

1 Grundlagen

Die nachfolgenden Kapitel sind nur eine „kurze“ Einführung in die Grundlagen der Übertragungs- und Lichtwellenleitertechnik. Um ein tieferes Wissen zu erlangen ist das Handbuch „Universelle Gebäudeverkabelung“ von unilan® beigelegt.

1.1 Allgemeines

Zur Übertragung von Nachrichten sind Nachrichtenübertragungssysteme (Abbildung 1.1) erforderlich. Als Nachrichtenquelle können z. B. Sprache, Texte, Bilder oder Daten vorliegen. Diese Nachrichten müssen zunächst mit einem Wandler in ein elektrisches Signal umgesetzt werden.

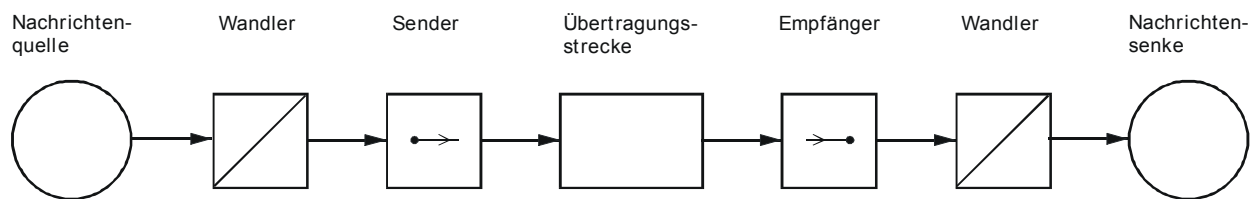


Abbildung 1.1 Prinzip eines Nachrichtenübertragungssystems

Der Sender passt das Signal an die Eigenschaften der Übertragungsstrecke an. Bei einer Funkstrecke wird die Nachricht durch Modulation in einen Frequenzbereich gebracht, der von der gewählten Antenne abgestrahlt wird. Bei einer optischen Übertragungsstrecke, mit oder ohne Lichtwellenleiter, ist die Umsetzung der elektrischen Information in eine optische Information Voraussetzung. Nur bei der drahtgebundenen Übertragung kann die Nachricht im ursprünglichen Frequenzbereich übertragen werden.

Der Empfänger nimmt das Signal auf, verstärkt es oder wandelt es, bei optischen Systemen, zunächst in ein elektrisches Signal um. Falls erforderlich, wird das Signal dekodiert und demoduliert, um es dann über einen Wandler der Nachrichtensenke zuführen zu können.

Bei der Nachrichtenübertragung unterscheidet man grundsätzlich drei Betriebsarten:

Simplexbetrieb:

Informationsfluss ist nur in eine Richtung möglich (z. B. Fernsehübertragung).

Halbduplexbetrieb:

Informationsfluss ist in beide Richtungen möglich, jedoch nicht gleichzeitig, sondern zeitversetzt, da nur ein Übertragungskanal zur Verfügung steht.

Duplexbetrieb:

Informationsfluss ist in beide Richtungen zeitgleich möglich, da für jede Richtung ein Übertragungskanal zur Verfügung steht.

1.2 Entwicklung der Lichtwellenleitertechnik

Die optische Übermittlung von Nachrichten (Rauchzeichen, Morsen mit einer Lichtquelle) ist eine Kommunikationsform, der sich die Menschen schon immer bedient haben. Die Forderung nach einer hohen Übertragungsgeschwindigkeit konnten die angewandten Verfahren zur Nutzung des Trägers Licht jedoch nicht erfüllen, da es an bestimmten Voraussetzungen für eine schnelle und sichere Übertragung fehlte:

- Es waren keine leistungsstarken und schnell schaltbaren Lichtquellen vorhanden.
- Das menschliche Auge ist, zur Beobachtung, als schneller Empfänger ungeeignet.
- Die Eigenschaften der irdischen Atmosphäre, als Übertragungsmedium, sind sehr von den herrschenden Witterungsbedingungen abhängig.

1.3 Das Prinzip der optischen Nachrichtenübertragung

Abbildung 1.3 zeigt das Prinzip eines optischen Übertragungssystems. Elektrische Signale werden im Sender in Lichtsignale umgewandelt. Das Licht wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt und von diesem bis zum Empfänger weiter geleitet, um von dort wieder in elektrische Signale rückgewandelt zu werden.

Der übertragbare Frequenzbereich und die überbrückbaren Streckenlängen werden wesentlich bestimmt durch:

- die Eigenschaften des Lichtwellenleiters
- die abgestrahlte Leistung und Modularität (Frequenzverhalten) des Senders
- die Empfindlichkeit des Empfängers

Eingangssignale können analog übertragen werden, was jedoch eine Linearität des Gesamtsystems erfordert, was nur mit großem Aufwand zu erreichen ist.

Trotzdem wird die analoge Übertragung angewandt, um z. B. Fernseh- und Rundfunksignale im Frequenzbereich von 47 MHz bis 550 MHz zu übertragen. Mit einer Einmodenfaser sind dabei Entfernungen von bis zu 15 km ohne Zwischenverstärker überbrückbar.

Die Vorteile von Lichtwellenleitersystemen, z. B. ihre große Bandbreite und Störsicherheit, kommen jedoch erst bei einer digitalen Übertragung zur Geltung. Dazu müssen analoge Signale digitalisiert werden, z. B. durch Puls-Code-Modulation. Digitale High- und Low-Zustände können direkt als Hell-Dunkel-Information übertragen oder vorher in geeignete Übertragungscode umgewandelt werden (z. B. 5B/6B).

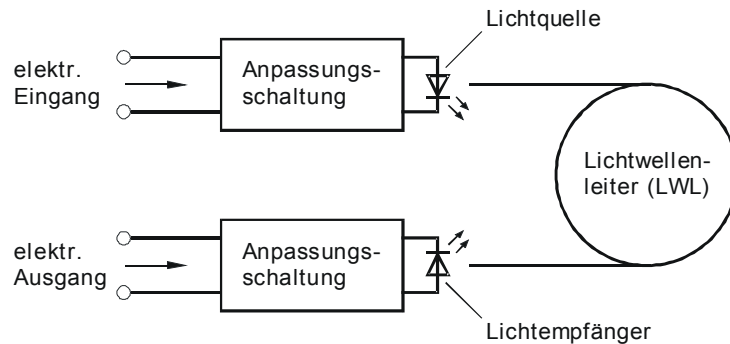


Abbildung 1.3 Prinzip eines optischen Übertragungssystems

1.4 Vorteile der Lichtwellenleitertechnik

Die Einsatzmöglichkeiten von Lichtwellenleitern in der Übertragungstechnik sind vielfältig. Lichtwellenleiter haben folgende Vorteile:

