

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 60 (1982)

**Heft:** 3

**Artikel:** Grundlagen zur analogen Breitbandübertragung mit Glasfasern

**Autor:** Welter, Rudolf / Berger, Hanspeter / Guekos, Georg

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-876149>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.03.2025

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

# Grundlagen zur analogen Breitbandübertragung mit Glasfasern

Rudolf WELTER, Hanspeter BERGER, Georg GUEKOS, Andres DILL, Armin SOLLBERGER, Hans MELCHIOR, Zürich,  
und Werner STEFFEN, Bern

621.391.62/64:681.7.068

Zusammenfassung. *Dank der Fortschritte in der Glasfaserkommunikationstechnik werden die praktischen Anwendungen für die Übertragung von Fernseh- und Tonsignalen über Glasfasern immer interessanter. Neben der digitalen Übertragung gelangt wegen der apparativen Einfachheit auch die analoge Modulationstechnik zum Einsatz, bei der die Lichtintensität (IM) direkt vom Signal gesteuert wird (AM-IM). Mit experimentellen und theoretischen Abklärungen sowie mit dem Aufbau kompletter Systeme wurde untersucht, über welche Entfernungen sich TV- und Tonsignale unter Beibehaltung strenger Qualitätskriterien in analog modulierter Form übertragen lassen. Lineare Sendermoduln, empfindliche Empfänger und nahezu perfekte Spleissstellen ermöglichten, vier TV- und sechs FM-Radiosignale gleichzeitig über eine Faser von 1 km Länge oder einen TV-Kanal über 4 km zu übertragen. Mit 3,5 dB/km Faserdämpfung konnten ein Videosignal-Rauschverhältnis von 40 dB und Verzerrungen von weniger als -67 dB verwirklicht werden. Bei der Wahl der Laserdioden muss auf ausgezeichnete Qualität der Strom-Licht-Charakteristiken, auf gute Stabilität und Rauscheigenschaften sowie einen optimalen Betriebspunkt geachtet werden. Das ebenfalls untersuchte FM-IM-System erfordert gegenüber AM-IM einen schaltungsmässig massiv erhöhten Aufwand, sowohl auf der Empfänger- als auch auf der Senderseite. Die Anforderungen an die Laserdioden sind weniger strikt, und es lassen sich grosse Entfernungen überbrücken.*

## Bases de la transmission analogique à large bande sur fibres optiques

Résumé. *Vu les progrès de la technologie, il est de plus en plus intéressant de transmettre des signaux image et son sur des fibres optiques. En plus de la transmission numérique, on applique aussi la modulation analogique, en raison de la simplicité des équipements, le signal commandant alors directement (AM-IM) l'intensité lumineuse (IM). Par des études expérimentales et théoriques ainsi qu'aux moyens de systèmes complets, on a examiné à quelle distance il était possible de transmettre des signaux image et son par une modulation analogique tout en respectant des critères de qualité très sévères. En utilisant des modules d'émission linéaires, des récepteurs sensibles et des épissures quasi parfaites, on a pu transmettre simultanément quatre signaux TV et six signaux de radio en modulation de fréquence sur une fibre d'un kilomètre de longueur ou un signal TV sur 4 km. Pour une atténuation de fibre de 3,5 dB/km, il a été possible de réaliser un rapport signal vidéo/bruit de 40 dB et des distorsions inférieures à -67 dB. Lors du choix des diodes laser, il faut veiller à une excellente qualité des caractéristiques courant/lumière, à une bonne stabilité, à un faible niveau de bruit ainsi qu'à un point de fonctionnement optimal. Du point de vue des circuits, un système FM-IM également examiné est nettement plus complexe qu'une liaison AM-IM, tant sur le plan du récepteur que sur celui de l'émetteur. Les exigences posées aux diodes laser sont moins sévères et les tronçons réalisables sont plus longs.*

## Concetti basilari della trasmissione analogica a banda larga con fibre ottiche

Riassunto. *I progressi fatti nel campo della trasmissione di segnali televisivi e acustici su fibre ottiche rendono questo mezzo sempre più interessante. Accanto alla trasmissione digitale viene impiegata, per la semplicità delle apparecchiature, anche la tecnica della modulazione analogica, in cui l'intensità della luce (IM) viene comandata direttamente dal segnale (AM-IM). Si è cercato di analizzare sperimentalmente e teoricamente come anche mediante la costruzione di sistemi completi a quali distanze fosse possibile trasmettere segnali televisivi e radiofonici modulati analogicamente, osservando rigidi criteri qualitativi. Moduli lineari di trasmettitori, ricevitori sensibili e giunzioni pressoché perfette hanno reso possibile la trasmissione simultanea di quattro segnali televisivi e di sei canali radiofonici su una fibra della lunghezza di 1 km o di un segnale televisivo su 4 km. Con un'attenuazione della fibra di 3,5 dB/km è stato possibile realizzare un rapporto segnale video/rumore di 40 dB e delle distorsioni sotto i -67 dB. I diodi laser devono essere di qualità ottima per quanto riguarda le caratteristiche di corrente-luce, avere buone qualità di stabilità e di rumore, come pure un punto d'esercizio ottimale. Il sistema FM-IM, che è stato sottoposto a esame, richiede, rispetto al sistema AM-IM, un dispendio molto maggiore in fatto di circuiti sia dal lato ricezione, sia dal lato trasmissione. Le esigenze nei confronti dei diodi laser sono meno rigorose e con essi si possono raggiungere distanze maggiori.*

