

# Digitale Übertragungstechnik

Michael Dienert

9. Februar 2009

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgaben der Schicht 1 - Physical Layer</b>	<b>1</b>
<b>2 Leitungen und Kabel in der Übertragungstechnik</b>	<b>2</b>
<b>3 Dämpfung und Übersprechen</b>	<b>3</b>
3.1 Was ist die Dämpfung in der Übertragungstechnik? . . . . .	3
3.1.1 Wiederholung: Logarithmus . . . . .	4
3.2 Die Leitungsdämpfung . . . . .	5
3.2.1 Abhängigkeit der Dämpfung von der Länge . . . . .	5
3.2.2 Abhängigkeit der Dämpfung von der Betriebsfrequenz . . . . .	6
3.3 Übersprechen (Cross-Talk) auf Leitungen . . . . .	6
3.4 Kabelspezifikationen . . . . .	9
<b>4 Lichtwellenleiter</b>	<b>9</b>
4.1 Totalreflexion . . . . .	9
4.2 Ausführungen . . . . .	9
4.3 Akzeptanzwinkel, numerische Apertur . . . . .	10
4.4 optische Fenster . . . . .	11

## 1 Aufgaben der Schicht 1 - Physical Layer

Die Bitübertragungsschicht ist zuständig für die Normierung folgender Komponenten:

**Steckverbinder** - Stecker, Buchsen, Belegung der Stifte eines Steckers

**Medien** -

**Lichtwellenleiter** Faseroptische Systeme, Fibre-Optics, Details siehe Kapitel 4

**Monomode-Fasern** - Kerndurchmesser  $3\text{-}9\mu\text{m}$ , Faserdurchmesser  $125\mu\text{m}$ ,  
Wellenlängen  $1310\text{nm}$ ,  $1550\text{nm}$  oder  $1625\text{nm}$  (Infrarot, nicht sichtbar), sehr grosse Reichweiten möglich, z.B. 1000Base-ZX: bis  $70\text{km}$ ,  
neueste Netzwerkadapter:  $125\text{km}$ .

**Multimode-Fasern** - Kerndurchmesser  $50/62.5\mu\text{m}$ , Faserdurchmesser  $125\mu\text{m}$   
 Beispiel: 1000Base-SX  $50\mu\text{m}$ , Reichweite 550m (Europa),  $62.5\mu\text{m}$ ,  
 Reichweite 220m (USA)

**Gradienten-Fasern** - Variante der Multimode-Fasern, gleiche Abmessungen, aber kein sprunghafter sondern ein allmählicher Übergang vom Kern zur äusseren Faser. Gradienten-Fasern sind heutzutage die Standard-Fasern im LAN-Bereich. Reichweite bis 3km.

**Elektrische Leitungen** -

**Koaxial-Leitungen**

**Twisted-Pair-Leitungen (TP)** -

**Unshielded TP - UTP:** Die Adernpaare sind nicht gegenseitig abgeschirmt, die Alu-Folie, die alle Adernpaare gemeinsam umhüllt, wird *Screen* genannt. Cat5/5e Leitungen sind UTP-Leitungen.

**Shielded TP - STP:** Bei STP ist jedes Adernpaar einzeln von einer Abschirmung umhüllt. Ausführung Cat6/7 - STP-Leitung

verbinder ————— stecker, buchsen, pinbelegung

medien ————— faser - lwl — monomode-faser 50/9 — — — - gradientenfaser/multimodefaser 50/62.5 — - koper - koax — -tp – utp (querschnittskizzen) — - stp (querschnittskizzen)

signale , codes (manchester, mlt3, 4d-5pam)

## 2 Leitungen und Kabel in der Übertragungstechnik

Die Abb. 1 zeigt ein allereinfachstes, analoges Telefonsystem. In der Praxis arbeitet ein Telefonsystem im Full-Duplex-Modus (beide Partner können gleichzeitig hören und sprechen), hier ist aber nur eine Übertragungsrichtung dargestellt.

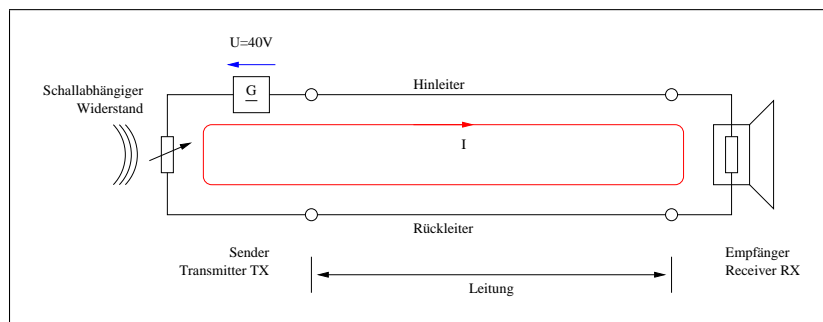


Abbildung 1: Einfachstes Telefonsystem

Der Sender (Transmitter, TX) besteht aus einem Widerstand, dessen Grösse sich mit der Lautstärke ändert (Kohlemikrofon) und einer Spannungsquelle. Der Empfänger (Receiver, RX) ist einfach nur ein Lautsprecher.