- **Geringe Dämpfung:** dadurch ist die Überbrückung weiter Strecken ohne Zwischenverstärkung möglich.
- **Große Bandbreite** zur Übertragung von umfangreichen Informationsmengen
- **Galvanische Trennung von Sender und Empfänger:** dadurch sind keine Potenzialprobleme (Erd-schleifen) vorhanden. Außerdem werden dadurch Mess- und Übertragungsprobleme, für die sonst Übertrager, Trennverstärker oder Optokoppler erforderlich sind, auf einfache Weise gelöst.
- **Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen,** z. B. in der Umgebung leistungsstarker Maschinen
- **Kleine Kabeldurchmesser und geringes Gewicht:** dadurch ist das Einziehen langer Leitungen möglich.
- **Wesentlich höhere Abhörsicherheit** als bei drahtgebundener oder drahtloser Übertragung
- **Hohe Sicherheit in explosionsgefährdeter Umgebung**
- **Kein Nebensprechen**

1.5 Der Lichtwellenleiter (LWL)

Der Lichtwellenleiter (kurz: LWL), auch Lichtleitfaser, Lichtleiter oder einfach Faser genannt, hat die Aufgabe, das Licht möglichst ohne Verlust vom Sender zum Empfänger zu übertragen. Die Lichtführungseigenschaften der Faser sind dabei für die Leistungsfähigkeit der optischen Übertragungsstrecke von großer Bedeutung.

An einer sehr einfachen Faser soll das Prinzip der Wellenführung durch den Lichtwellenleiter erläutert werden. Abbildung 1.5.1 zeigt den schematischen Aufbau einer so genannten Stufenindexfaser.

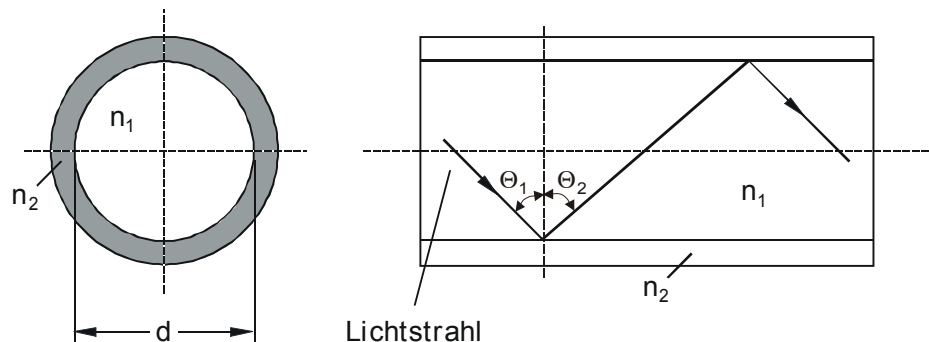


Abbildung 1.5.1 Schematischer Aufbau einer Stufenindexfaser

Ein Lichtwellenleiter ist eine zylindrische Faser, die aus einem hochreinen, lichtdurchlässigen

Material besteht. Sie setzt sich aus einem Kern mit dem Brechungsindex n_1 sowie aus einem Mantel mit dem Brechungsindex n_2 zusammen. Der in Abbildung 1.5.1 eingezeichnete Lichtstrahl wird an den Grenzschichten total reflektiert (Totalreflexion) und so im Leiter geführt. Einfallswinkel Θ_1 ist hier gleich Ausfallswinkel Θ_2 . Damit der Strahl voll reflektiert wird, darf der Einfallswinkel einen bestimmten Wert nicht unterschreiten, da sonst der Strahl nicht reflektiert, sondern nur gebrochen würde. Dieser Grenzwinkel ist vom Verhältnis der beiden Brechzahlen n_1 und n_2 abhängig.

Die bis hierher geschilderten Verhältnisse setzen voraus, dass der Lichtstrahl sich bereits in der Faser befindet. Der Lichtstrahl muss aber auch in die Faser eingekoppelt werden. An der Einkoppelstelle wird das Licht, beim Übergang vom Medium Luft ($n_{\text{Luft}} = 1$) in den Lichtwellenleiter (n_1), gebrochen. Snellius hat dies in seinem Brechungsgesetz formuliert:

$$\frac{\sin \Theta_1}{\sin \Theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

n_1, n_2 Brechzahlen der Medien 1 und 2

c_1, c_2 Geschwindigkeiten des Lichts in Medium 1 und 2

Snellius stellte fest, dass ein Lichtstrahl, auf Grund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, in Medien verschiedener Dichte gebrochen wird.

Dies soll an einem einfachen Beispiel erklärt werden:

Eine Person steht auf einer Brücke und schaut in ein Gewässer (Abbildung 1.5.2). Auf dessen Grund liegt, schräg unter der Person, eine Glasflasche. Da das menschliche Auge die Brechung an der Wasseroberfläche nicht berücksichtigt, scheint die Glasflasche wesentlich näher an der Wasseroberfläche zu sein als es ihrer tatsächlichen Position entspricht.

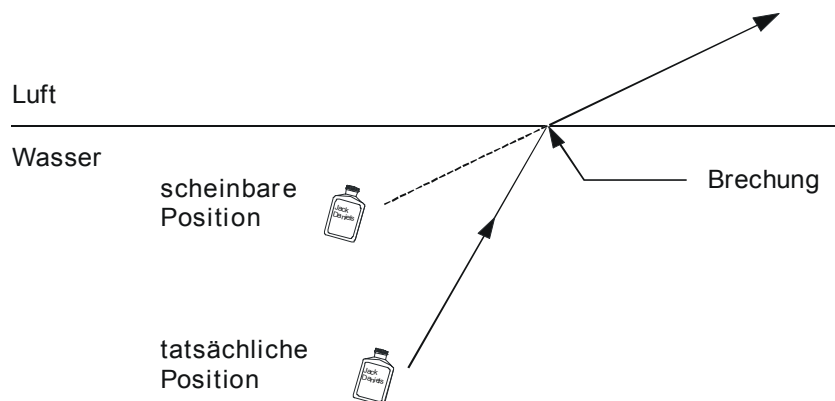


Abbildung 1.5.2 Brechung des Lichts am Übergang der Medien Luft – Wasser

Als Anschauungsobjekt kann auch Ihre Zahnbürste in einem mit Wasser gefüllten Zahnbecher dienen. Sie scheint je nach Betrachtungswinkel einen Knick zu haben.

Den maximalen Einkoppelwinkel Θ (siehe Abbildung 1.5.3), d. h. der Winkel, bei dem in der Faser noch eine Totalreflexion stattfindet, bezeichnet man auch als Akzeptanzwinkel δ_A . Den Sinus dieses Maximalwertes findet man in den Datenblättern von Faserherstellern auch als Numerische Apertur NA .

