

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 15

Artikel: Digitale faseroptische Kommunikation

Autor: Leuthold, P. / Heinzmann, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903890>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Digitale faseroptische Kommunikation

P. Leuthold und P. Heinzmann

Die Singlemode-Glasfaser stellt das universelle Übertragungsmedium zukünftiger Kommunikationssysteme dar. Dieser Aufsatz beschreibt ihre wichtigsten Eigenschaften im Hinblick auf die digitale Signalübertragung und zeigt die Grenzen auf, die für die pulsförmige Modulation der Lichtintensität und für die Modulation des Lichtfeldes bei kohärenter Detektion zu erwarten sind. Dabei spielt das Verhalten der Lichtquellen sowie der Photodetektoren eine bedeutsame Rolle. Eine Übersicht über die heute bereits im Einsatz stehenden digitalen optischen Übertragungssysteme mit Singlemode-Fasern liefert Anhaltspunkte für die weitere Entwicklung.

La fibre de verre monomode est le moyen de transmission universel pour futurs systèmes de communication. L'article décrit ses propriétés les plus importantes du point de vue de la transmission numérique de signaux et indique leurs limites, auxquelles il y a lieu de s'attendre pour la modulation impulsionnelle de l'intensité de la lumière et de la modulation du champ lumineux, lors de détection cohérente. Le comportement des sources de lumière et celui des photodétecteurs jouent un rôle important. Un aperçu des systèmes de transmission optiques, numériques, déjà en service, avec fibre de verre monomode, donne des indications sur leur développement.

Adresse der Autoren

Prof. Dr. Peter Leuthold und dipl. El.-Ing. ETH Peter Heinzmann, Institut für Kommunikationstechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

1. Einführung

Die moderne Gesellschaft benötigt in zunehmendem Masse leistungsfähige Kommunikationssysteme. Ein erster Schritt zu deren Realisierung war die Einführung hochintegrierter Halbleiterschaltungen, welche Ende der 60er Jahre die Entwicklung von der analogen zur digitalen Übertragung eingeleitet hat. Der Engpass lag damit eindeutig beim Übertragungsmedium, das in Form der üblichen elektrischen Leiter nur eine relativ hohe Dämpfung und bescheidene Bandbreite anbieten konnte (Tab. I). Der Durchbruch bei Corning Glass im Jahre 1970 bei der Produktion dämpfungsarmer Glasfasern kam gerade rechtzeitig, um auch hier die notwendige Kapazität zur Verfügung zu stellen. Ohne Glasfasern wären z.B. die heutigen Projekte für die Installation eines flächendeckenden Breitband-ISDN (Integrated Services Digital Network) im Verlaufe der nächsten 30 bis 40 Jahre undenkbar.

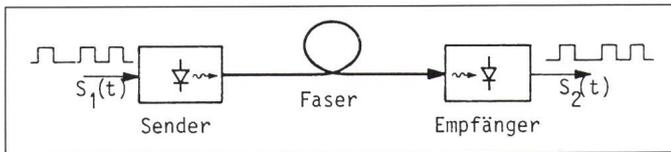
Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass Glasfasern nicht nur die Übertragung von Lichtimpulsfolgen

und somit von digitalen Signalen erlauben, sondern auch die Weiterleitung von Lichtsignalen mit analog variierender Intensität, wobei allerdings sehr auf eine ausreichende Linearität der optoelektrischen Wandler geachtet werden muss. Diese Forderung sowie die Gewährleistung der Kompatibilität mit bestehenden Digitalsystemen haben zur Folge, dass heute praktisch ausschliesslich digitale faseroptische Übertragungssysteme verwendet und entwickelt werden.

Figur 1 zeigt das Blockschema eines digitalen faseroptischen Übertragungssystems. Das informationstragende digitale Eingangssignal $s_1(t)$ wird mit Hilfe eines elektrooptischen Wandlers in Form einer Laserdiode (LD) oder lichtemittierenden Diode (LED) in ein entsprechendes Lichtsignal umgesetzt und auf die Glasfaser gebracht. Auf der Empfangsseite wandeln Photodetektoren, nämlich PIN-Photodioden (PIN) oder Avalanche-Photodioden (APD), das empfangene Licht in ein elektrisches Ausgangssignal $s_2(t)$ um, das mit dem ursprünglichen Signal $s_1(t)$ weitgehend überein-

Leitungstyp	Frequenzbereich bzw. Wellenlänge	Dämpfung (dB/km)	3-dB-Bandbreite [MHz]
Zweidrahtleitung (Twisted Pair) 22-Ga	1 kHz...1 MHz	5...15	≈ 0,5
7/8"-Koaxialkabel	1 MHz...1 GHz	2...30	≈ 10
2"-Hohlleiter (Kreisquerschnitt, TE ₀₁)	10 GHz...100 GHz	2	≈ 10 ⁵ (Dispersion: ≈ 0,1 ns/km · GHz)
Singlemode-Glasfaser	1,5 μm	0,2	≈ 50 · 10 ⁶ (Dispersion: < 0,2 ps/km · GHz)

Tabelle I Vergleich der Dämpfung und der Bandbreite verschiedener Leitungstypen



Figur 1
Blackschema eines
digitalen
faseroptischen
Übertragungssystems

stimmt. Allfällige Abweichungen bzw. Fehler sind auf Störungen im Sender, Empfänger und zu einem geringen Teil auf der Übertragungsstrecke zurückzuführen. Bei gegebener Bitrate und Faserlänge spielt denn auch die Bitfehlerrate (Bit Error Rate, BER) eine bedeutsame Rolle zur Beschreibung der Systemsqualität.

