

# Kapitel 10

## Optoelektronik

Die Bezeichnung Optoelektronik entstammt aus der Kombination von Optik und Halbleiter- oder Mikroelektronik. Sie umfasst Bauelemente, Komponenten und Verfahren, um elektronische Daten, Informationen und elektrische Energie ganz allgemein in Lichtsignale und umgekehrt umzuwandeln und weiter zu verarbeiten.

Sowohl die elektronische Datenaufbereitung und -verarbeitung, also auch die optischen Technologien haben ihre Vorteile und bevorzugte Anwendungsbereiche. Die Übertragung von Lichtsignalen ist schnell und kaum stör anfällig.

Die Wandlung von elektrischer Energie in Licht und umgekehrt passiert oft mittels elektronischer Halbleitertechnologie. Das dabei erzeugte Licht kann sich sowohl im freien Raum als auch in geführten Lichtwellenleitern wie z.B. in Glasfaserkabeln ausbreiten. Die optische Speichertechnik hingegen dient zur Sicherung elektronischer Daten.

Wichtige leitungsführende Komponenten der optischen Signalübertragung wurden bereits im Gegenstand Netzwerktechnik besprochen.

### 10.1 Optoelektronische Bauteile

Optoelektronische Komponenten werden mittlerweile in vielen Haushalten und Betrieben eingesetzt. Dazu gehören LEDs, Bildschirme, Rechner, optische Speichermedien und auch Laserdioden in elektronischen Produkten.

Sie dienen oft als Komponenten mit Schnittstellenwirkung zwischen elektronischem und optischem Verhalten. Vielfach betrifft das mikroelektronische Halbleiterbauelemente.

Eine grobe Einteilung kann in die Unterscheidung von **Aktoren (Sender)** und **Detektoren (Empfänger)** getroffen werden. Sender sind Halbleiterbauelemente, die aus elektrischer Energie Licht erzeugen, wie Leuchtdioden oder Laserdioden. Vom infraroten Spektralbereich, über den sichtbaren Bereich bis hin zur UV-Strahlung sind Komponenten verfügbar. Sensoren können z.B. Photodioden, Fototransistoren oder Solarzellen sein. Weiters können Lichtsensoren als Array integriert aufgebaut sein, z.B. als CCD-Bildsensoren.

Auch **optische Verstärker** und **Photomultiplier** werden zur Optoelektronik gezählt. Die Kombination aus einem Sender und Empfänger in einem Bauteil wird als **Optokoppler** bezeichnet. Damit kann eine Signalübertragung zwischen elektronischen Baugruppen via Licht durchgeführt werden, ohne dass diese leitungstechnisch miteinander verbunden sein müssen. Man spricht dabei von **galvanischer Trennung**.

Neben diesen Komponenten gibt es noch viele weitere Bauteile, die zur Übertragung, zur Signalverstärkung, zur Aufbereitung und zur Modulation von Signalen eingesetzt werden. Wie bereits erwähnt kann die Übertragung von optischen Signalen entweder durch den freien Raum oder in geführten Wellenleitern wie Glasfaserkabeln erfolgen. Zur Modulation von Lichtsignalen können z.B. Amplitudenmodulation oder Phasenveränderungen eingesetzt werden.

Auf wichtige Komponenten wird hier nun näher eingegangen.

### 10.1.1 LEDs

Leuchtdioden (Light Emitting Diodes - LEDs) werden in Durchlassrichtung betrieben. Elektronen wandern dabei von der n-Seite zum pn-Übergang. Das Dreieck im Schaltsymbol zeigt in die technische Stromrichtung im Durchlassbereich.

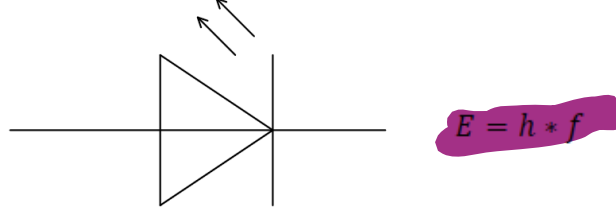


Abbildung 10.1: Schaltsymbol einer Leuchtdiode

Im Bändermodell gehen die Elektronen nach dem Übergang in den p-Halbleiter in das Valenzband über, es kommt zur Rekombination. Man kann diese auch als Vereinigung eines Elektrons vom Leitungsband mit einem Loch interpretieren.