Spricht jemand ins Mikrofon, ändert sich dessen Widerstand und damit ändert sich auch der Strom, der im gesamten Stromkreis fliesst.

Die Stromschwankungen wiederum erzeugen auf der Empfangsseite Bewegungen der Lautsprechermembran, die als Schall hörbar werden.

Die Verbindung zwischen Sender und Empfänger wird *Leitung* genannt. Damit ein Strom im geschlossenen Kreis fließen kann, muss diese Leitung aus einem *Hin-* und einem *Rückleiter* bestehen.

Eine Leitung besteht aus genau zwei elektrischen Leitern (Hin- und Rückleiter).

Ein Kabel ist in der Nachrichtentechnik einfach nur die technische Ausführung einer oder mehrerer Leitungen.

### 3 Dämpfung und Übersprechen

#### 3.1 Was ist die Dämpfung in der Übertragungstechnik?

Mit dem Begriff *Dämpfung* wird in der Nachrichtentechnik beschrieben, wie gross das Verhältnis der Leistung am Anfang zur Leistung am Ende eines Übertragungssystems ist. Da die Leitung zwischen Sender und Empfänger nicht verlustfrei ist, schwächt sie das Audiosignal ab.

In den Anfangstagen des Telefons war zunächst nur von Interesse, wie lang man die Leitung zwischen den Partnern machen darf, ohne dass das Audiosignal am Empfangsort zu *leise* wird. Oder in anderen Worten: wie stark die Leitung das Audiosignal *dämpft*.

Nun ist das menschliche Lautstärkeempfinden jedoch *nicht linear*. Um eine deutlich wahrnehmbare Lautstärkeerhöhung zu erzielen, muss man die Leistung am Lautsprecher *verdoppeln*. Wer es doppelt so laut haben möchte, muss die Leistung sogar *verzehnfachen*! Wenn man diesen Zusammenhang mathematisch analysiert, findet man heraus, dass das Gehör annähernd *logarithmisch* arbeitet.

Aus diesem Grund wird die Dämpfung einer Übertragungsstrecke (z.B. einer Leitung) so definiert:

$$\text{Dämpfung } a = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}$$

Dabei ist  $P_1$  die Leistung am Anfang,  $P_2$  die Leistung am Ende der Leitung (Abb. 2).  $\log$  steht hier für den 10er-Logarithmus (siehe unten). Auf wissenschaftlichen Taschenrechnern wird dieser mit der Taste log berechnet.

Zu Ehren des Erfinders des Telefons, Graham Bell, wird dieses *logarithmische Leistungsverhältnis* mit **Dezibel** bezeichnet. Die Silbe **Dezi** steht dabei für den Faktor 10, mit dem der Logarithmus multipliziert wird.

Wichtig:

Das Dezibel ist **keine** Einheit, sondern ist ein logarithmisches *Zahlenverhältnis*.

Hier ein paar wichtige Dämpfungen:

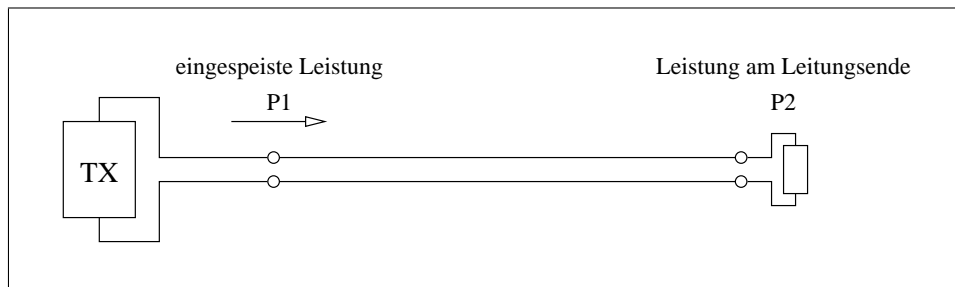


Abbildung 2: Leistung am Anfang und Ende einer Leitung

$\frac{P_1}{P_2}$	$\frac{U_1}{U_2}$	$a = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$
1	$\sqrt{1} = 1$	0dB
2	$\sqrt{2} = 1.41$	3dB
4	$\sqrt{4} = 2$	6dB
10	$\sqrt{10} = 3.16$	10dB
100	$\sqrt{100} = 10$	20dB
1000	$\sqrt{1000} = 31.6$	30dB
0.1	$\sqrt{0.1} = 0.316$	-10dB
0.01	$\sqrt{0.01} = 0.1$	-20dB

