

Optische Nachrichtensysteme

Von W. S. Boyle

Seit einigen Monaten prüft die Bell Telephone Company in einem Großversuch den praktischen Einsatz eines neuen Kommunikationssystems. Es arbeitet mit Lichtimpulsen, die durch haarfeine Glasfasern von einem Ort zum anderen gelangen und die Telefongespräche ebenso übertragen können wie Bildsignale, Telegramme oder die Daten eines Computers. Zunächst hat man zwei Vermittlungsstellen der Telefongesellschaft und ein großes Bürohaus in der Innenstadt von Chicago durch ein mehr als zweieinhalb Kilometer langes und nur 13 Millimeter dickes Kabel verbunden, das zwei Bänder mit je 12 Glasfasern, zusammen also 24 solcher Fasern enthält. Jede Faser kann pro Sekunde fast 45 Millionen Informationseinheiten („Bits“) übertragen, das heißt, der Laser, der die Faser mit Licht versorgt, wird in jeder Sekunde 45millionenmal ein- und wieder ausgeschaltet. Rechnet man diese Zahl in eine vorstellbare Größe um, so ergibt sich, daß über jede einzelne Glasfaser gleichzeitig bis zu 672 Telefongespräche in einer Richtung geführt werden können. Da für den Hin- und Rückweg je 12 Glasfasern vorhanden sind, bietet das Kabel insgesamt $12 \times 672 = 8064$ komplette Telefonkanäle. Um diese Übertragungskapazität mit herkömmlichen Kupferadern zu realisieren, würde man ein vielfach dickeres Kabel benötigen. Abgesehen davon, daß optische Kabelnetze Kupfer sparen helfen, werden sie also auch eine viel bessere Ausnutzung der vorhandenen Kabelschächte gestatten.

Bild 1: In einer Verstärkerschaltung werden die schwach gewordenen Lichtsignale aus der Glasfaser eines optischen Nachrichtensystems regeneriert und als neue, scharf getrennte Impulse in den nächsten Faserabschnitt eingespeist. Dieses Bild wurde bei den Bell Laboratories aufgenommen. Es zeigt in linear zehnfacher Vergrößerung einen Teil der Verstärkerschaltung und die Glasfaser, die das regenerierte Signal aufnimmt. Unten sieht man die Glasfaser in die rote Kabelhülle eintreten. In

Nicht nur in den USA arbeitet man mit der neuen Technik. In Berlin haben vier Firmen (AEG-Telefunken, Standard Elektrik Lorenz, Siemens und Te-Ka-De) im Auftrag der Deutschen Bundespost Glasfaserkabel auf der 4,3 Kilometer langen Strecke zwischen Abmannshäuser Straße und Uhlandstraße in vorhandenen Kabelschächten installiert. Jedes Kabel enthält drei Glasfaserpaare, und über jedes Paar lassen sich gleichzeitig bis zu 480 Telefongespräche führen. Nach Abschluß des Probetriebs sollen die Glasfaserkabel reguläre Bestandteile des Berliner Fernsprechnetzes werden.

Eigentlich ist der Gedanke nicht neu, Licht für die Nachrichtenübertragung zu nutzen. Die Rauchzeichen, mit denen sich die Indianer über weite Strecken hinweg verständigten, sind nahezu sprichwörtlich, und die Engländer warnten mit großen Feuern vor der sich nähernden spanischen Armada. 1790 baute Claude Chappe in Frankreich ein optisches Telegraphensystem, dessen Signalmasten auf Bergspitzen standen. Dieses System konnte eine Nachricht in 15 Minuten 200 Kilometer weit befördern, und erst die elektrische Telegraphie hat es verdrängt. 1880 erfand Alexander Graham Bell das „Photophon“ mit dem er die Sprachübertragung durch einen Lichtstrahl demonstrierte (Bild 2, Seite 62): er ließ Sonnenlicht über einen dünnen Spiegel auf eine lichtempfindliche Selenzelle fallen. Versetzte er den Spiegel durch die Schallwellen der menschlichen Stimme in Schwingungen, so änderte sich damit die Licht-

der Bildmitte ist der Anfang der Faser mit einem Tropfen Epoxidharz dicht vor dem winzigen Galliumarsenidlaser befestigt. Der Laser erzeugt die regenerierten Lichtsignale. Sie können bis zu 14 Kilometer weit durch die Faser laufen, bevor sie erneut regeneriert werden müssen. In dem weißen Block am oberen Bildrand ist eine Photodiode montiert, die die Rückwärtsstrahlung des Lasers auffängt und damit den Arbeitspunkt des Lasers gegen Temperaturschwankungen stabilisiert.

Die ersten Anlagen zur Übertragung von Telefongesprächen durch Lichtimpulse werden jetzt in Chicago und in Berlin probeweise in Betrieb genommen. Die Lichtimpulse werden von kleinen Halbleiterlasern erzeugt und durch haarfeine Glasfasern zum Empfänger gesandt.

energie, die auf die Selenzelle traf, was wiederum Änderungen im elektrischen Widerstand der Zelle und folglich Stromschwankungen verursachte, die ihrerseits mit Hilfe eines Telefonhörers in Schallwellen zurückverwandelt werden konnten. Erinnert sei schließlich auch daran, daß die Marine mindestens bis zum zweiten Weltkrieg Nachrichten von Schiff zu Schiff im Morse-Alphabet mit Lichtsignalen übertrug.

Neu an der heutigen Technik der optischen Nachrichtenübertragung sind einerseits die Verfahren zur Erzeugung eines Lichtstrahls, der mit sehr hoher Frequenz moduliert werden kann, und andererseits die Möglichkeit, die so erzeugten Signale ohne übermäßigen Energieverlust viele Kilometer weit durch Glasfasern zum Empfänger zu leiten. Das Interesse an dieser Technik erwachte mit der ersten Demonstration eines Lasers im Jahr 1960. Diese Lichtquelle, die einen nahezu monochromatischen, sehr energiereichen Strahl sichtbaren oder infraroten Lichtes abgibt, erschloß für die Nachrichtenübertragung einen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, dessen Frequenzen zehntausendmal größer sind als die höchste bis dahin benutzte Frequenz. Da die übertragbare Nachrichtenmenge mit der Frequenz wächst, hatten sich die Nachrichtentechniker jahrzehntelang mit viel Erfindungsgabe bemüht, immer höhere Frequenzen für ihre Zwecke zu verwenden. Seit den frühen Tagen des Rundfunks war es ihnen gelungen, den nutzbaren Frequenzbereich von 100 Kilohertz (1 kHz = 1000 Schwingungen pro Sekunde) um fünf Größenordnungen auf etwa 10 Gigahertz (1 GHz = 1 Milliarde Schwingungen pro Sekunde) zu erweitern. Nun brachte der Laser eine abermalige Zunahme um vier Größenordnungen auf mehr als 100 Terahertz (1 THz = 1 Billion Schwingungen pro Sekunde). Selbst wenn man nur einen kleinen Teil dieses vom Laser erschlossenen Frequenzbereichs ausnutzt, könnte im Prin-

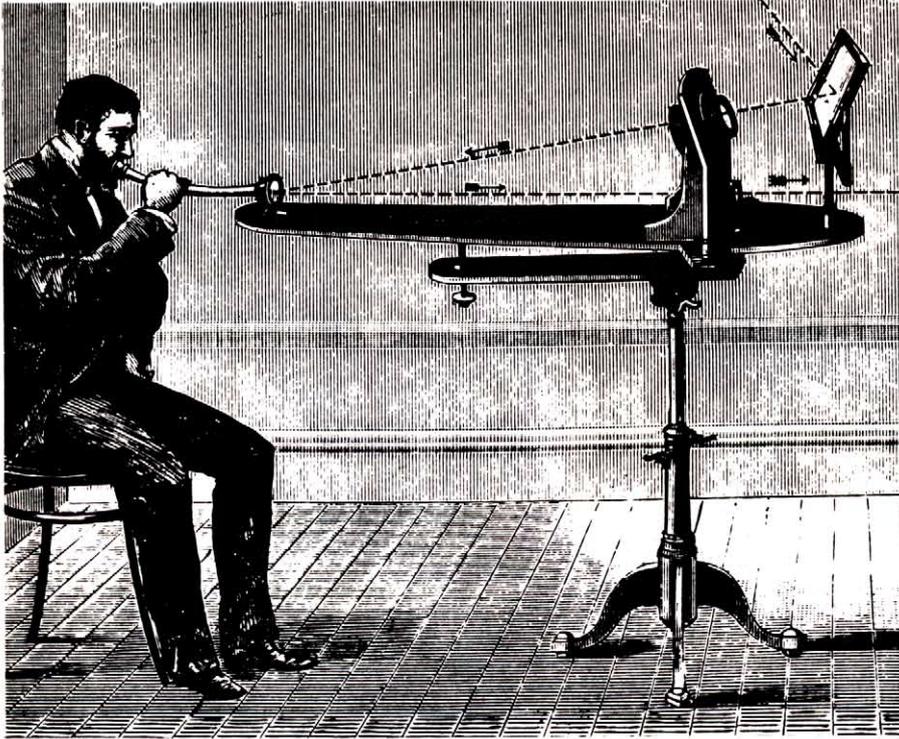


Bild 2: Graham Bell's Photophon. Sonnenlicht wird über einen Spiegel (rechts im Bild) und durch eine Linse auf einen zweiten Spiegel geleitet, der die Öffnung am unteren Ende des Sprachrohres verschließt, und gelangt von dort durch eine weitere Linse zu einem Photodetektor (rechts außerhalb des Bildes). Der Spiegel am Ende des Sprachrohres ist so dünn, daß ihn die Schallwellen der menschlichen Stimme in Schwingungen versetzen, die vom Photodetektor als Änderungen der Lichtintensität wahrgenommen und mit Hilfe eines Telefonhörers in Schallwellen zurückverwandelt werden.