Aus Figur 2 geht die enorme Entwicklung der Kapazität digitaler faseroptischer Übertragungssysteme in den letzten 12 Jahren hervor. Ursache dafür bildet die weitere Verringerung der Dämpfung sowie die inzwischen erzielte Reduktion der Dispersion bzw. der Verbreiterung der Lichtimpulse längs der Faser durch Massnahmen an der Lichtquelle und an der Faserstruktur. Insbesondere die Singlemode-Faser vermeidet die bei den Multimode-Fasern auftretende Modendispersion, die durch eine Überlagerung mehrerer Wellentypen mit unterschiedlicher Laufzeit zustande kommt. In ähnlicher Weise wirkt sich der Einsatz von Lasern mit geringerer spektraler Linienbreite aus. Ein weiterer Schritt nach vorne zeichnet sich mit dem Einsatz der kohärenten optischen Übertragung ab.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf optische Übertragungssysteme mit Singlemode(SM)-Fasern, da Multimode(MM)-Fasern zufolge ihrer vergleichsweise ungünstigen Eigenschaften für nachrichtentechnische Anwendungen weitgehend verschwinden dürften. Zunächst wird auf die SM-Faser als Übertragungsmedium näher eingegangen. Hernach erfolgt eine kurze Beschreibung der Signalaufbereitung im Sender und Empfänger sowie eine Betrachtung der Leistungsverhältnisse, die eine ausreichend sichere Übertragung gewährleisten. In einem weiteren Kapitel wird die kohärente digitale Übertragung behandelt, die zwar heute erst Gegenstand von Forschungsarbeiten darstellt, jedoch ein grosses Anwendungspotential für die Zukunft beinhaltet. Abschliessend werden Hinweise auf aktuelle und zukünftige Anwendungen faseroptischer Kommunikationssysteme gegeben.

2. Digitale optische Übertragung auf Singlemode-Fasern

2.1 Die SM-Faser als Übertragungsmedium

Übliche SM-Fasern bestehen aus einem Kern von 5 bis 10 μm Durchmesser und einem Mantel, der einen Aussendurchmesser von 125 μm aufweist. Der Brechungsindex n_1 des Kerns ist etwas grösser (etwa 0,4%) als der Brechungsindex n_2 des Mantels. Diese geringe Differenz und der kleine Kerndurchmesser sorgen dafür, dass sich im genutzten Wellenlängenbereich nur ein einziger Wellentyp, näm-

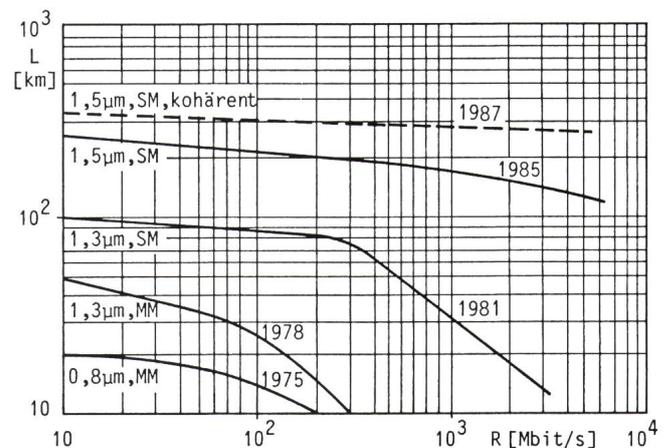
lich der Grundmodus ausbreitet (Singlemode).

In Figur 3 ist der Verlauf der Dämpfung A als Funktion der Wellenlänge festgehalten. Das Minimum liegt bei ungefähr 1550 nm und beträgt dort 0,2 dB/km. Das üblicherweise auftretende relative Dämpfungsmaximum bei 1390 nm wird durch im Material eingelagerte OH-Ionen verursacht. Eine weitere generelle Absenkung der Dämpfungswerte für Fasern auf der Basis von SiO_2 -Gläsern ist nicht zu erwarten, weil im Bereich von 1200 bis 1600 nm die Grenze des sog. Rayleigh-Scattering – ein molekularer Streueffekt – nahezu erreicht wird und ab 1600 nm die sog. Infrarot-Absorption einsetzt.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wirkt sich auch die Dispersion als kapazitätsbegrenzender Faktor einer faseroptischen Übertragungsstrecke aus und zwar erwartungsgemäss bei hohen Bitraten ab etwa 1 Gbit/s, wo zufolge der Impulsverbreiterung ein Übersprechen auftritt

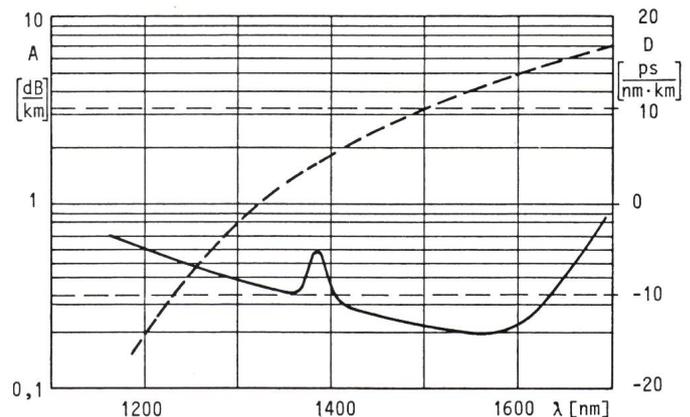
Figur 2
Entwicklung der
Kapazität
faseroptischer
Übertragungssysteme

L Faserlänge
 R Bitrate
MM Multimode-Faser
SM Singlemode-Faser



Figur 3
Dämpfung A und
Dispersion D einer
Singlemode-Faser

— Dämpfung
- - - Dispersion



(Intersymbol Interference). Die Dispersion D einer SM-Faser, definiert als Pulsverbreiterung pro spektrale Breite des emittierten Lichts und pro Länge der Faser, setzt sich aus zwei wesentlichen Komponenten zusammen, der *Wellenleiterdispersion* und der *Materialdispersion*. Letztere ist durch den wellenlängenabhängigen Brechungsindex bedingt. Die Wellenleiterdispersion lässt sich auf den Umstand zurückführen, dass doch etwa 20% der Energie der Lichtwelle im Mantel der SM-Faser voranschreitet. Die Differenz der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kern und im Mantel, bedingt durch die leicht voneinander abweichenden Brechungsindizes n_1 und n_2 , führt zu einer wellenlängenabhängigen Gruppenlaufzeit, die ebenfalls eine Beeinflussung der Impulsbreite bewirkt. Material- und Wellenleiterdispersion können unterschiedliche Vorzeichen haben und sich gegenseitig kompensieren. So zeigen z. B. gewöhnliche, mit Germanium dotierte SiO_2 -SM-Fasern eine Nullstelle der Dispersion bei 1330 nm (Fig. 3). Dies ist mit ein Grund, warum man solche Fasern bei 1330 nm betreibt, obwohl die Dämpfung bei 1550 nm kleiner wäre. Selbst bei Verwendung relativ breitbandiger Lichtquellen, insbesondere auch von LED, hält sich dann die Dispersion in tolerierbaren Grenzen.

