

# 1 Lichtwellenleiter<sup>1</sup>

Lichtwellenleiter oder kurz LWL gewinnen immer mehr an Bedeutung sowohl für Weitverkehrsstrecken, aber seit einigen Jahr auch im Nahbereich bis hin zu inhouse Verkabelungen. Im Folgenden werden zunächst Vor- und Nachteile aufgezeigt so wie Bezeichnungen von LWL-Verbindungen. Neben den klassischen Glasfaserleitungen gibt auch sogenannt POF-basierten<sup>2</sup> Leitungen. Diese werden hier nicht betrachtet, da sie überwiegend im semiprofessionellen Bereich eingesetzt werden.

## 1.1 Vorteile

- sehr hohe Übertragungsraten
- unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen (erst ab 110kV)
- neutral hinsichtlich Störungen anderer Komponenten
- weitgehend Abhörsicher (bis auf aktive Komponenten)
- unempfindlich gegenüber Blitzschlag/Überspannung
- längere Übertragungsstrecken

## 1.2 Nachteile

- Aufwändiger/sensibler bei Verkabelung
- Kopplung der Netzelemente ist aufwendiger (rein optische Switche sehr aufwendig)
- empfindlich gegen mechanische Einwirkungen (knicken, Druck)
- Messungen aufwändiger
- Herstellung aufwändiger

## 1.3 Typen von LWL-Verbindungen

Im LWL-Umfeld werden unterschiedliche Verbindungstypen unterschieden. Da rein optische Netze nicht umsetzbar sind, beschränkt sich der optische Anteil meist auf eine Teilstrecke. Diese Verbindungen werden meist mit **FTTx**<sup>3</sup> bezeichnet. Bei den **FTTx**-Bezeichnungen wird immer vom öffentlichen/zentralen Netz ausgehend das Ende der LWL-Strecke benannt.

FTTx	Bedeutung	Endpunkt
FTTC	To the Curb	Straßenecke bzw. KvZ
FTTB	To the Building	Gebäudeanschluss
FTTH	To the Home	Wohnung
FTTO	To the Office	Bürraum
FTTD	To the Desk	Arbeitsplatz

Tabelle 1: FTTx-Verbindungstypen

# 2 Physikalische Zusammenhänge

## 2.1.1 Licht Teilchen oder Welle?

Licht ist ein Phänomen, dass Physiker schon seit Jahrhunderten beschäftigt. **DeBroglie**<sup>4</sup> ging bei Licht davon aus, dass es Teilchencharakter hat, dass heißt es gibt Lichtteilchen sogenannte Photonen, die eine Energie in Form von kinetischer Energie (Bewegungsenergie) besitzen.

$$p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$$

p: Lichtenergie                          v: Ausbreitungsgeschwindigkeit  
h: Heisenberg'sche Konstante                          λ : Wellenlänge

Diese Formel besagt also, dass die Höhe der Energie umgekehrt proportional zur Wellenlänge oder direkt proportional zur Frequenz ist. Dies erklärt auch, warum Röntgen-Strahlen durch Materie (z.B. menschliches Gewebe) tiefer eindringen können, als z.B. infrarot- oder sichtbare Strahlung. Weiterhin wird klar, warum γ-Strahlen (vgl. Kernspaltung) so gefährlich ist. Sie enthält auf Grund ihrer geringen Wellenlänge eine enorm große Energie, die Zellstrukturen beim Aufprall auf molekularer Ebene schädigen können.

DeBroglie stützte sich bei seiner Theorie auf die **elektrodynamischen Gleichungen** von **Maxwell**<sup>5</sup>.