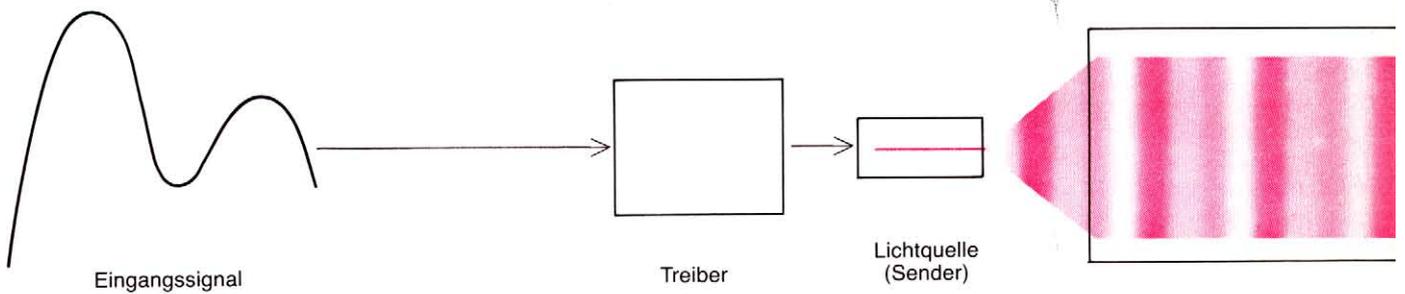


Bild 3: Hier ist die analoge Übertragung dargestellt, bei der die Amplitudenschwankungen des eingehenden Signals in Intensitätsschwankungen

des Lichtsignals umgesetzt werden, das dann in eine Glasfaser geleitet wird. Auf der Empfangsseite wandelt ein Photodetektor die

Intensitätsschwankungen wieder in Amplitudenschwankungen um, die verstärkt werden, so daß sich die Wellenform des ursprünglichen

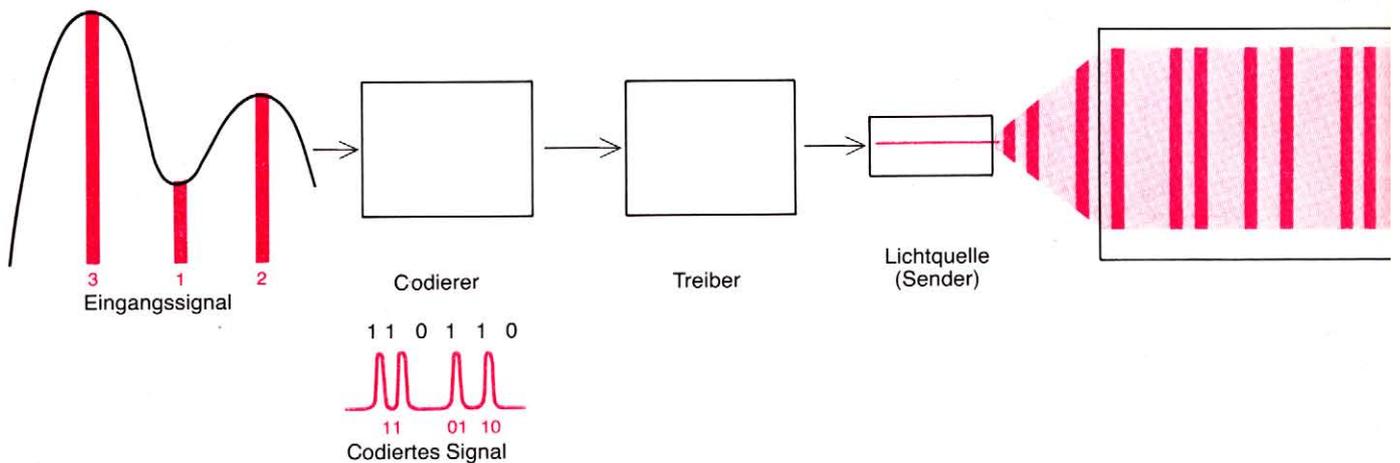


Bild 4: Bei der digitalen Übertragung wird der Amplitudenwert (die Höhe) des Eingangssignals (links) in regelmäßigen Abständen elektronisch gemessen (farbige Balken unter dem Kurvenzug). Für eine genaue Wiedergabe des Signals muß die Zahl der Messungen mindestens

doppelt so groß sein wie die höchste Frequenz im Eingangssignal. Ein Sprachsignal, dessen höchste Frequenz 4000 Schwingungen pro Sekunde beträgt, muß 8000mal pro Sekunde abgetastet werden. (Um die Abbildung zu vereinfachen, wurden nur drei Abtastungen

gezeichnet.) Die gemessenen Amplitudenwerte werden als Binärzahlen ausgedrückt (1 = 01, 2 = 10, 3 = 11). Bei der Übertragung bedeutet ein Lichtimpuls eine 1 und kein Lichtimpuls eine 0. In einem Sprachübertragungssystem werden die Amplitudenwerte durch

zip ein einziges optisches Nachrichtensystem genügen, um die Telefongespräche aller in Nordamerika lebenden Menschen zu übertragen.

Die ersten Laser waren noch unhandlich und unzuverlässig. Auch die besten funktionierten nur wenige Monate. Außerdem merkte man bald, daß eine Übertragung des Laserlichtes durch die Atmosphäre analog der Übertragungstechnik in Mikrowellen-Richtfunksystemen unzweckmäßig ist. Nebel, Regen, Schnee und Smog dämpfen das Licht so stark, daß es einfacher ist, Lichtsignale von der Erde zum Mond zu senden, als horizontal durch die Dunstglocke einer Großstadt.

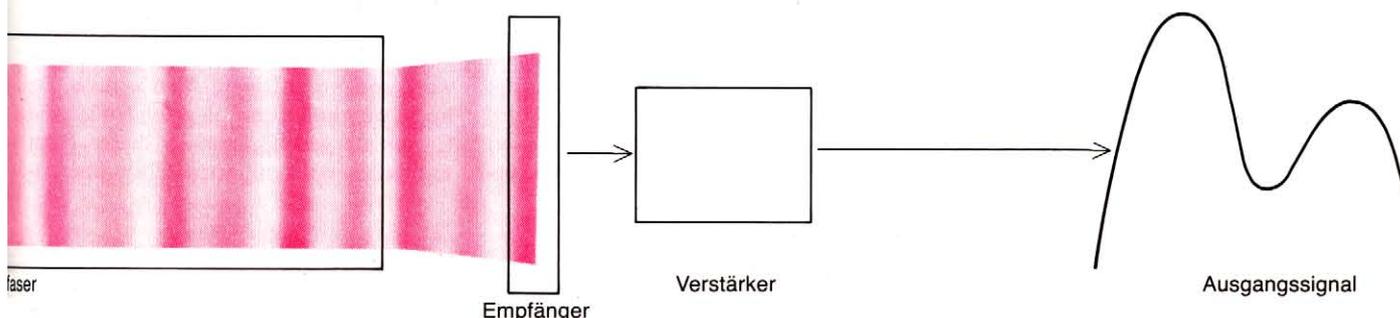
Intensive Entwicklungsarbeiten haben dazu geführt, daß einerseits der Laser kompakter und zuverlässiger wurde und andererseits die Übertragung des Lichtes durch die Atmosphäre nicht mehr notwendig ist. Außerdem konnte man mit der Hochleistungsvariante der lichtemittierenden Diode (LED) eine einfache und billige Lichtquelle entwickeln, die den Laser in weniger anspruchsvollen Systeme

ersetzen kann. Die erste erfolgversprechende Alternative zur Übertragung von Laserlicht durch die Atmosphäre war die Verwendung von Lichtrohren. Das sind sorgfältig hergestellte Rohre mit etwa einem Zentimeter Durchmesser, die auch in gebogener Linie laufen können, wenn man durch optische Mittel (zum Beispiel durch örtliche Veränderung des Gasdrucks im Rohr) dafür sorgt, daß das Licht entsprechend umgelenkt wird.

Die Verlegung solcher Lichtrohre ist schwierig. Nachrichtentechniker begannen daher, die Lichtübertragung in Glasfasern zu untersuchen. Es war bekannt, daß man mit Bündeln von Glas- oder Kunststoff-Fasern Licht über kurze Entfernungen leiten kann, und solche Systeme wurden bei der Magen-Endoskopie oder zur Instrumentenbeleuchtung in Armaturenbrettern benutzt. Diese Faserbündel waren jedoch viel zu wenig lichtdurchlässig, als daß sie sich für nachrichtentechnische Zwecke geeignet hätten. Sie waren weniger durchsichtig als Wasser. Wäre Wasser andererseits so

transparent wie die heute verwendeten Glasfasern, könnte man leicht bis auf den Grund der tiefsten Ozeane sehen.