Bestrebungen sind im Gange, SM-Fasern zu entwickeln, die bei 1550 nm, d. h. also an der Stelle des Dämpfungsminimums, eine minimale Dispersion aufweisen. Dies ist möglich, indem man mittels komplizierter Brechungsindexprofile die Wellenleiterdispersion entsprechend verändert¹ [1]. Im Hinblick auf die später noch zu beschreibende kohärente Übertragung wäre es auch wünschenswert, SM-Fasern zu haben, die eine bestimmte Polarisationsrichtung des eingekoppelten Lichtfeldes beibehalten. Hierzu sind Brechungsindexprofile notwendig, die keine zirkulare Symmetrie mehr aufweisen [2]. Es versteht sich von selbst, dass die Herstellung von SM-Fasern mit solchen Spezialprofilen erheblich teurer und damit weniger attraktiv ist.

¹ Siehe dazu auch Beitrag G. Kotrotsios und O. Parriaux «Un outil de CAD pour fibres optiques monomodes» in diesem Heft S. 921.

Modulationsart	Träger	Verfahren
Intensitätsmodulation a. Pulsmodulation b. Sinusträgermodulation	Lichtleistung	Binäre PAM, Multilevel PAM ASK, PSK, FSK usw.
Lichtträgermodulation (kohärent)	Lichtfeldstärke	ASK, PSK, FSK usw.

Tabelle II Digitale optische Modulationsarten

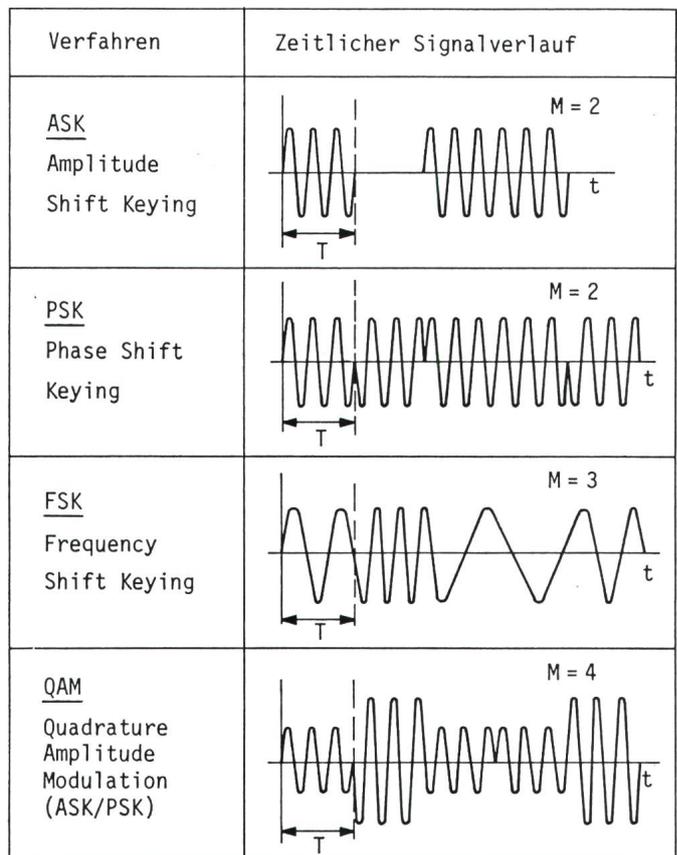
2.2 Signalaufbereitung im optischen Sender und Empfänger

Einleitend sei festgehalten, dass das informationstragende Signal den Lichtwellen in unterschiedlicher Weise aufgeprägt werden kann. Gemäss Tabelle II ist grundsätzlich zwischen der sogenannten Intensitätsmodulation und der Lichtträgermodulation mit kohärenter Demodulation zu unterscheiden. Bei der letzteren, welche genügend schmalbandiges Licht voraussetzt, werden unmittelbar die Parameter Amplitude, Phase oder Frequenz des Lichtfeldes zeitlich verändert. Unter Intensitätsmodulation versteht man hingegen die pulsförmige Variation der momentanen Lichtleistung

oder die zeitliche Veränderung der Parameter Amplitude, Phase oder Frequenz eines sinusförmigen Trägers, dargestellt durch eine entsprechend verlaufende momentane Lichtleistung. Die Fig. 4 zeigt mögliche Signalformen bei digitaler Parametervariation. Auf der Ordinate hat man sich entweder die Feldstärke des Lichtes oder die Lichtleistung bzw. Lichtintensität vorzustellen, wobei im letzteren Fall natürlich nur positive Werte in Frage kommen (Zusatz eines Mittelwertes).

Von grosser praktischer Bedeutung ist die digitale *Pulsmodulation* der Lichtintensität, die man übrigens auch als Spezialfall der Lichtträgermodulation (ASK), aber ohne kohärente Detektion, interpretieren kann. Dank ih-

Figur 4 Signalverläufe bei digitaler Modulation



rer Einfachheit hat die binäre Pulsamplitudenmodulation, d. h. das Ein- und Ausschalten einer Lichtquelle, weite Verbreitung gefunden. Die Verwendung von Impulsen mit mehreren Leistungsniveaus kommt ebenfalls in Frage, stellt aber bereits gewisse Anforderungen an die Linearität des Übertragungssystems und soll hier nicht weiter verfolgt werden.