## 1 Einleitung

Die optische Faserübertragungstechnik hat heute einen Entwicklungsstand erreicht, der ihr ein weites Anwendungsgebiet eröffnet [1]. Im Laufe der letzten Jahre wurden wesentliche Fortschritte in der Herstellung zuverlässiger optischer Senderelemente und dämpfungsarmer Wellenleiter erzielt [2, 3]. Dank der grossen Übertragungskapazität moderner Glasfasern lassen sich Fernseh- und Audioprogramme oder auch Telefonie- und binäre Signale von Computern [4, 5] unter Beibehaltung guter Signalqualität über beachtliche Entfernungen übertragen. Durch das stets günstiger werdende Verhältnis von Preis/Leistung bei optischen Glasfasersystemen findet die neue Technologie zunehmend dort Anwendung, wo bisher Zweidraht- oder Koaxialverbindungen installiert wurden.

Nebst der grossen Übertragungskapazität weisen Glasfasersysteme weitere technische Vorzüge gegenüber der herkömmlichen Kabelübertragung auf. Es sei hier daran erinnert, dass die Lichtausbreitung in Fasern

viel weniger von elektromagnetischen Störquellen beeinflusst werden kann als die Signalausbreitung in metallischen Leitern. Aber auch das geringe Gewicht und Volumen der Faserkabel gegenüber Koaxialverbindungen ist als wesentlicher Vorteil bei der Installation von neuen Datenleitungen zu werten. Optische Faserübertragungssysteme stehen in verschiedenen Ländern in Einführung [10...15]. Mit der Herstellung von Glasfaserkabeln, Kabelsteckern und mit der Durchführung verschiedener Projekte bei der Generaldirektion PTT, in der Industrie und an den Hochschulen ist auch die Schweiz in dieser neuen Technologie aktiv.

Bis vor kurzem stand für faseroptische Strecken die Übertragung von digitalisierten Signalen im Vordergrund. Mit der Weiterentwicklung der technologischen Verfahren zur Herstellung von Halbleiterlasern und Lichtemissionsdioden (Gallium-Aluminium-Arsenid-[GaAlAs]-Technologie [6, 7, 8, 9]) und mit der Verbesserung ihrer optischen Eigenschaften ist auch die Übertragung von Analogsignalen ins Interessengebiet der Kommuni-

kationstechnik gerückt. Ein optisches Analogsystem ist im Vergleich zu einer digitalen Übertragung schaltungstechnisch einfach zu verwirklichen. Im weiteren eignet sich die Analogmodulation gut zur Übertragung mehrerer Breitbandkanäle (zum Beispiel mehrere TV-Programme über eine Faser). Puls-Code-Modulation (PCM) erfordert hierfür einen beträchtlich höheren Schaltungsaufwand. Die faseroptische Analogkommunikation kann deshalb durchaus einen gewissen Anwendungsbereich gewinnen, besonders weil künftige optische Fasersysteme im Wellenlängengebiet zwischen etwa  $1,3 \mu\text{m}$  und  $1,6 \mu\text{m}$  grosse Übertragungsdistanzen erwarten lassen.

Als mögliche Anwendungen analoger Faserverbindungen seien Überwachungsanlagen in Industriebetrieben oder die Versorgung grosser Bevölkerungsteile mit Fernseh- und Radioprogrammen über Gemeinschaftsantennenanlagen erwähnt.

In einer Folge von zwei Beiträgen befassen sich die Autoren mit einem Versuchsaufbau und den verschiedenen Möglichkeiten zur Übertragung von amplituden- (AM) oder frequenzmodulierten (FM) Fernsehsignalen und FM-Radiokanälen über Glasfaserlichtwellenleiter. Ziel der Untersuchungen ist aufzuzeigen, dass neben digitalen Übertragungsformaten auch die apparativ viel einfacheren analogen Modulationsarten gute Aussichten bieten, einen oder mehrere Fernseh- oder Radiokanäle mit hoher Qualität über mehrere Kilometer lange Glasfaserstrecken zu übertragen. Zu diesem Zweck wurden optische Lasersender und Empfängermodule mit hoher Linearität entwickelt und mit Gradientenindex-Multimodefasern zu ganzen Übertragungssystemen kombiniert.

