Signalausbreitung in Glasfasern

Autor(en): **Weber, H. P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 15

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905401

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Signalausbreitung in Glasfasern

Von H. P. Weber

535.3 : 621.391.63 : 681.7.068;

Optische Glasfaserwellenleiter funktionieren auf dem Prinzip der totalen inneren Reflexion. Das Zustandekommen der Moden und deren Eigenschaften wird hergeleitet. Die verschiedenen Beiträge zur Pulsverformung bei Signalübertragung in Monomode- und Multimodefibern werden diskutiert, unter spezieller Berücksichtigung der Fibern mit graduiertem Indexprofil. Zusätzliche Effekte, die bei hohen Leistungen auftreten können, werden erwähnt.

Les guides d'onde optique en fibre de verre fonctionnent selon le principe de la réflexion interne totale. La réalisation des modes et leurs propriétés sont exposées. Les diverses contributions à la déformation des impulsions lors de la transmission des signaux dans des fibres monomodes ou multimodes sont discutées, en considérant plus particulièrement les fibres à gradient d'indice. Des effets supplémentaires, qui peuvent se présenter dans le cas de grandes puissances, sont mentionnés.

1. Einleitung

Die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung wie Radio-, UKW oder Mikrowellen im Raum wird in der Elektrotechnik schon lange untersucht; sie wird beschrieben durch die Maxwellgleichungen, deren Lösungen für einfachere Verhältnisse bekannt sind. Es ist auch aus der Mikrowellentechnik geläufig, wie elektromagnetische Strahlung in Wellenleitern geführt werden kann.

Mit der Feststellung, dass Licht auch elektromagnetische Strahlung ist, allerdings von weit höherer Frequenz (10^{14} Hz), kommt man der Problematik der Signalausbreitung in Glasfasern schon recht nahe. Es ist aber nicht nur der Faktor 10^4 in der Frequenz bzw. der Wellenlänge der Strahlung, den man als Unterschied erkennen muss, sondern es müssen neue, der Elektrotechnik ungewohnte Elemente für Sender und Empfänger verwendet werden. Auch in bezug auf das Übertragungssystem gibt es neuartige Aspekte, auf die hier eingegangen werden soll.

2. Das Ausbreitungsmedium

Der in der Mikrowellentechnik beschrittene Weg, elektromagnetische Strahlung in hohlen Metall-Wellenleitern, die eine Querdimension in der Grössenordnung der Wellenlänge besitzen, zu führen, versagt für die Optik. Einerseits führen die benötigten Toleranzen der Herstellung der Wellenleiter in einen Bereich (10^{-5} mm), der in der Fabrikationstechnik nicht beherrscht wird; anderseits ist die Reflexion von Metallen im optischen Bereich nicht mehr «verlustlos». Dies fällt umso mehr ins Gewicht, als für eine vorgegebene Übertragungsstrecke auch in demselben Mass, wie die Frequenz ansteigt ($\approx 10^4$), mehr Reflexionen im Wellenleiter nötig sind. Da andere Medien mit totaler äusserer Reflexion nicht existieren, wurden dielektrische Materialien (durchsichtige feste Körper oder Flüssigkeiten) verwendet. Dank intensiver Forschung ist es gelungen, die Transmissionsverluste von Gläsern bis auf weniger als 1 dB/km zu senken. Der wesentlichste Unterschied zu Vakuum ist der, dass sich Licht in Medien nicht mit der Lichtgeschwindigkeit c, sondern mit der Phasengeschwindigkeit $v = c/n$ fortpflanzt, wobei n der Brechungsindex des Dielektrikums ist (n für Quarzglas ≈ 1.47). Da der Brechungsindex $n(\lambda)$ wellenlängenabhängig ist, wird sich ein Lichtpuls mit der Gruppengeschwindigkeit $v_g = c/m(\lambda)$, mit $m = n(\lambda) - \lambda \cdot dn/d\lambda$ fortpflanzen.

Vortrag, gehalten an der SEV-Informationstagung über «Informationsübertragung mit Glasfasern», am 13. Juni 1979 in Bern.