Wie bereits erwähnt, führen die Dämpfung der Faser und bei höheren Bitraten zusätzlich die Dispersion zu einer Begrenzung der ohne Repeater überbrückbaren Strecke, weil sich am Empfängereingang das Nutzsignal aus dem stets vorhandenen Rauschen genügend abheben muss und zudem die gegenseitige Beeinflussung aufeinanderfolgender Pulse ein gewisses Mass nicht überschreiten darf.

Bekanntlich wird die übertragene Leistung P_2 mit wachsender Länge l der Faser exponentiell gedämpft. Mit der Sendeleistung P_1 und der Dämpfungskonstanten A [dB/km] findet man den einfachen Zusammenhang

$$\frac{P_2}{P_1} \text{ [dB]} = -Al \text{ [km]} \quad (1)$$

Der Photodetektor auf der Empfangsseite benötigt einen minimalen Leistungspegel P_s , um das Nutzsignal mit einer annehmbaren Fehlerrate extrahieren zu können. Die Grösse P_s wird als *Detektorsensitivität* bezeichnet. Unter Vernachlässigung einer allfälligen Dispersion folgt die maximale Übertragungsstrecke aus (1) zu

$$l_{\max} \text{ [km]} = \frac{1}{A} \left(\frac{P_1}{P_s} \text{ [dB]} \right) \quad (2)$$

Mit der minimalen Dämpfung $A = 0,2$ dB/km und dem typischen Verhältnis $P_1/P_s \approx 10^4$ ergibt sich also die Faserlänge $l_{\max} = 200$ km. Aus (2) erkennt man leicht, dass die Reichweite l_{\max} sehr stark – nämlich umgekehrt proportional – von der Dämpfungskonstanten abhängt und nur relativ wenig durch das Verhältnis P_1/P_s beeinflusst wird. So bewirkt z. B. eine Verdoppelung der Sendeleistung lediglich eine Verlängerung der überbrückbaren Strecke von 200 km auf 215 km. Es kommt daher nicht von ungefähr, dass man die minimale Dämpfung bei 1550 nm auszunützen versucht und die damit verbundene anspruchsvollere Technologie der elektrooptischen Komponenten in Kauf nimmt.

Auf der Senderseite werden *Laserdioden* (LD) oder *lichtemittierende Dioden* (LED) verwendet [3]. Beide Elemente besitzen ausreichend kleine lichtemittierende Flächen im Hinblick auf die Faserankopplung, haben bescheidene Verlustleistung (typisch 100 mW) und lassen eine Modulation durch Variation des Arbeitspunktstromes zu. Die im allgemeinen wesentlich teurere LD weist jedoch gegenüber der LED den Vorteil auf, dass zufolge einer geringeren spektralen Linienbreite und damit kleinerer Dispersion höhere Übertragungsgeschwindigkeiten (> 4 Gbit/s) erreicht werden können und dass eine effizientere Einkopplung des Lichtes in die SM-Faser möglich ist. Interessanterweise gilt unabhängig von der Laserstruktur die Faustregel, dass praktisch alle für die Glasfaserübertragung eingesetzten LD eine optische Sendeleistung $P_1 \approx 1$ mW in die Faser einprägen.

Als Photodetektoren kommen PIN-Photodioden (PIN) oder Avalanche-Photodioden (APD) zum Einsatz [3]. Letztere sind zwar teurer, aber dafür empfindlicher und eignen sich für Systeme mit hoher Bitrate ($> 0,5$ Gbit/s). Die heute bekannten, besten Photodetektoren im Wellenlängenbereich von 800 nm bis 1600 nm benötigen bei einer Bitrate R zwischen 10 Mbit/s und 2 Gbit/s einen Photonenfluss von 300 bis 1000 Photonen pro Bit. Daraus lässt sich mit der Photonenenergie $h\nu$ (h Plancksche Konstante, ν Frequenz) die Detektorsensitivität bestimmen:

$$P_s \approx 2R \cdot 10^{-16} \text{ [W]} \quad (3)$$

Aus (2) und der Sendeleistung $P_1 \approx 1$ mW erhält man die maximale Faserlänge in Abhängigkeit von der Bitrate:

$$l_{\max} \text{ [km]} = \frac{1}{A} [130 - 10 \cdot 10^3 \log 2R] \quad (4)$$

Die in Figur 2 eingetragene Kurve für 1,5 μm , SM (1985), entspricht der Beziehung (4) mit einer Dämpfungskonstante von $A = 0,23$ dB/km.

Die Dispersion D der SM-Fasern wirkt sich erst bei sehr hohen Bitraten R aus. Als grobe Abschätzung kann man sagen, dass eine zeitliche Verbreiterung bis zur halben Symboldauer toleriert werden kann. Mit der spektralen Breite $\Delta\lambda$ des Laserlichts ergibt sich für eine Faser der Länge l die Ungleichung

$$D \cdot l \cdot \Delta\lambda \leq 1/2 R \quad (5)$$

Das Spektrum einer konventionellen LD im 1,3- μm - oder 1,5- μm -Bereich belegt etwa 3 nm. Mit $D = 10 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ bei etwa 1500 nm (Fig. 3) findet man den Grenzwert