Anmerkung: Das Leistungsverhältnis ändert sich mit dem Quadrat des Spannungsverhältnisses. Begründung:

$$\text{Leistung: } P_1 = U_1 \cdot I_1 \quad (1)$$

$$\text{Strom durch den Widerstand: } I_1 = \frac{U_1}{R} \quad (2)$$

$$\text{Leistung am Widerstand: } P_1 = \frac{U_1^2}{R} \quad (3)$$

$$\text{also gilt: } \frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} \quad (4)$$

$$\text{bzw.: } \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \quad (5)$$

Interessant sind auch die letzten beiden Zeilen der Tabelle: ist das Verhältnis von  $P_1/P_2$  kleiner 1, kommt also am Ende des Systems mehr Leistung heraus, als man am Anfang hineinsteckt, wird das Signal nicht gedämpft sondern *verstärkt*.

Eine negative Dämpfung in Dezibel kann man als Verstärkung betrachten.

### 3.1.1 Wiederholung: Logarithmus

Der *Logarithmus zur Basis 10* wird in der Mathematik eigentlich mit **lg** bezeichnet. Da auf allen Taschenrechnern stattdessen die zugehörige Taste mit **log** beschriftet ist,

verwendet der Verfasser dieses Textes ebenfalls diese Abkürzung.  
 Nun ist der Logarithmus zur Basis 10 so definiert:

$\log(x)$  ist die Zahl, mit der man 10 potenzieren muss, um x zu erhalten.

Der Logarithmus ist also die Umkehrfunktion des Potenzierens:

$$10^{\log(x)} = x$$

Ein paar Beispiele:

$\log 1$	$= 0$	da	$10^0$	$= 1$
$\log 10$	$= 1$	da	$10^1$	$= 10$
$\log 100$	$= 2$	da	$10^2$	$= 100$
$\log 1000$	$= 3$	da	$10^3$	$= 1000$
$\log 2$	$= 0.301$	da	$10^{0.301}$	$= 2$
$\log 5$	$= 0.699$	da	$10^{0.699}$	$= 5$

### 3.2 Die Leitungsdämpfung

Die Dämpfung einer Leitung hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab:

- der Länge der Leitung
- der Bitrate und damit der Frequenz, die das Signal auf der Leitung hat.

#### 3.2.1 Abhängigkeit der Dämpfung von der Länge

Abb. 3 zeigt drei gleiche, 100m lange Leitungen. Jede Leitung hat in diesem Beispiel eine Dämpfung von 10dB. Bei 10dB Dämpfung ist die Leistung am Ende einer Leitung 10 mal kleiner als am Anfang.

$$a = 10 \cdot \log \frac{P_a}{P_e} = 10dB \tag{6}$$

$$\log \frac{P_a}{P_e} = 1 \text{ (dB ist keine Einheit, kann weggelassen werden)} \tag{7}$$

$$\frac{P_a}{P_e} = 10 \text{ weil: } \log 10 = 1 \tag{8}$$

$$P_a = 10 \cdot P_e \tag{9}$$

Betrachtet man nun die Hintereinanderschaltung aller Leitungen, ist da Verhältnis

$$\frac{P_1}{P_4} = \frac{1000mW}{1mW} = 1000$$

In Dezibel:

$$a = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_4} = 30dB$$

Im Beispiel haben sich die Leitungslänge und die Dämpfung um den gleichen Faktor (3) erhöht. Allgemein kann man daher sagen:

Ändert sich die Leitungslänge um einen bestimmten Faktor, ändert sich die Dämpfung der Leitung um den selben Faktor. Die Dämpfung ist also *proportional* der Leitungslänge.

Beispiel: Eine 100m lange Cat5 Leitung hat bei 125MHz eine Dämpfung von 25dB. Wie lang dar die Leitung sein, damit sie nur 10dB dämpft?