Im vorliegenden Artikel wird in einer Einführung das Blockschaltbild einer faseroptischen Übertragungsstrecke mit Halbleiterelementen als Licht-Strom- beziehungsweise als Strom-Licht-Wandler diskutiert. Danach werden die Vorteile analoger Modulationsmethoden im Zusammenhang mit der Faserübertragung erläutert und analysiert. Die Eigenschaften der Wandlerelemente, Lichtemissionsdioden, Laserdioden und Fotodetektoren, die für die Übertragung von Bedeutung sind, werden besprochen. Die Schaltungen für die Ansteuerung der Elemente werden ebenfalls angegeben und experimentell charakterisiert. Anschliessend wird auf die Probleme eingegangen, die bei der Ankopplung der Faser an den Laser und bei den Spleissstellen entstehen.

Die Messergebnisse der gesamten im Laboratorium aufgebauten Übertragungsstrecke mit verschiedenen Faserlängen und Lasern werden vorgestellt und die Erfahrungen, die dabei gesammelt wurden, diskutiert. Basierend auf diesen Experimenten und aufgrund von theoretischen Abklärungen werden die Möglichkeiten und Grenzen der AM- und FM-Faserübertragung von Fernsehsignalen aufgezeigt.

## 2 Aufbau eines optischen Übertragungssystems

Einem faseroptischen Übertragungssystem mit Halbleiterdioden als optische Senderelemente und Halbleiterfotodioden als Detektoren liegt, unabhängig von der Modulationsart der Signale, ein Blockschaltbild nach *Figur 1* zugrunde. Auf der Seite des Senders ist im allgemeinen Fall eine Signalaufbereitungsanlage erforderlich,

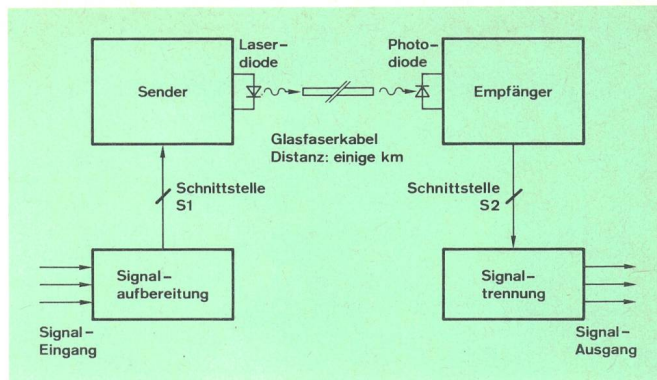


Fig. 1  
Hauptelemente einer Faserkommunikationsstrecke mit Halbleiterelementen als Sender und Empfänger

die die Informationen aus mehreren Kanälen zu einem elektrischen Signal zusammenfasst und an die Schnittstelle S1 leitet. Am Empfangsort werden die Kanäle in einer geeigneten Schaltung wieder voneinander getrennt. Die Komplexität dieser Blöcke hängt wesentlich von der Art der optischen Signalübertragung (analog oder gepulst) und von der übertragenen Kanalzahl ab.

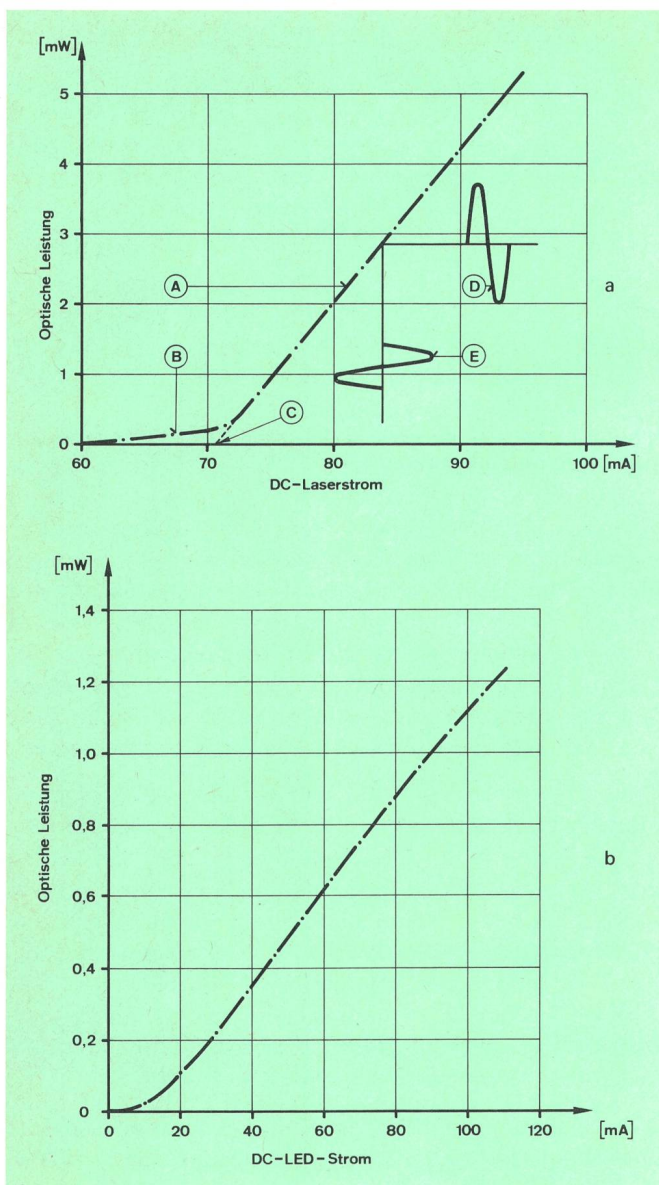
In einem analogen optischen Übertragungssystem moduliert ein elektrisches Signal direkt die Lichtintensität der Diode (Intensitätsmodulation = IM), so dass in der Signalaufbereitung die Kanäle mit Hilfe von Mischern und Addierern zu einem Frequenzmultiplexsignal zusammengeführt werden können. Bei einer Übertragung mit gepulstem Licht (PCM, PPM usw.) dagegen sind wegen der Codierung der Kanäle und des Zusammenführens der Impulse zu einem Zeitmultiplexsignal wesentlich aufwendigere Schaltungen nötig.

