

Optische Übertragungstechnik

Teil 1

Es war schon immer ein Traum des Menschen, ohne körperliche Überbringung einer Nachricht durch Boten schnell und über große Entfernungen zu kommunizieren. Als weder die drahtgebundene Telegrafie erfunden noch die elektromagnetischen Wellen entdeckt waren, konnten Botschaften nur mit Lichtzeichen über eine Relaiskette im freien Raum übertragen werden. Doch erst durch Lichtwellenleiter in Verbindung mit den Fortschritten in der Optoelektronik konnte die Nachrichtenübertragung mit Licht ihren unvergleichlichen Siegeszug antreten.



Das Aquarell von A. Roloff illustriert den Fackeltelegraphen von Polybios. Das zu sendende Zeichen wurde durch Fackeln zwischen den Zinnen eines Signalturms codiert und ausgesendet. Mit Hilfe von zwei auf den nächsten Turm der Relaiskette ausgerichteten Dioptern (griechisch: Gerät zum „Durchblicken“ = Ziel- oder Visierrohr) empfing man dort gleichermaßen erzeugte Zeichen. (Quelle: Museum für Kommunikation Frankfurt, D-60596 Frankfurt am Main)

Historische Entwicklung der optischen Nachrichtenübertragung

Fünf Sinne hat der Mensch: Fühlen, Schmecken, Riechen, Hören und Sehen. Davon spielt das Sehen für ihn die weitaus wichtigste Rolle. Die meisten Informatio-

nen nimmt er über die dafür ausgelegten Sinnesorgane, die Augen, auf. Zum Sehen ist Licht erforderlich, das der Mensch nicht selber produziert. Er ist auf Licht einer externen Quelle, z. B. von der Sonne, angewiesen. Dieses fällt auf seine Umgebung und wird von der dort vorhandenen Materie verändert zurückgestrahlt. Ein kleiner

Teil dieses „modulierten“ Lichts wird in das Auge eingestrahlt. Modulation bedeutet hier im weiteren Sinne das Aufprägen einer Nachricht auf das ursprünglich informationslose weiße Licht der Sonne oder einer künstlichen Lichtquelle.

Seit Urzeiten bedient sich der Mensch des Lichts, um Nachrichten zu übertragen,

wo die menschliche Stimme nicht weit genug trägt oder die persönliche Überbringung nicht möglich oder zu langsam ist. Man denke an primitive Rauch- oder Fackelzeichen. Diesen Methoden haftet aber eine Reihe von Nachteilen an: Sie sind nur für Nachrichten mit vereinbarter Bedeutung (geringe Komplexität) geeignet, sie sind nur bei geeigneten Sichtverhältnissen einzusetzen, um sie aufnehmen zu können. Für die sicherere und leistungsfähigere Übertragung beliebiger Informationsinhalte wurden deshalb Verfahren entwickelt, die auf einem vereinbarten Zeichenvorrat beruhen, aus dem sich komplexe Nachrichten zusammenstellen ließen. Beispiele dafür sind der Fackeltelegraf von Polybios (2. Jahrhundert vor Christus), der Balkentelegraf von Claude Chappe (1794) sowie der Klappentelegraf von George Murray (1795). Wer sich für die Geschichte der Übertragungstechnik interessiert, findet auf <http://it.tud.uni-essen.de/index.htm> interessante Lektüre.

Polybios ließ Fackelträger hinter zwei Mauern jeweils zwischen 1 und 5 Fackeln herausstrecken. Die linke Fackelgruppe gab dem entfernten Beobachter die Spalte, die rechte die Zeile des codierten Buchstabens gemäß einer matrixförmigen Anordnung des griechischen Alphabets (max. 25 Zeichen) an.



Bild 2: Ein zeitgenössisches Bild der Eglise Saint-Pierre-de-Montmartre um 1818, deren Turm mit einem Chappe'schen Telegrafen für die Übertragung militärischer Nachrichten bestückt war. (Musée de la Poste de Paris)

Chappes Telegraf bestand aus einem Hauptbalken (regulateur) und an dessen Enden je einem Zeigerbalken (indicateur). Alle Balken waren in 45°-Schritten unabhängig voneinander drehbar. Durch die Kombination der Balkenstellungen wurden 196 Zeichen codiert. Neben dem Alphabet und den Ziffern waren also noch viele Sonder- und Protokollzeichen möglich.