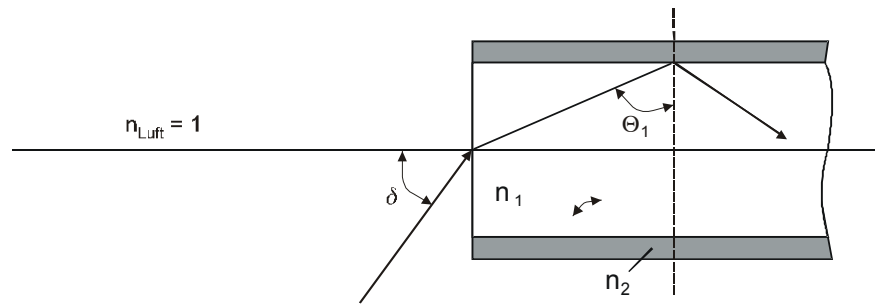


Abbildung 1.5.3 Einkoppelwinkel Θ

$$\delta_{\max} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$NA = \sqrt{n_{\text{Faserachse}}^2 - n_{\text{Mantel}}^2}$$

Neben der Stufenindexfaser gibt es Gradientenindexfasern, bei denen die Brechzahl vom Maximalwert in der Fasermitte meist parabelartig nach außen hin abfällt. Dadurch verläuft in diesem Lichtwellenleitertyp die Ausbreitung nicht mehr geradlinig, sondern auf gekrümmten Bahnen. Abbildung 1.5.4 zeigt vereinfacht die Entstehung dieser Bahnkrümmung.

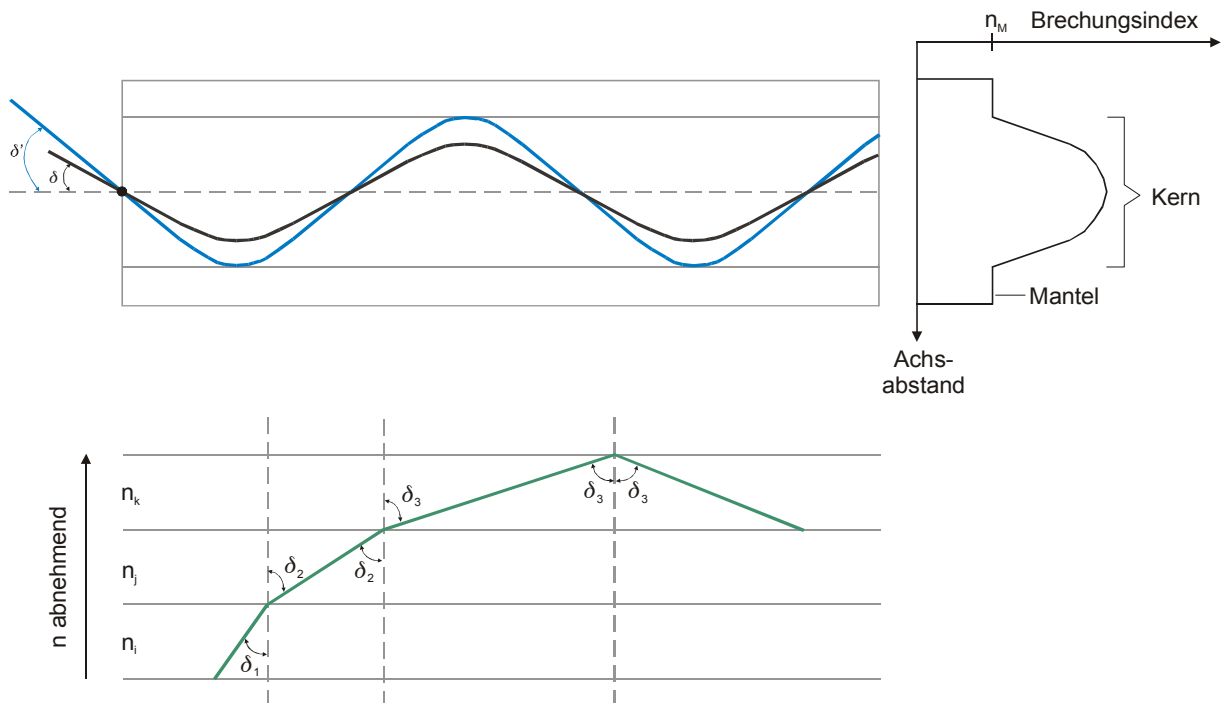


Abbildung 1.5.4 Schematischer Aufbau einer Gradientenindexfaser

Man kann sich den Lichtwellenleiter dazu in mehrere Schichten mit nach außen fallender Brechzahl aufgeteilt vorstellen. Beim Übergang des Lichts tritt hier keine Totalreflexion mehr auf, sondern eine Brechung. Der Bahnverlauf des Lichts wird mit zunehmendem Abstand von der Fasermitte immer flacher. Für eine kontinuierliche Änderung des Brechungsindexes läuft der Strahl dann auf sinusförmigen Bahnen (Abbildung 1.5.5).

Außer dieser Unterteilung in Stufenindex- und Gradientenindexfasern gibt es noch die Einteilung in Mehrmodenfasern (Multimodefasern) und Einmodenfasern (Singlemodefasern).

Multimodefasern erlauben die Ausbreitung mehrerer Moden im Faserkern. Ist der LWL eine Multimodefaser mit Stufenindexprofil, so ergeben die unterschiedlich langen Wege des Lichts durch den LWL große Laufzeitunterschiede. Fasern mit Gradientenstufenindexprofil gehören ebenfalls zu den Multimodefasern. Bei ihnen werden jedoch die Laufzeitunterschiede durch das spezielle Indexprofil ausgeglichen.

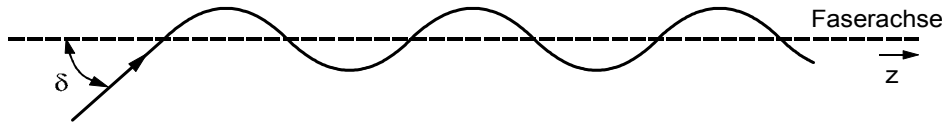


Abbildung 1.5.5

Bei Singlemodefasern ist der Kerndurchmesser so klein, dass sich nur ein Mode ausbreiten kann. Singlemodefasern sind deshalb immer Stufenindexfasern.

Der in den Versuchen verwendete Kunststoff-Lichtwellenleiter ist eine Multimodefaser mit Stufenindex. Die Kunststofffaser wurde auf einen Kerndurchmesser von 980 μm und 1000 μm Manteldurchmesser standardisiert.