Die Funktion des Senders in der Faserstrecke ist die Wandlung der elektrischen in optische Signale. Dies geschieht in Lichtemissions- (LED) oder in Laserdioden (LD), deren Lichtintensität mit dem Diodenstrom variiert werden kann. Für ihre geeignete Ansteuerung und Arbeitspunkteinstellung ist eine elektronische Schaltung notwendig.

Das von den Laser- und Lichtemissionsdioden emittierte Licht wird in eine flächenkompatible Faser eingekoppelt und über eine Entfernung von einigen Kilometern zur Detektionsdiode geführt. In dieser wird das Licht in elektrischen Strom zurückgewandelt. Vom nachgeschalteten Verstärker wird eine hohe Empfindlichkeit verlangt, da die empfangenen optischen Signale einerseits durch die verhältnismässig geringen Sendeleistungen der LD und LED und andererseits durch die Dämpfungsverluste der Fasern sehr kleine Intensitäten aufweisen.

## 2.1 Wahl der Halbleiterlaser

Für den Wellenlängenbereich zwischen  $0,8$  und  $0,9 \mu\text{m}$  ist heute eine grosse Zahl von GaAlAs-Heterostruktur-Diodenlasern und LED erhältlich. Ihre Licht-Strom-Kennlinien geben dabei über die Qualität der abgestrahlten optischen Signale Aufschluss. In den *Figuren 2a* und *2b* sind die gemessenen statischen Licht-Strom-Kennlinien einer LD und einer LED angegeben.



**Fig. 2**  
**DC-Lichtstromcharakteristik von lichtemittierenden GaAlAs-Halbleiterdioden**  
 Der Halbleiterlaser a) strahlt mit einer wesentlich höheren Lichtintensität als die LED b)  
 (A) Stimulierte Emission  
 (B) Spontane Emission  
 (C) Laserschwelle  
 (D) Optisches Signal  
 (E) Elektrisches Signal

Bei kleinen Stromdichten emittiert eine Laserdiode inkohärentes Licht von geringer optischer Leistung. Bei einer gewissen Stromdichte erreicht die Diode die Laserschwelle, bei der in der Kavität optische Oszillationen angeregt werden. Das aus den teildurchlässigen Laser spiegeln austretende Licht ist nun von wesentlich höherer Intensität und grösstenteils kohärent, was für eine optische Übertragung interessant ist. In Figur 2a ist die Modulation mit einem Sinussignal bei einem gewählten Arbeitspunkt angedeutet. Bei modernen Halbleiter-Laserstrukturen ist die Licht-Strom-Abhängigkeit im lasenden Betrieb sehr linear, womit diese Typen für eine Übertragung von Analogsignalen geeignet sind.

Wie aus der Charakteristik einer sogenannten Burrus-LED (Fig. 2b) ersichtlich wird, ist die Lichtleistung mit etwa 1 mW wesentlich kleiner als bei einer LD. Die

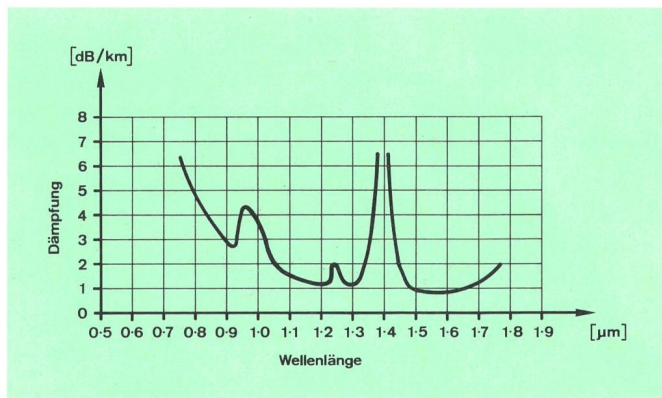
Strahlung der LED wird praktisch ausschliesslich durch spontane Trägerrekombination erzeugt und weist somit ein relativ breites Emissionsspektrum auf. Die Grenze der erreichbaren Lichtintensitäten ist bei der LED durch ihre thermische Belastbarkeit bestimmt. Für Laserdioden ist diesbezüglich meistens die Leuchtdichte auf den Laserspiegeln massgebend.