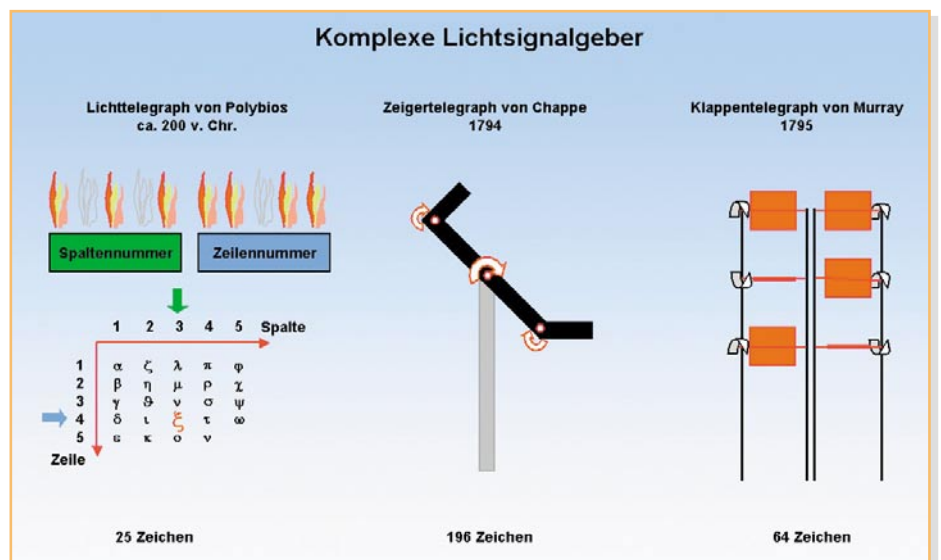


Bild 1: Mit diesen Lichtsignalgebern ließen sich nahezu beliebig komplexe Botschaften in damals kaum glaublicher Geschwindigkeit übermitteln.

Murray ordnete 6 um 90° drehbare Klappen in zwei Spalten und drei Zeilen an. Stand eine Klappe senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters, nahm dieser sie wahr, andernfalls nicht. Damit hatte Murray ein digitales Übertragungssystem erdacht, welches $2^6=64$ unterscheidbare Zeichen zuließ.

Die Übertragungsgeschwindigkeiten dieser frühen Nachrichtensysteme waren, verglichen mit dem heute Möglichen, winzig. Sie hingen von der Laufzeit eines Zeichens ab, welche durch die Anzahl der Relaisstationen, Sichtverhältnisse und gewünschte Übertragungssicherheit beeinflusst wurde. Auf der Strecke London-Plymouth konnte die Murray'sche Relaiskette zwei Buchstaben pro Minute übertragen. Da ein Buchstabe durch 6 Bit repräsentiert wurde, entsprach dies einer Über-

tragungsrate von 0,2 Bit/sek. Eine Depesche mit 120 Zeichen war über die 300 km weite Entfernung in einer Stunde beim Empfänger. Reitende Boten brauchten zur Überbringung mindestens 10 Stunden (allerdings unabhängig von der Menge der überbrachten Zeichen). Für die damalige Zeit war dies trotz des hohen Aufwands ein gewaltiger Fortschritt, der natürlich auch von den Militärs genutzt wurde (Abbildung 2).

Übrigens werden selbst in unserer modernen Informationsgesellschaft gelegentlich noch Rauchzeichen für die Übermittlung einer Information verwendet! Man denke an den weißen Rauch, der aus der Sixtinischen Kapelle in Rom aufsteigt und Kunde davon gibt, dass die Kardinäle in ihrem Konklave sich auf einen neuen Papst geeinigt haben.

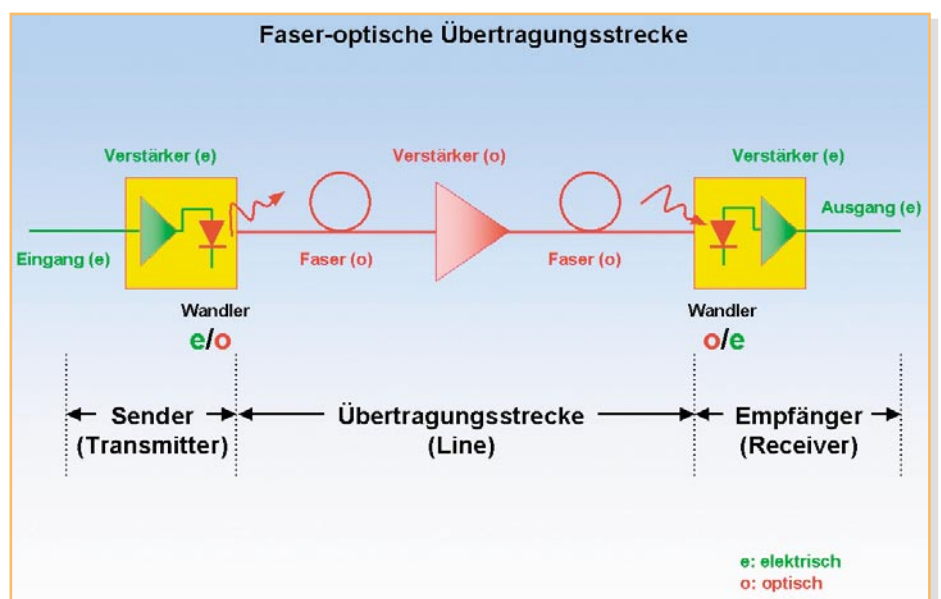


Bild 3: Das Grundmodell der Nachrichtenübertragung ist am Prinzip einer faseroptischen Übertragungsstrecke gut zu erkennen: Quelle (Sender), Kanal (Glasfaser mit Verstärker) und Senke (Empfänger).