1 LWL: **L**icht**w**ellen**l**eiter oder Glasfaserleitung

2 POF: **p**olymerische **o**ptische **F**aser; Kunststofffaser

3 FTTx: **F**ibre **t**o **t**he **x**; Glasfser bis zu einem Punkt x

4 DeBroglie, Louis-Victor Pierre Raymond; französischer Physiker; 1892-1987

5 Maxwell, James Clerk; schottischer Physiker; 1831-1879; Maxwell-Gleichung → elektromagnetische Felder

Diese beschreiben die Wechselwirkung zwischen sich ändernden elektrischen und magnetischen Feldern. Licht kann also auch als ein **elektromagnetische Welle**<sup>6</sup> betrachtet werden. Eine weitere Definition von Licht beschreibt folgenden Gleichungen.

### 2.1.2 Lichtgeschwindigkeit in Vakuum:

$$f \cdot \lambda = c_0 \quad f: \text{Frequenz} \quad \lambda : \text{Wellenlänge}$$

$$c_0 : \text{Lichtgeschwindigkeit in Vakuum; } 2,9979 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \approx 300.000 \frac{km}{s}$$

Zum Vergleich: Die Entfernung zwischen Sonne und Erde beträgt 8,3 Lichtminuten, also ungefähr:  
 $8,3 \cdot 60 \cdot 300.000 \text{ km} \approx 149.400.000 \text{ km} \approx 150 \text{ Mio. km}$

Strahlungstyp	$\lambda$	f
$\gamma$ -Strahlung	<500 pm	$>6 \cdot 10^{18}$
Röntgen	<50 nm	$>6 \cdot 10^{15}$
UV	<400 nm	$>7,5 \cdot 10^{14}$
Sichtbar	<700 nm	$>4,3 \cdot 10^{14}$
Infrarot	<100 $\mu\text{m}$	$>3 \cdot 10^{12}$
Mikrowelle	<1 cm	$>3 \cdot 10^{10}$
Radiowelle	<1 km	$>3 \cdot 10^6$

### 2.1.3 Lichtgeschwindigkeit in einem Medium:

In einem Medium verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht. Es gilt folgender Zusammenhang.

$$f \cdot \lambda = \frac{c_0}{n} \quad n: \text{Brechzahl oder Brechungsindex}$$

oder über die elektromagnetischen Eigenschaften dargestellt:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad \epsilon_0 : \text{elektrische Feldkonstante}^7; \text{ Naturkonstante}$$

$$\mu_0 : \text{magnetische Feldkonstante}^8; \text{ Naturkonstante}$$

$$n = \frac{c_0}{c_{\text{Medium}}} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \quad \epsilon_r : \text{relative Permittivität; Materialeigenschaft;}$$

beschreibt grob ausgedrückt die **elektrischen** Eigenschaften von nichtleitenden Stoffen

$$c_{\text{Medium}} = \frac{c_0}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot \mu_0 \mu_r}} \quad \mu_r : \text{relative Permeabilität; Materialeigenschaft;}$$

beschreibt grob ausgedrückt die **magnetische** Eigenschaft

Als Essenz dieser Formeln lässt sich festhalten, dass die **Brechzahl** von den **elektromagnetischen Eigenschaften** eines Mediums abhängt.

Und die **Ausbreitungsgeschwindigkeit**  $c_{\text{Medium}}$  hängt ihrerseits wiederum von der **Brechzahl**  $n$  ab.

Es gilt: **Je größer die Brechzahl, umso kleiner ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht.**

Beispiele für Brechzahlen:

Material	Brechzahl n
Vakuum	1 (exakt)
Luft	1,00092
Quarzglas	1,46
Fensterglas	1,49
Diamant	2,42

Tabelle 2: Beispiel für Brechzahlen

6 vgl. Funkwellen wie Radiosignale

7  $\epsilon_0$  : Permittivität oder Dielektrizitätskonstante; Naturkonstante; Epsilon ist das griechische **E**

8  $\mu_0$  : magnetische Permeabilität; Naturkonstante; **M**ü ist das griechische **M**

### 3 Geometrie des Lichts

#### 3.1 Reale Lichtquelle

Bei einer realen Lichtquelle<sup>9</sup> wird normalerweise von einer Lichtquelle radial ausgestrahlt. Die **Lichtleistung**<sup>10</sup> der Quelle nimmt **quadratisch** mit dem **Abstand r** von der Quelle ab:

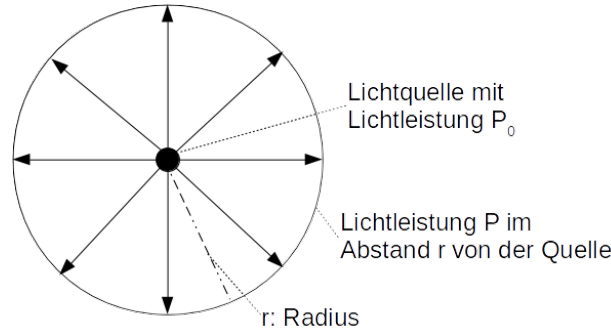


Abbildung 1: Reale Lichtquelle; Abnahme der Lichtleistung P mit dem Abstand r

$$P = \frac{P_0}{r^2}$$

P: Lichtleistung an der Quelle    P<sub>0</sub>: Lichtleistung im Abstand r von der Quelle

#### 3.2 Moden

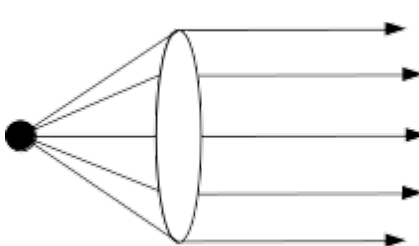


Abbildung 2: parallel gebündelte Lichtstrahlen

Da man bei einem LWL möglichst viel Licht von einem Sender zu einem entfernten Empfänger transportieren möchte, wäre es ungünstig eine reale Lichtquelle zu verwenden. Das Licht wird vor der Übertragung zunächst gebündelt und parallelisiert. Dies führt dazu, dass man sich die radial abgestrahlten Lichtstrahlen wie folgt vorstellen kann.



Abbildung 3: einzelner Lichtstrahl = Mode

Idealisiert können nun diese einzelnen Lichtstrahlen bei einer hinreichend kleinen Lichtquelle als EINE Linie als ein **einzelner Lichtstrahl**, der **Mode** genannt wird, dargestellt werden.

#### 3.3 Beugung / Reflexion

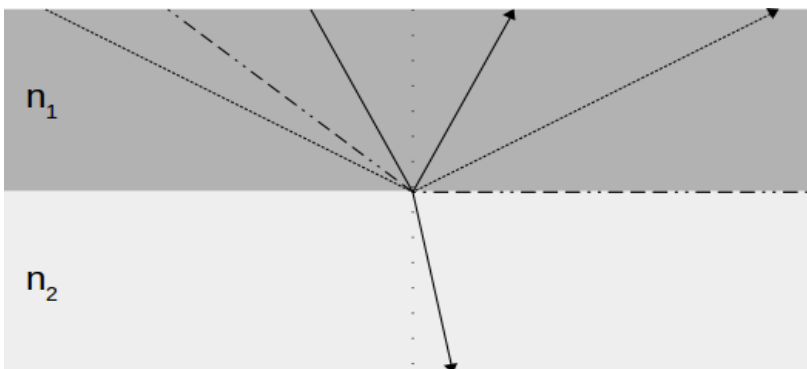


Abbildung 4: Beugung / Reflexion / Totalreflexion

Trifft ein Lichtstrahl senkrecht von einem optisch **dichteren Medium (Glas n<sub>1</sub>)** auf ein anderes Medium (**Luft n<sub>2</sub>**), so wird der Lichtstrahl nicht abgelenkt.