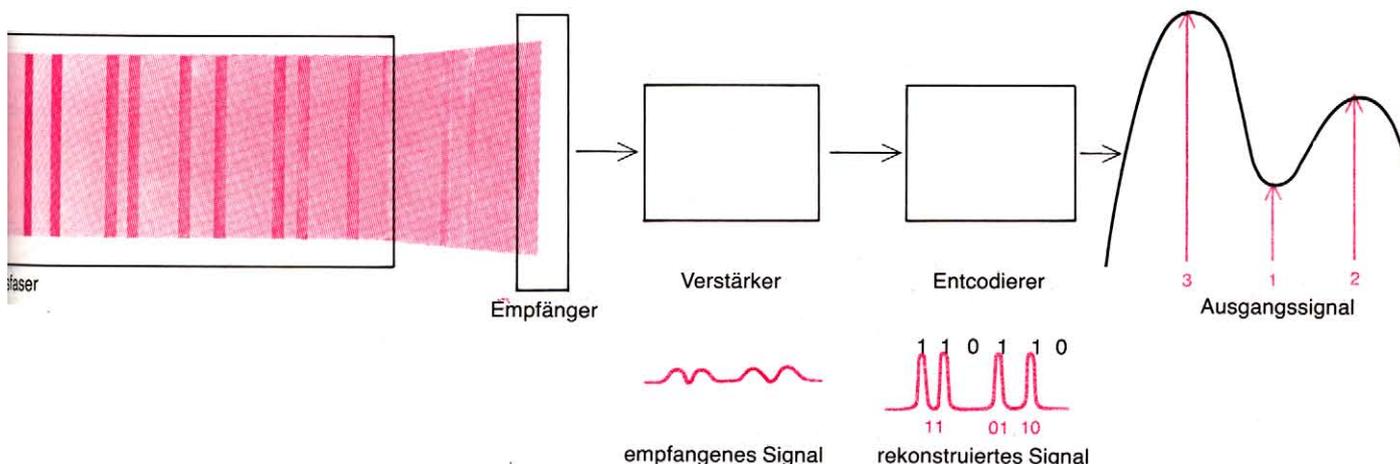
Bevor wir auf die Nachrichtensysteme eingehen, die man mit Lasern, lichtemittierenden Dioden und Glasfasern aufbauen kann, wollen wir erläutern, wie man die aus einem Telefon, einer Fernsehkamera oder einem Computer kommenden Signale aufbereiten muß, damit sie sich optisch übertragen lassen. In konventionellen („analogen“) Übertragungssystemen wird die Wellenform der Nachricht benutzt, um die Amplitude einer Trägerfrequenz zu modulieren, die dann durch die Übertragungsleitung läuft. Im optischen Fall heißt das, daß man die Intensität des Lichtstrahls moduliert, der von einer Lichtquelle abgestrahlt und an eine Glasfaser weitergegeben wird (Bild 3, Seite 62). Am Ende der Glasfaser gelangt das Licht in einen Photoempfänger, der die wechselnde Intensität in elektrische Signale zurückverwandelt. Elektrische Verstärker bringen die Signale auf ihren ursprünglichen Pegel,



Signale zurückbildet. Auf dem Weg durch die Glasfaser verliert das Signal proportional zur Faserlänge an Intensität. Außerdem wird es

zunehmend verzerrt, so daß der auf der Empfangsseite regenerierte Amplitudenwert nicht mehr genau dem Wert des Originalsignals ent-

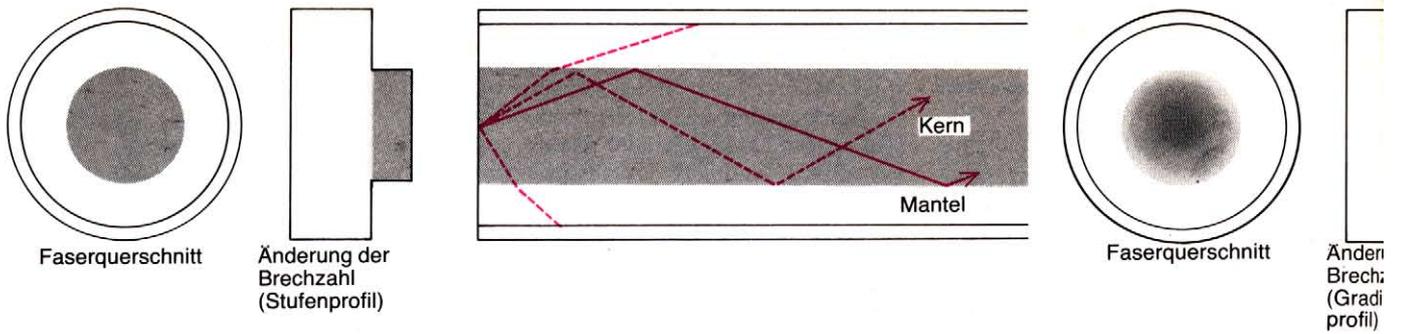
spricht. Bedeutend weniger anfällig für Signalverzerrungen ist die in Bild 4 dargestellte digitale Übertragung.



Zahlen zwischen 0 und 255 beschrieben. Deren Kodierung erfordert 8 Bit pro Zahl, denn $2^8 = 256$. Um ein Sprachsignal von einer Sekunde Dauer zu erfassen, braucht man bei digitaler Übertragung also $8000 \times 8 \text{ Bit} = 64000$ Bit. Im optischen Nachrichtensystem, das seit

dem letzten Jahr in Chicago arbeitet, erzeugen die als Sender benutzten Lichtquellen 44,7 Millionen Bit pro Sekunde. Damit können mit einer Glasfaser mehr als 650 Telefongespräche gleichzeitig übertragen werden. Obwohl die Lichtimpulse auf dem Weg durch die Glasfaser

verzerrt werden, lassen sie sich sauber regenerieren, da lediglich zwischen „Impuls“ und „kein Impuls“ unterschieden werden muß. Aus den empfangenen Impulsen kann die ursprüngliche Wellenform mit hoher Güte rekonstruiert werden.



und nach entsprechender Umsetzung bietet sich die Nachricht dem Auge, dem Ohr oder auch einem Computer in ihrer alten Form dar.

Da auch in den besten Glasfasern immer etwas Licht durch Absorption und Streuung verlorengelht, nimmt die Stärke des übertragenen Signals mit der Länge der Faser zwischen Sender und Empfänger ab, zum Beispiel auf die Hälfte nach einem Kilometer, auf ein Viertel nach zwei Kilometern und so weiter. Für eine Übertragung über lange Strecken muß also der Sender so stark und der Empfänger so empfindlich wie möglich sein. Im Augenblick erfüllen Hochleistungslaser und höchstempfindliche Photodetektoren (Lawinphotodioden) diese Forderungen am besten. In einer Lawinphotodiode erzeugt jedes eintreffende Photon eine Lawine von Elektronen.

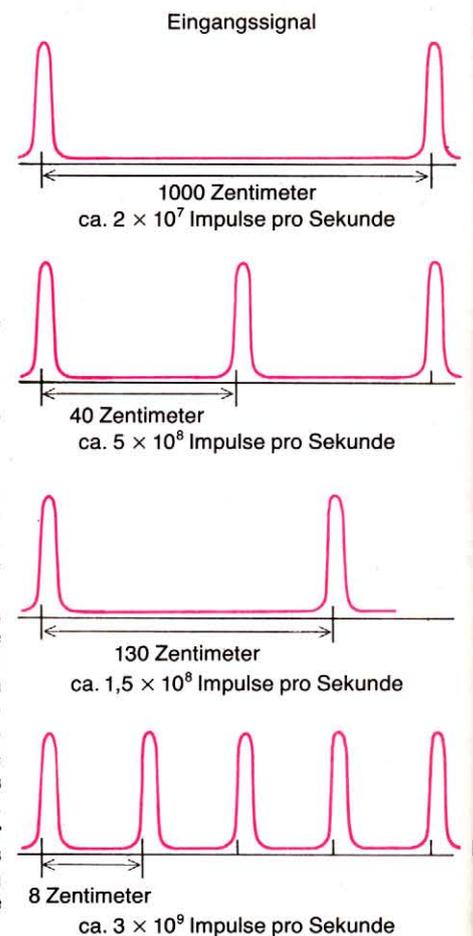
Allerdings wird die maximale Entfernung, über die man mit einem optischen System Nachrichten übertragen kann, viel mehr von den Verlusten in der Glasfaser bestimmt als von der Leistung und Empfindlichkeit des Senders und Empfängers. Gelingt es, die Dämpfung einer Glasfaser auf die Hälfte zu reduzieren, dann verdoppelt sich damit die Übertragungsentfernung. Erhöht man dagegen die Leistung des Lasers auf das Doppelte, kann man die Glasfaser nur so weit verlängern, bis sich die Dämpfung am Ende der Strecke wieder verdoppelt hat, und oft gewinnt man so nur etwa zehn Prozent der ursprünglichen Übertragungsentfernung.