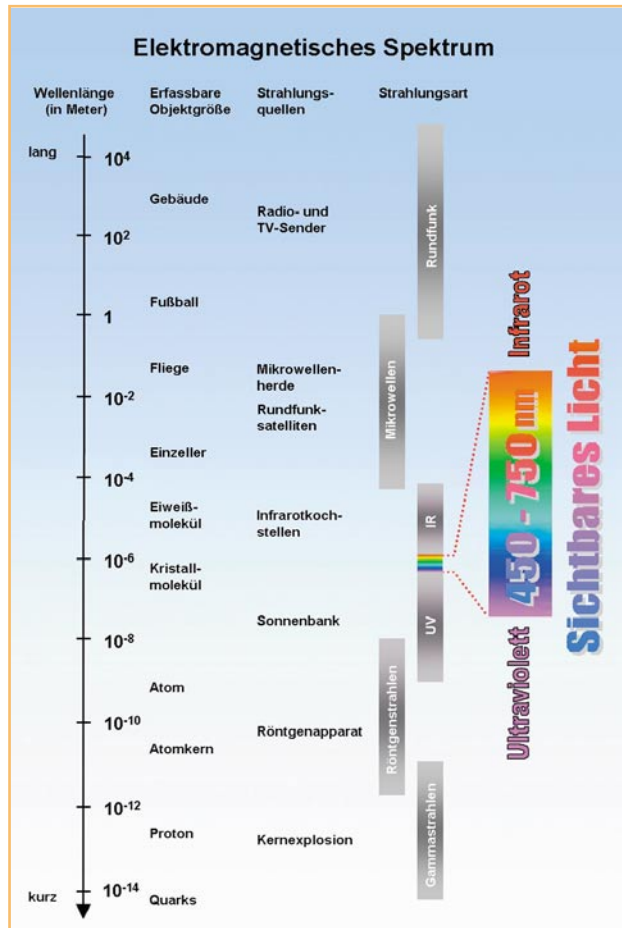


Bild 4: Das sichtbare Licht ist nur ein winziger Ausschnitt des gesamten, nach oben offenen Spektrums der elektromagnetischen Wellen.

folgender Wellenpunkte (Wellenlänge λ) und der zeitlichen Häufigkeit ihres Auftretens (Frequenz f) ist:

$$f \cdot \lambda = c$$

Dabei ist c die Geschwindigkeit des Lichts im jeweiligen Medium. Im Vakuum ist c am größten ($c_0=300.000 \text{ km/s}$). Rotes Licht mit 700 nm hat also im Vakuum eine Frequenz von

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{7 \cdot 10^{-7} m} = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Zum Vergleich: Diese Frequenz ist etwa vierzigtausendmal so hoch wie die der heutigen Rundfunksatelliten ($10,7$ bis $12,75 \text{ GHz}$).

Licht ist nicht gleich Licht

Licht wird von Lichtquellen erzeugt. Für die Nachrichtenübertragung ideal wäre eine Lichtquelle, die nur eine einzige Frequenz (Spektrallinie) erzeugt, also monochromatisches oder einfarbiges Licht. In der Praxis erzeugt jede Lichtquelle aber ein mehr oder weniger breites Lichtspektrum, d. h. Lichtwellen in einem begrenzten Wellenlängenbereich. Dabei kann eine lückenlose Vielzahl von Frequenzen auftreten (kontinuierliches Spektrum) oder nur eine diskrete Anzahl (Linienspektrum), oder es können aus einem kontinuierlichen Spektrum einzelne Frequenzen ausgefiltert sein (Absorptionsspektrum) (s. Abbildung 5).

Die Sonne, Glühlampen und Kerzen sind typische breitbandige, kontinuierliche Lichtquellen. Sie produzieren Lichtspektren beginnend im infraroten Bereich (Wärmestrahlung) bis hin zum ultravioletten Bereich. Wir werden später sehen, dass für die breitbandige Nachrichtenübertragung durch Lichtwellenleiter möglichst schmalbandiges Licht verwendet werden sollte, idealerweise monochromatisch und kohärent. Kohärenz ist eine Lichteigen-

Grundmodell der Nachrichtenübertragung

Jede Übertragung einer Nachricht lässt sich auf drei Elemente zurückführen: Quelle (Sender), Kanal (Übertragungsstrecke) und Senke (Empfänger). Das ist bei dem vorchristlichen griechischen Fackeltelegrafen genauso wie bei den modernsten Lichtwellensystemen. Die Quelle erzeugt das Licht (wir nehmen an, dass sie es auch der Nachricht entsprechend formt), der Kanal überträgt das Licht (im freien Luftraum oder in einer Glasfaser), und die Senke nimmt das Licht auf (und wandelt es in die ursprüngliche Nachricht zurück). Bei Polybios waren die Fackelträger und ihre Fackeln die Quelle, die Luftstrecke der Kanal und die Beobachter am Ende der Übertragungsstrecke die Senke. Bei Glasfaser- oder allgemeinen Lichtwellenleitersystemen sind dies Sendediode oder -Laser, der Lichtwellenleiter und die Empfangseinrichtung an seinem Ende, wie in Abbildung 3 zu sehen ist.

Licht als elektromagnetische Strahlung

Natürliches weißes Licht besteht aus einer unendlichen Vielzahl elektromagnetischer Wellen, die sich durch ihre Wellenlänge, Intensität und Phasenlage voneinander

unterscheiden. Die Wellenlänge bestimmt die Farbe des Lichts, die Intensität seine Helligkeit. Das Auge kann nur Frequenzen zwischen dem langwelligen Rot und dem kurzwelligen Violett sowie Gemische daraus wahrnehmen – es ist „schmalbandig“ (450 bis $750 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, Abbildung 4).