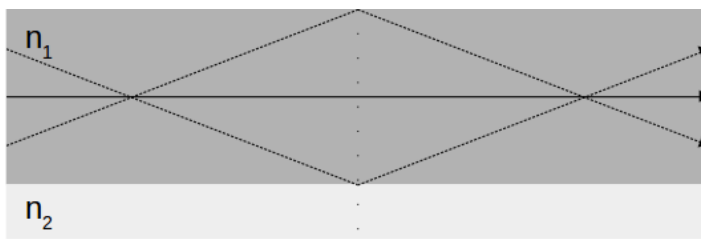
Trifft der Strahl in einem Winkel  $\alpha$  auf die Trennschicht, so wird ein Teil des Lichts reflektiert (ca. 4%). Dabei gilt **Einfallswinkel = Ausfallswinkel**.

Der Rest dringt in das zweite Medium ein und wird dabei zum Lot hin mit einem größeren Winkel  $\beta$  gebeugt (ca. 96%).

Erhöht man den Winkel weiter bis man den sogenannten **Grenzwinkel** erreicht, dann wird der gesamte Lichtstrahl entlang der Trennschicht gebeugt. **Oberhalb des Grenzwinkels**, wird das Licht **totalreflektiert**, d.h. es dringt kein Anteil mehr in das zweite Medium ein, sondern die gesamte Energie bleibt im Medium eins.

<sup>9</sup> z.B. Kerze oder Glühlampe

<sup>10</sup> Dieser Zusammenhang gilt auf für andere elektromagnetischen Felder (z.B. Strom durchflossener Leiter)



Was hat dies nun mit LWL zu tun? Bei LWL ist man bestrebt möglichst viel des eingekoppelten Lichts im Medium (Glas) zu halten.

Um dies zu erreichen muss das **Licht idealerweise parallel zur Trennschicht zum äußeren Medium einkoppeln**.

Abbildung 5: Mit unterschiedlichen Winkeln eingekoppelte Lichtstrahl

## 4 Faserentypen

Die folgenden Bilder zeigen drei unterschiedliche Faserentypen mit den jeweiligen Brechzahlen, Querschnitten sowie den Einfluss auf ein Eingangssignal  $S_{\text{ein}}$ .

