


Arbeitsblatt Nr.	Lehrgang: Vernetzte Systeme	 B S G G
Datum:	Thema: Lichtwellenleiter	
Seite 1 von 4	Name:	

## Brechung und Totalreflexion

Die physikalische Grundlage der Lichtwellenleitertechnik bilden das Brechungsgesetz und die Totalreflexion.

### Brechung

Jeder kennt Lichtbrechung aus dem Alltag: ein in Wasser eingetauchter Bleistift erscheint an der Stelle des Übergangs Wasser / Luft geknickt. Zur Begründung für die offensichtliche Ablenkung der Lichtstrahlen wird die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Wasser und in Luft herangezogen. Die Eigenschaft lichtdurchlässiger Stoffe, eine spezifische Lichtgeschwindigkeit zuzulassen, wird als optische Dichte bezeichnet, und jedem Stoff als Maß dafür ein dimensionsloser Brechungsindex  $n$  zugeordnet.

Dann gilt für die Lichtgeschwindigkeit  $c(n)$  in dem Stoff:  $c(n) = c_0 / n$

( $c_0 = 2,9799 \cdot 10^8$  m/s, Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, das den Brechungsindex  $n=1$  besitzt).

Immer dann, wenn ein Lichtstrahl die Grenzfläche zweier Stoffe mit unterschiedlichen Brechungsindizes passiert, ändert sich seine Richtung. Die Richtungsänderung wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben:

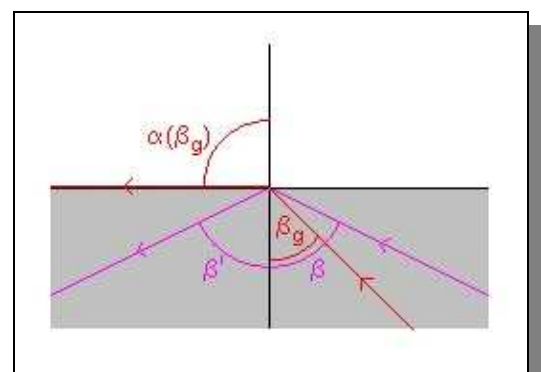
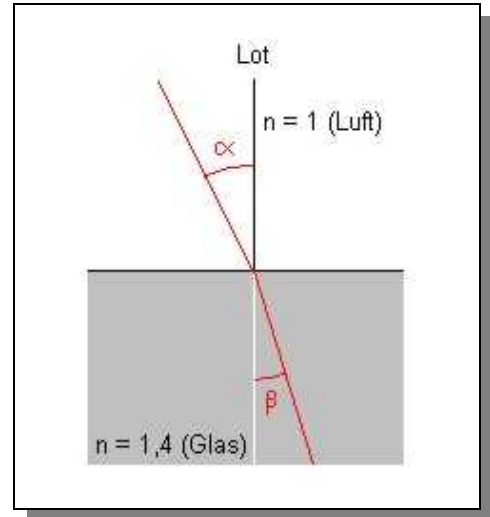
$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$$


mit den Lotwinkeln  $\alpha_i$  in den Medien  $i = 1, 2$  und deren Brechungsindizes  $n_i$ .

Lichtstrahlen werden also beim Übergang ins optisch dichtere Medium zum Lot hingebrochen, und umgekehrt.

### Totalreflexion

Vergrößert man in der obigen Skizze den Winkel  $\beta$ , dann nimmt der Winkel  $\alpha$  den Wert  $90^\circ$  an, so dass der Lichtstrahl parallel zur Grenzfläche läuft. Vergrößert man den Winkel  $\beta$  noch mehr, dann wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche in das optisch dichtere Medium zurückgeworfen; dies nennt man Totalreflexion.



Arbeitsblatt Nr.	Lehrgang: Vernetzte Systeme		B S G G
Datum:	Thema: Lichtwellenleiter		
Seite 2 von 4	Name:		

## Aufbau eines Lichtwellenleiterkabels

Ein Lichtwellenleiter ist ein zylindrisches Element das aus 3 Schichten besteht.