$$(R \cdot l)_{\max} = 17 \text{ Gbit s}^{-1} \text{ km} \quad (6)$$

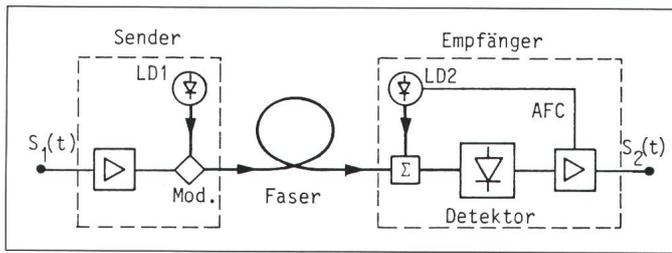
Ein Vergleich mit der Kurve 1,5 μm , SM (1985), in Figur 2 zeigt, dass unter diesen Umständen schon ab 100 Mbit/s die Dispersion den begrenzenden Faktor darstellt. Mit Single-Longitudinal-Mode-LD oder gar mit Distributed Feedback-LD (DFB-LD) kann hier Abhilfe geschaffen werden. So liegt z. B. das Emissionsspektrum einer DFB-LD in einem Wellenlängenintervall von nur 10^{-4} bis 10^{-3} nm. Die Beschränkung der Faserlänge ist damit wieder eindeutig durch die Dämpfung gegeben. Allerdings sind schmalbandige LD-Typen teuer und meistens sehr empfindlich auf Reflexionen.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass auch eine Mehrfachausnutzung der Glasfaser möglich ist. Dabei geht es einerseits um die parallele Übertragung mehrerer Nachrichtensignale, andererseits um die gleichzeitige Vorwärts- und Rückwärtsübertragung auf derselben Faser. Grundsätzlich kommen Verfahren bei gleichen optischen Wellenlängen oder bei verschiedenen optischen Wellenlängen (Wellenlängenmultiplex) in Frage. In [4] werden entsprechende Methoden der Signalaufbereitung bei Verwendung von Multimodefasern behandelt; eine Übertragung der Konzepte auf Systeme mit SM-Fasern bietet keine besonderen Probleme.

3. Kohärente digitale faseroptische Übertragung

3.1 Grundlagen

Ein wesentlicher Vorteil der kohärenten optischen Übertragung besteht darin, dass die Detektorsensitivität P_s beträchtlich verbessert werden kann; theoretisch ist ein Gewinn bis zu 20 dB möglich. Falls sich dieser gesamthaft auf eine Erweiterung der Faserlänge umsetzen liesse, ergäbe sich nach (2) mit $A = 0,2$ dB/km eine Zusatzstrecke von etwa 100 km, d. h. die maximale Übertragungsstrecke ohne Repeater würde im Vergleich zur gewöhnlichen Pulsmodulation auf 300 km gesteigert. Allerdings führen Nichtidealitäten der Quelle sowie diverse Zusatzverluste – beispielsweise in Kopplern oder in der



Figur 5
Kohärentes digitales
faseroptisches
Übertragungssystem

Einrichtung zur Polarisationskontrolle - zu beträchtlichen Leistungseinbußen. Es liegen daher erst in jüngster Zeit Messresultate vor, wonach mit kohärenten Systemen tatsächlich grössere Übertragungsdistanzen erreicht worden sind. Ein weiterer Vorteil der kohärenten Übertragung besteht in der Realisierungsmöglichkeit von optischen Frequenzmultiplexsystemen, die überhaupt erst eine Ausnutzung der gewaltigen Faserbandbreite von bis zu 50 000 GHz gestatten.

Die Figur 5 zeigt das Blockschema eines kohärenten digitalen faseroptischen Übertragungssystems. Auf der Senderseite erzeugt die LD1 eine kontinuierliche Lichtwelle mit geringer spektraler Linienbreite. Der externe Modulator in Form einer GaInAs-Komponente oder eines LiNbO₃-Kristalls erlaubt eine Änderung der Lichtwellenparameter Amplitude, Phase oder Frequenz entsprechend dem angelegten Eingangssignals $s_1(t)$. Grundsätzlich könnten diese Parameter auch direkt durch eine Änderung des Arbeitspunktstromes der LD variiert werden, aber im Hinblick auf die Einhaltung der später noch zu betrachtenden Stabilitätsbedingungen für den Lichtträger erweist sich die Verwendung eines externen Modulators im allgemeinen als günstiger. Die modulierte Lichtwelle gelangt über die SM-Faser zum Empfänger, wo mittels eines halbdurchlässigen Spiegels die von der LD2 erzeugte, ebenfalls sehr schmalbandige Lichtwelle hinzugefügt wird. An der Nichtlinearität des Photodetektors entsteht ein Mischprodukt, das die Information enthält und das nach entsprechender Aufbereitung ein mit dem Eingangssignal weitgehend identisches Ausgangssignal $s_2(t)$ liefert. Ist die optische Wellenlänge λ_1 der LD1 gleich derjenigen der LD2, d.h. $\lambda_1 = \lambda_2$, so liegt das Mischprodukt im Basisband; man spricht in Anlehnung an die Bezeichnungen der klassischen Rundfunktechnik von einem *Homodynsystem*. Mit $\lambda_1 \neq \lambda_2$ resultiert ein Mischprodukt in «Zwischenfre-

quenzlage»; hier handelt es sich entsprechend um ein *Heterodynsystem*.

Die Realisierung einer optischen Homodyn- oder Heterodyn-Übertragung stellt folgende Hauptanforderungen:

1. Extrem schmalbandige Lichtquellen mit stabiler Mittenfrequenz,
2. Verzerrungsfreies Übertragungsmedium,
3. Synchronisation der Lichtwelle im Sender (Lokaloszillator LD2) auf das Empfangssignal bzw. Konstanzhaltung der Zwischenfrequenz.

In [5] wird gezeigt, dass die Bandbreite der Lichtwelle weniger als 20% der Bitrate R ausmachen sollte. Wie bereits früher erwähnt, beträgt die spektrale Breite $\Delta\lambda$ des Lichts einer konventionellen LD etwa 3 nm, dies entspricht im Wellenlängenbereich um 1550 nm einer Bandbreite von rund 400 GHz. Für die minimale Bitrate ergäbe sich also der Wert $R = 2$ Tbit/s, was im Hinblick auf praktische Anwendungen viel zu hoch ist. Es müssen demnach spezielle LD wie z.B. DFB-LD eingesetzt werden, die Licht mit geringer spektraler Breite aussenden. Es besteht auch die Möglichkeit, mit Hilfe von externen Regelkreisen das Licht gewöhnlicher LD schmalbandiger zu machen [6]. Eine Stabilisierung der Mittenfrequenz wird zudem immer nötig sein.