3. Totalreflexion in dielektrischen Medien

Anstelle der fast totalen äusseren Reflexion an Metalloberflächen wird die totale innere Reflexion, die an der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit verschiedenen Brechungsindizes auftreten kann, verwendet. Fig. 1 illustriert das optische Phänomen der Brechung, die beim Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium zum anderen auftritt. Die formelmässige Beschreibung des Brechungsgesetzes lautet:

$$n_s \sin\alpha = n_f \sin\Theta$$

Beim Durchgang vom optisch dünneren (n_s) zum optisch dichteren Medium ($n_f > n_s$) wird ein Lichtstrahl dem Lot zugebrochen. In umgekehrter Richtung, für einen Strahl, der sich anfänglich im optisch dichteren Medium bewegt, gibt es für grösser werdende Winkel Θ einen Grenzwert, über dem für das Brechungsgesetz keine Lösung mehr existiert. Den Grenzwinkel Θ_c kann man aus der Relation $\sin\Theta_c = n_s/n_f$ berechnen. Für grössere Winkel Θ wird der Lichtstrahl in seiner totalen Intensität reflektiert.

4. Dielektrische Wellenleiter

Es soll im folgenden ein ebener (schichtförmiger) Wellenleiter betrachtet werden (Fig. 2); Lichtleitung in Glasfasern spielt sich analog ab, ist jedoch mathematisch komplizierter zu beschreiben. Ein Lichtstrahl läuft auf einem Zick-Zack-Weg entlang der Wellenleiterachse. Die Lichtstrahlen werden an den Grenzflächen total reflektiert. Sie können allerdings nicht im ganzen Bereich $\Theta > \Theta_c$ beliebig auf die Trennfläche auftreffen. Ein Fortpflanzen der Strahlen in einem solchen Wellenleiter ist nur bei konstruktiver Interferenz nach einem kompletten Zick-Zack-Weg möglich. In Formeln ausgedrückt heisst das:

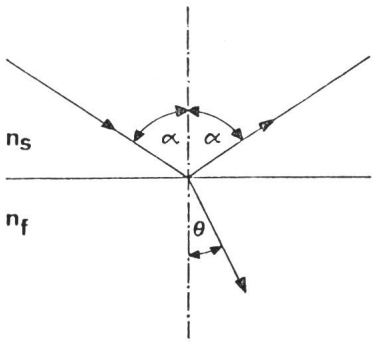

Fig. 1 Brechung von Licht beim Übergang zwischen Medien mit verschiedenem Brechungsindex n

$$\frac{4\pi}{\lambda} d\, n_f \cdot \cos\Theta - 2\,\Phi = \pi\, \nu \qquad (\nu \text{ ganze Zahl})$$

wobei die Phasenverschiebung Φ für senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht gegeben ist durch

$$\mathrm{tg}\Phi = \left[(N^2 - n_s^2)/(n_f^2 - N^2)\right]^{\frac{1}{2}}$$

mit $N = n_f \cdot \sin\Theta$

Die Lösungen dieser transzendenten Zusammenhänge können nur numerisch ermittelt werden. Dazu lässt sich folgendes sagen:

– Es existiert nur eine kleine endliche Zahl von Lösungen. Jeder Lösung entspricht ein Mode.

– Es gibt immer mindestens einen Mode für jede der beiden Polarisationsrichtungen.

– Je grösser d um so mehr Moden können existieren.

– Alle Moden haben eine voneinander verschiedene Phasengeschwindigkeit $v = c/N$. Es gilt dabei immer $n_f > N > n_s$.

Für Fibern gilt genau dasselbe. Bemerkenswert ist ferner, dass, da N vom Verhältnis d/λ abhängt, N ebenfalls wellenlängenabhängig ist, auch wenn Materialien mit wellenlängenunabhängigen Brechungsindizes verwendet werden könnten.

Die Struktur einer Fiber ist in Fig. 3 angegeben. Typische technische Daten für Glasfasern lauten:
$n_f - n_s \approx 10^{-3}...10^{-2}$. Für Singlemode Fibern beträgt der Durchmesser der Zentralregion (Core) etwa 3...5 µm, für Multimode Fibern beispielsweise 50 µm.