Die dabei frei werdende Energie wird in Form von elektromagnetischen Wellen durch Photonen oft als sichtbares Licht freigesetzt, oder z.B. als infrarote oder ultraviolette Abstrahlung. Durch den Einsatz von verschiedenen Materialkombinationen mit unterschiedlichen Bandabständen können diverse Leuchtfarben realisiert werden.

Der Farbe entspricht eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda$ . Diese hängt mit der Frequenz über die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium zusammen:

$$c = \lambda \cdot f \quad (10.1)$$

Die Informationsgeschwindigkeit im freien Raum beträgt  $c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ , und ist im elektronischen Kabel sowie im geführten Lichtwellenleiter kleiner.

Da Leuchtdioden üblicherweise ein relativ bandbegrenztes Abstrahlungsspektrum aufweisen, können verschiedene Verfahren zur Farbmischung verwendet werden, um weißes Licht zu erzeugen. Dazu werden oft RGB-LEDs (rote, grüne und blaue LEDs) in einem Gehäuse kombiniert, und mit einem Diffusor versehen.

### 10.1.2 Photodioden

Photodioden sind Halbleiterdioden, die sichtbares Licht, Infrarot oder ultraviolette Strahlung an einem pn-Übergang oder an einem pin-Übergang in elektrischen Strom umwandeln.

Der sogenannte innere Photoeffekt spielt dabei eine Rolle. Damit kann Licht mit Elektronik in Spannung umgesetzt werden, sowie mit Licht übertragene Information empfangen und elektronisch weiter verarbeitet werden.

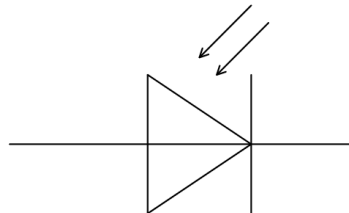


Abbildung 10.2: Schaltsymbol einer Photodiode

Photodioden werden oft in Sperrichtung oder im Quasi-Kurzschluss mit einem speziellen Verstärker betrieben. Werden Sie in Durchlassrichtung betrieben, spricht man eher von einem Photoelement oder einer Solarzelle.

### 10.1.3 Solarzellen

Solarzellen sind Bauteile, die dazu genutzt werden, um Sonnenlicht direkt in elektrische Energie umzuwandeln.

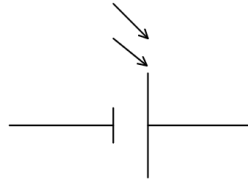


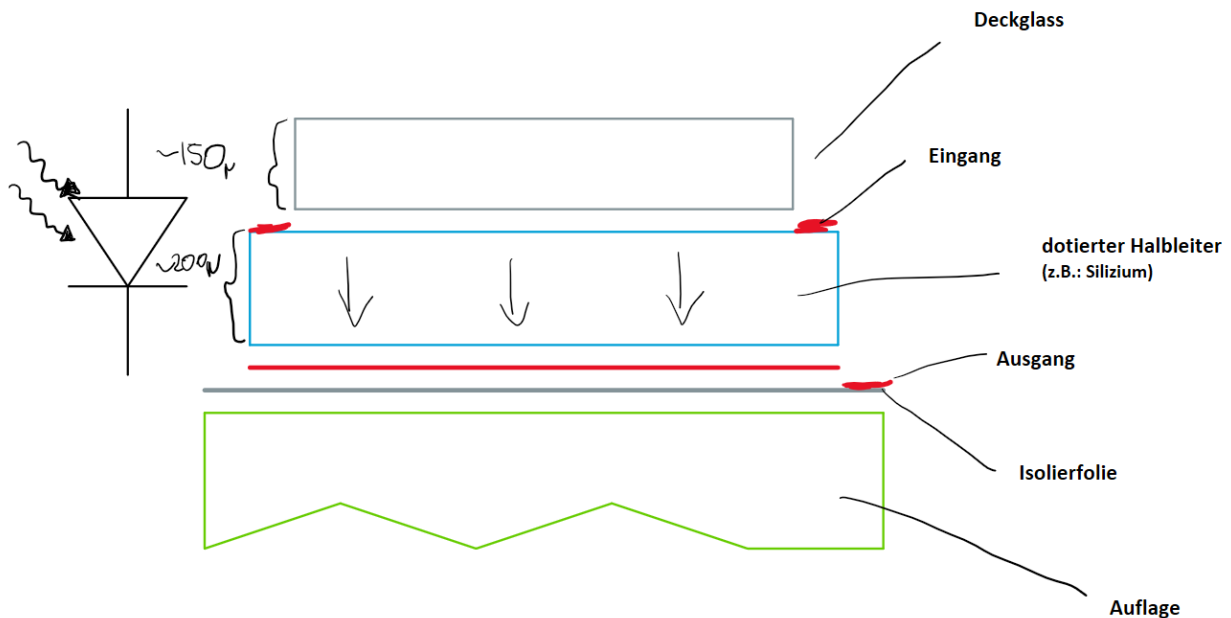
Abbildung 10.3: Gängiges Schaltsymbol einer Photovoltaik-Zelle

