

Physik in der Informationstechnik

Lichtwellenleiter

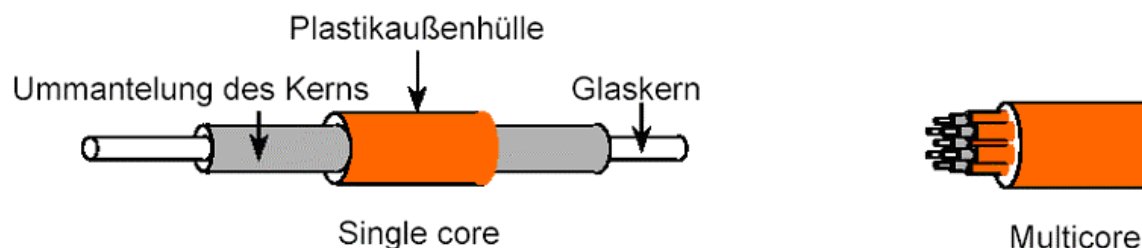
von Thomas Schäffner

Die heutige Kommunikationstechnik, insbesondere das Internet, hat erstaunlicherweise sehr viel mit der Optik zu tun und wäre ohne die moderne Optik nicht vorstellbar. Ausgehend von der einfachen Physik, der Brechung und der Totalreflexion von Licht, werde ich in meinem Bericht auf die Lichtführung in Glasfaserkabeln durch das Prinzip der Totalreflexion, auf die Lichtquellen, die sog. Laser, bei denen ebenfalls Reflexion und stehende Wellen eine Rolle spielen, und ferner auf optisch integrierte Bauteile zur Steigerung der Übertragungskapazitäten eingehen.

1. Einführung

Die Faseroptik ist ein Teilgebiet der Optik, das sich mit der Übertragung von Licht in Glasfasern bzw. in dünnen Glasstäben oder anderen transparenten Materialien mit hohem Brechungsindex befasst. Der erste Vorschlag, nach diesem Prinzip Nachrichten zu übertragen, stammt aus dem Jahre 1966. Er konnte damals jedoch nicht in die Praxis umgesetzt werden, da die verfügbaren Fasern oder Lichtwellenleiter das Licht noch viel zu stark absorbierten. Im Jahre 1970 erfolgte der große Durchbruch für die Glasfaserübertragung: zum einen wurde die Faserdämpfung auf 20 dB/km (= Abschwächung der Lichtintensität nach 1 km auf $1/100 = 1\%$ des anfänglichen Wertes) reduziert und zum anderen wurde kontinuierlicher Betrieb von Halbleiterlasern bei Raumtemperatur erreicht. Von diesem Zeitpunkt an erfolgte eine stürmische Entwicklung dieses neuen Gebietes, das für die menschliche Kommunikation eine ähnliche Bedeutung erlangt hat wie die Mikroelektronik.

Ein optisches Übertragungssystem besteht aus drei Grundkomponenten: Lichtsender, Übertragungsmedium und Lichtempfänger. Als Übertragungsmedium werden Lichtwellenleiter (LWL) aus Quarzglas oder aus Plastik benutzt.



Fügt man zusätzliche Komponenten (Wellenlängenmultiplexer und -demultiplexer) ein, so kann man mehrere Signale unterschiedlicher Wellenlänge über eine einzige Faser schicken.

Die Erfindung des optischen Verstärkers ermöglicht es, die Reichweite der Übertragungssysteme beträchtlich zu erhöhen. Damit kann beispielsweise der Atlantik ohne elektrische Zwischenverstärker überbrückt werden, was die Kosten für Interkontinentalverbindungen drastisch reduziert. Somit hat erst die optische Übertragung das Internet mit seinen weltumspannenden Informationsmöglichkeiten für jedermann erschwinglich gemacht.

2. Brechung und Totalreflexion

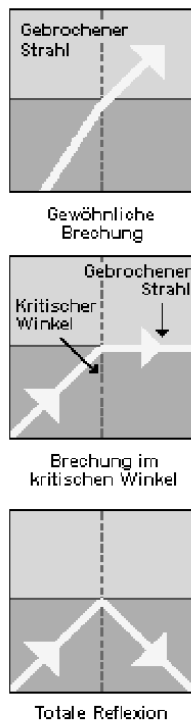


Abb. 2.1: Totalreflexion

Das Grundprinzip der Signalausbreitung im LWL beruht auf der **Totalreflexion**. Fällt ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen einem optisch dichteren Medium mit der Brechzahl n_1 und einem optisch dünneren Medium mit der Brechzahl n_2 , so wird dieser Strahl in Abhängigkeit von seinem Einfallswinkel gebrochen oder totalreflektiert. Dabei bedeutet optisch dichteres Medium eine höhere Brechzahl, optisch dünneres Medium eine geringere Brechzahl, also $n_1 > n_2$. Unter dem Einfallswinkel versteht man den Winkel zwischen dem Lot auf die Grenzfläche und dem einfallenden Strahl. Beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium wird der Strahl vom Lot. Der gebrochene Strahl kann gegen das Lot maximal einen Winkel von 90° annehmen.