SM-Fasern sind in bezug auf Dämpfung und Dispersion ein hervorragendes Übertragungsmedium. Unangenehm ist aber der Umstand, dass sich gleichzeitig zwei orthogonal polarisierte Grundmoden ausbreiten können.

Zufolge einer stets vorhandenen, durch die Herstellung bedingten geringfügigen Anisotropie der Glasfaserstruktur ergibt sich eine zunehmende räumliche Trennung der beiden Polarisationsmoden während der Ausbreitung längs der Faser. An irgendeiner Stelle der Faser kann also die Polarisation linear, elliptisch oder zirkular

sein; durch Vibrationen, Spannungsänderungen und Temperaturschwankungen muss zudem eine zeitliche Variation in Kauf genommen werden. Die Auswirkungen liegen auf der Hand: Im Empfänger stimmen die Polarisierungen der Lichtwelle der LD2 und der empfangenen Lichtwelle nicht mehr überein und beeinträchtigen bzw. verunmöglichen den Mischvorgang im Photodetektor. Konstante Polarisationsabweichungen können relativ leicht korrigiert werden; für die Kompensation zeitabhängiger Polarisationsdifferenzen existieren heute Lösungsansätze [7].

Hohe Anforderungen stellt auch die exakte Synchronisation der LD2, die gemäss Terminologie der Rundfunktechnik die Funktion eines Lokaloszillators hat, mit dem Lichtträger des empfangenen Signals. Dasselbe gilt für die Konstanzhaltung der Zwischenfrequenz. Die erforderlichen optisch-elektrischen Regelkreise basieren auf Prinzipien, die unter dem Begriff Automatic Frequency Control (AFC) in der klassischen Empfängertechnik bestens bekannt sind.

3.2 Betrachtungen zur Sensitivität des kohärenten optischen Empfängers

Im folgenden sei nun das Verhalten eines Homodyn- bzw. Heterodynsystems unter der Annahme ideal synchronisierter Lichtträger mit verschwindender spektraler Linienbreite analysiert. Bei binärer Amplitudenmodulation (ASK) weise die im Empfänger einfallende Lichtwelle während des Zustandes für eine logische Eins den elektrischen Feldverlauf

$$e_2(t) = \hat{E}_2 \cos 2\pi \nu_1 t \tag{7}$$

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1}$$

auf. Die Superposition mit dem lokal erzeugten Lichtfeld

$$e_o(t) = \hat{E}_o \cos 2\pi \nu_2 t \tag{8}$$

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2}$$

führt am Eingang des Photodetektors auf die optische Momentanleistung

$$P_{opt}(t) = \frac{1}{z} [e_2(t) + e_o(t)]^2 \tag{9}$$

Die Grösse z ist als mittlere Querschnittsimpedanz [Ω/m^2] zu interpretieren. Bei der Quadrierung in (9) entstehen Terme mit verschiedenen Frequenzen. Der nutzbare Photostrom ergibt sich aus dem Leistungsanteil $P_{\Delta}(t)$ mit der Differenzfrequenz $\nu_1 - \nu_2$:

$$P_{\Delta}(t) = \frac{1}{z} [\hat{E}_2 \hat{E}_0 \cos 2\pi(\nu_1 - \nu_2)t] \quad (10)$$

Mit Einführung der Effektivwerte $\hat{E}_2 = \sqrt{2}E_2$ und $\hat{E}_0 = \sqrt{2}E_0$ erhält man für das *Heterodynsystem* ($\nu_1 \neq \nu_2$) den Ausdruck

$$P_{\Delta}(t) = [2E_2E_0 \cos 2\pi(\nu_1 - \nu_2)t] / z \quad (11)$$

und für das *Homodynsystem* ($\nu_1 = \nu_2$) die Beziehung

$$P_{\Delta}(t) = E_2E_0 / z \quad (12)$$

Jedes Photon trägt – wie schon früher erwähnt – die Energie $h\nu$. Unter der idealisierenden Annahme, dass jedes Photon im Detektor ein Elektron freisetzen kann ($\eta = 1$), resultiert der Photostrom

$$i(t) = \eta e P_{\Delta}(t) / h\nu \quad (13)$$

In Wirklichkeit beschreibt $\eta < 1$ die Quanteneffizienz des Detektors, d. h. η berücksichtigt den Umstand, dass nicht jedes Photon tatsächlich ein Elektron ausschlägt, und e bedeutet die Elektronenladung. Für ν kann ν_1 oder ν_2 eingesetzt werden, da beide optischen Frequenzen gleich sind oder sich nur um die Zwischenfrequenz $\nu_1 - \nu_2$ (einige 100MHz) unterscheiden. Durch Einsetzen von (11) und (12) in (13) erhält man also folgende Beziehungen für die Effektivwerte der Photoströme bei kohärenter Übertragung:

Heterodynsystem:

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{2\eta} e E_2 E_0 / (h\nu z) \quad (14)$$

Homodynsystem:

$$i_{\text{eff}} = 2\eta e E_2 E_0 / (h\nu z) \quad (15)$$

In beiden Fällen verläuft der Photostrom proportional zur empfangenen Feldstärke E_2 . Von entscheidender Bedeutung ist nun die lokal erzeugte Feldstärke E_0 und deren verstärkende Wirkung, die bei der Intensitätsmodulation fehlt. Die dadurch zustande kommende Verbesserung der Empfangsempfindlichkeit sei im folgenden kurz erläutert.