Sie funktionieren vom Prinzip her ähnlich zu Photodioden, und verwenden einen pn-Übergang zur Ladungstrennung. Das dahinterliegende Prinzip wird photovoltaischer Effekt genannt. Dieser Effekt ist ein Sonderfall des inneren photoelektrischen Effekts.

Am Markt sind verschiedene Zelltypen in Verwendung, die aus diversen Halbleitermaterialien, als auch aus unterschiedlichen Zelltechnologien aufgebaut sein können (z.B. aus Wafern, oder aus Dünnschichtmodulen). Ein wichtiges Halbleitermaterial dafür ist **Silizium**.

Einzelne Solarzellen werden oft in Reihe geschaltet, und anschließend verkapselt. Man spricht dann von Solarmodulen. Bei Dünnschichtmodulen wird die Serienschaltung schon in den Zellfertigungsprozess integriert. Bei vielen verwendeten kristallinen Modulen wird die Serienschaltung durch Verbinder auf fertige Solarzellen realisiert.

Treffen Photonen (Lichtteilchen) auf die Solarzelle, so geben sie Energie an Elektronen im Material ab. Dabei können diese auf ein höheres Energieniveau (vom Valenzband ins Leitungsband) angehoben werden, in dem sie sich durch das Material bewegen können.



## 10.2 Grundlagen der optischen Signalübertragung

Die Grundlagen der optischen Signalübertragung und die dabei oft eingesetzten Lichtwellenleiter wurden in der Netzwerktechnik teilweise besprochen. Dieses Kapitel dient als Aufbau dazu.

Lichtwellenleiter werden nicht nur in der Netzwerktechnik zur Übertragung digitaler Signale eingesetzt. Ein weiterer Anwendungsbereich ist z.B. die Audiotechnik, da diese Art der Signalübertragung unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störfeldern und Einstreuungen ist, sowie keine Masseschleifen bei getrennten Gerätegruppen verursacht. Weiters kann mit dem Einsatz von Lichtwellenleitern eine Datenübertragung mit Potenzialtrennung zwischen Sender und Empfänger erreicht werden (müssen nicht elektrisch miteinander in Kontakt stehen). Weitere Anwendungsfelder liegen in der Medizintechnik und in der Messtechnik.

Lichtwellenleiter haben in den letzten Jahrzehnten massiv an Verbreitung gewonnen. Es wurden sukzessive ältere Kupferkabelverbindungen auf optische Übertragung umgestellt. Vorteile dabei sind wesentlich höhere mögliche Datenraten im Bereich von Giga- oder Terabit pro Sekunde, in Kombination mit großen möglichen Reichweiten von mehreren 100 km ohne großen Aufwand. Lichtwellenleiter sind leicht, und haben einen geringen Platzbedarf. Sie benötigen relativ wenig Zwischenverstärker. Dadurch werden sowohl die Installationskosten als auch eventuell notwendige Wartungsarbeiten verringert.