Auch das Material der Faser spielt eine wichtige Rolle. Man unterscheidet zwischen:

- Kunststofffasern
- HCS-Fasern (hartpolymerbeschichtete Quarzglasfasern)
- Quarzglasfasern

Mit Hilfe folgender Tabelle ist eine Einteilung der unterschiedlichen Fasern möglich:

Fasertyp	Bezeichnung	Kerndurchmesser
Kunststofffaser	APF (All Plastic Fibre) oder POF (Plastic Optical Fibre)	250 μm ... 980 μm
Glas-Kunststofffaser	PCS (Plastic Coated Silicon) Glas-Kunststofffaser mit weichem Mantel	200 μm
Glas-Kunststofffaser	HCS (Hard Clad Silicon) Glas-Kunststofffaser mit hartem Mantel	50 μm ... 600 μm
Glasfaser	SIF (Step Index Fibre) Stufenindexfaser	10 μm ... 200 μm
Glasfaser	GIF (Gradient Index Fibre) Gradientenindexfaser	50 μm ... 100 μm
Glasfaser	SMF (Single Mode Fibre) Einmodenfaser	5 μm ... 12 μm

Tabelle 1.5

1.6 Dispersion

Alle Effekte, die bei der Übertragung eines Impulses durch einen Lichtwellenleiter zu einer Impulsverbreiterung führen, werden als Dispersion bezeichnet.

Modendispersion:

Da sich bei Mehrmodenfasern mit Stufenindexprofil das Licht auf unterschiedlichen Bahnen innerhalb des Kerns bewegt, entstehen Laufzeitdifferenzen (vgl. Abbildung 1.6.1).

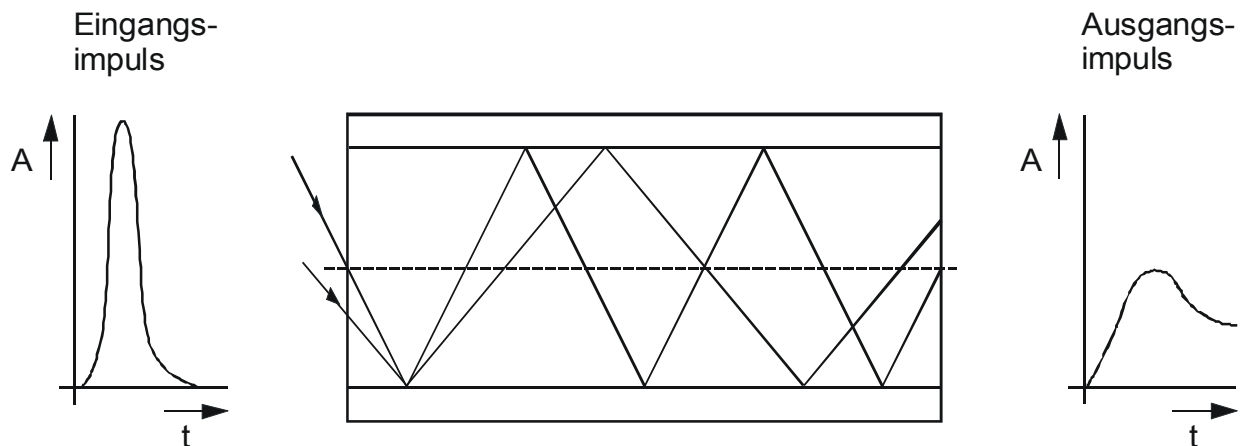


Abbildung 1.6.1 Entstehung von Laufzeitdifferenzen bei Mehrmodenfasern

Bei der Mehrmodenfaser mit Gradientenindexprofil werden durch die unterschiedliche Geschwindigkeit der Moden, hervorgerufen durch unterschiedliche Brechzahlen in der Faser, die Laufzeitunterschiede gering gehalten.

Bei der Einmodenfaser entfällt der Einfluss der Modendispersion, da der Kerndurchmesser so klein ist, dass sich nur ein Mode (Grundmode) ausbreiten kann.

Material- und Wellenleiterdispersion:

Beide werden unter dem Begriff „chromatische Dispersion“ zusammengefasst. Verursacht wird diese Art der Dispersion u. a. durch die Abhängigkeit der Wellenlänge von der Faserbrechzahl. Sie kann gering gehalten werden, wenn der Sender möglichst nur eine Wellenlänge abstrahlt, und wenn mit Wellenlängen von ca. 1300 nm gearbeitet wird, da in diesem Bereich alle Wellenlängenanteile in etwa gleiche Gruppenlaufzeiten haben (vgl. Abbildung 1.6.2).

Bedingt durch die Dispersion und die Länge der Strecke wird eine Impulsverbreiterung hervorgerufen. Diese begrenzt die mögliche Übertragungsrate. Bei Mehrmodenfasern wird deshalb meist die Bandbreite für 1 km Länge angegeben. Bei Einmodenfasern wird die Dispersion dagegen meist angegeben in

$$\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$$

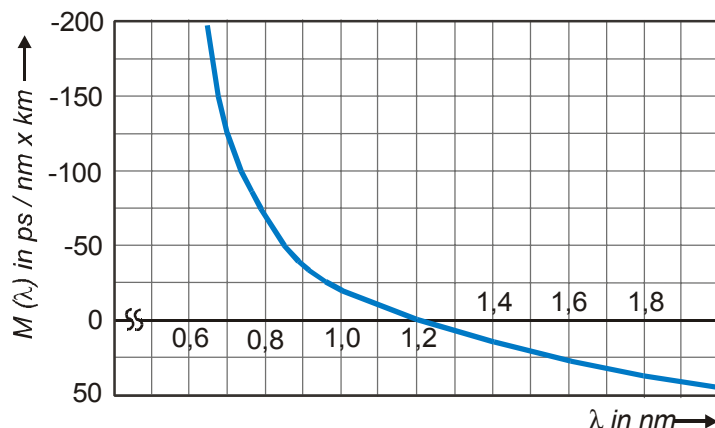


Abbildung 1.6.2 Spektraler Dispersionsverlauf

1.7 Dämpfung

Die im Lichtwellenleiter auftretenden Verluste können aus der am Anfang P_1 und am Ende P_2 eines Faserabschnitts der Länge l wirksamen Strahlungsleistung berechnet werden.

$$\alpha_L = \frac{10}{l} \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Die Dämpfungskonstante α_L wird in den Herstellerangaben zu den Lichtwellenleitern im Allgemeinen in dB/km angegeben. Sie ist aber immer von der Wellenlänge der Strahlung abhängig.

Abbildung 1.7.1 zeigt den theoretischen Dämpfungsverlauf einer Glasfaser. Die bevorzugten Wellenlängen liegen bei 850 nm, 1300 nm und 1550 nm; sie werden auch als erstes, zweites oder drittes Fenster bezeichnet.