Soll Licht in eine Glasfiber gekoppelt werden, so ist zu beachten, dass eine Singlemode Fiber nur das Licht einer Singlemode-Lichtquelle aufnehmen kann. Typische Kopplungsgrade liegen bei 80%. Man beachte, dass es keine optischen Tricks, wie z.B. Ausbau von Tapern [5] gibt, die eine effiziente Einkopplung von Multimode-Strahlung in eine Singlemode Fiber erlauben. Dagegen kann Singlemode-Strahlung wie auch Multimode-Strahlung in eine Multimode Fiber eingeführt werden. Multimode Fibern akzeptieren Licht aus einem ganzen Kegel wie Fig. 3 zeigt. Der halbe Öffnungswinkel δ_c ist gegeben durch den inneren kritischen Grenzwinkel und ermittelt sich aus der Beziehung $\cos\delta_c = n_s/n_f$. Die Brechung am Fiberende ist in dieser Gleichung vernachlässigt.

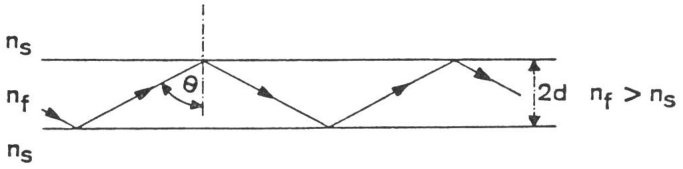

Fig. 2 Schichtförmiger Wellenleiter mit Zick-Zack-Weg eines Lichtstrahls

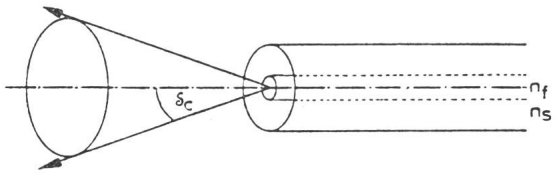

Fig. 3 Struktur eines Glasfiberlichtleiters
Für Multimode-Fibern ist die numerische Apertur gegeben durch $A = \sin\delta_c$, wobei δ_c der kritische Winkel für totale innere Reflexion ist

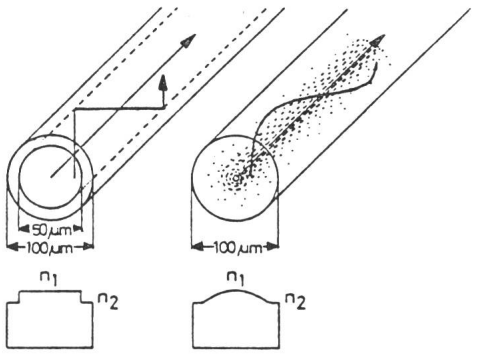

Fig. 4 Fortpflanzung von Licht in einer Stepindexfiber (links) und einer Fiber mit graduiertem Brechungsindexprofil

5. Verluste in Glasfibern

Durch grosse technologische Anstrengungen konnten die Dämpfungsverluste in Glasfibern auf Werte von weniger als 1 dB/km für Multimode Fibern reduziert werden. Die Verluste sind auf zwei Ursachen zurückzuführen: Die *Absorption* rührt von Verunreinigungen im Glas, in erster Linie von Metallionen, her. Die Streuung rührt, ähnlich wie Streuung im Nebeldunst, von Dichtevariationen im Glas her; in diesem Fall, da die Störungen kleinere Dimensionen besitzen als die Wellenlänge λ, wird sie Rayleighstreuung genannt. Die Stärke dieser Streuung hängt vom Herstellungsverfahren ab. Generell gilt, dass sie mit zunehmender Wellenlänge proportional zu λ^{-4} abnimmt; daher betreibt man Glasfibern vorzugsweise im nahen Infrarot und nicht im sichtbaren Bereich des optischen Spektrums. Die erwähnten niedrigsten Abschwächungen sind bei 1,06 µm und bei 1,3 µm gemessen worden.