Weitere Vorteile sind die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern, und dass kein Nebensprechen der Signale von Fasern auf benachbarte Fasern stattfindet. Die Notwendigkeit einer Erdung ist aufgrund der Technologie nicht mehr notwendig, und es kann eine galvanische Trennung zwischen Sender und Empfänger geben.

Was steigt sind die Anforderungen an die Genauigkeit und Sorgfalt bei der Installation und bei der Verlegung. Insbesondere sind bei vielen Fasern bestimmte minimal erlaubte Biegeradien einzuhalten. Aus diesen Gründen ist die Verlegung von Glasfasern hin zu Desktopgeräten noch nicht weit fortgeschritten.

Lichtwellenleiter weisen in der Regel eine Faserstruktur aus Quarzglas oder Kunststoff (Polymere) auf. Vielfach werden sie als Glasfaserkabel bezeichnet, wobei dieser Begriff eigentlich oft für eine Zusammenfassung von mehreren Lichtwellenleitern in einem gemeinsam geführten Kabel steht, welche zusätzlich mechanisch verstärkt sind.

Lichtwellenleiter sind dielektrische Wellenleiter. Sie bestehen aus konzentrischen Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes und darüberliegenden Kunststoffummantelungen. Der Kerndurchmesser liegt im Mikrometer- bis Millimeterbereich. Man trennt Lichtwellenleiter u.a. in Monomode- und Multimodefasern, diese in Stufenindex- oder Gradientenindexfasern. Man sollte dabei die Anzahl der ausbreitungsfähigen Schwingungsmoden und die daraus folgenden Konsequenzen Auge behalten.

Monomodefasern haben einen kleinen Kerndurchmesser. Dadurch kann sich nur der Grundmodus der Welle ausbreiten. Die radiale Intensitätsverteilung ist ungefähr normalverteilt. In Multimodefasern breiten sich viele Moden aus, da das Kernmaterial dicker ist. Wieviele Moden sich ausbreiten können, hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität und die Reichweite der Signalübertragung, da unterschiedliche Moden verschiedene Ausbreitungswege nehmen können und damit unterschiedliche Laufzeiten auftreten werden. Dieses Problem liefert einen Anteil zur Dispersion. Es kommt dabei insbesondere bei Multimodefasern mit zunehmender Länge zu einer starken Signalverfälschung. Dadurch wird die übertragbare Informationsmenge pro Zeiteinheit stark limitiert. Somit sind Monomodefasern für die Signalübertragung bei größeren Distanzen und höheren Datenraten von Vorteil.

**Resümee** In der Netzwerk- und Nachrichtentechnik werden Lichtwellen als Übertragungsmedium oftmals genutzt. Sie haben aufgrund der erreichbaren Übertragungsraten, aber auch aufgrund der Reichweiten, des Verlegegewichts und der Herstellungskosten die Einsatzgebiete von Kupferkabelverbindungen verdrängt. Ihre Anwendungsfelder reichen aber weit über die IT hinaus. Lichtwellenleiter werden z.B. zum Transport von Laser- und Beleuchtungslicht in der Medizin und für Mikroskope, Endoskope usw. verwendet, und sind in der Messtechnik ein wesentlicher Bestandteil von Sensoren, optischen und spektralen Messgeräten.

### 10.2.1 Aufbau von Lichtwellenleitern

Ein einfacher Lichtwellenleiter könnte folgendermaßen aufgebaut sein: Innen befindet sich die Kernschicht (A), umgeben von einem Mantel (B), dessen Brechungsindex etwas kleiner ist. Dadurch kann an der Grenzfläche eine Totalreflexion vom Lichtstrahl geführt werden. Oftmals besteht der Mantel aus Siliziumdioxid (Quarzglas). Der höhere Brechungsindex im Kern kann durch Dotierung erreicht werden. Ebenso kann der Kern aus Quarzglas

