Lichtkegel auf die Querschnittsfläche der Faser (eventuell ist der Lichtkegel größer oder kleiner als die Querschnittsfläche, das ist aber hier unerheblich). Diese Endfläche A_{ges} des Lichtkegels soll idealerweise gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Die Lichtleistung, die auf die Fläche A_{ges} fällt, soll Φ_{ges} sein.

Allerdings wird nur der Teil des Lichts, der in einem Winkel kleiner oder gleich Θ einfällt, im Lichtleiter per Totalreflexion übertragen. Die Kreisfläche innerhalb dieses Winkels soll A_{nutz} heißen.

Je kleiner diese Fläche im Verhältnis zur gesamten bestrahlbaren Fläche, desto geringer ist der Anteil des eingekoppelten Lichts:

$$\eta = 100\% \cdot \frac{A_{nutz}}{A_{ges}} = 100\% \cdot \frac{\pi r_{nutz}^2}{\pi r_{ges}^2} = 100\% \cdot \frac{r_{nutz}^2}{r_{ges}^2} \quad (10)$$

Nun hängen die Radien der Flächen ab vom Abstand d zwischen Faser und LED und vom jeweiligen Winkel ($\tan \Theta = \frac{r_{nutz}}{d}$, $\tan \epsilon = \frac{r_{ges}}{d}$)

$$\eta = 100\% \cdot \frac{A_{nutz}}{A_{ges}} = 100\% \cdot \frac{(d \cdot \tan \Theta)^2}{(d \cdot \tan \epsilon)^2} = 100\% \cdot \frac{\tan^2 \Theta}{\tan^2 \epsilon} \approx 100\% \cdot \frac{\Theta^2}{\epsilon^2} \quad (11)$$

Hier ist also der Abstand d zwischen Faser und LED nicht mehr enthalten — das gilt aber nur, solange d so klein ist, dass r kleiner als der Kernradius bleibt. Bei sehr dünnen (so genannten Monomode-) Fasern kann das ein Problem sein.

2.2.9 LWL-Empfänger

Für den Empfang von Licht aus Lichtwellenleitern haben sich zwei Techniken bewährt:

- Photodioden und Phototransistoren,
- Lawinenphotodioden.

Die Auskopplung des Lichts bereitet keine größeren Probleme: Es reicht aus, die Photofläche so groß zu dimensionieren, dass alles Licht, das aus dem LWL austritt, auf die Photofläche trifft.