Man erkennt, dass mit abnehmender Wellenlänge die Größe der wahrnehmbaren Objekte ebenfalls abnimmt. Die Auflösung steigt! Je kurzwelliger oder hochfrequenter die elektromagnetische Strahlung ist, desto mehr unterscheidbare Informationen kann sie also übertragen. Dieses Grundprinzip prägt die gesamte optische Übertragungstechnik.

Der Zusammenhang zwischen dem räumlichen Abstand gleicher aufeinander-

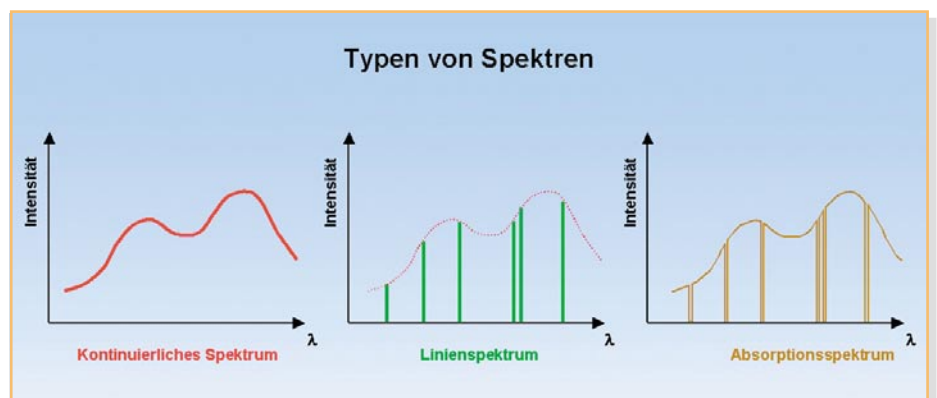


Bild 5: Lückenlose Spektren, solche, die nur aus bestimmten Einzelfrequenzen bestehen, und kontinuierliche, in denen bestimmte Frequenzen fehlen.

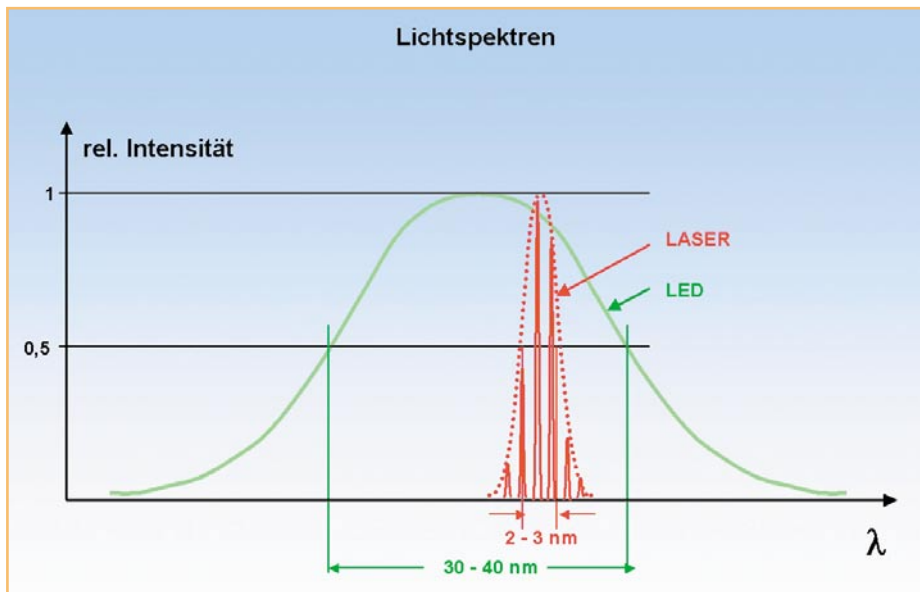


Bild 6: Laser-Licht ist erheblich schmalbandiger als LED-Licht und zudem noch kohärent: eine ideale Lichtquelle für die optische Nachrichtenübertragung.

schaft, die natürliche Quellen nicht kennen. Das von ihnen abgesonderte Licht ist ständigen zufälligen Phasenschwankungen unterworfen, was aus der Überlagerung einzelner Lichtimpulse durch viele nichtsynchronisierte Emissionen herrührt. Wenn dagegen alle Lichtwellen die gleiche Phasenlage aufweisen, haben wir es mit kohärentem Licht zu tun.

Lichtquellen in der optischen Übertragungstechnik

Jede optische Übertragung beginnt mit einer Lichtquelle, welche die elektrischen Eingangssignale in Licht umsetzt. Dieses wird in eine Glasfaser eingespeist und an deren Ende wieder in elektrische Signale zurückverwandelt. Als Lichtquellen kommen

im Wesentlichen LED (Light Emitting Diode = Leuchtdiode) oder Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) auf der Grundlage von Halbleitertechnologien in Frage. Letztere sind teurer, haben aber wesentlich bessere Übertragungstechnische Eigenschaften.

An erster Stelle unterscheiden sich LED und Laser durch die Breite des erzeugten Lichtspektrums. Das Laser-Licht ist schmalbandig, das Licht der LED gut 10-mal breitbandiger. Das hat, wie wir später sehen werden, Einfluss auf die erzielbare Übertragungsrate und die mögliche Länge der Übertragungsstrecke (Abbildung 6).