Wird dieser Winkel überschritten, geht die Brechung in eine Totalreflexion über.

Die Totalreflexion im LWL wird realisiert, indem man auf das optisch dichtere Kernmaterial mit der Brechzahl n_1 ein optisch dünneres Mantel mit der Brechzahl n_2 aufbringt. Das heißt, die Brechzahl des Kerns ist stets höher als die des Mantels.

3. Lichtquellen

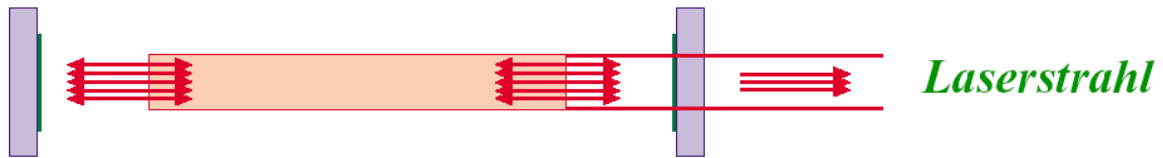
Als Sender für optische Übertragungssysteme finden Leuchtdioden (LEDs) und Laserdioden Verwendung, deren Emissionsleistung direkt, d.h. über den Injektionsstrom moduliert werden kann. Für Datenraten oberhalb 200 Mbit/s (entsprechend einer Pulsdauer von ca. 2,5 ns) müssen Laserdioden eingesetzt werden, da die Leuchtdioden diesen schnellen Änderungen nicht mehr folgen können.

Silizium kann wegen seiner Struktur der Bänder (indirekte Bandstruktur) nicht für Laser verwendet werden. Man benötigt ein Material mit einer direkten Bandstruktur, die bei den sogenannten III-V Halbleitern vorhanden ist. Diese Verbindungshalbleiter bestehen aus einem Element der III. Hauptgruppe z.B. Indium oder Gallium und einem aus der V. Hauptgruppe z.B. Phosphor oder Arsen.

Für Lasertätigkeit bedarf es einer Resonatorstruktur mit spiegelnden Endflächen, in der sich stehende Wellen (= longitudinale Eigenschwingungen) ausbilden können.

Im Halbleiterlaser wird der Resonator durch parallele Kristallebenen gebildet, die durch das Spalten der Halbleiterkristalle entstehen und damit stets exakt parallel und senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung eingestellt sind.

Im Halbleitermaterial wird durch Dotierung ein pn-Übergang erzeugt. Schickt man einen Strom durch den pn-Übergang so findet ab einer gewissen Stromstärke (Laserschwelle) durch stimulierte Emission eine optische Verstärkung der spontan emittierten Photonen statt. Durch die spiegelnden Endflächen wird das Licht wieder in den Resonator zurückgeworfen. Lasertätigkeit tritt ein, wenn die optische Verstärkung größer wird als die optischen Verluste. Bis zur Laserschwelle emittiert das Bauelement im wesentlichen inkohärente Strahlung wie eine Leuchtdiode, oberhalb der Schwelle weitgehend kohärentes Licht.



4. Integriert-optische Komponenten

Da sich Photonen unterschiedlicher Frequenz nicht gegenseitig beeinflussen, kann man mehrere Nutzsignale simultan auf einer einzigen Faser übertragen. Durch diesen Wellenlängenmultiplexbetrieb lässt sich die Übertragungskapazität einer Faserstrecke drastisch steigern. Wie in Abb. 4.1 schematisch gezeigt, benötigt man zusätzliche Bauelemente zum Vereinigen (Multiplexen) oder Trennen (Demultiplexen) von „Lichtgemischen“. Hierfür gibt es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten. Für eine große Zahl von Wellenlängen (=Kanalzahl) sind integriert-optische Komponenten aus Glas vorteilhaft, die auf einer Trägerplatte aus Quarzglas oder Silizium hergestellt werden. Im Gegensatz zu Glasfasern weisen sie eine planare Struktur auf, der Kernquerschnitt ist nicht mehr kreisrund sondern meist rechteckig oder quadratisch. Der lichtführende Kern ist auch hier von Glas mit niedriger Brechzahl umgeben.