## 22 Wahl der Glasfasern

Mit Glasfasern lassen sich heute grosse Übertragungskapazitäten erreichen. Das Produkt Bandbreite  $\times$  Faserlänge — eine charakteristische Grösse der Faser — beträgt je nach Fasertyp 0,5 bis einige GHz  $\times$  km, so dass breitbandige Faserverbindungen ohne weiteres realisierbar sind. Von ausschlaggebender Bedeutung für die erreichbare Übertragungsdistanz ist die optische Dämpfung der Faser, die Figur 3 für eine moderne typische Faser als Funktion der Wellenlänge zeigt. Im Bereich 0,8...0,9  $\mu\text{m}$ , wo GaAlAs-Strukturen (1. Generation von LED und LD) emittieren, werden in der Praxis Dämpfungen von 2,5...3,5 dB/km gemessen. Im tieferen Infrarot (1,3 und 1,5...1,6  $\mu\text{m}$ ) können Minimas der Kurve gefunden werden mit Dämpfungen von weniger als 1 dB/km [3]. Diese geringe Dämpfung macht diesen Wellenlängenbereich für die optische Kommunikationstechnik noch günstiger als den 0,8- $\mu\text{m}$ -Bereich [4, 16]. Weltweit wird heute an der Technologie zur Herstellung von LED und LD der 2. Generation (das heisst Dioden, die im Wellenbereich von 1,3 und 1,6  $\mu\text{m}$  emittieren) sowie von geeigneten Detektoren gearbeitet [17, 18]. Diese Entwicklungsrichtung ist noch verhältnismässig neu, so dass das kommerzielle Angebot von Bauelementen dieser Wellenlängen zurzeit noch bescheiden ist.

## 23 Empfänger

Zur Detektion der optischen Signale und zur Wandlung in elektrische Signale am Ende der Faser werden in 0,8- $\mu\text{m}$ -Systemen vor allem PIN- oder Avalanche-Fotodioden (APD) aus Silizium verwendet [19]. Ihre aktiven Flächen sind grösser als die Faserkerne, was die Detektion der gesamten Lichtleistung aus der Faser vereinfacht. Für Licht der Wellenlänge von 1,3 oder 1,6  $\mu\text{m}$  eignen sich Siliziumdioden nicht, was die Verwendung anderer Materialien, wie Germanium oder GaInAs, notwendig macht.



**Fig. 3**  
 Lichtdämpfung als Funktion der Lichtwellenlänge in einer modernen Glasfaser

Der Wunsch nach langen, verstärkerlosen Übertragungsstrecken mit grossen Bandbreiten erfordert Empfangsschaltungen mit guten Empfindlichkeiten: Transimpedanzverstärker erweisen sich als günstige Schaltungskonfigurationen [20].

### 3 Systemorganisation

Die angestrebte analoge Übertragung von 4 TV- und 6 FM-Radio-Kanälen über eine Faser unter Einhaltung einer hohen Signalqualität stellt an das optische System, bestehend aus Sender, Faser und Empfänger, strenge Anforderungen. *Tabelle I* ist ein Auszug aus einem Pflichtenheft, das von der Generaldirektion PTT erstellt wurde. Die Werte gelten für das optische System allein, von der Schnittstelle S1 zur Schnittstelle S2 (Fig. 1).

**Tabelle I.** Auszug aus dem Pflichtenheft der Generaldirektion PTT für die Faserübertragungsstrecke (die Ziffern ohne Klammern haben für Richtstrahlzubringerverbindungen Gültigkeit; die eingeklammerten Werte sind für Punkt-zu-Punkt-Übertragungen verbindlich)

<b>TV-Bild</b>	
Video-Rauschabstand (unbewertet)	40 (37) dB
Intermodulationsabstand im TV-Kanal	73 (67) dB
Differentielle Amplitude	< 2 (10) %
Differentielle Phase	< 2 (10) °
<b>UKW Hörfunkqualität (Mono)</b>	
Ton-Geräuschabstand	> 51 (47) dB
Klirrfaktor	< 0,5 (1) %
<b>Weitere Spezifikationen</b>	
Gesamtamplitudengang	innerhalb 2 (4) dB
Schnittstellenimpedanz	75 Ω

Bei der direkten Intensitätsmodulation (AM-IM) sind die Werte der Tabelle I direkt als Spezifikationen für den optischen Sender und Empfänger aufzufassen. Mit der Wahl einer anderen Modulationsart (zum Beispiel FM-IM) würden die Anforderungen an diese Blöcke entschärft, so dass trotz gewisser Nichtidealitäten der optischen Übertragungsstrecke die verlangte Signalqualität erhalten werden kann. Zu diesen zählen vor allem die beschränkte optische Leistung von LED und Laserdioden, der Verzerrungsgehalt der optischen Signale wie auch Rauschquellen in der Faserstrecke (etwa optische Fluktuationen von Laserdioden [21, 22]).