In ihrem grundsätzlichen Aufbau sind sich LED und Laser sehr ähnlich. In einem pn-Übergang, d. h. an der Grenzfläche zwi-

schen positiv und negativ dotiertem Halbleitermaterial (z. B. Galliumarsenid GaAs), kommt es zur Rekombination zwischen Löchern und Elektronen, was die spontane Emission von Photonen auslöst. Das so in einer LED entstandene Licht ist relativ breitbandig und inkohärent.

Beim Laser ist die Rekombinationsschicht (Laser-aktiver Bereich) als optischer Resonator ausgestaltet, was beim Überschreiten eines bestimmten Querstroms durch die Halbleiterstruktur zu Resonanzen von gleichphasigen Lichtwellen passender Wellenlänge und zum Auslösen aller anderen führt. Die resultierende stimulierte Strahlung ist (im Gegensatz zum LED-Licht) schmalbandig und kohärent (Abbildung 7).

Aber auch bezüglich der Strahlungscharakteristik gibt es Unterschiede. Die LED hat eine rundliche Strahlungskeule, die Laser-Diode eine längliche, was für die Einkopplung in einen dünnen Lichtleiter natürlich viel günstiger ist (Abbildung 8).

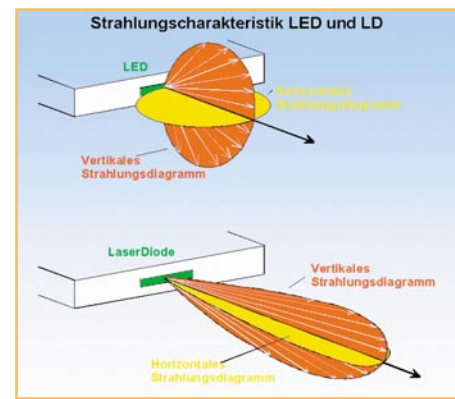


Bild 8: Der Laser hat eine schmale Strahlungskeule – bestens geeignet für die flache Einkopplung in die Glasfaser.

Als Fazit können wir festhalten: Die Laser-Lichtquelle ist wegen ihres schmalbandigen und kohärenten Lichts für optische Datenübertragung besser geeignet als eine LED.

Glasfasern

Glasfasern sind für das zu übertragende Licht mit seiner aufgeprägten Nachricht ein dämpfungsarmer und zeitlich konstanter, d. h. zuverlässiger Transportweg. Das unterscheidet sie ganz wesentlich von den optischen Freiraumübertragungen, wo die Wetterverhältnisse eine große Rolle spielen. Im Allgemeinen spricht man von Lichtwellenleiter (LWL) und meint damit optische Leiter, die aus Kunststoff (POF: Plastic Optical Fiber) oder Glas bestehen können (vergl. DIN 47002 und VDE 0888-2). Meist ist mit LWL aber ein Lichtwellenleiter auf Glasgrundlage gemeint. So auch in diesem Artikel. In der modernen Daten-

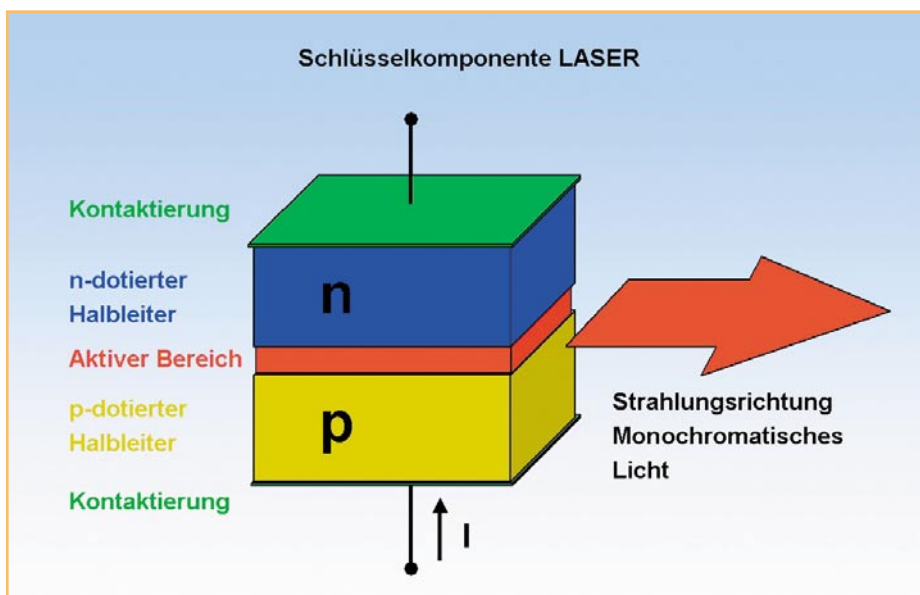


Bild 7: Der aktive Bereich des Lasers, wo durch Rekombination Spontanemissionen von Lichtquanten ausgelöst werden, ist als Resonator ausgelegt.