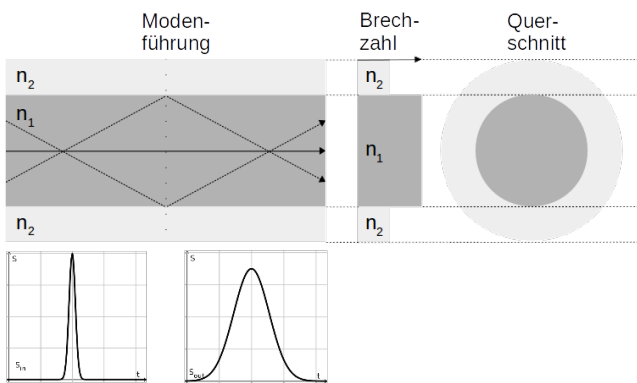


Abbildung 6: Multimodefaser mit Stufenindex

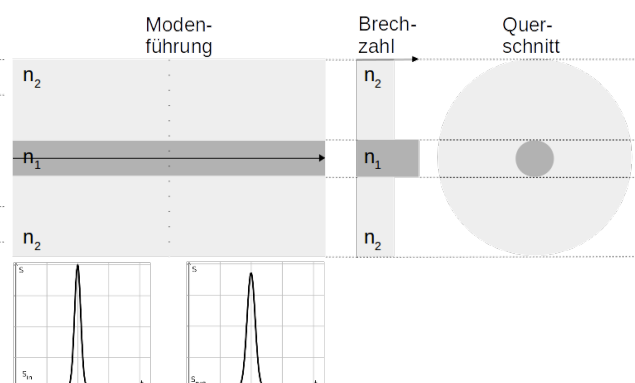


Abbildung 7: Singlemodefaser mit Stufenindex

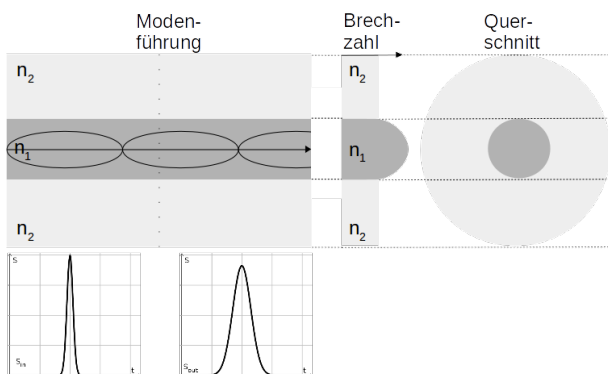


Abbildung 8: Multimodefaser mit Gradientenindex

## 5 Negative Effekt in LWL

### 5.1 Dispersion

#### 5.1.1 Chromatische Dispersion

- Langwelliges Licht („rotes“ Spektrum) wird langsamer über Glasfaserleitungen übertragen  
 → **Laufzeitunterschiede** als **Folge einer Materialeigenschaft**

#### 5.1.2 Modendispersion

- Nicht alle Moden werden senkrecht zur Faserendfläche eingekoppelt  
 → **Laufzeitunterschiede** als Folge von **unterschiedlich langen Wegen** der einzelnen Moden

### 5.2 Dämpfung

Da Licht auch als elektromagnetische Welle verstanden werden kann, unterliegt sie dem Effekt der Dämpfung. Die eigentliche Dämpfung von Glasfasern ist eher gering im Vergleich zur elektrischen Dämpfung, die ein elektrisches Signal auf beispielsweise einer Kupferleitung erfährt. Bei Licht spielen andere Effekte eine größere Rolle. Die folgende Auflistung führt einige Dämpfungseffekte auf.

### 5.2.1 Interne Fehler (innerhalb der Faser)

- Verunreinigungen (Dotierungen<sup>11</sup>)
- Blasen (Luft) oder Einschlüssen (Staub)
- schlechte Spleißung<sup>12</sup>

### 5.2.2 Externe Fehler (außerhalb der Faser)

- schlecht polierte Faserendflächen
- Stecker nicht zentrisch
- kein vollständiger Kontakt
- Einfügedämpfung durch optische Elemente

## 6 LWL-Steckverbindungen

Das folgende Bild zeigt exemplarisch einige LWL Steckverbinder. Der **LC-Stecker** ist aufgrund seiner kompakten Form häufig anzutreffen. Es gibt noch weitere Steckverbinder. Sie unterscheiden sich im wesentlichen in der Handhabung und Packungsdichte. Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Anwendungsgebiete.

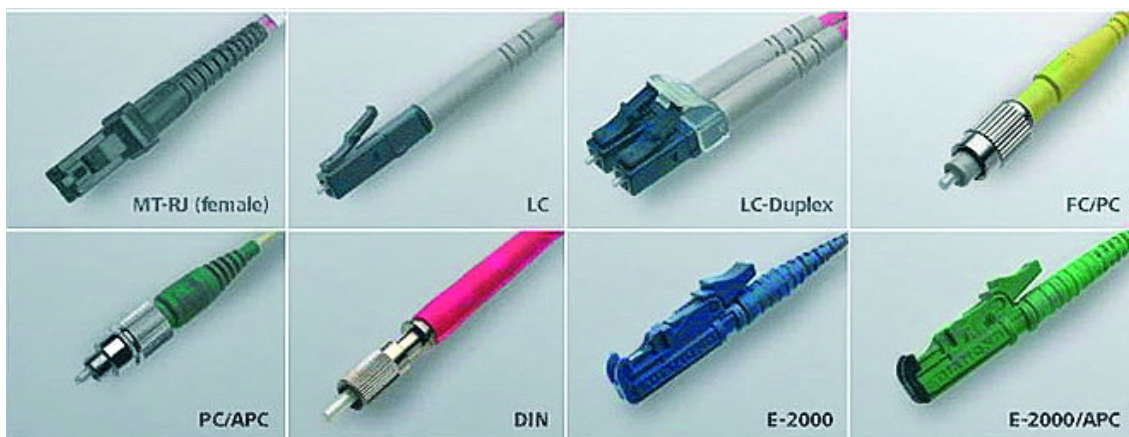


Abbildung 9: LWL Steckverbinder; Quelle: [www.deltec-shop.de](http://www.deltec-shop.de)