Lösung:  $l = \frac{100m}{25db} \cdot 10db = 40m$

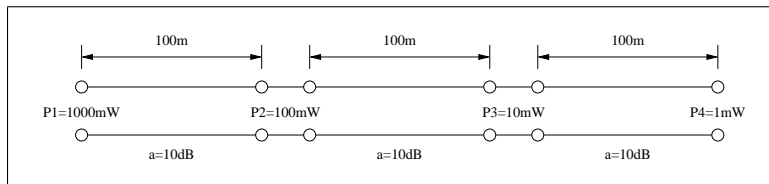


Abbildung 3: Abhängigkeit der Dämpfung von der Leitungslänge

### 3.2.2 Abhängigkeit der Dämpfung von der Betriebsfrequenz

Die Tabelle 1 zeigt einige Messwerte von handelsüblichen UTP und STP Datenkabeln:

$f / MHz$	Cat5e	Cat6	Cat7
1	2	2	2
10	6.5	6	6
125	25	22.5	21.5
250	-	33	31
600	-	-	50

Tabelle 1: Dämpfungswerte verschiedener TP-Leitungen

Trägt man diese Messwerte in ein Diagramm ein, bei dem beide Achsen logarithmisch eingeteilt sind fällt auf, dass alle Messwerte auf einer Geraden liegen. Die Abb. 4 zeigt dies mit den Messwerten der Cat7 Leitung.

Nimmt man nun zwei beliebige Punkte auf der Geraden, z.B. bei 1MHz und bei 100MHz, kann man folgende Gesetzmässigkeit feststellen:

Ändert sich die Frequenz mit einem bestimmten Faktor, ändert sich die Dämpfung mit der Wurzel dieses Faktors.

Ein Beispiel: von 1MHz nach 100MHz ist der Faktor 100. Da aber  $\sqrt{100} = 10$ , müsste sich die Dämpfung von 2dB auf ca. 20dB erhöhen, was man im Diagramm leicht nachprüfen kann.

### 3.3 Übersprechen (Cross-Talk) auf Leitungen

In einem Netzkabel sind 4 Leitungen (Doppeladern) auf engstem Raum untergebracht. Bei höheren Frequenzen tritt dadurch eine ungewünschte Störung auf: Signale,

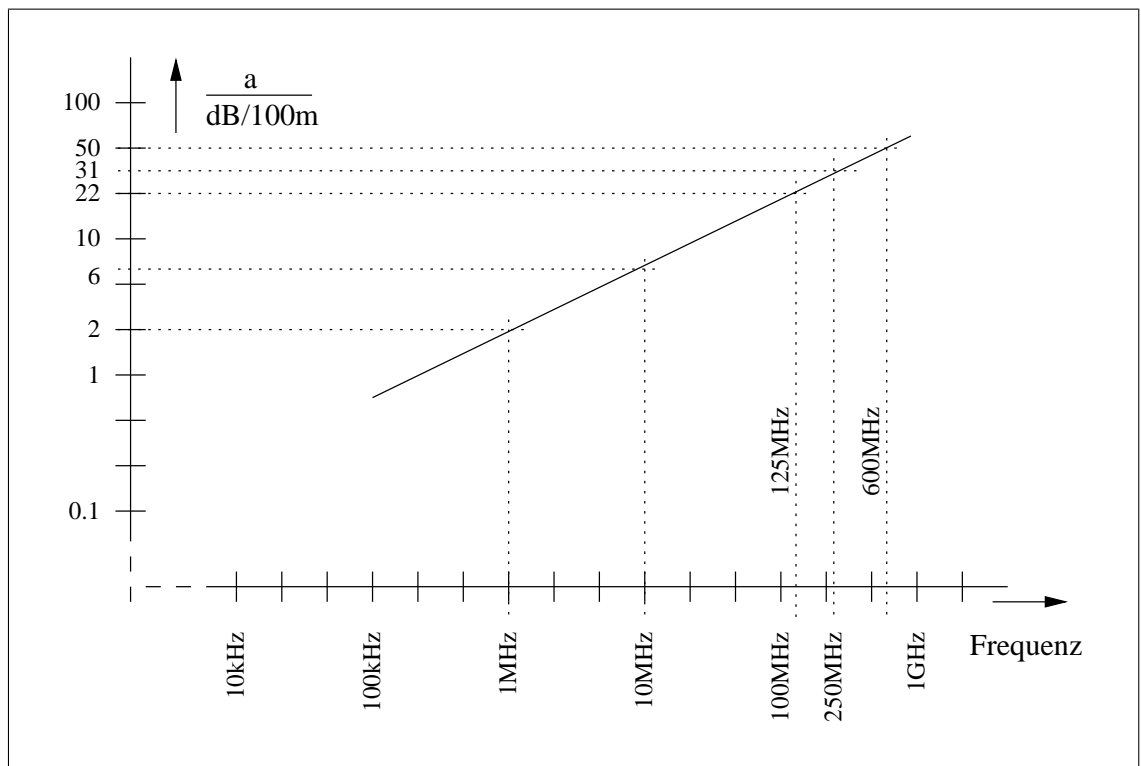


Abbildung 4: Dämpfung einer Cat7 Leitung im doppelt logarithmischen Diagramm

die auf einer Leitung übertragen werden, gelangen durch *elektromagnetische Kopplung* auch ungewollt auf die Nachbarleitungen.