Der wichtigste Nachteil der analogen Übertragung ist, daß jede Verzerrung, die das amplitudenmodulierte Lichtsignal auf seinem Weg durch die Glasfaser erleidet (und solche Verzerrungen sind unver-

meidbar), zusammen mit dem Signal beim Empfänger verstärkt wird. Eine der wirksamsten Methoden zur Übertragung eines nahezu ungestörten Signals besteht darin, es vor dem Aussenden in die digitale Form umzuwandeln (Bild 4, Seite 62). Dazu mißt man in regelmäßigen Zeitabständen den Amplitudenwert des Signals. Um seine Wellenform möglichst genau zu erfassen, muß die Zahl der Messungen mindestens doppelt so groß sein wie die höchste Frequenz im Signal. Will man zum Beispiel ein Sprachsignal naturgetreu übertragen, dessen obere Frequenzgrenze bei 4000 Hz liegt, muß man 8000mal pro Sekunde den Amplitudenwert messen. Die einzelnen Meßwerte werden dann in Binärzahlen kodiert, das heißt, sie werden als Folge von Nullen und Einsen dargestellt, und in dieser Form nach einem vereinbarten Code übertra-

Bild 6: Zwei Arten von Dispersion (Impulsverbreiterung) treten in Glasfasern auf. Die Modendispersion wurde in Bild 5 erklärt. Hier wird in den Diagrammen (a) und (b) gezeigt, wie diese Art der Dispersion die Impulsfrequenz und damit die Übertragungskapazität einer Glasfaser beschränkt. In jedem Fall ist die Impulsfrequenz gerade so gewählt, daß die Impulsverbreiterung gleich dem halben Zeitintervall zwischen zwei Impulsen ist. Für eine Faser (a) mit einem Brechzahlssprung zwischen Kern und Mantel (Stufenprofilfaser) beträgt der Laufzeitunterschied zwischen Anstiegs- und Abfallflanke eines ideal schmalen Impulses etwa 25×10^{-9} Sekunden pro Kilometer, was einer Impulsverbreiterung von etwa fünf Meter pro Kilometer entspricht. Damit die Dispersion nicht größer wird als ein halbes Intervall, darf die Impulsfrequenz 2×10^7 Impulse pro Sekunde nicht überschreiten. Gradientenfasern (b) bringen eine Verbesserung um das 25-fache auf 10^{-9} Sekunden (entsprechend 20 cm) pro Kilometer. Ideal schmale Impulse können also mit einer Frequenz von 5×10^8 Impulsen pro Sekunde übertragen werden. Die Impulsverbreiterungen sind logarithmisch aufgetragen. Der Abstand der Im-

pulse (ganz links) soll jeweils gerade das Doppelte der Impulsverbreiterung betragen. Die zweite Art der Dispersion, die Materialdispersion, hat ihre Ursache in der spektralen Breite der Lichtquelle. Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge breiten sich in der Glasfaser verschieden schnell aus, da der Brechungsindex von der Wellenlänge abhängt. Mit zunehmender Wellenlänge wächst auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Lichtemittierende Dioden hoher Leistung, die man in der optischen Nachrichtentechnik verwendet, haben eine spektrale Bandbreite von 35 Nanometer, was etwa dem Abstand zwischen grün und gelb im sichtbaren Spektralbereich entspricht. Ihre Schwerpunktwellenlänge liegt im nahen Infrarotbereich bei etwa 0,82 Mikrometer. Selbst in einer Gradientenfaser mit der Modendispersion Null würde ein schmaler LED-Lichtimpuls pro Kilometer auf 65 cm verbreitert. Die Impulsfrequenz kann daher höchstens $1,5 \times 10^8$ Impulse pro Sekunde betragen (c). Dient dagegen ein Halbleiterlaser mit einer spektralen Breite von nur 2 Nanometer als Lichtquelle, so beträgt die Materialdispersion lediglich 4 cm pro Kilometer, und man könnte 3×10^9 Impulse pro Sekunde übertragen (d).



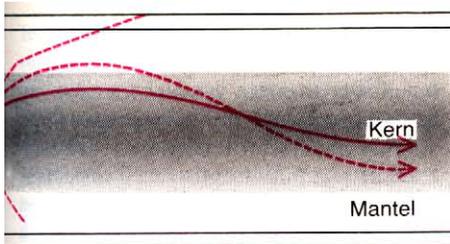


Bild 5: Glasfasern bestehen aus einem Kern, einem Mantel und einer schützenden Umhüllung. Das Material des Kerns hat eine höhere Brechzahl als das Material des Mantels. Dadurch werden die Lichtstrahlen, die auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel treffen, in den Kern reflektiert. Solange die Faser keine scharfe Biegung macht, pendeln die Lichtstrahlen von einer Seite zur anderen. Lediglich Lichtstrahlen, die unter einem großen Winkel zur Faserachse in die Faser eintreten, gehen verloren. Gibt es einen Brechzahlssprung zwischen Kern und Mantel (Stufenprofilfaser,

links), so legen die häufig reflektierten Lichtstrahlen einen längeren Weg zurück als Strahlen, die seltener reflektiert werden, und kommen später an. Dieser als Modendispersion bezeichnete Effekt kann umgangen werden, wenn man eine Glasfaser herstellt, deren Brechzahl zur Faserachse hin allmählich zunimmt (rechts). In einer solchen Gradientenfaser laufen die Lichtstrahlen umso schneller, je weiter sie von der Achse des Kerns entfernt sind. Daher kommen alle Strahlen fast gleichzeitig am Faserende an, obwohl die Wege, die sie zurücklegen, verschieden lang sind.

gen, beispielsweise für jede 1 ein Lichtimpuls, für jede 0 kein Lichtimpuls. Der Empfänger entschlüsselt diese Impulse und rekonstruiert auf diese Weise die ursprünglichen Amplitudenwerte.

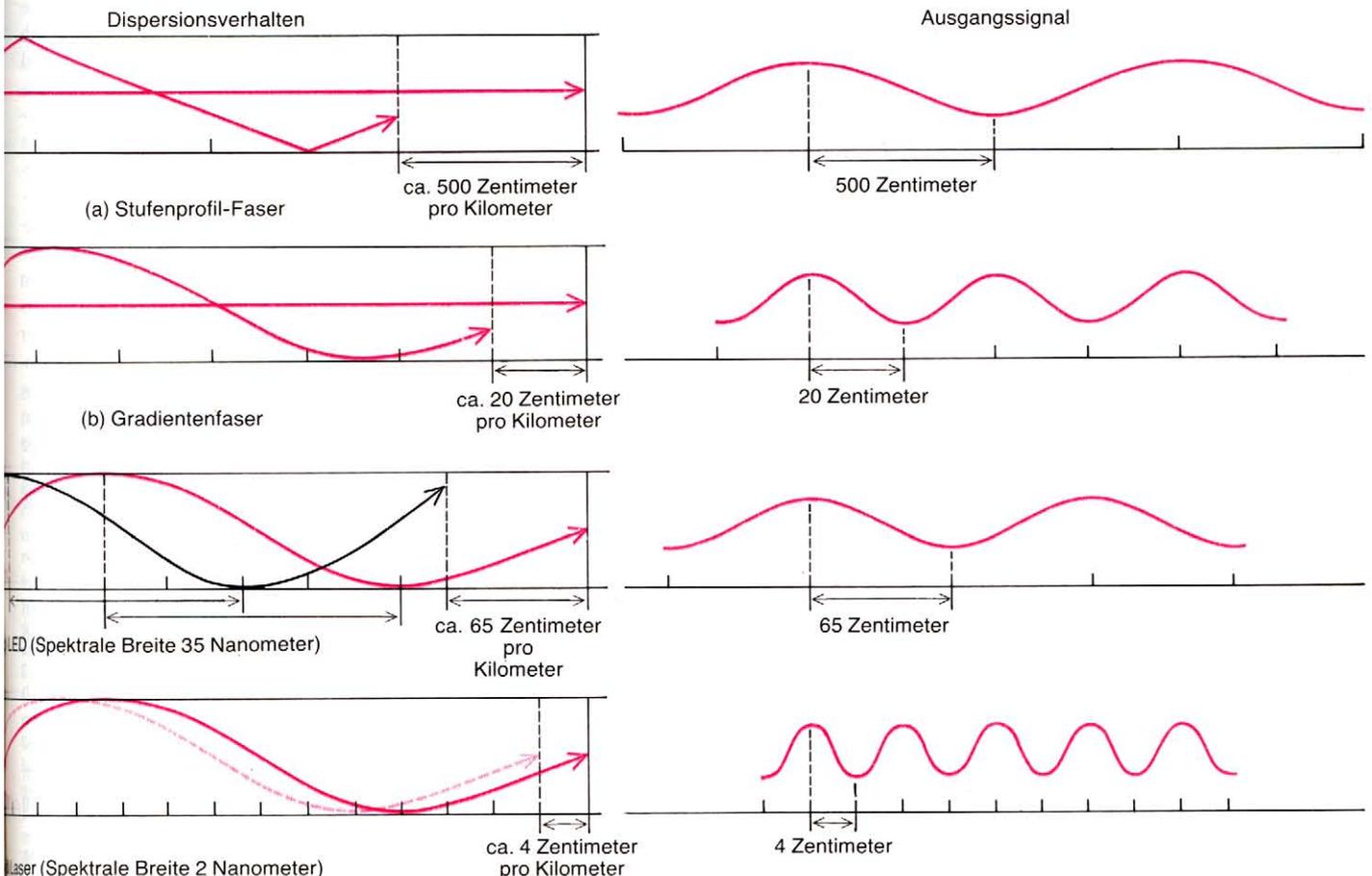
Der Vorteil der digitalen Übertragung macht sich vor allem bei schwachen Eingangssignalen bemerkbar. Jeder Empfänger hat nämlich ein physikalisch bedingtes Eigenrauschen, das die ankommenden Signale stört. Für die Nachrichtentechnik ist daher das Signal-Rausch-Verhältnis wichtig. Dieses Verhältnis wird zu Ehren von Graham Bell in Dezibel gemessen. Ein Dezibel ($\text{dB} = 0,1 \text{ Bel}$) ist der 10fache Logarithmus vom Verhältnis zwischen zwei Leistungen. Ein Signal-Rausch-Verhältnis von 20 Dezibel bedeutet also, daß das Signal hundertmal stärker ist als das Rauschen. Bei der digitalen Übertragung muß nun der Empfän-