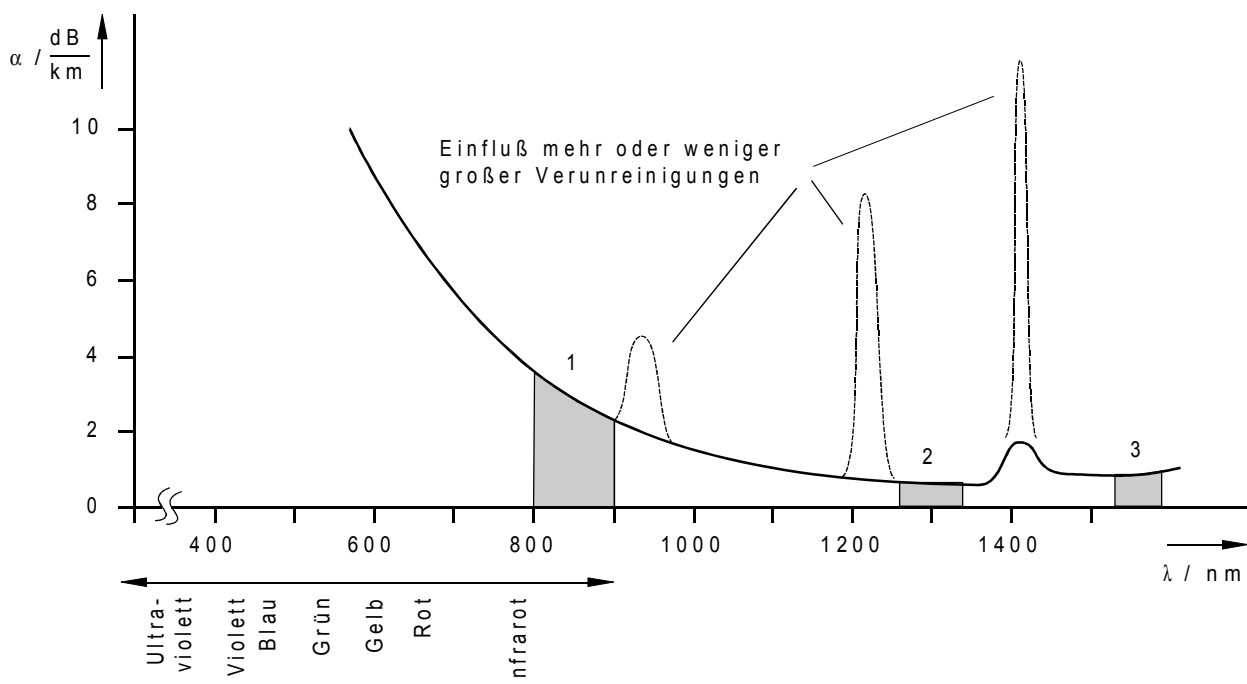


Abbildung 1.7.1 Theoretischer Dämpfungsverlauf in einer Glasfaser

Die Abbildungen 1.7.2 und 1.7.3 zeigen den Dämpfungsverlauf einer HCS-Faser, welche im ersten Fenster einsetzbar ist, und einer Kunststofffaser, die unterhalb des ersten Fensters im sichtbaren Rotbereich ihre geringste Dämpfung aufweist.

Die Auswahl der Übertragungswellenlänge richtet sich nach der Verfügbarkeit der Sende- und Empfangselemente, einer möglichst geringen Dämpfung und einer möglichst kleinen Dispersion.

Die Dämpfung wird hauptsächlich verursacht durch:

- Streueffekte in Folge von Inhomogenitäten im Material (Rayleigh-Streuung)
- Absorptionsverluste der Strahlung durch Verunreinigungen des Quarzmaterials, z. B. durch Wasser (OH-Absorption)

Darüber hinaus können durch Krümmung von Lichtwellenleitern beim Verlegen und durch mechanische Deformation zusätzliche Verluste auftreten. Aus diesem Grund sind die Herstellerangaben bezüglich des minimalen Biegeradius einzuhalten.

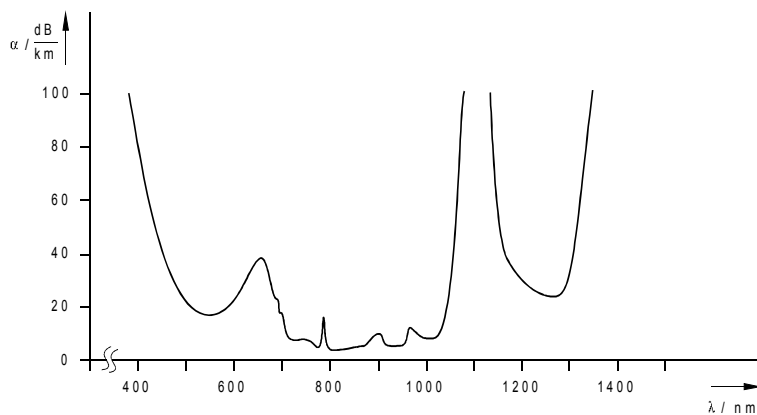


Abbildung 1.7.2 Dämpfungsverlauf in einer HCS-Faser

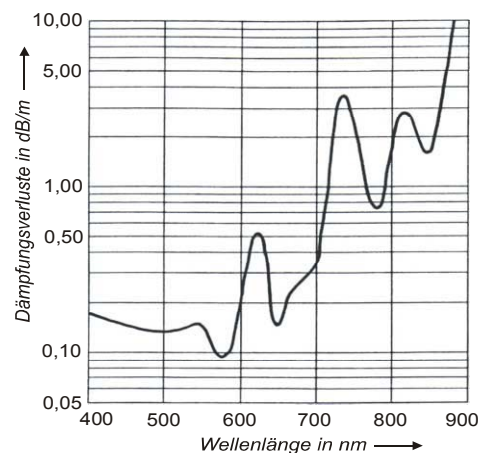


Abbildung 1.7.3 Dämpfungsverlauf in einer Kunststoffaser

Über die ohne Zwischenverstärker überbrückbare Entfernung entscheiden neben Sender- und Empfängerqualität auch Fasermaterial und Faseraufbau.

Zur Orientierung sind in der folgenden Tabelle einige fasertypische Werte angegeben, die jedoch erheblich von den Angaben einiger Faserhersteller abweichen können.

Lichtwellenleiter gibt es für verschiedene Verwendungszwecke als Innen- oder Außenkabel mit einer oder mehreren Fasern sowie als Sonderkabel (z. B. Luftkabel).

Art der Faser	Typischer Kern- durchmesser	Typischer Manteldurchmesser	Typische Dämpfung	Bandbreite für 1 km
Kunststoffaser mit Stufenindexprofil	980 μm	1000 μm	190 dB/km	Übertragung nicht möglich
Mehrmoden-HCS-Faser mit Stufenindexprofil	110 μm	125 μm	7 dB/km	15 MHz
Mehrmoden-Quarzglas- faser mit Gradientenprofil	50 μm	125 μm	1,2 dB/km	1 GHz
Einmoden-Quarzglasfaser	9 μm	125 μm	0,1 dB/km	10 GHz

Tabelle 1.7

1.8 Sendeelemente

Die Strahlungsquelle eines optischen Nachrichtensystems hat die Aufgabe, ein leistungsstarkes, möglichst monochromatisches Licht mit optimalem Wirkungsgrad auszusenden.