Die Sensitivität eines Photodetektors in bezug auf den direkten Empfang von Lichtimpulsen (Intensitätsmodulation) wird durch das Rauschen im Detektor und im elektronischen Vorverstärker begrenzt. Würde dieses Rauschen wegfallen, so wäre die Sensitivität nur noch durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der detektierten Photonen limitiert. Für diesen Idealfall kann man zeigen, dass ein binäres 140-Mbit/s-Übertragungssystem bei 1500 nm etwa 21 Photonen pro Lichtpuls für die Detektion mit einer Fehlerrate von 10^{-9} benötigt. Mit Rauschen sind jedoch für dieselbe Fehlerrate im Mittel etwa 1000 Photonen erforderlich. Mit kohärenter Übertragung kommt man nun nahe an diese Grenze von 21 Photonen pro Lichtimpuls, die man übrigens als «Quantum Limit» bezeichnet, heran; der potentielle Gewinn ergibt sich hier zu 1000/21 bzw. zu 17 dB. Theoretisch lässt sich zeigen und entsprechende Experimente mit extrem schwachen Lichtfeldern liegen vor, dass die Quantum Limit mit PSK-Heterodyn-, PSK-Homodyn-Empfang und anderen Modulationsverfahren [8] wesentlich unterschritten werden kann. Es sei hier noch erwähnt, dass APD bei ausreichender Lokaloszillatorleistung keinen Empfindlichkeitsgewinn ergeben. Zweckmässigerweise verwendet man daher rauscharme PIN-FET-Detektoren.

4. Anwendungen

In bezug auf die digitale optische Übertragung mittels SM-Fasern sind drei Bereiche zu unterscheiden: das öffentliche Netz, das halböffentliche Netz und das private Netz.

4.1 Öffentliche Netze

Dank der geringen Dämpfung und Dispersion der SM-Fasern hat deren Einsatz in Langstreckenverbindungen hervorragende Bedeutung. Allerdings liegen hinsichtlich der Zuverlässigkeit noch wenig Erfahrungen vor. Besonders attraktiv wäre die Realisierung von *Interkontinentalverbindungen* ohne Unterwasser-Repeater. Hierzu müssten Distanzen von mehr als 400 km in einem Zug überbrückt werden, was bei den geforderten Bitraten heute noch nicht möglich ist. Mit kohärenter Übertragung und einer neuen Technologie bei längeren Wellenlän-

gen dürfte in nicht allzu ferner Zukunft eine Lösung greifbar werden. Eine starke Konkurrenz dieses Systems mit den heutigen Interkontinentalverbindungen via Satellit ist daher vorauszusehen. Heute beschränkt man sich auf die Installation von Glasfaser-Transatlantik-Verbindungen mit Unterwasser-Repeater. So wird das 1988 fertiggestellte TAT-8-System mit einem 6adrigen 1,3- μm -SM-Faserkabel eine Distanz von 5600 km bewältigen, wobei die Bitrate von 295,6 Mbit/s pro Faser einen Repeaterabstand von 50 km erfordert [9].

Im *Fern- und Bezirksnetz* stehen Bitraten von 2 bis 565 Mbit/s zur Übertragung an. Auch hier hat die Glasfaserübertragung bereits Eingang gefunden, da die bis zu 20mal grösseren Repeaterabstände sowie das geringe Gewicht und die kleinen Abmessungen der Faserkabel bzw. die fast 10mal grösseren Einzugsängen im Vergleich zu Kupferkabeln eine merkliche Kostenreduktion bei der Installation mit sich bringen.

Bei Neuinstallationen im Fern- und Bezirksnetz werden heute praktisch ausschliesslich 1,3- μm -SM-Fasern verwendet. Je nach Distanz und Datenrate gelangen dabei sowohl LD als auch LED zum Einsatz.

Es dürfte noch einige Zeit verfließen, bis die SM-Faser auch im Ortsnetz Fuss fassen wird. Vorderhand steht die Einführung des Integrated Services Digital Network (ISDN) mit zwei Kanälen zu 64 kbit/s und einem Dienstkanal zu 16 kbit/s je Teilnehmer bevor. Für die resultierende Datenrate von 144 kbit/s glaubt man mit dem bisherigen Zweidraht-Teilnehmernetz vorderhand auskommen zu können. Diese Sachlage wird sich schlagartig ändern, wenn in absehbarer Zeit Breitbanddienste wie Videophonie, Videoconferencing, Breitband-Videotext usw. und verschiedene Verteildienste für hochqualitative Bewegtbild-Übertragung (Pay TV, High Definition Television) flächendeckend zur Einführung gelangen. Für diesen Zweck kommt nur die Verwendung von SM-Fasern bis zum Teilnehmer in Frage, wobei heute noch offen steht, welche Übertragungsverfahren mit welchen Komponenten implementiert werden. Viel Zeit für die Entwicklung steht allerdings nicht mehr zur Verfügung, will doch die Deutsche Bundespost schon ab 1992 mit dem flächendeckenden Ausbau des Breitband-ISDN mit 140-Mbit/s-Kanälen bis zum Teilnehmer beginnen.

4.2 Halböffentliche Netze

Bei den halböffentlichen Netzen handelt es sich vor allem um *CATV-Netze* (Community Antenna Television). Faseroptische Kommunikationssysteme sind für den Einsatz im Verteilerbereich der CATV-Netze wenig geeignet, da heute die Fernsehgeräte ausschliesslich analog angesteuert werden. Hinzu kommen die relativ kurzen Übertragungsdistanzen und viele Verzweigungen, die sich optisch nur mit erheblichen Verlusten realisieren lassen. Bei den CATV-Zubringerleitungen hingegen, d.h. für die Übertragung der Fernsehprogramme zu den Kopfstationen oder zu den Verteilpunkten, ist die faseroptische digitale Kommunikation im Vergleich zur konventionellen Lösung durchaus vorteilhaft, weil die Zahl der Zwischenverstärker erheblich reduziert werden kann.

4.3 Private Netze

Den wichtigsten Anteil der privaten Netze bilden die lokalen Netzwerke (LAN), die vor allem zur Verbindung von Computern, Terminals und Peripheriegeräten innerhalb von Betrieben und Abteilungen eingesetzt werden. Die heutige Situation bei den LAN ist durch den Wunsch nach höherer Übertragungskapazität, Integration von Diensten, verbesserter Störfestigkeit und nahezu unbeschränkter Verfügbarkeit geprägt. Es liegt daher nahe, die Glasfaser als Übertragungsmedium ins Auge zu fassen.