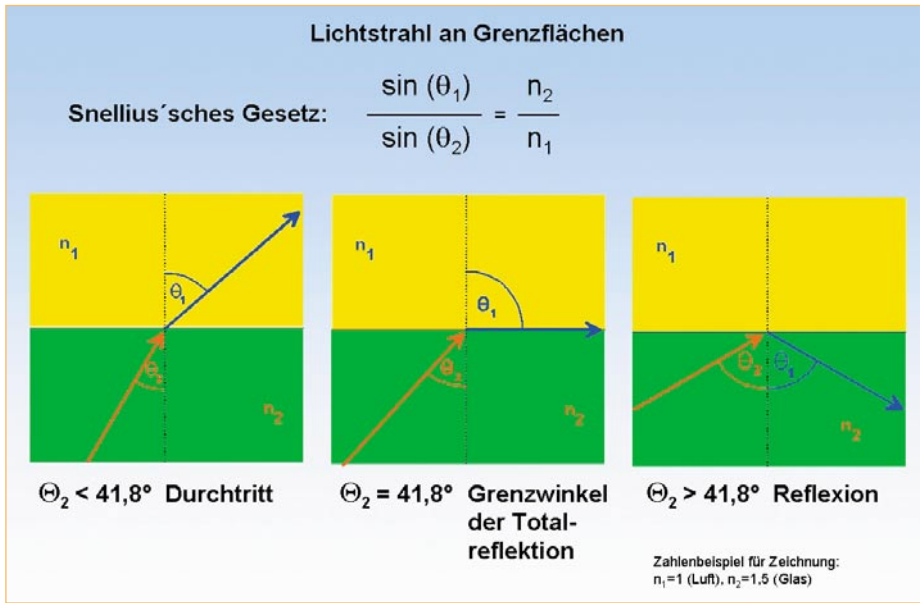


Bild 9: Der Winkel, mit dem ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche fällt, entscheidet darüber, ob der Strahl wieder in das Medium zurückgeworfen wird oder es verlässt.

kommunikation werden zunehmend Lichtwellenleiter (LWL) für die Informationsübertragung, bei der Telekommunikation

gänzlich unterschiedlich verhalten (Abbildung 9). Jedes transparente Medium ist durch seine Brechzahl n gekennzeichnet.

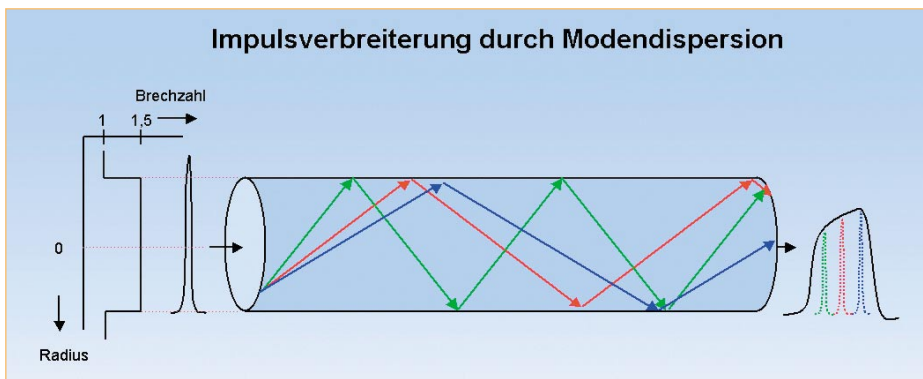


Bild 10: Mehrfachausbreitung von Lichtstrahlen bewirkt unterschiedlich lange Laufzeiten und damit einen „verschmierten“ Gesamtimpuls am Ausgang.

und auch im Bereich der Rechnernetzwerk eingesetzt.

Einige Vorteile von Lichtwellenleitern sind:

- hohe Übertragungsrate (Bandbreite)
- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen
- Abhörsicherheit durch Störstrahlungsfreiheit
- geringe Dämpfung

Snellius'sches Gesetz

Um die Funktionsweise der verschiedenen LWL-Typen richtig verstehen zu können, ist es sinnvoll, sich das Brechungsgesetz des holländischen Physikers Snellius (1581 bis 1626) ins Gedächtnis zurückzurufen. Snellius hat beobachtet, dass Lichtstrahlen, die auf eine Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen transparenten Medien fallen, sich je nach Einfallswinkel

trachteten Medium. In der Skizze ist $n_2 = 1,5 = 3/2$ die Brechzahl von Glas, was bedeutet, dass sich Licht in Glas nur mit $2/3$ der Vakuumlichtgeschwindigkeit (d. h. 200.000 km/s) ausbreitet. Mit $n_1 = 1$ als Brechzahl von Vakuum und trockener Luft ergeben sich die zwei Winkelbereiche: Winkel des Lichtstrahls $\Theta_2 < 41,8^\circ$ führen zum Eintritt in die Luft, wobei der Strahl aber in Richtung des optisch dichteren Mediums, also zum Glas hin, abgelenkt (gebrochen) wird. Bei $\Theta_2 = 41,8^\circ$ verläuft der gebrochene Strahl in der Grenzfläche (Grenzwinkel der Totalreflexion), und ab $\Theta_2 > 41,8^\circ$ wird er wieder ins Glas reflektiert. In einem Lichtwellenleiter werden also nur die Strahlen weitergeleitet, die flach genug in den Lichtwellenleiter eingestrahlt werden. Andernfalls treten sie aus ihm aus und stehen für die Weiterleitung nicht mehr zur Verfügung.