Im Sinne eines Überblicks werden im folgenden die Vorzüge verschiedener analoger Modulationsarten bezüglich ihrer Anwendbarkeit für faseroptische Kommunikationssysteme kurz diskutiert.

#### 31 AM-Intensitätsmodulation

Die direkte Intensitätsmodulation (AM-IM) des Lichtes bietet vom schaltungstechnischen Aufwand her die einfachste Methode zur Übertragung von Analogsignalen über Glasfasern. Die hochwertige Übertragung dieser Signale stellt jedoch strenge Anforderungen sowohl an die Linearität und die Rauschermut der Sender- und Empfängerteile als auch an die Qualität der Spleissstellen im Glasfaserkabel.

Grosse optische Signalleistungen und kleine Verzerrungen des Senders sind notwendig, um die spezifizier-

ten Werte für den Rauschabstand (Signal to Noise Ratio, SNR) und die Linearität zu erfüllen.

In der Praxis zeigt es sich, dass Linearität und Rauschabstand bei der Übertragung von mehreren TV- und UKW-Kanälen durch die gleiche Faser gegeneinander ausgewogen und optimiert werden müssen. Bei grosser Aussteuerung der modernen Laser entstehen Nichtlinearitäten, die den Anforderungen von Tabelle I nicht mehr genügen. Eine gewisse Auswegmöglichkeit besteht beispielsweise in einer weitgehend intermodulationsfreien Kanalanordnung. Die TV- und Radiokanäle werden dabei auf der Frequenzachse so angeordnet, dass die stärksten Verzerrungsprodukte 2. und 3. Ordnung, die üblicherweise bei Laserdioden dominieren, ausserhalb der Kanäle liegen. Durch entsprechende Frequenzwahl kann damit in den demodulierten Kanälen auch bei grosser Laseraussteuerung eine gute Linearität erreicht werden.

#### 32 FM-Intensitätsmodulation

Eine Alternative zur intermodulationsfreien Kanalanordnung bei AM-IM bietet die Frequenzmodulation (FM) eines Trägers, der seinerseits die Intensität des Laserlichtes moduliert (FM-IM) [23, 24]. Die FM erlaubt die Anhebung des Störabstandes gegenüber AM auf Kosten einer erweiterten Bandbreite [25]. Bei einem FM-Übertragungssystem werden die Kanäle in der Signalaufbereitungsanlage einzeln frequenzmoduliert. Wie bei AM werden sie zu einem Frequenzmultiplexsignal addiert und an die Schnittstelle S1 der Figur 1 geleitet. Im Vergleich zur einfachen Intensitätsmodulation (AM-IM) muss bei FM-IM wegen der zusätzlichen Modulation ein wesentlich grösserer Schaltungsaufwand getrieben werden. Mit der optischen Übertragung von frequenzmodulierten TV-Kanälen werden jedoch die Anforderungen an die Laserlinearität gemildert, was im allgemeinen eine grössere Aussteuerung der Laserdioden im Vergleich zu AM-IM erlaubt und damit grössere überbrückbare Distanzen ermöglicht.

In *Figur 4* sind die gerechneten Video-Rauschabstände in einem Fernsehkanal für eine optische Übertragung von vier TV- und sechs FM-Radio-Kanälen mit AM-IM und mit FM-IM einander gegenübergestellt. Für die Herleitung der theoretischen Zusammenhänge sei auf den Anhang verwiesen. Bei kurzen Übertragungsdistanzen (geringe Faserdämpfung) wird das Signal/Rauschverhältnis SNR durch die vom Laser herrührenden optischen Fluktuationen, ausgedrückt in RIN (relatives Intensitätsrauschen), [21] bestimmt. Die Dämpfung der Faser und die Empfindlichkeit der Empfängerschaltung dominieren hingegen den Rauschabstand (SNR) bei längeren Strecken.

Die Darstellungen in *Figur 4* zeigen, dass mit einer optischen FM-IM-Übertragung von 4 TV- und 6 FM-Radio-Kanälen mit einem Frequenzhub von 4 MHz je Fernsehkanal eine deutliche Anhebung des Video-Rauschabstandes gegenüber AM erreichbar ist. Dabei wurden für beide Modulationsarten die gleichen Parameter der optischen Strecke angenommen.