ger nur zwischen 0 und 1 unterscheiden, und das ist selbst bei beträchtlichem Rauschen mit geringer Fehlerwahrscheinlichkeit möglich: bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 21 Dezibel kann man damit rechnen, daß von einer Milliarde Impulsen nur einer im Rauschen verlorengeht. Dagegen wird ein Analog-Signal von jedem Rauschen verzerrt. Das Signal-Rausch-Verhältnis muß wesentlich größer sein als 21 Dezibel, damit das Signal vom Empfänger mit befriedigender Qualität reproduziert wird. Normalerweise braucht man 60 Dezibel, das heißt, das Signal muß eine Million mal stärker sein als das Rauschen.

Infolge der geringen Rauschanfälligkeit der digitalen Übertragung können die Signale wesentlich längere Strecken zurücklegen als bei der analogen Übertragung, ehe sie wieder verstärkt werden

müssen. Ein weiterer Vorteil ist der geringe Aufwand, mit dem sich digitale Signale erfassen und regenerieren lassen. Nur zwei Zustände müssen unterschieden werden, kleine Verzerrungen der Impulsformen haben kaum Folgen, und daher brauchen die Verstärker auch nur einfachen Anforderungen zu genügen.

In der Fernsprechtechnik werden die Sprachsignale zunehmend in digitaler Form über Kabel oder Mikrowellen-Richtfunkstrecken übertragen. Sie werden 8000mal pro Sekunde abgetastet, und jeder Amplitudenwert wird in eine achtstellige Binärzahl umgewandelt. In einer Binärzahl kann an jeder Stelle nur eine 0 oder eine 1 stehen. Folglich kann man mit achtstelligen Binärzahlen insgesamt $2^8 = 256$ Amplitudenwerte darstellen, und damit läßt sich das Wellenmuster des Sprachsignals ausreichend genau spe-



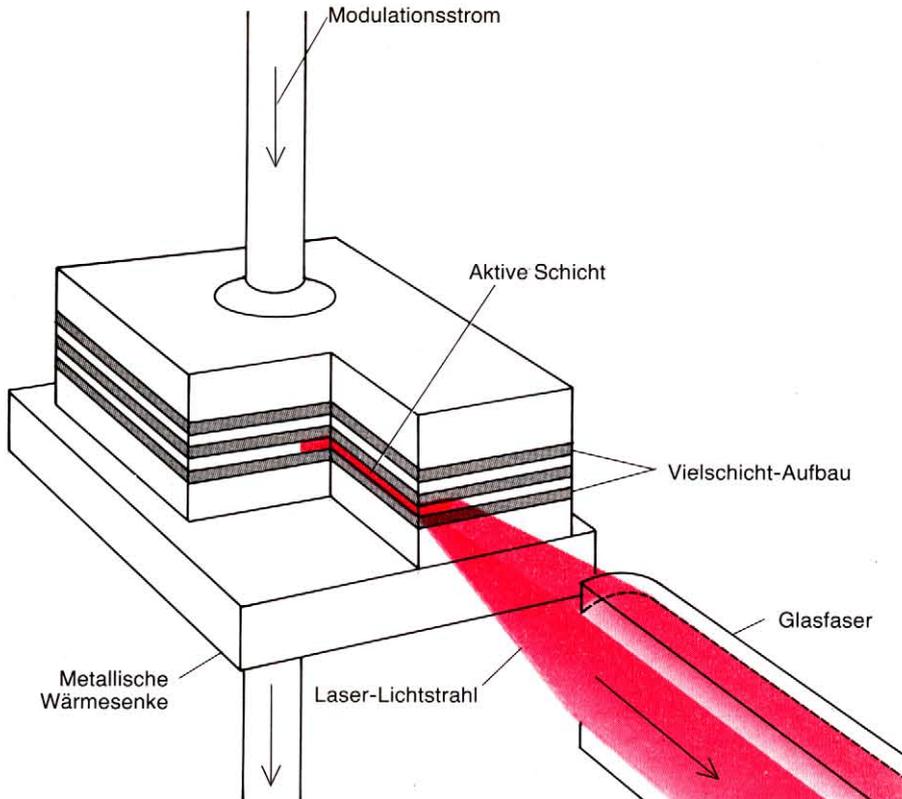


Bild 7: Laser als Lichtquellen für die optische Nachrichtentechnik sind nur so groß wie ein Körnchen Salz. Der Laserbetrieb wird durch einen komplizierten Aufbau aus zahlreichen Schichten von Galliumarsenid und Galliumaluminiumarsenid (Doppel-Heterostruktur) mit streng einzuhaltenden elektronischen Ei-

genschaften ermöglicht. Der Laserstrahl tritt aus einer der Galliumarsenidschichten aus und wird 40 Mikrometer weit durch ein Schutzgas geleitet, bevor er in eine Glasfaser eintritt. Solche Laser haben Ausgangsleistungen von mehr als 0,5 Milliwatt bei einer Wellenlänge von 0,82 Mikrometer.

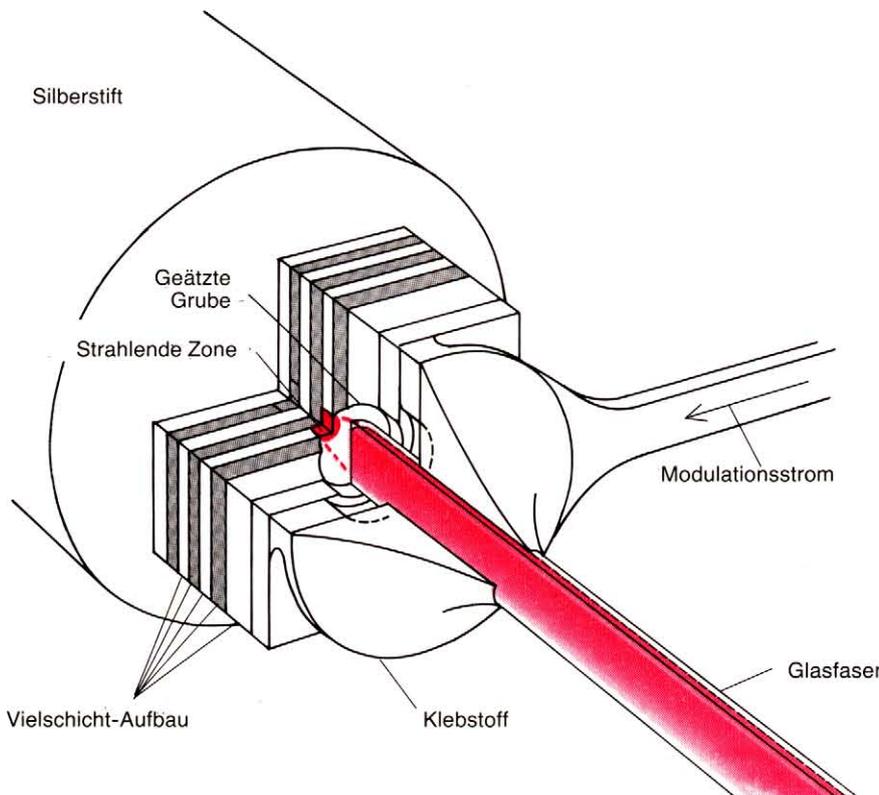


Bild 8: Lichtemittierende Dioden (LEDs) bestehen ebenfalls aus zahlreichen Schichten. Sie sind jedoch einfacher, billiger und zuverlässiger als Laser. Ihre Verwendung ist immer dann

sinnvoll, wenn man die geringe spektrale Breite des Lasers nicht braucht und wenn bei kurzen Übertragungsstrecken ihre geringe Lichtleistung von etwa 0,1 Milliwatt genügt.

zifizieren. Um das Sprachsignal mit seiner Bandbreite von 4000 Hz nach der digitalen Übertragung wiederherstellen zu können, muß man in der Lage sein, $8000 \times 8 = 64\,000$ Impulse pro Sekunde zu übertragen. Für optische Nachrichtensysteme ist das kein Problem, so daß man mit der Bandbreite verschwenderisch umgehen und sich auf diese Weise ein sehr großes Signal-Rausch-Verhältnis erkaufen kann. Das wiederum hat zur Folge, daß die Länge der Übertragungsstrecke wächst, nach der das Signal erneut verstärkt werden muß (Bild 1, Seite 60).