1. Optischer Kern (Core)
2. Optischer Mantel (Cladding)
3. Mechanische Schutzschicht (Primary Coating)

Die verschiedenen Typen von LWL werden für verschiedene Einsatzbereiche verwendet.

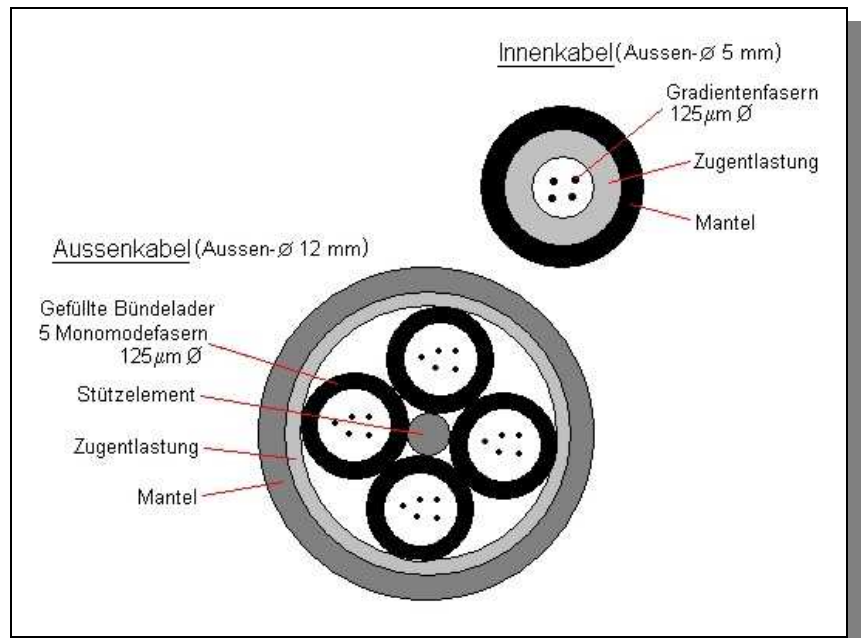
**Stufenprofilfasern** werden meist innerhalb von Gebäuden ("fibre-to-the-desk", Vernetzung von Arbeitsplatzrechnern in Gebäuden über maximal ca. 100 m) verwendet. Übliche Kerndurchmesser sind 100 und 200  $\mu\text{m}$ . Die Übertragungsbandbreite beträgt ca. 100 MHz \* km.


**Gradientenprofilfasern** dienen als Übertragungskanal für unterirdische und in Gebäuden verlaufende Verbindungen mittlerer Entfernung (sog. "Campusverkabelung", 1km bis ca. 10 km). Übliche Kerndurchmesser sind 50/62,5/85 und 100  $\mu\text{m}$ . Die Übertragungsbandbreite beträgt ca. 1 GHz \* km.

Mit **Monomodefasern** werden Weitverkehrsverbindungen ausgestattet (bis zu einigen 100 km, mit Zwischenverstärkern einige 1000 km). Die Monomodefaser ist eine Stufenfaser mit extrem niedrigem Kerndurchmesser (maximal 10  $\mu\text{m}$ ).

Die Übertragungsbandbreite liegt in der Größenordnung von ca. 10 Ghz \* km

Entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen werden diese Typen in verschiedenen Kabeln geführt. Für zwei typische Anwendungsfälle sehen diese Kabel wie nebenstehend dargestellt aus.



Arbeitsblatt Nr.	Lehrgang: Vernetzte Systeme	 B S G G
Datum:	Thema: Lichtwellenleiter	
Seite 3 von 4	Name:	

## Multimode-Fasern

Die Lichtwellen können in der Glasfaser auf verschiedenen Wegen laufen, die sich durch die Einkopplung des Lichtes ergeben; die lichterzeugenden Bauteile (LEDs oder Laserdioden) strahlen das Licht nicht ausschließlich vertikal ab.