Da dieser Effekt auch bei analogen Telefonsystemen auftritt, bei denen man bei manchen Verbindungen das Gespräch einer Nachbarleitung leise mithören kann, nennt man das Überkoppeln von Signalen *Nebensprechen*, bzw. *Crosstalk*.

Dieser Effekt wirkt sich auf die beiden Enden der gestörten Leitungen unterschiedlich aus. Aus diesem Grund wird die Störleistung am **nahen** und am **entfernten** Ende der Leitung gemessen. Abb. 5 zeigt das Messverfahren.

Das Nahnebensprechen (Near-End-Crosstalk) ist so definiert:

$$\text{NEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_{\text{Nah}}}$$

und das Fernnebensprechen (Far-End-Crosstalk) wird so berechnet:

$$\text{FEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_{\text{Fern}}}$$

Für die Bitfehlerrate ist es nun wichtig, dass das Signal am Empfangsort so wenig wie möglich gestört ist. Aus diesem Grund ist der FEXT-Wert eigentlich nicht so interessant, sondern man möchte lieber wissen, wie gross das Verhältnis von Nutzsignal zum Störsignal am Leitungsende ist.

Die nächste Abb. (Abb. 6) zeigt das Prinzip der Messung. Der gemessene Abstand zwischen Nutz- und Störsignal wird *bewertetes Fernnebensprechen* genannt. Auf Englisch:

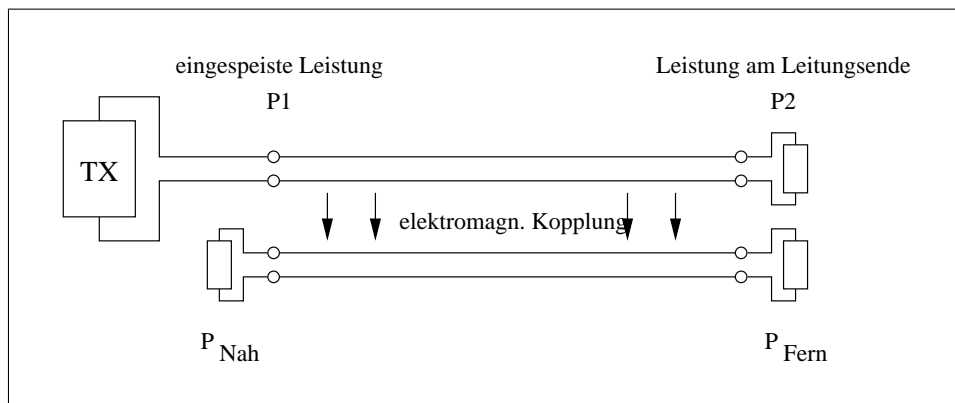


Abbildung 5: Messaufbau zur Bestimmung von NEXT und FEXT

**Equal-Level-FEXT = ELFEXT.**

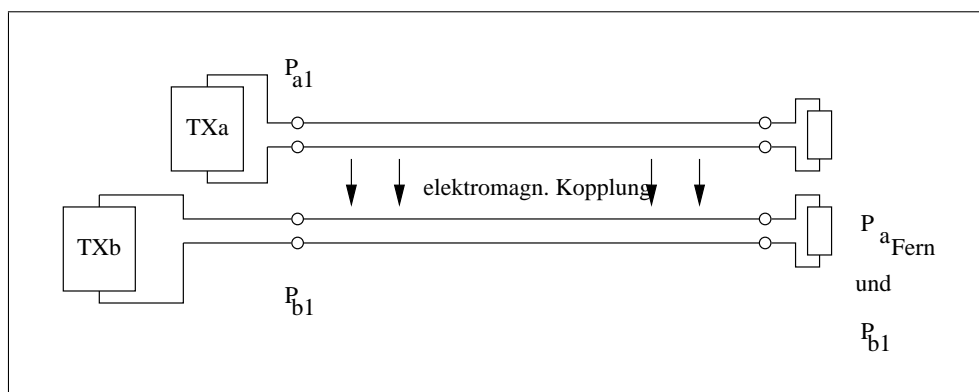


Abbildung 6: Messaufbau zur Bestimmung von ELFEXT

$$ELFEXT = 10 \cdot \log \frac{P_{b_2}}{P_{a_{Fern}}}$$

Dabei ist  $P_{b_2}$  das am Ende der unteren Leitung ankommende, gedämpfte Nutzsignal und  $P_{a_{Fern}}$  ist das von der oberen auf die untere Leitung Übersprech-Signal, also die Störung.