In Abbildung 1.8.1 ist die spektrale Bandbreite einer Sendediode dargestellt.

Außerdem ist es erforderlich, dass das Licht in den, durch die Numerische Apertur begrenzten Eingangstrichter der Faserstirnfläche einkoppelbar ist. Die gesendete Wellenlänge muss dem dämpfungsarmen Übertragungsbereich der Faser entsprechen und mit hohen Frequenzen modulierbar sein. Auf Grund dieser Forderungen kommen als optische Strahlungsquellen nur die Halbleiterbauelemente Lumineszenzdiode (LED) oder Laserdiode zur Anwendung.

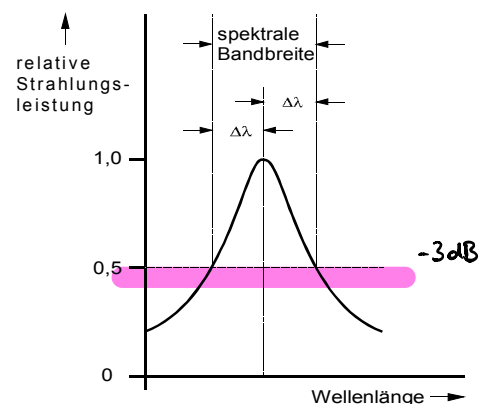


Abbildung 1.8.1

LEDs werden im Allgemeinen in Übertragungssystemen mit Bandbreiten bis 30 MHz eingesetzt.

LEDs strahlen kein monochromatisches Licht, sondern ein Frequenzgemisch ab. Die spektrale Bandbreite, gemessen bei der halben relativen Strahlungsleistung, beträgt je nach Diodentyp 30 nm bis 80 nm. Sie wird in englischsprachigen Datenbüchern als „Spectral half-value width“ bezeichnet (spectral half-value width = $\Delta\lambda$, spectral bandwidth = $2 \times \Delta\lambda$).

Bei Multimodelasern beträgt die Strahlungsbandbreite ca. 5 nm und bei Monomodelasern ca. 0,1 nm. Da für die Übertragung in Einmodenfasern wegen der Dispersion monochromatisches Licht erforderlich ist, kann hier nur die Laserdiode eingesetzt werden. Außerdem hat die Laserdiode im Vergleich zur LED die größere Ausgangsleistung.

LEDs können schon mit sehr kleinen Strömen betrieben werden und weisen bei nicht zu großer Aussteuerung der Leistungskennlinie eine für die meisten Anwendungsfälle zufrieden stellende Linearität auf.

Abbildung 1.8.2 zeigt die Leistungskennlinie der Sendediode (850 nm) im *Fibre Optic Transmitter Board* als Auszug aus dem Datenblatt.

Die Kennlinie eines Lasers teilt sich dagegen in zwei Bereiche. Bei kleinen Strömen strahlt der Laser nur sehr wenig Leistung ab, weist jedoch über einem bestimmten Schwellenstrom eine sehr steile und lineare Kennlinie auf. In diesem Bereich strahlt er monochromatisches Licht ab.

Abbildung 1.8.3 zeigt die Leistungskennlinie des Lasers als Auszug aus dem Datenblatt.

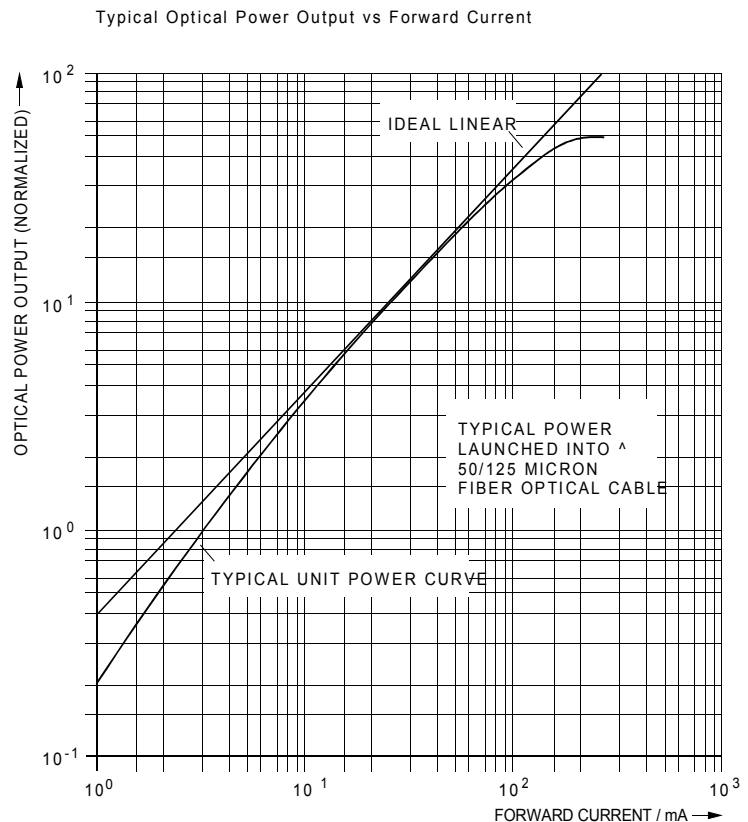


Abbildung 1.8.2 Leistungskennlinie der Sendediode ($\lambda = 850 \text{ nm}$) des *Fibre Optic Transmitter Board*

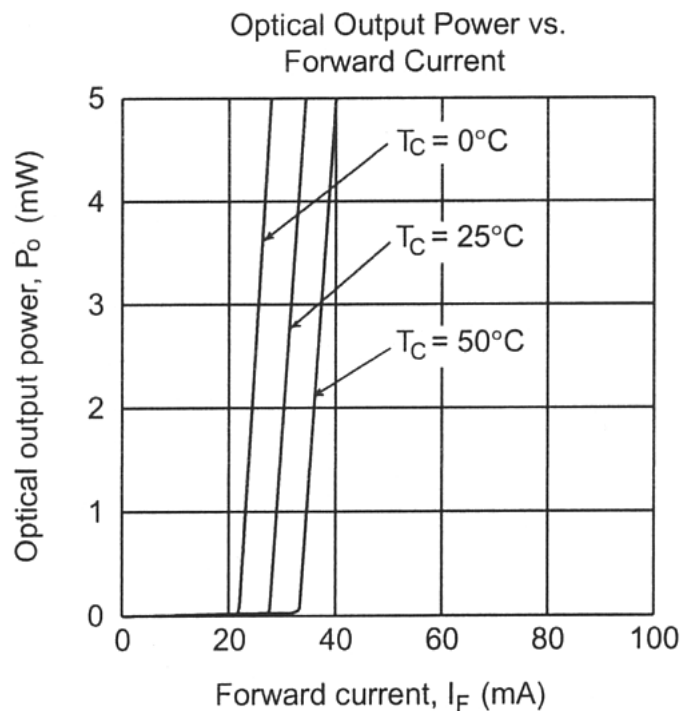


Abbildung 1.8.3

Auszug aus den Datenblättern der im *Fibre Optic Transmitter Board* verwendeten Sendeelemente:

Rote Sendediode, 660 nm

Absolute maximum ratings ($T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)			
Item	Symbol	Rating	Unit
DC forward current	I_F	20	mA
Reverse voltage	V_R	4	V
Power dissipation	P_D	125	mW
Operating temperature	T_{opr}	-30 ... 85	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature	T_{stg}	-40 ... 120	$^{\circ}\text{C}$

Electrical/optical characteristics ($T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)					
Item	Symbol	Condition	Typical	Maximum	Unit
Forward voltage	V_F	$I_F = 20\text{ mA}$	2.1	2.5	V
Reverse current	I_R	$V_R = 4\text{ V}$	----	50	μA
Peak wavelength	λ_p	$I_F = 20\text{ mA}$	623	----	nm
Half width	$\Delta\lambda$	$I_F = 20\text{ mA}$	15	----	nm

Infrarot-Sendediode, 850 nm

Electrical/optical characteristics ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)						
Item	Symbol	Condition	Min.	Typical	Max.	Unit
Coupled power	P_{oc}	$I_F = 50\text{ mA}$	30 -15	60 -12	----- -----	μW dBm
Forward voltage	V_F	$I_F = 100\text{ mA}$	-----	1.7	2.0	V
Reverse voltage	V_R	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$	1.0	5.0	-----	V
Peak wavelength	λ_p	$I_F = 100\text{ mA (DC)}$	-----	850	-----	nm
Half width	$\Delta\lambda$	$I_F = 100\text{ mA (DC)}$	-----	50	-----	nm
Response time	t_r	1 V (prebias) 100 mA (peak)	-----	8	10	ns
Analog bandwidth	BWE	$I_F = 100\text{ mA (DC)}$, small signal, sine-wave modulation	-----	85.0	-----	MHz
P_0 temperature coefficient	$\Delta P_0 / \Delta T$	$I_F = 100\text{ mA}$	-----	-0.019	-----	dB/ $^{\circ}\text{C}$
Series resistance	r_s	DC	-----	4.0	-----	Ω
Capacitance	C	$V_R = 0\text{ V}$ $f = 1\text{ MHz}$	-----	70	-----	pF
Operating temperature range	-----	-----	-40	-----	100	$^{\circ}\text{C}$

1.9 Empfangselemente

Aufgabe des Strahlungsempfängers ist es, die aus dem Lichtwellenleiter austretenden Strahlung in ein elektrisches Signal rück zu wandeln. Die Rückwandlung kann mit den folgenden Bauteilen durchgeführt werden:

- **Fototransistor**
Der Fototransistor eignet sich auf Grund seiner großen Anstiegs- und Abfallzeiten nur für langsame, niederfrequente Vorgänge. *sehr schnell (geringe Kapazität)*
- **PN-Fotodiode und PIN-Fotodiode**
Die gebräuchliche PN-Fotodiode unterscheidet sich von der PIN-Fotodiode im Aufbau. Zwischen der N- und der P-Schicht wird bei der PIN-Fotodiode eine schwachleitende Intrinsic-Zone eingebracht. Durch die dabei gewonnene weite Raumladungszone erhält man sehr niedrige Sperrschichtkapazitäten. Daraus resultieren sehr schnelle Schaltzeiten. Auch beim Detektieren geringer Lichtstärken ist die PIN-Fotodiode der PN-Fotodiode überlegen.
- **Avalanche-Fotodiode (ADP)**
Die Avalanche-Fotodiode wird wegen ihres Arbeitsprinzips auch als Lawinen-Fotodiode bezeichnet. Bei dieser Fotodiode werden durch Stoßionisation zusätzlich Ladungsträger freigesetzt. Der Vorteil der ADP liegt in ihrem guten Signal-/Rauschverhältnis. Je nach Dotierung können sehr empfindliche oder sehr schnelle Fotodioden hergestellt werden.

Bei der Wahl einer Empfangsdiode ist darauf zu achten, dass sie sich für den gewählten Wellenbereich eignet. Die spektrale Empfindlichkeit einer Fotodiode ist vom verwendeten Halbleitermaterial abhängig.

In Abbildung 1.9.2 wird die spektrale Empfindlichkeit der im *Fibre Optic Receiver Board* eingesetzten Si-PIN-Fotodiode dargestellt.

Der Fotostrom der verwendeten PIN-Fotodiode ist nahezu linear zur einfallenden optischen Strahlung. Dadurch ist auch die gemessene Spannung am Arbeitswiderstand der Diode (33 kΩ) und

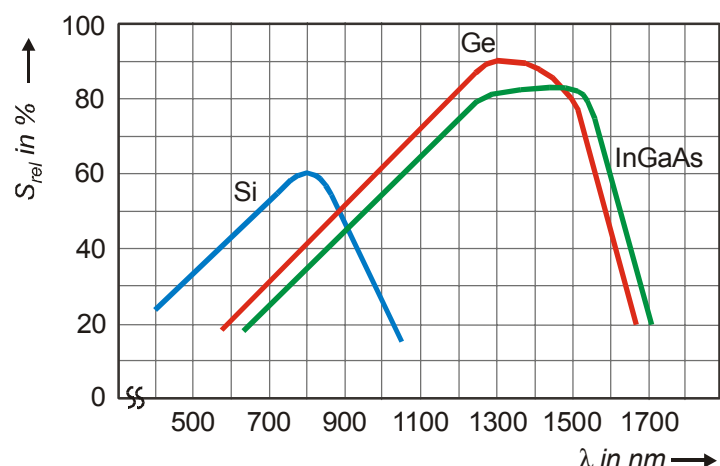


Abbildung 1.9.1 Spektrale Empfindlichkeit unterschiedlicher Materialien

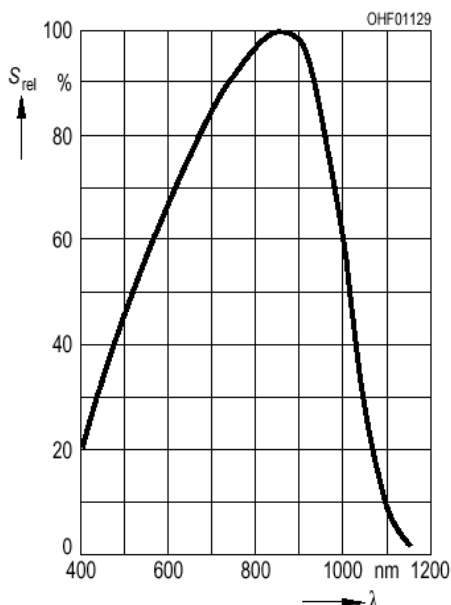


Abbildung 1.9.2

die Ausgangsspannung am *Fibre Optic Receiver Board* ein Maß für die Strahlungsleistung des Empfängers. Die optische Leistung wird im linearen Maßstab in μW oder im logarithmischen Maßstab in dBm (Bezugsgröße: 1 mW = 0 dBm) angegeben.