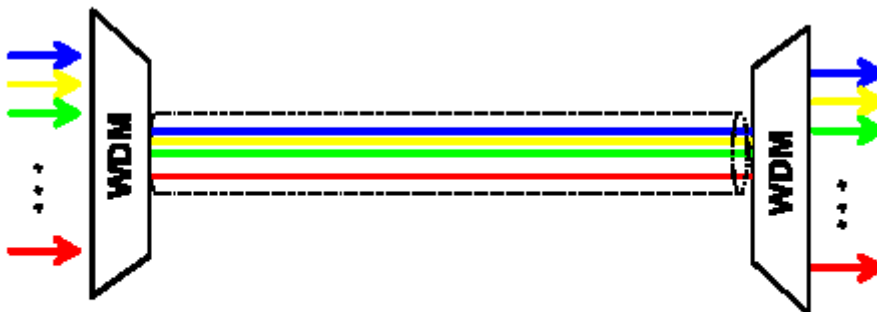


Abb. 4.1: Wellenlängenmultiplexbetrieb auf 1 Faser

5. Bedeutung der optischen Technik für das Internet

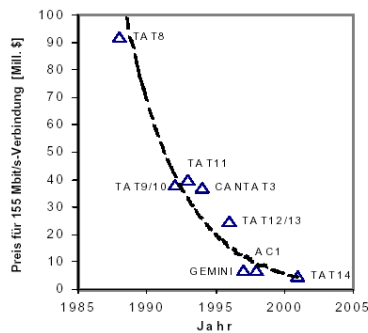


Abb. 5.2: Kostenreduktion von Transatlantik-Verbindungen mit einer Datenrate von 155 Mbit/s

Dank neuer Technologien, wie optische Verstärker und Wellenlängenmultiplexbetrieb, fallen die Kosten für die Netzinfrastruktur, d.h. Glasfasern und Endgeräte, ständig. Abb. 5.2 zeigt als Beispiel die erforderlichen Investitionen für eine Transatlantik-Verbindung mit einer Datenrate von 155 Mbit/s, die innerhalb der letzten 10 Jahre um mehr als den Faktor 10 gefallen sind. So stellt das GEMINI-Netz eine Verbindung mit einer Datenrate von 20 Gbit/s zwischen London und New York bereit. Teilstrecken arbeiten im Wellenlängenmultiplexbetrieb mit 8 Kanälen zu je 2,5 Gbit/s. Das gerade im Aufbau befindliche weltumspannende Unterwassernetz (SEA-ME-WE 3) wird ebenfalls mit 8 Wellenlängen arbeiten und 40 Stationen von Australien und Japan über den Mittleren Osten bis nach Nordeuropa verbinden.

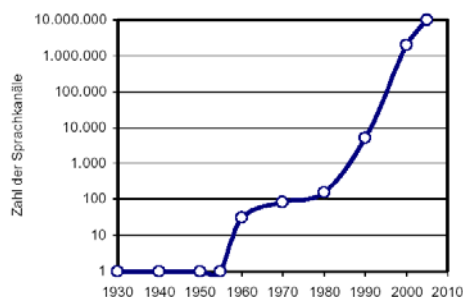


Abb. 5.3: Entwicklung der Übertragungskapazität eines Kabels gemessen in Sprachkanälen

Abb. 5.3 zeigt, wie die Gesamtübertragungsrate pro Kabel (gemessen in Sprachkanälen) zugenommen hat. 1950 erfolgte der erste Technologiesprung mit der Einführung des analogen elektrischen Frequenzmultiplexverfahrens auf Kupfer-Koaxialleitungen. Diese Technik wurde ca. 30 Jahre später von digitalen optischen Verfahren abgelöst, die in den letzten Jahren durch Wellenlängenmultiplexbetrieb und den Einsatz von optischen Verstärkern eine starke Kapazitätserhöhung ermöglichten. So stieg die Kapazität von 1988 bis 1998 um den Faktor 64. Nur durch diesen enormen technischen Fortschritt ist es möglich, dass es im Internet gleichviel kostet, ob man eine am Heimatort gespeicherte Internet-Seite abrufen, oder eine, die sich auf einem Rechner in den USA befindet.