#### 33 Analoge Pulsmodulationen

Im gepulsten Betrieb lassen sich Laserdioden stärker aussteuern als im kontinuierlichen (CW) Betrieb. Von

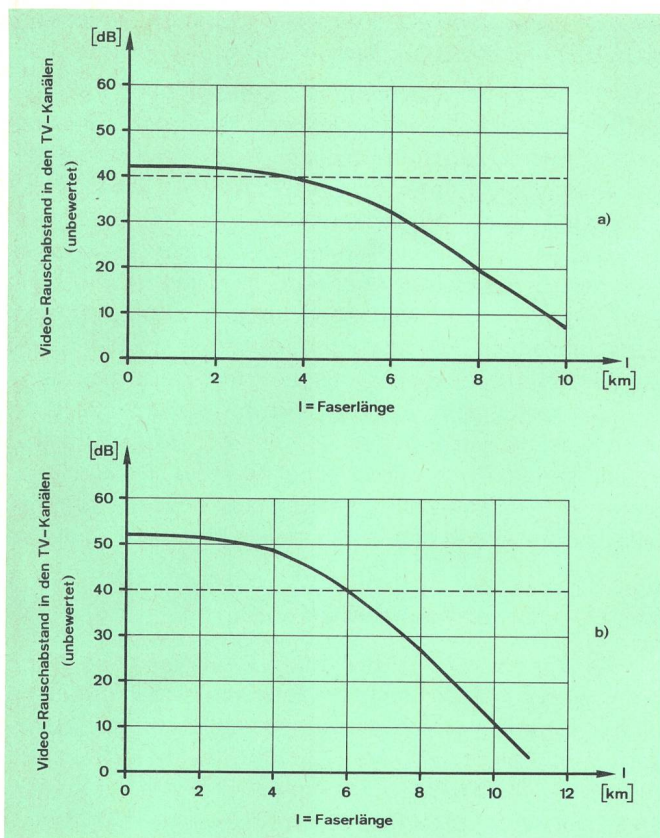


Fig. 4  
Gerechnete Videorausabstände als Funktion der Faserlänge bei der Übertragung von vier TV- und sechs FM-Radiokanälen mit Analog- beziehungsweise Frequenzmodulation

Die Übertragung von frequenzmodulierten TV-Kanälen bringt gegenüber der Analogmodulation eine deutliche Anhebung der Rauschabstände. Der Frequenzhub ist zu 4 MHz angenommen. Das optische Rauschen der Laserdiode und die optischen Signalleistungen sind für beide Berechnungen dieselben: RIN:  $10^{-14}$ s, optische peak-peak-Leistung: 3 mW<sub>p-p</sub>

diesem Gesichtspunkt aus erscheint die Übertragung der Signalinformation in Lichtimpulsen mit einer analogen Pulsmodulation wie Pulspositionsmodulation (PPM), Pulsweitenmodulation (PWM), Pulsintensitätsmodulation (PIM) usw. [26] eine interessante Alternative zu AM und FM. Überdies bleiben auch extreme Verzerrungen bei der Strom-Licht-Wandlung durch Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Kennlinie (Kinks) [27] ohne Einfluss auf die Signalqualität. Wie bei FM ist auch hier die Linearität durch die Modulatoren und Demodulatoren begrenzt. Bei der analogen Pulsmodulation wird die Ampli-

tude der zu übertragenden Signalinformation in den Zeitbereich transformiert. Dadurch nehmen diese Modulationsarten eine Stellung zwischen Pulscode und Analogmodulation ein. Bandbreitebedarf und Schaltungsaufwand der Signalaufbereitung sind vergleichbar mit PCM-Systemen. Die Übertragungsdistanz wird aber immer noch wie bei AM durch die Signal/Rauschverhältnis-Spezifikation der optischen Strecke begrenzt. Durch den Einbau von Verstärkern kann die Verbindung verlängert werden, doch bleibt das SNR nicht erhalten (wie bei PCM), sondern nimmt sukzessive ab.

#### 4 Versuchsaufbau

Der faseroptische Teil des Laboraufbaus, der für die Untersuchungen der analogen optischen Fernsehübertragung gedient hat, wird in *Figur 5* gezeigt. Links im Bild ist das Sendermodul mit der angekoppelten Faser zu sehen, rechts der optische Empfänger. Das Faserkabel, aufgewickelt auf die vier Rollen, weist eine Länge von 4,3 km auf. Dies ist die längste Faser, die in diesen praktischen Systemuntersuchungen verwendet wurde.

Zur Erzeugung von TV- und FM-Radiosignalen wurden im Laboraufbau der Strecke kommerzielle TV-Bild- und Ton-Generatoren eingesetzt. Die Signalaufbereitungs- und die Signaltrennungsanlage wurden bei der Generaldirektion PTT besonders für das Projekt angefertigt und an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) ergänzt. Sie erlauben, bis zu 4 TV-Kanäle der europäischen Normbereiche I und II (47...68 MHz beziehungsweise 118...174 MHz) in einem Multiplexsignal zusammenzufassen und mit den FM-Radiokanälen zu kombinieren.