ELFEXT kann man auch aus dem FEXT-Wert und der Dämpfung  $a$  berechnen:

$$ELFEXT = FEXT - a$$

Bei Gigabit-Ethernet werden alle 4 Doppeladern in einem Kabel *gemeinsam* zur Übertragung verwendet. Hier findet also nicht nur Übersprechen zwischen 2 Leitungen statt, sondern das Nutzsignal einer Leitung wird von **3** Nachbarleitungen gestört. Die Störsignale *summieren* sich dabei.

Um diesen Effekt zu berücksichtigen wurden noch die beiden Größen

- Power Sum NEXT - PS-NEXT



- Power Sum ELFEXT - PS-ELFEXT

eingeführt. Diese Werte werden durch **Aufaddieren** der einzelnen Störsignale auf eine Leitung **errechnet**.

Die Bestimmung aller Werte für alle 4 Adernpaare eines Kabels erfolgt vollautomatisch mit einem Kabeltester.

$f/MHz$	Cat5e	Cat6	Cat7
1	62	72	80
10	47	57	80
125	31	41	71
250	-	36	66
600	-	-	60

Tabelle 2: PS-NEXT verschiedener TP-Leitungen

### 3.4 Kabelspezifikationen

Grösse	Cat5	Cat5	Cat6
Frequenz	100MHz	100MHz	250MHz
Dämpfung	22dB	22dB	20dB
Wellenwiderstand	100Ω	100Ω	100Ω
NEXT	32dB	35dB	44dB
PS-NEXT	-	32dB	42dB
ELFEXT	-	24dB	28dB
PS-ELFEXT	-	21dB	25dB

Tabelle 3: Spezifikationswerte von Dämpfung und Übersprechen

## 4 Lichtwellenleiter

In einem Lichtwellenleiter wird Licht durch Totalreflexion in einer dünnen Kernfaser aus optischem Spezialglas weitergeleitet.

Die Kernfaser besteht aus einer Glassorte mit höherem Brechungsindex (optisch dichter) und ist von einer Mantelfaser aus einer Glassorte mit niedrigerem Brechungsindex umhüllt. An der Grenzfläche der beiden Gläser kommt es zur Totalreflexion.

### 4.1 Totalreflexion

Trifft Licht aus einem optisch dichten Medium auf ein dünneres Medium, kommt es bei kleinen Strahlwinkeln an der Grenzfläche beider Medien zu einer vollständigen Reflexion des Lichts ins dichtere Medium zurück.

### 4.2 Ausführungen

Lichtwellenleiter (LWL) werden in 3 verschiedenen Ausführungen verwendet:

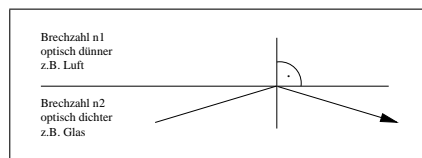


Abbildung 7: Totalreflexion

**Multimode-Faser** - bei der Multimode-Faser (Abb. 10) kann sich das Licht im Inneren des Kerns auf verschiedenen Wegen ausbreiten. Diese Wege werden *Moden* genannt. Je nach Durchmesser des Kerns gibt es mehrere 100 Moden, auf denen die Lichtsignale unterschiedlich lange Wege zurücklegen. Durch die Wegunterschiede treffen die Lichtstrahlen an der Empfangsseite zu verschiedenen Zeitpunkten ein, so dass ein Impuls auf der Empfangsseite breiter ist als auf der Sendeseite. Durch die Impulsverbreiterung entstehen Bitfehler, wenn eine bestimmte Leitungslänge überschritten wird. Multimodefasern werden heute praktisch nicht mehr verwendet.

**Gradienten-Faser** - Die Gradientenfaser ist eine Variante der Multimode-Faser. Bei ihr ändert sich der Brechungsindex des Kerns allmählich. Diese allmähliche Änderung wird so berechnet, dass die Strahlen im Kern annähernd sinusförmig verlaufen. Abb. 11 zeigt das Prinzip. Die Laufzeitunterschiede und damit die Impulsverbreiterung am Ende der Faser sind dadurch viel kleiner als bei der Multimode-Faser.

Die Gradientenfaser ist das Standardmaterial für LAN-Anwendungen. Reichweiten von 550m und mehr sind kein Problem.

**Monomode-Faser** - Bei der Monomode-Faser macht man den Kerndurchmesser so klein, dass es nur einen einzigen Lichtweg gibt. Eine Impulsverbreiterung findet dann gar nicht mehr statt und die Reichweite wird nur durch die Dämpfung begrenzt. Da es Materialien mit Dämpfungen von nur 0.2db/km gibt, sind mehrere 100km Reichweite machbar. Abb. 12 zeigt die Lichtausbreitung in Monomode-Fasern.