Glasfasertypen

Die Lichtstrahlen können sich in einer „nackten“, d. h. von Luft umgebenen Glasfaser unter einer Vielzahl von Winkeln (Moden) ausbreiten. Nun haben aber in Bezug auf die Faserachse flache Strahlen einen kürzeren Weg bis zum Ende der Glasfaser zurückzulegen als steilere, die vielmals an der Grenzfläche reflektiert werden. Jeder Strahl liefert demnach die Nachricht zu einem anderen Zeitpunkt und unterschiedlich stark gedämpft am Ausgang des LWL ab. Ein Lichtimpuls am Eingang erscheint deshalb umso mehr am Ausgang verbreitert, je mehr unterschiedliche Ausbreitungswinkel (vereinfacht als Moden bezeichnet) auftreten und je länger der LWL ist. Diesen Effekt nennt man Modendispersion. Er ist im Interesse einer höheren Übertragungsbandbreite zu verkleinern (Abbildung 10).

Praktisch ausgeführte Glasfasern bestehen daher aus einem Glaskern (core) mit Brechungsindex 1,5 und einem Mantel

Die Brechzahl ist definiert als das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit des Lichts in dem be-

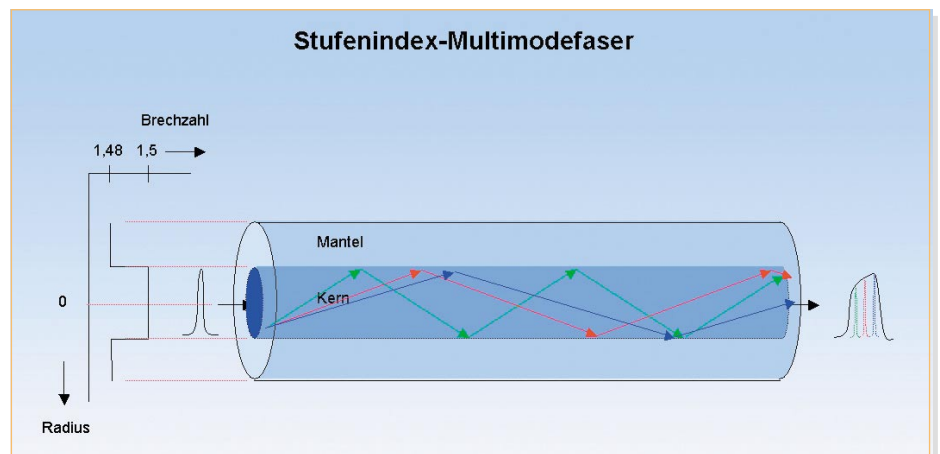


Bild 11: Ein erster Schritt zur Verringerung der Modendispersion ist die Umhüllung des Kerns durch einen Glasmantel.

(cladding) mit einem Brechungsindex von typ. 1,47 bis 1,49. Die darüber gelegte Schutzschicht (coating) verhindert das Einstrahlen von Fremdlicht und schützt vor mechanischen Beschädigungen. Das Nutz-Lichtsignal wird nur in den Kern eingespeist und von diesem weitergeleitet.

Durch die sich nur gering unterscheidenden Brechungsindizes von Kern und Mantel wird die Zahl der Moden und damit die Impulsverbreiterung drastisch verringert, und zwar umso mehr, je dünner der Kern ist. Es breiten sich nur „flache“ Moden aus, die „steilen“ verlassen den Kern und treten in den Mantel ein. Dies ist mit einer Erhöhung der Übertragungskapazität gleichzusetzen.

In einem LWL kann nur eine begrenzte Zahl von Moden auftreten – je nach Abmessungen und Materialien von Kern und Mantel bis zu einigen hundert. Das ist nur zu verstehen, wenn man vom strahlenoptischen Ausbreitungsmodell auf die tatsächlich gegebene Ausbreitung eines elektrischen Feldes in der spezifischen Geometrie mit den dazugehörigen Brechungs-

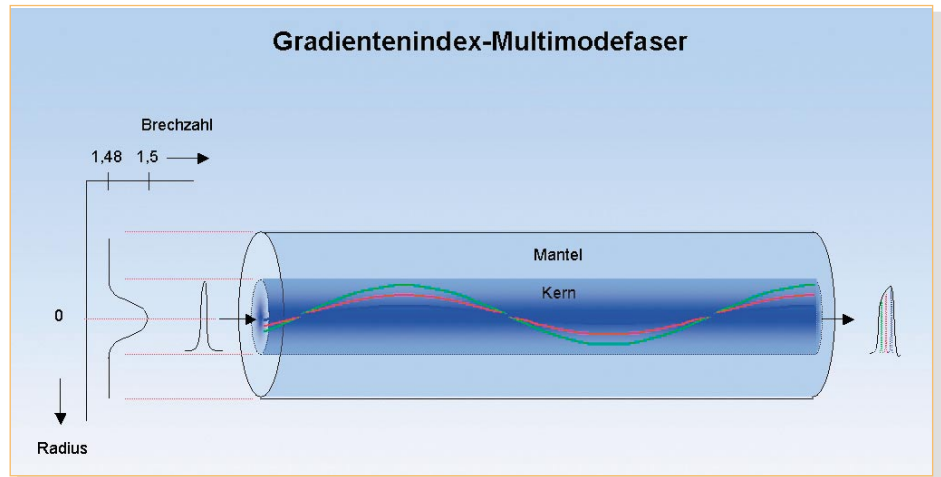


Bild 12: Eine weitere Verbesserung der Modendispersion bewirkt die kontinuierliche Abnahme der Kern-Brechzahl bis zum Mantel.