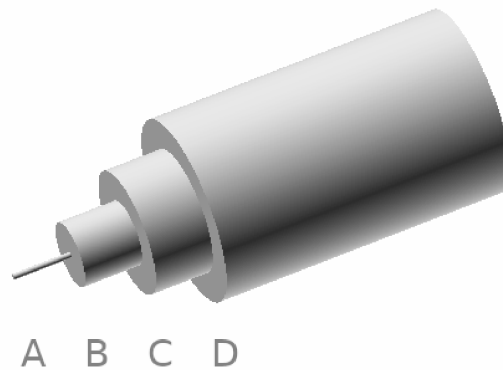


Abbildung 10.4: Prinzipieller Aufbau einer Glasfaser (nicht maßstäblich).

hergestellt werden, und der Mantel mit anderen Materialien dotiert werden. Die Lichtfarbe (bzw. das Spektrum) bestimmt, welcher Fasertyp besser geeignet ist. Darüber befindet sich die Coating-Schicht (C), die als Schutz wirkt. Außen liegt die Jacket-Schicht (D), sozusagen die äußere Schutzschicht, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern.

Glasfasern werden sowohl in Patchkabel- und Erdkabel-Ausführungen eingesetzt. Patchkabel haben einen dünnen Kunststoff- oder Metallmantel. Erdkabel sind oft mit Metalldrähten versteift, und außen in der Regel mit einem Metallgeflecht zur zusätzlichen Stabilisierung verstärkt.

### 10.2.2 Verschiedene Arten von Lichtwellenleitern

Lichtwellenleiter werden zur Übertragung von IR-Signalen von ca.  $2.5\,\mu\text{m}$  Wellenlänge über den sichtbaren Bereich bishin zu UV-Signalen bis ca.  $350\,\text{nm}$  eingesetzt. In ihnen können sich je nach Aufbau verschiedene **Schwingungsmoden** ausbreiten. Das bedeutet, dass sich die Arten der Verteilungen der elektrischen und magnetischen Feldstärke zueinander unterscheiden.

Der **Brechungsindexunterschied** zwischen dem Kern und dem Mantel ist mit ca. 0.3 % gering. Abhängig vom Kerndurchmesser und von diesem Unterschied können sich entweder nur der Grundmodus oder zusätzlich höhere Moden ausbreiten.

Man unterscheidet daher Monomodefasern (single mode fibers), und Multimodefasern (multi mode fibers). Bei den Multimodefasern wird weiters zwischen **Stufenindexfasern** (hier ändert sich der Brechungsindex zwischen Kern und Mantel **sprungartig**) und **Gradientenindexfasern** (es ändert sich der Brechungsindex in Form einer **Parabel** nach außen hin) unterschieden. **Monomodefasern** werden eher nur als **Stufenindexfasern** gefertigt.

#### Multimodefasern

Der Durchmesser der Kernschicht von Multimodefasern liegt grob im Bereich von  $50\,\mu\text{m}$ .

**Stufenindexfasern** Die Lichtführung kann durch die Totalreflexion an der Grenze zwischen Kernschicht und Mantel eingegrenzt werden:

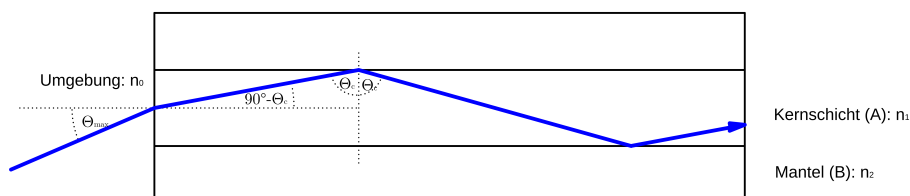


Abbildung 10.5: Einstrahlungs- und Reflexionswinkel.