Die Länge der Übertragungsstrecke hängt also von der Leistung der Lichtquelle, von der Dämpfung der Faser, vom Rauschen des Empfängers und von der Wahl der Übertragungsform ab. Dagegen wird die Übertragungskapazität (Bandbreite, Impulsfrequenz) eines optischen Systems bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der der optische Sender ein- und ausgeschaltet werden kann, durch die Ansprechgeschwindigkeit des optischen Empfängers und durch die Verbreiterung der Impulse auf ihrem Weg in der Glasfaser.

Optische Nachrichtensysteme arbeiten gegenwärtig mit zwei Arten von Lichtsendern: mit lichtemittierenden Dioden (abgekürzt als LED bezeichnet) und mit Halbleiterlasern. Lichtemittierende Dioden werden beispielsweise in Taschenrechnern verwendet, um die Rechenergebnisse anzuzeigen. Für die optische Nachrichtentechnik müssen sie natürlich eine viel höhere Leistung haben und überdies in ihren Abmessungen zur Glasfaser passen, deren Durchmesser nur einige hundertstel Millimeter beträgt. In die Oberfläche einer LED für die Nachrichtentechnik ätzt man eine kleine Vertiefung, um die Glasfaser so dicht wie möglich an die Stelle bringen zu können, die das Licht aussendet (Bild 8). Glasfasern übertragen infrarotes Licht mit besonders geringem Verlust, und man wählt daher LEDs, die derartiges Licht emittieren. LEDs aus Galliumarsenid strahlen mit einer Wellenlänge von 0,8 Mikrometer, aber eine etwas größere Wellenlänge wäre besser. Man sucht daher zur Zeit intensiv nach Halbleitermaterialien, die dieser Forderung genügen.

Ein Halbleiterlaser ist wesentlich komplizierter als eine lichtemittierende Diode. Obwohl er nicht größer ist als ein Körnchen Salz, besteht er aus mehreren Schichten (Bild 7). Diese „Sandwich“-Struktur schafft die für den Laserbetrieb notwendigen Bedingungen: sie konzentriert die Ladungsträger, durch deren Rekombination das Licht entsteht, in einem engen Bereich, und sie lenkt das Licht in eine Vorzugsrichtung.

Anfangs war es äußerst schwierig, diese Sandwich-Struktur zu erzeugen, ohne die

Kristallgitter der einzelnen Schichten zu stören. Die Lichtleistung der ersten Laser fiel sehr schnell ab. Manche arbeiteten nur wenige Stunden. Nach und nach fand man neue Methoden, mit denen sich die Herstellung des Schichtaufbaus so verbessern ließ, daß in den Kristallgittern keine Störstellen mehr entstehen. Heute fabrizierte Halbleiterlaser sollten bei Zimmertemperatur eine Lebensdauer von mehreren Jahren haben. Ziel der Forschung ist es, Halbleiterlaser zu entwickeln, die ebenso zuverlässig sind wie andere Halbleiter-Bauelemente.

Der Halbleiterlaser hat gegenüber der LED zwei wesentliche Vorteile. Erstens ist das ausgesandte Licht erheblich stärker gebündelt, und ein größerer Teil des Lichtstrahls kann direkt in das Ende einer Glasfaser eingekoppelt werden. Zweitens ist die spektrale Breite, das heißt der Wellenlängenbereich des abgestrahlten Lichtes, sehr gering. Da sich unterschiedliche Wellenlängen in der Glasfaser mit geringfügig unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten, hängt die Verbreiterung (Dispersion) eines Lichtimpulses von der spektralen Breite der Lichtquelle ab (Bild 6, Seite 64). Laserlicht kann mit einer größeren Impulszahl pro Sekunde durch eine Glasfaser übertragen werden als das Licht einer LED, deren spektrale Breite größer ist. Der Wellenlängenbereich eines typischen Lasers erstreckt sich nur über zwei Millionstel Millimeter (2 Nanometer), wogegen eine LED mit einer spektralen Breite von etwa 35 Nanometer strahlt. Bei der Übertragung durch einen

Kilometer Glasfaser wird ein Laserlichtimpuls um etwa 20×10^{-12} Sekunden gestreckt, das heißt, er verbreitert sich auf etwa vier Zentimeter. Für das Licht einer LED ist die Dispersion nahezu 20mal so groß. Die Verbreiterung der Lichtimpulse in der Glasfaser aufgrund der mangelnden spektralen Reinheit der Lichtquelle begrenzt die Impulsfrequenz und damit die Kapazität eines optischen Nachrichtensystems. Werden zwei Lichtimpulse mit zu geringem zeitlichen Abstand ausgesandt, laufen sie ineinander und können nicht mehr unterschieden werden. Neben diesem als Materialdispersion bezeichneten Effekt tritt eine zusätzliche Impulsverbreiterung dadurch auf, daß einzelne Lichtstrahlen (oder „Moden“) in der Glasfaser verschiedene lange Wege zurücklegen. Diese Modendispersion kann durch konstruktive Maßnahmen klein gehalten, aber nicht ganz beseitigt werden. Wir kommen darauf zurück.

Um der Glasfaser längs ihrer Achse eine möglichst große Lichtdurchlässigkeit zu geben, muß man dafür sorgen, daß die Lichtstrahlen niemals an die Oberfläche der Faser gelangen, denn dort würden sie durch Staub, Kratzer oder den Kontakt mit anderen Flächen stark gedämpft. Eine Glasfaser besteht aus drei Lagen. Die äußerste Lage ist meist ein Kunststoffüberzug, der sie gegen Kratzer und Abrieb schützt und dem Entstehen von Schwach- und Bruchstellen vorbeugt. Der Schutzschicht folgen eine Mantel- und eine Kernzone, wobei der Kern eine etwas höhere Brechzahl hat als der Mantel (Bild 5,

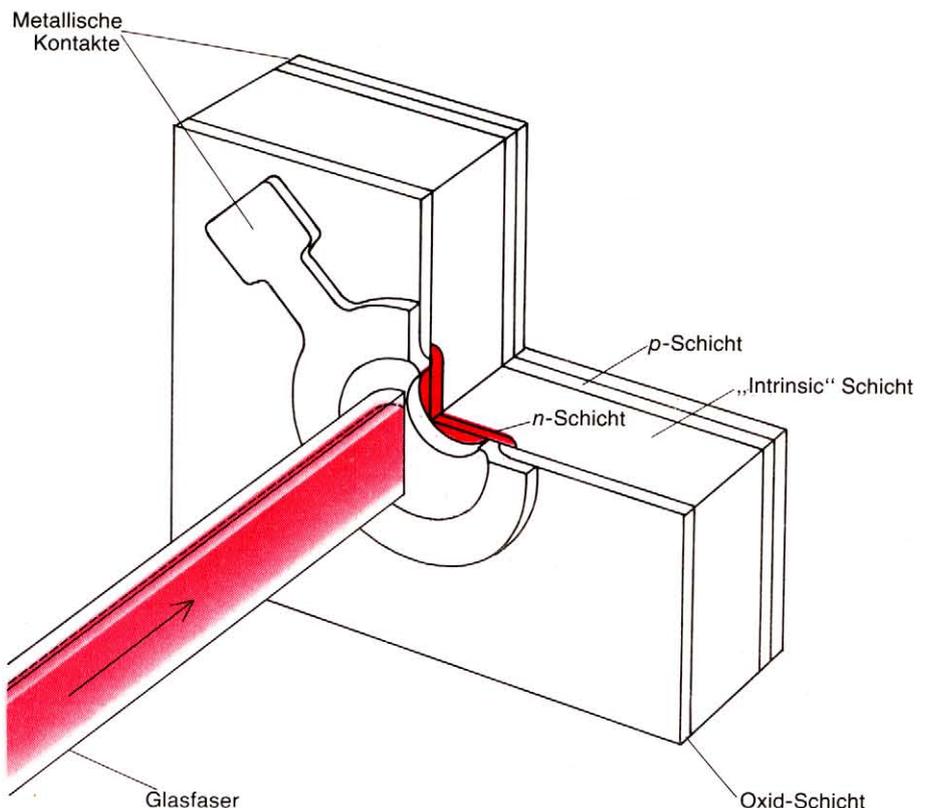
Seite 65). Dadurch werden die Lichtstrahlen an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel in den Kern reflektiert, wenn man sie mit einem gegen die Faserachse flachen Einfallswinkel in das Ende der Glasfaser eintreten läßt.

Ist dieser Einfallswinkel nicht flach genug, so verläßt das Licht die Faser wieder. Dagegen kann ein Lichtstrahl der einmal von der Grenzfläche zwischen Mantel und Kern in den Kern reflektiert worden ist, diesen nie wieder verlassen, solange die Glasfaser nicht stark gebogen wird, was man in der Praxis dadurch vermeidet, daß man mehrere Glasfasern in einen steifen Kabelmantel einbettet.

Jetzt wird auch die Ursache der Modendispersion klar (Bild 6, Seite 64): Lichtstrahlen, die parallel zur Faserachse laufen, legen einen wesentlich kürzeren Weg zurück als Lichtstrahlen, die ständig von einer Seite zur anderen reflektiert werden. Der längere Weg hat zur Folge, daß ein Teil des Lichtimpulses am Ende der Glasfaser verspätet eintrifft, das heißt, der Endimpuls ist gegenüber dem Eingangsimpuls verbreitert.