6. Dispersion in Fibern

Die Phasengeschwindigkeiten in Gläsern sind wellenlängenabhängig. Im weiteren wurde erwähnt, dass auch der Fiberphasenindex N allein von der Struktur des Wellenleiters her wellenlängenabhängig ist. Diese beiden Effekte spielen eine Rolle für Singlemode Fibern. Soll ein Lichtpuls unverzerrt eine Glasfaser durchlaufen, so muss die Gruppengeschwindigkeit über den ganzen spektralen Bereich des Pulses konstant sein. Dies ist nur möglich, falls die zweite Ableitung $d^2 N/d\,\lambda^2$ verschwindet. Diese Grösse kann für $\lambda = 1{,}3$ µm gleich null gemacht werden. Daher existiert heute grosses Interesse für Lichtquellen bei dieser Wellenlänge, umso mehr als dort auch die Dämpfung sehr klein ist.

Gegenwärtig beschäftigt man sich jedoch für praktische Verwendung fast ausschliesslich mit Multimode Fibern, besonders weil die Kopplung von derartigen Fibern weniger Schwierigkeiten bereitet. Für diese Fibern ist der Bereich der Phasengeschwindigkeiten, der von c/n_f bis c/n_s reicht, massgebend für die Dispersion. Für typische Step-Index Fibern, bei denen der innere Teil einen konstanten Brechungsindex besitzt, ist die Pulsverbreiterung von der Grössenordnung 100 ns/km. Um diese Multimode Dispersionseffekte zu reduzieren, werden Fibern mit graduiertem Brechungsindex-Profil verwendet, was zu einer Reduktion der Verbreiterung um zwei Grössenordnungen führt. Wie in Fig. 4 dargestellt, bewegen sich dort die Lichtstrahlen eher schlangenförmig statt zickzack-artig entlang der Fiberachse.

7. Optische Nichtlinearitäten

Bei Lichtleistungen in Glasfibern, die im Bereich von mehr als etwa 10 mW pro μm^2 liegen, verhält sich die Glasfiber nicht mehr passiv gegenüber dem eingestrahlten Licht, sie wird selbst zu Schwingungen angeregt, die Rückwirkungen auf das Lichtsignal haben. Es treten Intermodulationen im zu übertragenden Lichtsignal auf (sog. 4-wave-mixing). Eine spektrale Verbreiterung des Signales ist die Folge, die ihrerseits zu Pulsverformungen führt wegen der Dispersion. Für schmalbandige Lichtsignale kann sich sogar eine akustische Welle aufbauen, die das Lichtsignal frequenzverschoben zum Sender zurück reflektieren kann (sog. stimulierte Brillouinstreuung).

Literatur

[1] *H.G. Unger:* Optische Nachrichtentechnik. Berlin, Elitera-Verlag, 1976.
[2] *N.S. Kapany* and *J.J. Burke:* Optical waveguides. New York/London, Academic Press, 1972.
[3] *D. Marcuse:* Light transmission optics. New York a.o., Van Nostrand, 1972.
[4] *D. Marcuse:* Theory of dielectric optical waveguides. New York/London, Academic Press, 1974.

Adresse des Autors

Prof. Dr. *H.P. Weber*, Institut für angewandte Physik, Universität Bern, Sidlerstrasse 5, 3012 Bern.

Glasfaserkommunikation: Einführende Übersicht, Stand der Entwicklung

Von H. Melchior

621.391.63:681.7.068;

1. Einleitung

Die wachsende Nachfrage nach Sprach-, Ton-, Fernseh- und Bildübermittlung wie auch das Aufkommen der digitalen Signalübertragung über kurze und lange Distanzen bieten der Nachrichtentechnik stete Anstösse zur Entwicklung und Verbesserung neuer Kommunikationsmittel. Die Realisierung des ersten Lasers im Jahre 1960 wurde auch gleich als bedeutsam für die Übermittlung von Nachrichten auf optischem Wege erkannt. Lasersignale lassen sich wohl direkt durch die Atmosphäre übertragen, doch stellen sich einer zuverlässigen Übertragung witterungsbedingte Probleme entgegen. Auf der Suche nach einem umweltsunempfindlichen Medium für die Übertragung von optischen Signalen über grössere Distanzen machten *Kao* und *Hockham* [1] 1966 in England den Vorschlag, Glasfasern zu verwenden. Das Funktionsprinzip der Glasfaser-Lichtwellenleiter, d.h. die Fortführung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Kern eines dielektrischen Leiters war schon seit den Arbeiten von *Hondros* und *Debye* [2] aus dem Jahre 1910 bekannt. Die optischen Dämpfungsverluste von Glas- und Kunststoffasern überstiegen aber 1966 noch Werte von 1000 dB/km. Einer gezielten Eliminierung der Glasverunreinigungen bis zu weniger als einem Fremdatom auf eine Million Glasmoleküle und verbesserten Faserherstellungsmethoden ist es zu verdanken, dass 1970 [3] der technologische Durchbruch zu praktisch brauchbaren Fasern mit Dämpfungsverlusten von weniger als 20 dB/km gelungen ist. In der Folge setzte eine breite Entwicklung der Glasfasertechnologie ein mit dem Resultat, dass heute Glasfasern und Glasfaserkabel mit Dämpfungsverlusten von nur wenigen dB/km erhältlich sind [5; 6; 7] (Fig. 1).