Aus dem snelliusschen Brechungsgesetz ergibt sich mit dem Brechungsindex  $n_1$  für den Kern und  $n_2$  für den Mantel ein maximaler Winkel  $\theta_c$  für die Totalreflexion von:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (10.2)$$

Von der optischen Achse der Faser ausgehend betrachtet ergibt sich nun ein maximaler Akzeptanzwinkel  $\theta_{max}$  für den Eintritt des Lichts aus dem umgebenden Medium. Dieses ist in der Regel Luft mit  $n_0 = 1$ :

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (10.3)$$

Die sogenannte numerische Apertur  $NA$  der Faser ergibt sich zu

$$NA = \sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (10.4)$$

Sie beträgt bei Multimodefasern ca.  $0,2 \leq NA \leq 0,3$  und bei Monomodefasern  $NA \approx 0,1$ . Aufgrund der Größe der Multimodefasern und des relativ hohen Kerndurchmessers im Vergleich zu Wellenlänge breiten sich mehrere Moden gemeinsam aus. Dadurch entsteht ein Strahlprofil am Ausgang der Faser, das stark von der Lichteinkopplungsart und einer evt. Biegung der Faser abhängig ist. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungslängen der Lichtwege je nach Moden- und Reflexionsart kommt es bei der Signalübertragung über größere Distanzen zu Laufzeitunterschieden, die nicht mehr vernachlässigbar sind. Diese wirken sich mindernd auf die Signalqualität und die Übertragungsbandbreite aus. Man spricht deshalb von **Modendispersion**.

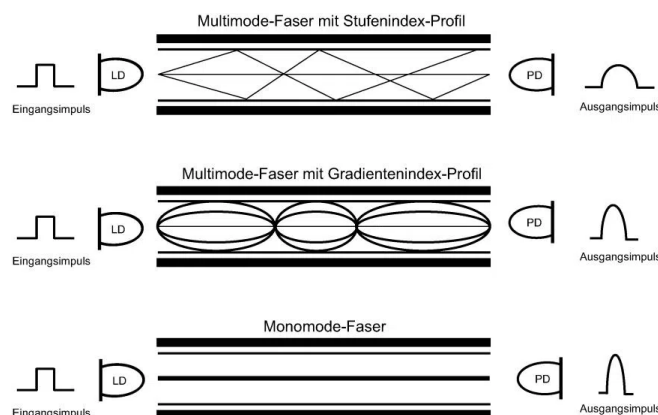
**Gradientenindexfasern** Um solche Laufzeitunterscheide zu verkleinern, werden Gradientenindexfasern eingesetzt. Bei dieser Faserart wird der Brechungsindex vom Kern nach außen hin gesehen langsam abfallend gefertigt. Dadurch wird die Signallaufzeit in den äußeren Faserbereichen wegen des geringeren Brechungsindex kleiner. Nun legen zwar bei einem radial verlaufenden parabolisch geformten Brechungsindexverlauf Strahlen im äußeren Bereich einen längeren Weg zurück, aber durch den dort kleineren Brechungsindex holen Sie die Laufzeitdifferenz (in etwa) wieder auf. **Dadurch kann eine Angleichung der Signallaufzeiten der Ausbreitungswege unterschiedlicher Moden erreicht werden.**

Bei der Herstellung solcher Gradientenindexfasern muss man berücksichtigen, dass der Brechungsindex nicht nur ortsabhängig, sondern auch wellenlängenabhängig ist. Je höher die Übertragungsbandbreite sein soll, umso komplexer und gefinkelter ist die Herstellungstechnologie.

### Monomodefasern

Bei Monomodefasern ist nur der sogenannte **LP01-Grundmode zur Übertragung gewünscht**. Dieser wird erreicht, in dem der Kerndurchmesser nur auf einige Vielfache der Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts ausgelegt wird. Im Englischen werden diese Fasern auch „single mode fibre“ bzw. „single mode fiber“ genannt.

Der Kerndurchmesser liegt oft im Bereich von  **$3 \mu m \leq d_A \leq 9 \mu m$** . Der äußere Durchmesser vom cladding beträgt ca.  **$d_B \approx 125 \mu m$** . Der Brechungsindex ist dort ca. **0,3 %** kleiner als im Kern. Der Hauptanteil der übertragenen Lichtleistung wird im Kern geführt. Die radiale Intensitätsverteilung vom Grundmode ist in etwa gaußförmig verteilt und reicht in den Mantel hinein.



In den nächsten beiden Unterkapitel werden verschiedene Dämpfungsmechanismen und die sogenannte Dispersion beschrieben. Diese verursachen eine Limitierung der maximal möglichen Reichweite bis zum nächsten notwendigen Repeater oder Verstärker. Insbesondere die Dispersion, als auch die verwendete Faserart beschränken diese maximal mögliche Datenrate.