Um die Modendispersion zu vermindern, gibt man den Glasfasern einen Kern mit einer parabelförmig nach außen abnehmenden Brechzahl (Bild 5, Seite 65). Damit kompensiert man die unterschiedliche Weglänge der Lichtstrahlen, denn mit abnehmender Brechzahl steigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in der Faser. Man kann den Gradienten der Brechzahl so wählen, daß alle Lichtstrahlen fast gleichzeitig am Ende der

Bild 9: Der Lichtdetektor am Ende einer Glasfaser erzeugt beim Auftreffen von Licht einen elektrischen Strom. Der einfachste Detektor ist eine PIN-Photodiode. Die Buchstaben P, I und N beschreiben den Schichtaufbau: p-Silizium (Elektronenmangel), „intrinsic“ p-Silizium (schwach eigenleitend), n-Silizium (Elektronenüberschuß). Photonen werden in der I-Schicht absorbiert und erzeugen dort Paare von Elektronen und Leerstellen, die sich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes auseinanderbewegen, so daß ein Strom fließt. Eine kompliziertere Struktur hat die Lawinenphotodiode. In ihr bewirkt eine zusätzliche n-Schicht eine Verstärkung, die zu einem größeren Ausgangssignal führt. Photodioden haben ein Eigenrauschen, das mit der Übertragungsgeschwindigkeit ansteigt. Wenn eine PIN-Photodiode 10^8 Impulse pro Sekunde empfangen soll, erreicht das Rauschen etwa 10^{-9} Watt. Das Rauschen einer Lawinenphotodiode ist etwa zehnmals schwächer.



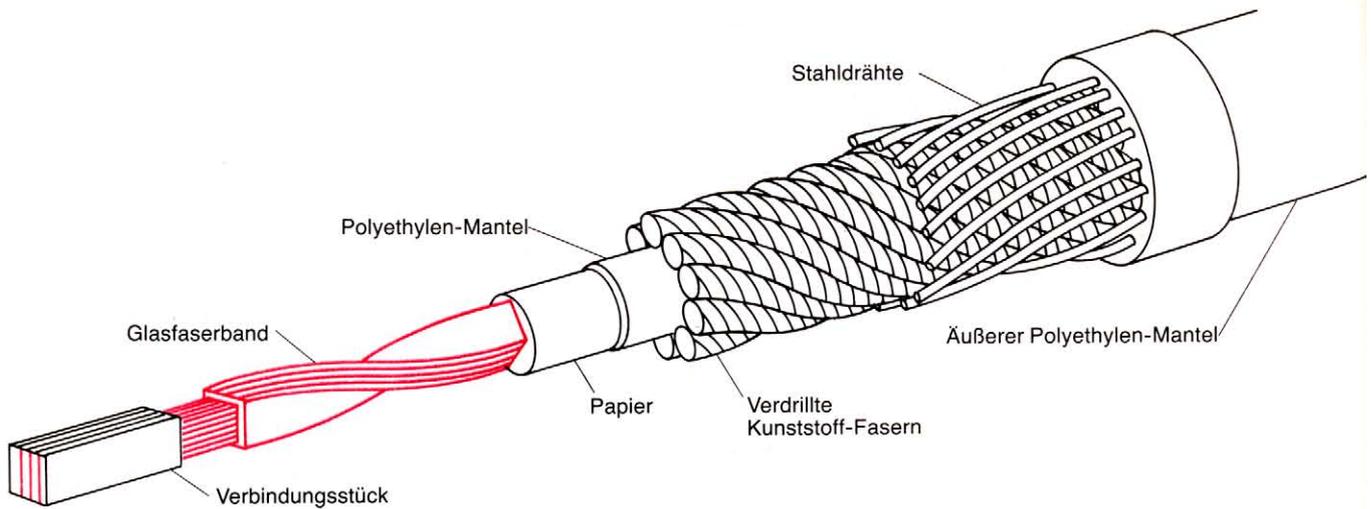


Bild 10: Glasfaserkabel, wie es zuerst in Atlanta (Georgia, USA) verwendet wurde. Es enthält 144 Glasfasern, von denen je 12 ein flaches Band bilden. Diese Bänder werden übereinandergelegt und mit mehreren Schutz-

schichten umgeben. Der äußerste Mantel besteht aus Polyethylen und ist mit Stahldrähten verstärkt. Bei einer Frequenz von 44,7 Millionen Impulsen pro Sekunde kann ein Glasfaserpaar 672 Telefongespräche, eine Zweiweg-

Bildtelefonverbindung oder ähnlich große Datenströme bewältigen. Die Kabelstücke werden fabrikmäßig mit Verbindungsstücken geliefert, an denen sie sich zu Kabeln größerer Länge vereinigen lassen.

Glasfaser ankommen. Glasfasern ohne einen solchen Gradienten verbreitern einen Lichtimpuls durch Modendispersion auf mehr als 25×10^{-9} Sekunden pro Kilometer, was einem Weglängenunterschied von etwa fünf Metern entspricht! Dagegen erreicht man mit den jetzt in Chicago verwendeten Gradientenfasern eine Verbesserung um den Faktor 25, und Labormuster haben sogar nur noch eine Modendispersion von etwa fünf Zentimeter pro Kilometer Übertragungsstrecke.

Die ersten hochtransparenten (dämpfungsarmen) Glasfasern wurden von der Firma Corning Glass Works in den USA hergestellt. Sie bestanden im wesentlichen aus Siliciumdioxid (Quarzglas). Die erste brauchbare Gradientenfaser produzierte die Firma Nippon Sheet Glass in Japan. Nach einem von den Bell Laboratories entwickelten Verfahren erhält man eine Gradientenfaser, indem man auf die innere Oberfläche eines Rohres aus Quarzglas Dutzende von Schichten aus Siliciumdioxid aufbringt, dem Germaniumdioxid zugesetzt wurde. Jede Schicht ist nur etwa ein hundertstel Millimeter dick. Das ein Meter lange Rohr wird dann zu einem Stab zusammenschmolzen und zu einer mehrere Kilometer langen Faser ausgezogen.

Die besten Exemplare solcher Glasfasern haben inzwischen eine Dämpfung von weniger als einem Dezibel pro Kilometer, das heißt, nach einem Kilometer sind noch mehr als 80 Prozent der anfänglichen Lichtleistung vorhanden. Allerdings lassen sich diese niedrigen Dämpfungswerte mit den Wellenlängen der heute verfügbaren Lichtquellen noch nicht ausnutzen. Tatsächlich beträgt die nach einem Kilometer ankommende

Lichtleistung nur etwa 30 Prozent, was einer Dämpfung von vier bis fünf Dezibel entspricht. Aber selbst mit dieser schlechteren Dämpfung können Impulse von Laserlicht etwa 14 Kilometer weit übertragen werden, bevor man sie wieder verstärken muß (Bild 1, Seite 60). Die nach dieser Strecke vorhandene Lichtleistung beträgt nur noch etwa ein Zehnmillionstel der Eingangsleistung. Wenn es gelingt, Sender und Empfänger für Wellenlängen von mehr als einem Mikrometer herzustellen, bei denen die Glasfasern den geringsten Verlust verursachen, und wenn sich auch die Fasern selbst noch verbessern lassen, dann kann der Abstand zwischen zwei Verstärkern wesentlich über 14 Kilometer hinauswachsen.

Die mit einer Schutzschicht gegen Feuchtigkeit, Kratzer und scharfe Biegungen versehenen haarfeinen Glasfasern werden in flachen, farbig markierten Bändern vereinigt. Jedes Band enthält zwölf Fasern, und bis zu zwölf Bänder bilden ein Kabel, das man mit einem schützenden und polsternden Mantel umgibt (Bild 10). Es war äußerst schwierig, Methoden zu finden, mit denen sich zwei Kabel so verbinden lassen, daß die Enden aller in ihnen enthaltenen Glasfasern exakt beieinanderliegen. Heute kann man die Faserenden auf zwei Mikrometer genau gegeneinander justieren.

Glasfasern bieten gegenüber metallischen Leitern einige Vorteile: Das Licht ist fest in den Kernen der einzelnen Fasern eingeschlossen, das heißt, die Signale können nicht von einer Faser zur anderen überspringen und dadurch einen Gesprächssalat hervorrufen. Glasfasern unterliegen auch keiner Einwirkung durch fremde elektrische Ströme und erweisen

sich daher in Bereichen mit starkem elektrischen Rauschen als überlegene Nachrichtenträger. Glasfaserkabel benötigen schließlich bedeutend weniger Material als metallische Kabel mit vergleichbarer Übertragungskapazität. Zwar sind Glasfasern im Augenblick noch wesentlich teurer als Kupferdraht, aber das ist immer so, wenn sich ein neues, technisch aufwendiges Produkt in der Anfangsphase seiner Verwendung befindet.