### 4.3 Akzeptanzwinkel, numerische Apertur

Strahlt man das Licht zu steil auf die Grenzfläche, findet keine Totalreflexion statt, sondern ein Teil des Lichts leuchtet durch die Grenzfläche hindurch.

Der Akzeptanzwinkel ist der maximale Winkel, unter dem das Licht zur Faserlängsachse eingestrahlt werden darf, so dass das Licht an den Grenzflächen immer noch total reflektiert wird.

Die Abb. 8 zeigt die Lichtleitung in einer Faser für einen Lichtstrahl, der steiler als der Akzeptanzwinkel eingestrahlt wird: es findet keine Totalreflektion mehr statt und der Strahl wird nach wenigen Reflektionen stark gedämpft.

Die numerische Apertur ist eine Zahlengröße, die so aus dem Akzeptanzwinkel berechnet wird:

$$\text{numerische Apertur} = \sin(\text{Akzeptanzwinkel})$$

#### 4.4 optische Fenster

Die Dämpfung einer Glasfaser nimmt mit steigender Wellenlänge ab. Ausserdem haben die Gläser durch Verunreinigungen (hauptsächlich durch Wasser) nochmals kleine Dämpfungsüberhöhungen (Abb. 9).

Heutzutage sind die Dämpfungsüberhöhungen fast nicht mehr ausschlaggebend (die Gläser können reiner hergestellt werden bzw. nehmen kein Wasser mehr auf), aber es haben sich für die Übertragung 3 allgemein verwendete Wellenlängen herausgebildet die garantieren, dass die Dämpfung minimal bleibt:

1. 850nm
2. 1330nm
3. 1550nm

Bei grösseren Wellenlängen absorbiert schliesslich das Glasmaterial ( $SiO_2$ ) wieder stärker, so dass sich ein theoretisches Dämpfungsminimum von 0.15dB/km ergibt.