### 10.2.3 Dispersion

Liegen innerhalb einer Faser unterschiedliche Laufzeitlängen einzelner Signalanteile vor, werden die Impulsformen der modulierten Lichtsignale auf dem Weg durch die Faser verschliffen.

Gründe dafür sind z.B. unterschiedliche Ausbreitungswege verschiedener Moden durch die Faser, unterschiedliche Wellenlängenbereiche innerhalb des Lichtimpulses oder Einflüsse durch Brechungsindexverläufe. All das bewirkt eine Veränderung der Lichtimpulsform zwischen Sender und Empfänger und somit eine Einschränkung der maximal möglichen Datenrate.

#### Modendispersion

Betrachtet man eine Multimodefaser mit Stufenindexprofil, so sieht man, dass sich unterschiedliche Moden verschieden schnell ausbreiten. Abhängig ist diese Dispersion vom radial gesehenen Verlauf des Brechungsindex. Würde diese parabelförmig nach außen absinken, könnte diese Modendispersion gegen Null gehen. Diese Dispersionsart tritt nicht bei Monomodefasern auf.

#### Chromatische Dispersion

Sie entsteht, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenlänge abhängig ist. Die Information wird durch modulierte Lichtimpulse übertragen. Diese benötigen eine spektrale Bandbreite, die mindestens der Bandbreite vom Nutzsignal entspricht. Dadurch ergibt sich eine untere und eine obere Grenzfrequenz des versendeten Lichtpakets. Benötigen nun unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich lange für die Distanz zwischen Sender und Empfänger, wird die Signalform des Pulses verschliffen. Diese Deformierung ist umso größer, je länger die Übertragungsstrecke und je größer diese Dispersion der eingesetzten Wellenlängen ist. Aufgrund folgender Einflüsse entsteht dieser Zusammenhang:

**Materialdispersion** In Glas ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig und damit abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$ . Dieser Effekt ist in der Photographie bei Glaslinsen als chromatische Aberration bekannt. Man kann diese Materialdispersion für eine bestimmte Wellenlänge durch geeignete Materialwahl auf Null bringen.

**Wellenleiterdispersion** Je tiefer die Frequenz des Paketanteils ist, umso tiefer dringt jener spektrale Anteil bei der Ausbreitung in den Mantel ein. Dabei wird der effektive Brechungsindex geringer, deswegen erhöht sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Höherfrequente Anteile werden tendenziell eher im Kern geführt. Dort ist der effektive Brechungsindex höher, und die Ausbreitungsgeschwindigkeit sinkt. Unterschiedliche spektrale Anteile benötigen daher unterschiedlich lange durch die Faser. Je geringer also der Brechungsindexunterschied zwischen Kern und Mantel ist, umso geringer wird die Wellenleiterdispersion.

Daneben kann noch die Polarisationsmodendispersion auftreten, wenn sich Lichtanteile je nach Polarisationsart in der Faser unterschiedlich schnell ausbreiten.

In Netzwerken für den Weitverkehr werden in der Regel Monomodefasern eingesetzt. Mit einem Non-Zero-Dispersion Fasertyp wird eine sehr geringe Dämpfung bei geringer Dispersion im „conventional band“ erreicht.

In einer Vorlesung über optoelektronische Komponenten an der TU Wien wurde von experimentiellen Licht-Impulsformen gesprochen, deren nichtlineare Einflüsse auf den Brechungsindex der Faser bei relativ hohen Amplituden die Impulsverformung durch Dispersion aufheben kann. Dadurch wäre es theoretisch möglich, eine Faserstrecke über massive Distanzen ohne Repeater (allerdings mit notwendigen Verstärkern) zu betreiben.