Wie bei den optischen Sendern sind auch bei den in der optischen Nachrichtentechnik verwendeten Photoempfängern oder Detektoren zwei Arten zu unterscheiden. Beide sind Halbleiterbauelemente. Das eine ist eine einfache PIN-Photodiode, ähnlich der bekannten Solarzelle, die das Licht (Photonen) in elektrischen Strom (Elektronen) umwandelt (Bild 9, Seite 67). Die Buchstaben P, I und N bezeichnen die Halbleiterschichten, aus denen die Diode besteht. Das andere ist die schon erwähnte Lawinenphotodiode. Alle Detektoren erzeugen ein Rauschen, das mit der Zahl der Informationseinheiten („Bits“) ansteigt, die sie pro Sekunde verarbeiten. Die PIN-Photodiode erzeugt zum Beispiel eine Rauschleistung von 10^{-11} Watt, wenn sie mit einer Million Bits (einem Megabit) pro Sekunde betrieben wird, und eine Rauschleistung von 10^{-9} Watt bei 100 Megabit pro Sekunde. Das Rauschen einer Lawinenphotodiode ist etwa zehnfach schwächer. Aus diesen Betrachtungen folgt, daß die Übertragungsentfernung umso größer sein kann, je kleiner die Zahl der pro Sekunde übertragenen Bits ist. Der Detektor ist das Element eines optischen Nachrichtensystems, das die Signale wieder in die Form bringt, die

man für die Weiterleitung im vorhandenen konventionellen Netz benötigt.

Mit diesen Informationen über Lichtquellen, Glasfasern und Detektoren wollen wir jetzt ein optisches Nachrichtensystem zusammenstellen und prüfen, welche Kommunikationsmöglichkeiten es bietet. Zunächst wollen wir die maximale Übertragungsentfernung für ein System abschätzen, in dem eine Million Bits pro Sekunde übertragen werden. Damit der Empfänger möglichst wenige Fehler macht, müssen die ankommenden Signale etwa 100mal stärker sein als das Rauschen des Detektors. Bei einer Lawinendiode verlangt das eine Signalleistung von mindestens 10^{-10} Watt. Um eine möglichst lange Übertragungsstrecke zu erhalten, nehmen wir als Lichtquelle einen Laser mit einer Leistung von mehr als 10^{-3} Watt und keine LED, deren Leistung um eine Größenordnung kleiner ist. Bei digitaler Übertragung darf das Licht auf seinem Weg durch die Glasfaser höchstens um den Faktor 10^7 oder um 70 Dezibel gedämpft werden. Mit den Dämpfungswerten der gegenwärtig verfügbaren Glasfasern (weniger als 5 Dezibel pro Kilometer) kommen am Ende eines jeden Kilometers etwa 30 Prozent der an seinem Anfang vorhandenen Leistung an, woraus sich eine maximale Übertragungsstrecke von 14 Kilometern ergibt. Hätte man Fasern mit Dämpfungswerten von 1 Dezibel pro Kilometer, könnte die Übertragungsstrecke 70 Kilometer lang sein. Allerdings ist nicht damit zu rechnen, daß es jemals Glasfasern geben wird, die länger als ein paar Kilometer sind. Wir müssen also stets zusätzliche Verluste an den Kopplungsstellen zwischen den Faserstücken berücksichtigen. Die gegenwärtigen Faserverbindungen bringen einen Verlust von etwa 0,5 Dezibel. Wenn man für 14 km Glasfaser sechs solcher Verbindungen braucht, dann gehen damit 3 Dezibel verloren. Das ist ungefähr die halbe Sendeleistung. Da ein Gesamtverlust von 70 Dezibel nicht überschritten werden darf, muß die Strecke um 600 Meter auf 13,4 Kilometer verkürzt werden ($13,4 \times 5 + 3 = 70$).

Welche Nachrichtenkapazität hat unser optisches System? Natürlich streben wir die Übertragung der größtmöglichen Anzahl von Bits pro Sekunde an. Allerdings rauscht der Detektor umso stärker, je größer die Bitzahl pro Sekunde wird. Wir haben unsere Signalleistung so gewählt, daß 10^6 Bit pro Sekunde übertragen werden können. Um 10^8 Bit pro Sekunde zu übertragen, müßten wir sie um den Faktor 100 erhöhen. Bei 10^8 Bit pro Sekunde sind aber auch die Lichtimpulse und ihr zeitlicher Abstand kürzer, und die Impulsverbreiterung auf dem Weg durch die Glasfaser begrenzt die Nachrichtenkapazität.

Um die Rechnung zu vereinfachen, wollen wir annehmen, daß die Impulsverbreiterung nicht größer ist als das halbe Intervall zwischen zwei Impulsen (Bild 6, Seite 64). In einer Gradientenfaser trägt die Modendispersion (der Weglängenunterschied) 10^{-9} Sekunden pro Kilometer; das heißt, wenn 10^9 Impulse pro Sekunde übertragen werden, ist die Impulsverbreiterung nach einem Kilometer bereits gleich dem Intervall zwischen zwei Impulsen. Damit eine Trennung um ein halbes Intervall erhalten bleibt, darf man nicht mehr als $0,5 \times 10^9 = 5 \times 10^8$ Bit pro Sekunde und Kilometer übertragen. Bei dieser Rechnung haben wir die Impulsverbreiterung durch die spektrale Breite der Quelle (Materialdispersion) außer Betracht gelassen, da uns als Lichtquelle ja der fast monochromatisch arbeitende Laser dient.

Würden wir eine LED als Lichtquelle verwenden, so wäre die Materialdispersion der begrenzende Faktor. Sie beträgt bei einer LED etwa $3,5 \times 10^{-9}$ Sekunden pro Kilometer. Das ist dreieinhalbmal so viel wie die Modendispersion. Um dabei die Impulsverbreiterung nicht größer als das halbe Intervall werden zu lassen, muß die Übertragungskapazität auf weniger als ein Drittel des mit einem Laser erreichbaren Wertes gesenkt werden: auf $1,4 \times 10^8$ Bit pro Sekunde über einen Kilometer.

Soll die Übertragungsstrecke vergrößert werden, so vermindert sich auch damit die Übertragungskapazität. Beispielsweise gestattet eine zehn Kilometer lange Übertragungsstrecke nur ein Zehntel der auf einem Kilometer möglichen Übertragungskapazität (bei Verwendung eines Lasers 5×10^7 Bit pro Sekunde). Das ist etwa der in Chicago verwendete Wert ($4,47 \times 10^7$ Bit pro Sekunde). Diese einfachen Berechnungen zeigen, was man mit der heutigen Technik erreichen kann. Man sieht, welche Kompromisse zwischen Übertragungskapazität und apparativem Aufwand zu schließen sind. Die Zukunft wird hier aber sicher noch bedeutende Fortschritte bringen.

Es gibt zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für die optische Nachrichtentechnik. Mehrere Fernsehprogramme können über eine einzige Glasfaser übertragen werden. Wohnkomplexe lassen sich mit Glasfasern verkabeln, um interne Kommunikationssysteme zu schaffen. Auch die Bauteile großer Computer können durch Glasfasern verbunden werden. Die ersten bedeutenden Anwendungen sind jedoch im Telefonverkehr zu erwarten: Heutzutage sind die Vermittlungsämter in den Städten durch dicke Kupferkabel verbunden, die in unterirdischen Kabelkanälen verlaufen. Platz ist in diesen Kanälen eine Kostbarkeit, denn die Schaffung neuer Kanäle ist teuer und

schwierig. Glasfaserkabel können mit ihren geringen Abmessungen und großen Übertragungskapazitäten zu einer besseren Ausnutzung der vorhandenen Kanäle führen und den Bau neuer Kanäle überflüssig machen. Da innerstädtische Vermittlungsämter meist nicht mehr als sieben Kilometer voneinander entfernt sind, braucht man die optischen Signale zwischen Sender und Empfänger wahrscheinlich nicht noch einmal zu verstärken.

Bevor die optische Übertragungsstrecke in Chicago gebaut wurde, unternahm die Firma Bell Laboratories und Western Electric Company einen Test in Atlanta (Georgia). Zwei 640 Meter lange Glasfaserkabel mit je 144 Fasern wurden durch normale Kabelkanäle gezogen und unter den (simulierten) Bedingungen eines städtischen Nachrichtennetzes benutzt. Beim Verlegen der Kabel zerbrach keine einzige Glasfaser, obwohl man an den Kabeln kräftig ziehen mußte und verhältnismäßig scharfe Biegungen zu überwinden waren. Als Teil des Versuchs wurden einzelne Glasfasern mit ihren Enden so verbunden, daß sich eine Übertragungsstrecke von 70 Kilometer Länge ergab. Diese Strecke enthielt elf Verstärker, mit deren Hilfe lange Zeit nahezu fehlerfreie Signale in einer Richtung übertragen werden konnten.

Es widerspräche aller Erfahrung, wenn wir nicht Zeugen einer stürmischen Entwicklung auf diesem Gebiet würden. Beispielsweise beschäftigen sich Wissenschaftler in der Industrie und an den Universitäten mit Versuchen zur Führung von Lichtwellen in dünnen Schichten. Man spricht von der integrierten Optik als dem optischen Äquivalent der integrierten Mikroelektronik. Vielleicht gibt es eines Tages optische Schaltungen, die es überflüssig machen, am Eingang eines Verstärkers in der Übertragungsstrecke Lichtimpulse zunächst in elektrische Signale umzusetzen, diese zu regenerieren und sie dann wieder als Lichtsignale weiterzusenden. Theoretische und praktische Arbeiten haben das Ziel, Schaltvorgänge direkt mit Lichtimpulsen auszulösen: man hofft, optische Schalter zu finden, die an die Stelle der jetzigen elektromechanischen und elektronischen Schalter treten können. Damit wäre es möglich, mehr Telefongespräche schneller zu vermitteln als je zuvor.

Übersetzt von Gerhard Elze