## 7 LWL-Leitungstypen

Optische Leitungen werden wie in Kapitel 4 gezeigt nach der Art der Modenführung unterschieden. Als grobe Richtschnur kann man sich merken, dass Singlemoden (**OS1-2**) für große Distanzen (10-100km) eingesetzt werden und Multimodefasern (**OM1-4**) eher für kurze Distanzen (wenige hundert Meter). Wie oben erläutert haben aber auch die eingesetzte Wellenlänge und damit die Materialeigenschaften einen großen Einfluss auf die möglichen Distanzen. Die Bezeichnungen von LWL sind komplizierter, als die von Kupferleitungen. Hier ein Beispiel:

### A - DQ (ZN) B2Y 12G50/125 2,7B400 LG

- A** → Außenkabel (oder: AT=Außenkabel teilbar, I=Innenkabel, U=Universalkabel)  
**D** → Bündelader, gefüllt (oder: F=Faser, H=Hohlader ungefüllt, W=Hohlader gefüllt, B=Bündelader gefüllt)  
**Q** → Quellfließ längswasserdicht  
**(ZN)** → Zugentlastung (oder: B=Bewehrung, (BN)=Bewehrung und Zugentlastung, ...)  
**B2Y** → Bewehrung mit PE-Schutzhülle (oder: Y=PVC-Mantel, 11Y=PU-Mantel, B=Bewehrung,...)  
**12** → Anzahl der Fasern bzw. Anzahl der Bündeladern mal Anzahl der Fasern je Bündel  
**G** → Gradientenfaser (oder: E=Einmodefaser, S=Stufenindexfaser)  
**50** → Kerndurchmesser in  $\mu\text{m}$   
**125** → Manteldurchmesser in  $\mu\text{m}$   
**2,7** → Dämpfungskoeffizient in dB/km  
**B** → Wellenlänge (B=850nm, F=1300nm, h=1550nm)

11 Dotierung nennt man das Einbringen von Fremdstoffen; dies kann beabsichtigt sein (vgl. Halbleiter) oder als Verunreinigung (vgl. Dämpfung LWL) geschehen.

12 Spleißung: Zusammenfügen von zwei LWL-Enden zu einer neuen Leitung; Verlängerung, Reparatur von Brüchen

### 7.1 1000BASE-XX-Varianten

Type	SX*	LX**	EX***	ZX	BX
Reichweite (bis zu)	220m 500m	10km	40km	70km	10km
Wellenlänge	850 nm	1310nm	1310nm	1550nm	1490/1310nm

\*SX: short wave, multi mode; \*\*LX: long wave LAN, single mode; \*\*\*EX,ZX,BX kein IEEE-Standards

### 8 Multiplexing auf LWL

Unter **Multiplexing**<sup>13</sup> versteht man allgemein Techniken, die es ermöglichen eine Übertragungsstrecke mehrfach auszunutzen. Damit können entweder Übertragungsraten erhöht und gegebenenfalls Kosten eingespart werden. Bei optischen Systemen wird das sogenannte **WDM**<sup>14</sup> eingesetzt. Dabei werden statt eines Lichtstrahls mit einer Farbe mehrere Lichtfarben eingesetzt. Die Informationen werden auf bestimmte Farben aufmoduliert („**gemultiplext**“), dann zusammengemischt und über die Übertragungsstrecke geschickt. Auf der Empfangsseite werden dann die einzelnen Farben wieder getrennt („**demultiplext**“) und eigenen Opto-Elektro-Kopplern zugeführt.

Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Verlauf eines optischen Demultiplexers, der einen mehrfarbigen Lichtstrahl (links) mittels eines Prismas aufspreizt (rechts). Jeder einzelne Lichtstrahl kann nun auf der rechten Seite einer eigenen Empfangseinheit (Detektor) zugeführt werden.