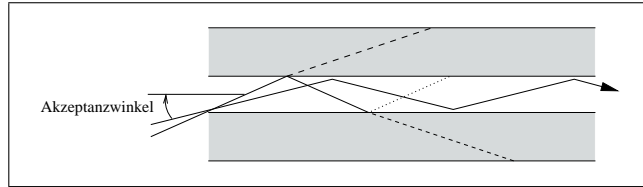


Abbildung 8: Akzeptanzwinkel

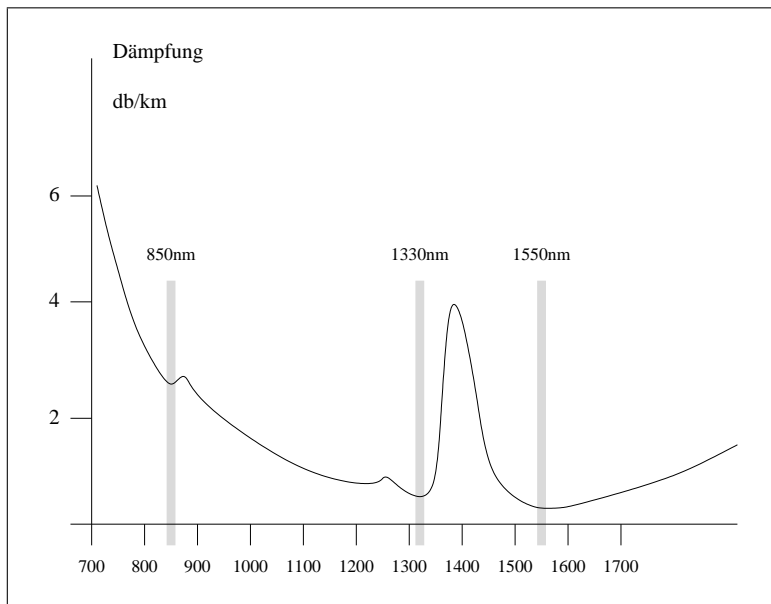


Abbildung 9: Absorptionsverlauf von LWL über der Lichtwellenlänge

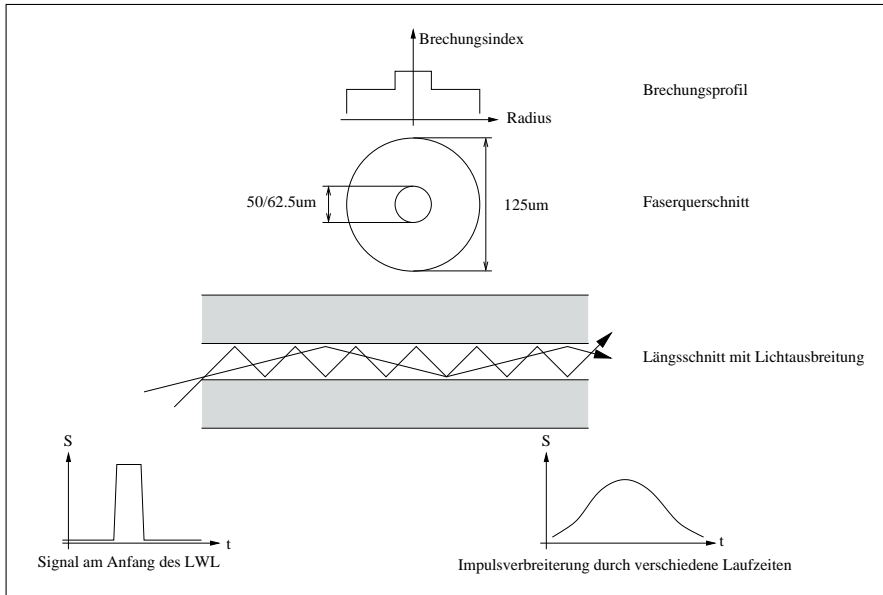


Abbildung 10: Multimode-Faser

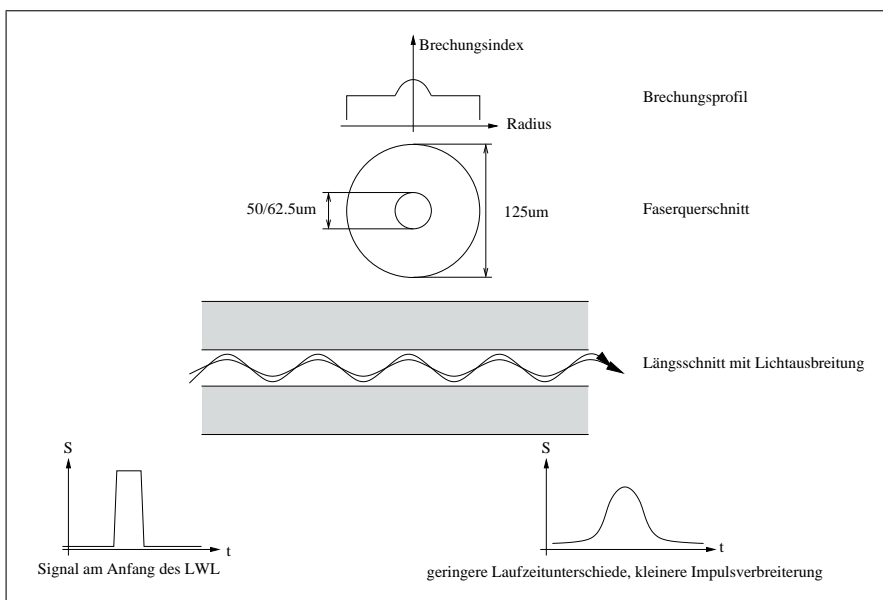


Abbildung 11: Gradienten-Faser

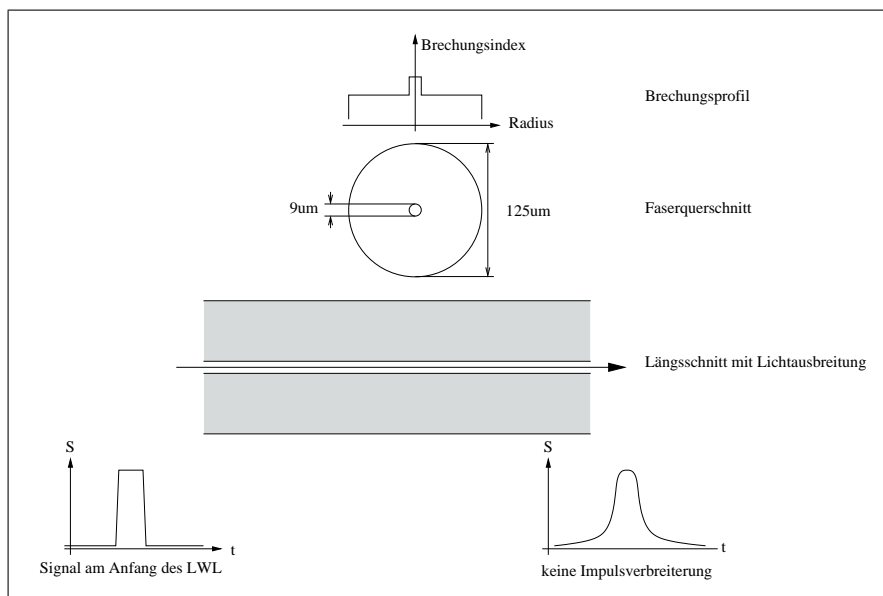


Abbildung 12: Monomode-Faser