Rein optische (passive) Netze mit Stern- oder Baumstruktur bilden physikalisch gesehen einen Bus, d.h. die Sendesignale breiten sich über ein verzweigtes Übertragungsmedium zu allen Stationen aus, und zwar ohne Hinzutun der einzelnen Knoten. Die optische Streckendämpfung weist geringe Werte auf, aber da die in den Koppeln (Verzweigungen) verlorene Leistung relativ gross ist, können solche Netze nur eine kleine Anzahl Knoten bedienen. Der Einsatz eines solchen Systems rechtfertigt sich daher nur dann, wenn besondere Anforderungen erfüllt werden müssen (Störfestigkeit, Potentialprobleme, Abhörsicherheit usw.).

Bei Ringnetzen oder bei Verbindungen zwischen Netzen bzw. Netzwerksegmenten steht die Punkt-zu-Punkt-Verbindung (ohne Abzweigung) wieder im Vordergrund. Hier gewinnt denn auch die Faseroptik zunehmend an Bedeutung.

Eigentlich erfordern die kurzen Übertragungsstrecken für Bitraten bis zu 50 Mbit/s keine hochgezüchtete SM-Faser-Technologie; man verwendet heute praktisch ausschliesslich Multimode-Fasern im 0,8- μ m- und 1,3- μ m-Bereich, wobei üblicherweise die wesentlich billigeren LED eingesetzt werden. Diese Situation könnte sich aber ändern, wenn mit der Einführung von Breitbanddiensten im öffentlichen Netz die SM-Faser weiter an Bedeutung gewinnt.

5. Schlussfolgerungen

Die digitale optische Übertragung auf SM-Fasern hat sich schon heute dort überall durchgesetzt, wo eine leistungsfähige Punkt-zu-Punkt-Verbindung über grosse Strecken erforderlich ist. Die Grenzen dieser Technologie sind noch keinesfalls erreicht. Forschung und Technik befassen sich mit folgenden Problemkreisen:

- Erhöhung der zum Empfänger gelangenden Signalleistung durch Vergrösserung der Quellenleistung, bessere Kopplung zwischen Quelle und Faser, weitere Reduktion der Faserdämpfung (Übergang zu noch grösseren Wellenlängen und Verwendung von Fasern, die nicht auf SiO₂ basieren), dämpfungärmere Koppel- und Abzweigelemente, Verbesserung der Detektorsensitivität und Schaffung der Möglichkeit einer direkten optischen Signalverstärkung,

- Vergrösserung der Übertragungsbandbreite durch Verminderung der Faserdispersion, Reduktion der spektralen Breite der Lichtquelle und Entwicklung schneller LED im Hinblick auf billige Kurzstanzanwendungen,

- Reduktion der Störungen durch Einsatz empfindlicherer Detektoren, Verminderung von Reflexionen und Rückstreulicht sowie Stabilisierung der Quellen hinsichtlich Mittenfrequenz und Bandbreite des emittierten Lichtes,

- Effizientere Signalaufbereitung im optischen Bereich durch integrierte Optik.

Die stetigen Fortschritte in den vergangenen Jahren (Fig. 2) sowie die deutlich sinkenden Preise der Komponenten lassen erwarten, dass in absehbarer Zeit die digitale faseroptische Übertragung auch in die untersten Hierarchiestufen der Kommunikationsnetze eindringen wird.

Ein besonders attraktives Zukunftspotential für die Realisierung von Breitbandkommunikationsnetzen mit praktisch unbegrenzter Kapazität stellt die kohärente Übertragung dar. Zum heutigen Zeitpunkt gilt, dass vor allem die Realisierung der Regelkreise sowohl für die Stabilisierung des Lichtträgers einschliesslich der Reduktion seiner spektralen Breite als auch für die Synchronisation zwischen Sender und Empfänger äusserst aufwendig ist und empfindliche Frequenzreferenzelemente wie z.B. Fabry-Pérot-Interferometer benötigt. Hinzu kommt das Problem der adaptiven Kompensation der Polarisationsdifferenz. Es wird daher allein schon aus diesem Grund noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden müssen, bis ein Einsatz von kohärenten optischen Übertragungssystemen unter praktischen Bedingungen möglich sein wird.

Literatur

- [1] P.K. Bachmann: Dispersion flattened and dispersion shifted single mode fibres: Worldwide status. ECOC 12. 12th European Conference on Optical Communication. Barcelona/Spain, September 22...25, 1986. Technical digest, volume II: Invited papers; p. 17...25.
- [2] J. Noda, K. Okamoto and Y. Sasaki: Polarization-maintaining fibres and their applications. IEEE J. of Lightwave Technology LT-4[1986]8, p. 1071...1089.
- [3] J.M. Senior: Optical fiber communications, principles and practice. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1985.
- [4] P. Heinzmann u.a.: Bidirektionale Übertragungssysteme mit einer Glasfaser. Bull. SEV/VSE 76[1985]15, S. 901...908.
- [5] G. Jacobsen and I. Garret: A theoretical analysis of coherent optical communication receivers with non-negligible laser linewidths. Report N. R. 297. Lyngby, Technical University of Denmark, Electromagnetics Institute, 1984.
- [6] A. Sollberger: Beiträge zur Stabilisierung der Emissionsfrequenz und der Linienbreite von Halbleiterlasern. Dissertation der ETH Zürich Nr. 8193, 1987.
- [7] I.W. Stanley: A tutorial review of techniques for coherent optical fiber transmission systems. IEEE Communications Magazine 23[1985]8, p. 37...53.
- [8] J.R. Lesh u.a.: Optical communications research program to demonstrate 2.5 bits/detected photon. IEEE Communications Magazine 20[1982]11, p. 35...37.
- [9] P.K. Runge and P.R. Trischitta: The SL undersea lightwave system. IEEE J. of Lightwave Technology 2[1984]6, p. 744...753.