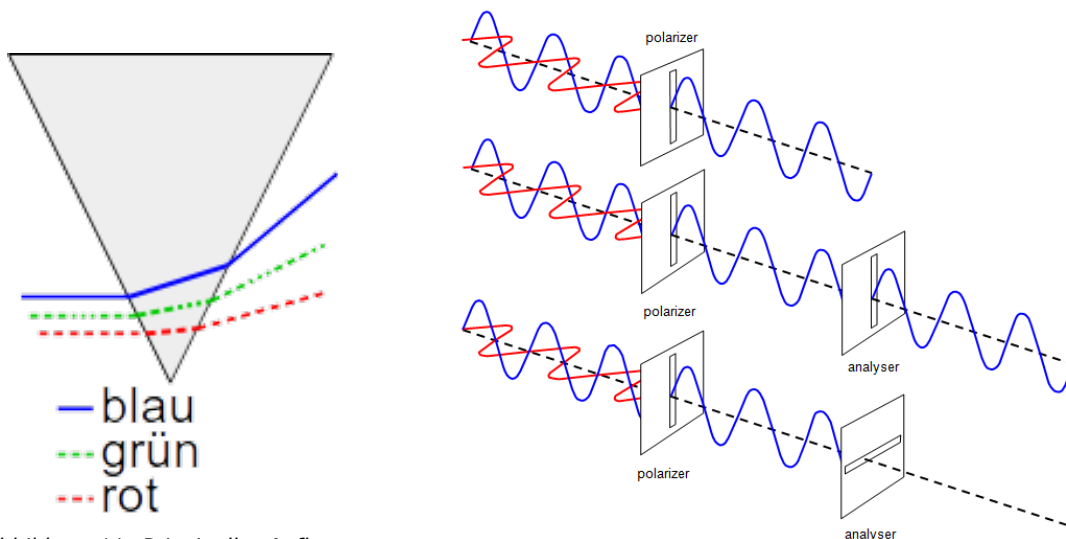


Abbildung 11: Prinzipeller Aufbau eines Demultiplexers

Abbildung 10: Polarisationsprinzip;  
 Quelle: www.peterkindermann.de

Es gibt weitere Varianten des **WDMs**, die hier nur kurz aufgeführt werden. Die Verfahren unterscheiden sich im wesentlichen in der Dichte (auf die Frequenz bezogen) der Lichtfarben zu einander. Je dichter, umso mehr Daten können transportiert werden.

- DWDM**<sup>15</sup>: Farben liegen sehr nah beieinander (0,2nm); bis zu 80 Kanäle mit 10-100Gbit/s pro Kanal; aufwendig/teuer, daher überwiegend im WAN-Bereich anzutreffen.
- CWDM**<sup>16</sup>: Farben liegen weit auseinander (20nm); 18 Kanäle mit bis zu 10Gbit/s; kostengünstig, da einfache Laser verwendet werden können; MAN-Bereich
- WWDM**<sup>17</sup>: einzelne Farben bestehen aus breiterem Frequenzbereich und liegen weiter auseinander (50nm); günstigste Variante; Einsatz LAN 10GBase-LX4 (802.3ae)
- PM/PDM**<sup>18</sup>: Lichtwellen werden bei gleicher Frequenz um 90° versetzt eingekoppelt; vgl. H/V-Polarisation bei Satellitenfernsehen.

13 Multiplex: lateinisch: mehrfach, vielfach  
 14 WDM: **w**avelength **d**ivision **m**ultiplex; Wellenlängenmultiplexing  
 15 DWDM: **d**ense **WDM**; dichte WDM  
 16 CWDM: **c**oarse **WDM**; grobe WDM  
 17 WWDM: **w**ide **WDM**; weite WDM  
 18 PM/PDM: **p**olarization **d**evison **m**ultiplex; Richtungsabhängiges Multiplexing