Diese geführten Lichtwellen nennt man Moden (Plural von Modus). Die Moden sind somit die möglichen Ausbreitungswege des Lichts in der LWL-Ader.

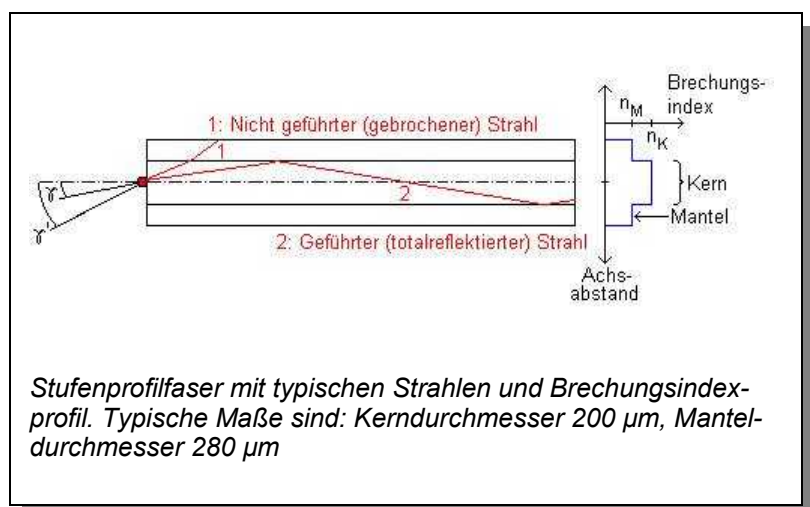
Bei einem LWL werden nur bestimmte Lichtwellenlängen verwendet, da die LWL bei diesen eine minimale Dämpfung aufweisen. Man nennt diese Bereiche optische Fenster. Die optischen Fenster liegen in den drei Wellenlängenbereichen

1. 850 nm
2. 1300 nm
3. 1550 nm

## Stufenprofilfaser

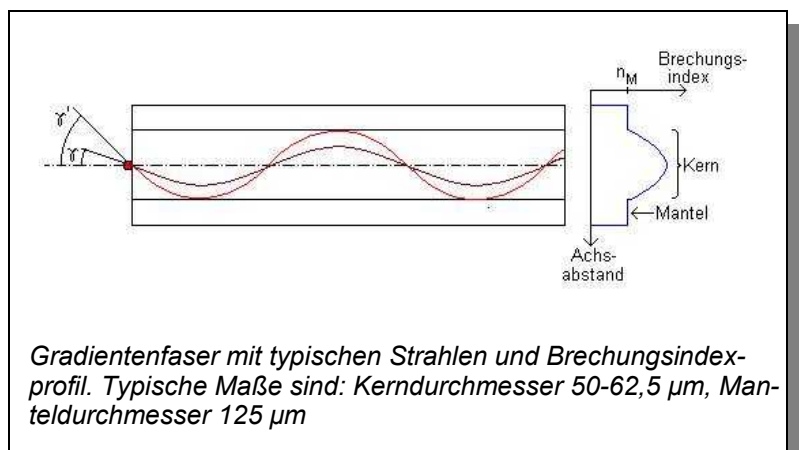
Diese Fasern bestehen aus einem Kern und einem Mantel, die sich in ihrem Brechungsindex unterscheiden. Der Übergang ist dabei unstetig und sieht in einem Diagramm wie eine Stufe aus (rechte Seite der unten stehenden Abbildung)


Die Führung der Lichtstrahlen erfolgt durch Totalreflexion an der Grenzschicht Kern / Mantel. Dabei entscheidet der Einkopplungswinkel  $\gamma$  darüber, ob ein Strahl geführt (reflektiert) wird wie Strahl 2 oder verloren geht (gebrochen wird) wie Strahl 1.



## Gradientenprofilfaser

Diese Bauform besitzt ebenfalls ein Brechungsindexprofil, welches aber im Kern stetig in Form einer Parabel verläuft. Tatsächlich ist dieses Profil - allein schon aus fertigungstechnischen Gründen - ebenfalls stufenförmig, nur sind die Stufen klein und zahlreich. Makroskopisch gesehen liegt dann ein "stetiges" Profil vor.