Glasmantels und der dadurch bedingten „flacheren“ Moden immer noch zahlreiche Moden auf, die zu einer Dispersion führen. Wegen des Brechungsindexsprungs an der Grenze Kern-Mantel spricht man auch von Stufenindexfasern. Sie führen die Licht-

ende zu verzeichnen. Die Laufzeitunterschiede sind kleiner, die Modendispersion hat also abgenommen, der Eingangsimpuls erscheint weniger verbreitert am Ausgang (Abbildung 12).

Monomodefasern

Durch Verringern des Kerndurchmessers auf ca. 5 μm ist nur noch eine Mode (in der strahlenoptischen Darstellung der achsenparallele Strahl) ausbreitungsfähig. Daher rührt der Begriff Monomodefaser, wie in Abbildung 13 zu sehen ist, auch Single Mode Faser (SMF) genannt. Mit der Monomodefaser ist das Thema Modendispersion vom Tisch. Durch geschickte Dimensionierung kann man die restliche chromatische Dispersion minimieren. Es bleibt ein LWL mit extrem hoher Übertragungskapazität. Er kann 100 GHz/km oder 10 GHz/10 km oder 1 GHz/100 km usw. ohne weiteres erreichen. Das Produkt aus Bandbreite und Länge der Faser ist konstant, hier 100 GHz \cdot km (Bandbreiten-Längen-Produkt).

Zusammenfassung

Dispersion schränkt die Übertragungsbreite einer Glasfaser ein. Sie kann durch möglichst schmalbandige Lichtquellen und dünne Faserkerne verringert werden. Das führt zum Einsatz des Lasers als Lichtquelle und der Monomodefaser als Übertragungsmedium. Da das Produkt aus Bandbreite und Länge bei jeder Glasfaser konstant ist, sind größere Faserlängen möglich. 

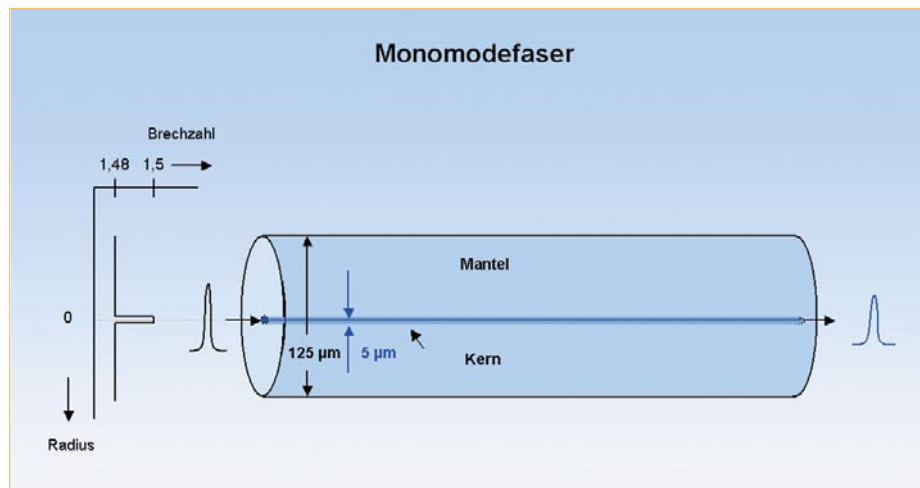


Bild 13: Das Ende der Modendispersion: Die Monomodefaser mit extrem dünnem Kern, in dem nur eine Mode ausbreitungsfähig ist.

dizes übergeht. Jede Mode wird durch eine mögliche Lösung der Maxwell'schen Gleichungen repräsentiert.

Es gibt noch andere Arten der Dispersion, die auf Abhängigkeiten des Ausbreitungsverhaltens der Moden (Wellenleiterdispersion) und des Brechungsindex (Materialdispersion) von der Wellenlänge und damit der Farbe des Lichts zurückzuführen sind. Deshalb fasst man beide Effekte unter dem Begriff chromatische Dispersion zusammen. Je schmalbandiger das Licht der Quelle ist, umso weniger treten diese Effekte auf. Diese hier im Detail zu behandeln, würde den Rahmen sprengen.

Stufenindex-Multimodefasern

Bei Glasfasern mit relativ dickem Kern (Größenordnung 50 μm) treten trotz des

strahlen durch Totalreflexion an dieser Grenze (Abbildung 11).

Gradientenindex-Multimodefasern

Die Erkenntnisse bei den Stufenindexfasern, wo die Ausbreitungsgeschwindigkeit überall im Kern die Gleiche ist, haben zu der Überlegung geführt, den Brechzahlverlauf in radialer Richtung nicht stufenförmig, sondern kontinuierlich abnehmen zu lassen. Damit sind steilere Strahlen mit wachsendem Abstand zur Kernachse schneller, wodurch sie ihre längere Wegstrecke kompensieren. Die flachen, kernnahen Strahlen haben zwar den kürzeren Weg, diesen aber in einem optisch dichteren Bereich des Kerns zurückzulegen. Im Ergebnis ist eine viel bessere Gleichzeitigkeit des Eintreffens aller Moden am Faser-

Internet:

<http://it.tud.uni-essen.de/index.htm>
<http://www.mspt.de>