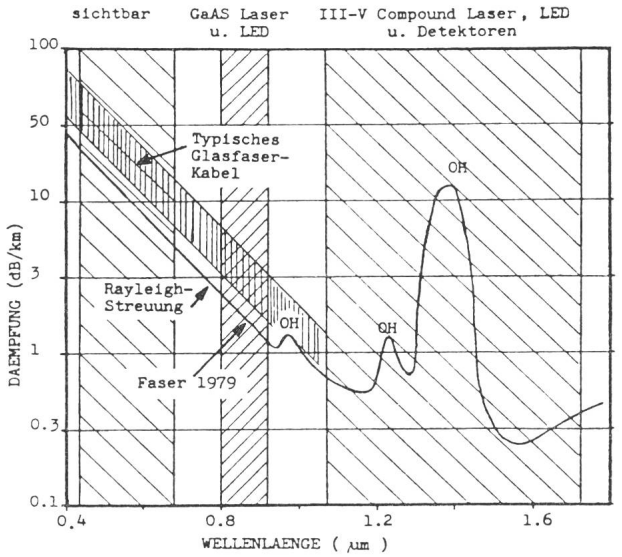

Fig. 1 Optische Dämpfung von Glasfaser-Lichtwellenleitern

Dämpfungsverluste als Funktion der Wellenlänge für beste Fasern (1979, NTT Japan, Kern 9,4 µm, Mantel 125 µm, Δn = 0,19%, Dispersion 17 ps/km+ns bei 1,35 µm [4]) und für typische Kabel (gestrichelte Kurve). Neben dem sichtbaren Spektralbereich sind die Emissionswellenlängen sowohl der GaAs-LED und -Laser bei 0,8–0,9 µm als auch der zukünftigen III-V-Laser, LED und Detektoren bei 1,2...1,6 µm angedeutet.

Als weitere grundlegende Entwicklung hat die Realisierung von kompakten, einfach modulierbaren Halbleiterdiodenlasern und Lichtemissionsdioden Wesentliches zur praktischen Brauchbarkeit der Glasfaserkommunikation beigetragen. Nachdem anfangs der sechziger Jahre im Gallium-Arsenid ein Halbleitermaterial mit effizienter Lichtemission gefunden wurde, konnten die ersten Halbleiterlaser aus diesem Material nach etlichen technologischen Anstrengungen im Jahre 1970 zur kontinuierlichen Lichtemission bei Zimmertemperatur gebracht werden [8; 9]. Diese anfänglich recht diffizilen Halbleiterlaser und die etwas einfacher gebauten Lichtemissionsdioden [10] sind heute weit entwickelt [11; 12] und auf dem besten Wege, als zuverlässige Lichtquellen (Fig. 2) praktisch eingesetzt zu werden. Diese Halbleiterlichtquellen sind, wenn die heute üblichen Preise dies auch noch nicht zeigen, potentiell billig herzustellen.

Mittels Glasfasern, Halbleiterlichtquellen und Photodetektoren [13] sind eine Vielzahl von experimentellen optischen Übermittlungssystemen aufgebaut und in verschiedensten Anwendungen ausgetestet worden [14...18]. Dabei wurde der

Vortrag, gehalten an der SEV-Informationstagung über «Informationsübertragung mit Glasfasern» am 13. Juni 1979 in Bern.