Abbildung 1.9.3 zeigt die Kalibrierungskennlinien der Empfangsdioden für Kunststofffaser und Glasfaser des *Fibre Optic Receiver Board*. Sie wurden ermittelt, indem eine eingestellte Strahlungsleistung zuerst mit einem optischen Leistungsmesser und anschließend als Ausgangsspannung des Empfängers gemessen wurde. Mit den daraus resultierenden Kennlinien lassen sich die Werte der Ausgangsspannung des Empfängers in Leistungswerte umwandeln. Da die spektrale Empfindlichkeit der Empfangsdiode bei den beiden Wellenlängen unterschiedlich ist, muss dies mit nach Wellenlänge getrennten Kennlinien wieder ausgeglichen werden.

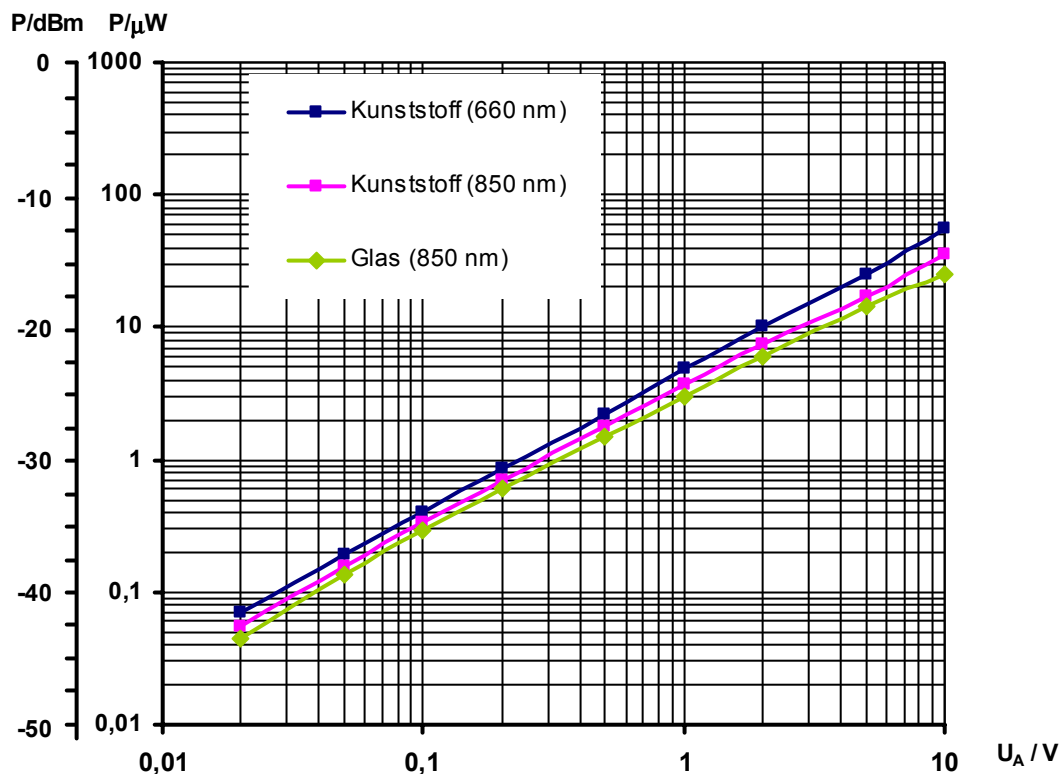
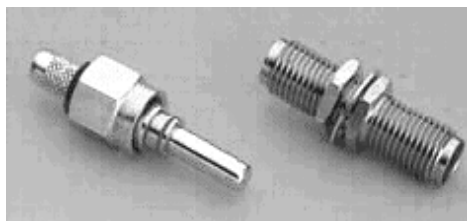


Abbildung 1.9.3 Kalibrierungskennlinien der Empfangsdioden des Fibre Optic Receiver Board für Kunststofffasern (660 nm und 850 nm) und Glasfaser (850 nm)

1.10 Steckverbindungen für Lichtwellenleiter



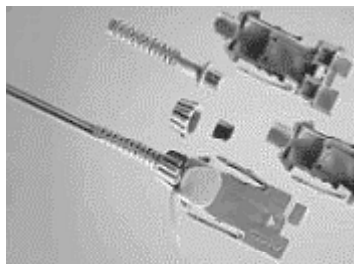
DIN-Stecker



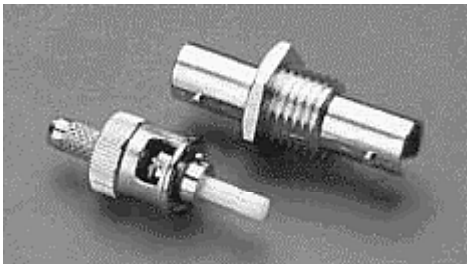
FSMA-Stecker



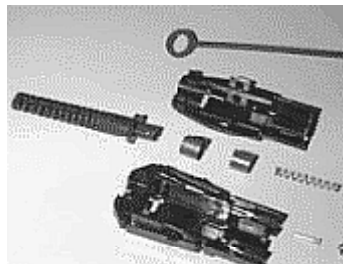
Mini BNC-Stecker



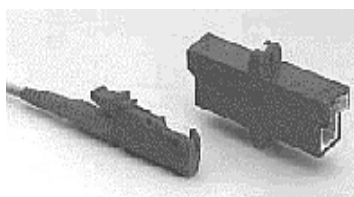
FDDI-Stecker



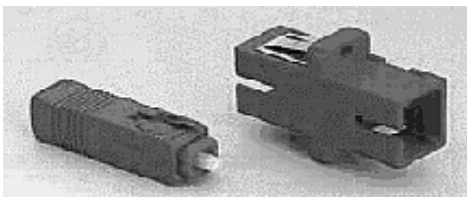
ST-Stecker und Kupplung



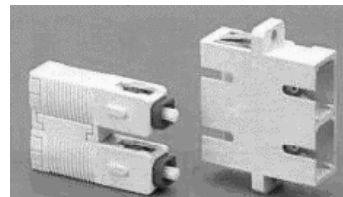
ESCON-Stecker



E2000-Stecker und Kupplung



SC-Stecker und Kupplung



SC-Duplex-Stecker und Kupplung