Arbeitsblatt Nr.	Lehrgang: Vernetzte Systeme	
Datum:	Thema: Lichtwellenleiter	
Seite 4 von 4	Name:	

## Unterschied Gradientenfaser/Stufenfaser

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Brechungszahl  $n$  abhängt, haben alle Moden in einer Stufenfaser die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit. Da die Moden aber unterschiedliche lange Wege zurücklegen (aufgrund der unterschiedlichen Einkopplungswinkel), entsteht am Ende des LWL ein verzerrtes Signal, da die verschiedenen Moden zu unterschiedlichen Zeitpunkten am Ende des LWL eintreffen. Ein zeitlich kurzer Lichtimpuls erscheint am Ende des LWL als zeitlich längerer (verbreiteter) Lichtimpuls. Diesen Effekt nennt man **Modendispersion**.

Bei der Gradientenfaser werden die unterschiedlich langen Wege durch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten für das Licht ausgeglichen. Moden mit längeren Wegen haben aufgrund des geringeren Brechungsindex  $n$  zum Mantel hin, eine höhere Geschwindigkeit, wodurch die verschiedenen Moden dann zur gleichen Zeit am Ende des LWL eintreffen; die Signalform bleibt besser erhalten!

## Monomode-Lichtwellenleiter

Es existiert nur eine Bauform dieser LWL, die im Prinzip eine Stufenindexfaser ist. Der Unterschied zur Multimode-Stufenindexfaser ist der geringere Kerndurchmesser von  $10\ \mu\text{m}$  (Manteldurchmesser  $125\ \mu\text{m}$ ).

Bei einer Wellenlänge des Lichts von  $1550\ \text{nm} = 1,55\ \mu\text{m}$  beträgt der Kerndurchmesser also nur noch etwa das 6,5-fache der Wellenlänge. Aus diesem Grund kann nur ein Wellenmodus gleichzeitig durch die Faser laufen, was eine Modendispersion ausschließt.

Da keine Modendispersion auftritt, sind mit Monomodefasern die größten Bandbreiten über lange Entfernungen zu erzielen. Allerdings ist ihre Herstellung teurer als die der Multimodefasern. Monomodefasern werden deshalb nur eingesetzt, wenn ihr Hauptvorteil, die Erhaltung der Impulsform über lange Entfernungen, zum Tragen kommt. Dies ist bei Weitverkehrsverbindungen mit hohen Übertragungsraten (z.B. dem deutschen Wissenschaftsnetz) der Fall.

Bei einem LWL wird dessen Übertragungskapazität als ein Produkt von Übertragungsrate multipliziert mit der Weglänge angegeben.

Die kommerziell nutzbaren, möglichen Bandbreite-Länge-Produkte betragen bei Verwendung entsprechender Zwischenverstärker heutzutage (Frühjahr 2000) größenordnungsmäßig  $100\ \text{Gbit/s} \cdot \text{km}$  - also beispielsweise  $1\ \text{Gbit/s}$  über  $100\ \text{km}$ . Technisch möglich sind bereits mehrere  $\text{Tbit/s} \cdot \text{km}$ , so dass in naher Zukunft die Einrichtung von Netzen dieser Kapazität erfolgen wird.

Text und Bilder teilweise von <http://it.tud.uni-essen.de/index.htm>

## Arbeitsfragen

1. Was gibt der Brechungsindex eines Materials an?
2. Erläutern Sie schriftlich mit eigenen Worten die Begriffe Brechung und Totalreflexion.
3. Erklären Sie, warum der Mantel einer LWL-Ader einen kleineren Brechungsindex als der Kern haben muss.
4. Welche Arten von LWL-Adern existieren? Erläutern Sie schriftlich deren Unterschiede.
5. Warum sind Stufenindexfasern nur für kurze und Monomodefasern auch für große Entfernungen nutzbar?