### 10.2.4 Dämpfungsverluste durch Materialeigenschaften

Glasfaserkabel weisen insbesondere aufgrund von Materialeigenschaften und Verunreinigungen Dämpfungsverluste auf. Ein typischer Dämpfungsverlauf über der Wellenlänge könnte in etwa so aussehen:



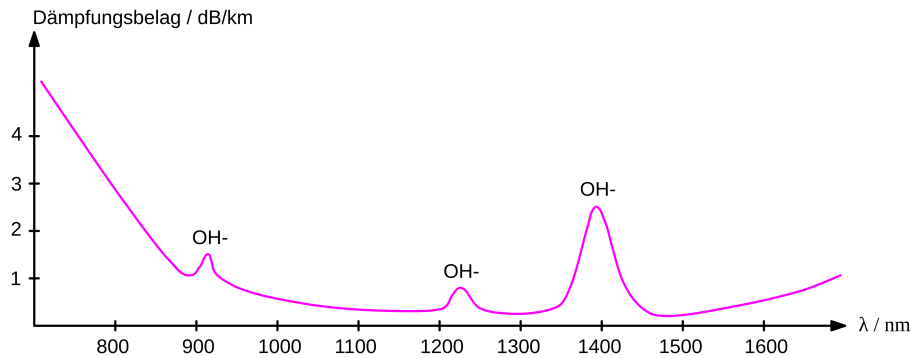


Abbildung 10.6: Dämpfungsbelag über der Wellenlänge.

In dieser Abbildung sehen Sie einerseits die Auswirkungen der Materialeigenschaften. Links und rechts sind die Ausläufer der sog. Absorptionsbanden im Ultraviolettbereich (überlagert durch Rayleigh-Streuungsverluste) und auf der anderen Seite vom Infrarotbereich zu sehen. Die drei lokalen Maxima sind sogenannte „water peaks“, welche in etwa bei  $950\text{ nm}$ ,  $1240\text{ nm}$  und  $1380\text{ nm}$  liegen.

Weiterentwicklungen sind Low-Water-Peak Fasern und Zero-Water-Peak Fasern. Durch stark verbesserte Herstellungsmethoden und Ausgangsmaterialien können diese Wasserdämpfungsspitzen vermieden oder stark limitiert werden. Damit kann der Dämpfungsbelag im Bereich von  $1260\text{ nm} \leq \lambda \leq 1625\text{ nm}$  entscheidend reduziert werden. Dadurch kann das sogenannte E-Band (extended band) für die Datenübertragung genutzt werden. Es wird somit ein Band mit großen möglichen Kanalabständen frei, in dem günstige Laser mit hohen Datenraten bei relativ großen Distanzen eingesetzt werden können.

### Weitere Verluste durch Biegung

Werden Glasfasern im Radius von einigen cm gebogen, wandert ein Teil der im Kern geführten Leistung in den Mantel. Dadurch erhöhen sich die Dämpfungsverluste, welche im schlimmsten Fall (je nach Länge, Leistungsbudget und Biegungsarten) zu einem Übertragungsausfall führen können. Es gibt deswegen Glasfasern mit reduzierten Biegeverlusten („low bending loss fibre“). Selbst bei sehr engen Biegeradien von unter  $1\text{ cm}$  treten dann kaum mehr nennenswerte Verluste auf.

### Verluste beim Einspeisen und beim Aneinanderkoppeln von Fasern

Sowohl beim Einspeisen des Lichts in die Faser, als auch beim Verbinden von zwei Fasern mittels Steckern oder Spleiße treten Verluste auf. Mögliche Gründe dafür sind nicht optimal ausgerichtete Faserenden, wie exzentrische Abweichungen der Kernmittelpunkte zueinander. Dadurch können Reflexionen an den Stoßstellen auftreten. Weitere Probleme ergeben sich, wenn die Fokussierung der Einkopplung nicht optimal auf die Faser ausgerichtet ist.

Werden Lichtwellenleiter miteinander verbunden, ist es daher von hoher Relevanz, dass einerseits die beiden Fasern von den Abmessungen her kompatibel zueinander sind, und dass die beiden Kernmittelpunkte möglichst korrekt zueinander positioniert werden. Da bei Monomodefasern der Kern nur wenige  $\mu\text{m}$  Durchmesser hat, ist eine besonders genaue Ausrichtung notwendig. Bei Multimodefasern kann es daher etwas höhere mögliche Toleranzen geben.