#### 41 Optischer Sender

*Figur 6* zeigt das Laborsendemodul in einer Nahaufnahme. Die Laserdiode ist auf einem auswechselbaren Halterungsstück an der Frontseite des Gehäuses fest montiert. Faser und Laser werden mit Hilfe von Mikro-manipulatoren aufeinander justiert.

Die gewünschte Linearität von Strom und Lichtleistung im lasenden Betrieb bedingt eine Ansteuerung der Diode aus einer Stromquelle. Da die Strom-Licht-Kennlinie temperatur- und alterungsabhängig ist, muss die mittlere optische Lichtleistung stabilisiert werden.

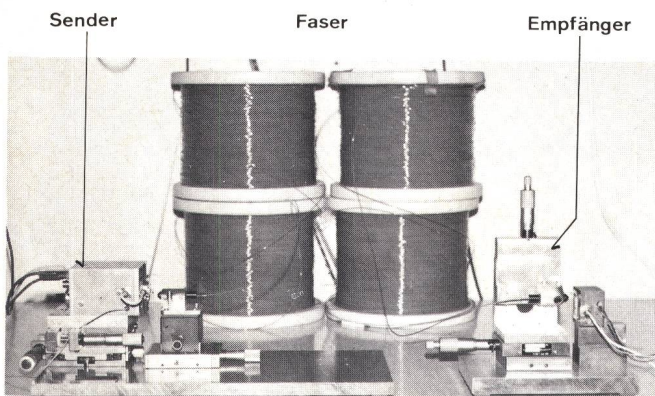


Fig. 5  
Versuchsübertragungsstrecke mit optischem Sender, Faser und Empfänger. Die Faser auf vier Rollen aufgewickelt hat eine Gesamtlänge von 4,3 km.

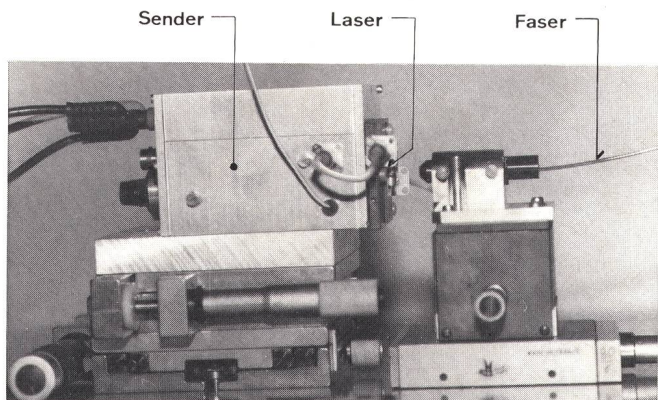


Fig. 6  
Sendermodul mit aufgesetzter Diodenhalterung und angekoppelter Faser

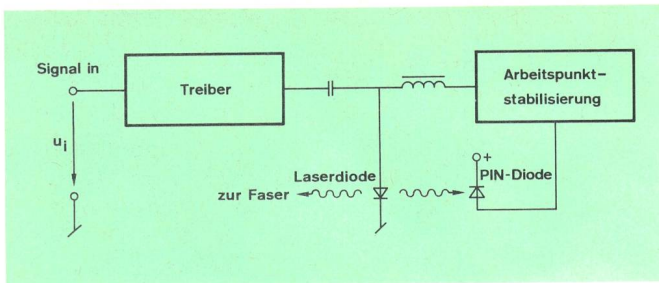


Fig. 7  
Blockschaltbild des optischen Senders für analog modulierte Signale

Das Blockschaltbild einer geeigneten Laseransteuerung ist aus *Figur 7* ersichtlich. Die Stabilisierung der mittleren optischen Sendeleistung geschieht mit einer optoelektronischen Rückkopplungsschaltung. Dabei wird das Licht aus einem der zwei teildurchlässigen Laserspiegel auf die PIN-Diode zur Regelung fokussiert. Der tatsächliche Laserarbeitsstrom wird dann durch die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert des Fotostromes der PIN-Diode bestimmt. Der Treiber stellt eine ge-

steuerte Stromquelle dar und wandelt die am Senderingang anliegende Signalspannung in einen Strom um. Die verwirklichten Schaltungen für Arbeitspunktstabilisierung und Treiber sind in *Figur 8* abgebildet.

Der Treiber ist als Differenzstufe mit zwei ausgewählten Transistoren gebaut. Durch die Ansteuerung mit der Eingangsspannung  $u_i$  fließt im rechten Ast der Schaltung ein zu  $u_i$  proportionaler Strom durch die Last, gebildet aus Laserimpedanz, Vorwiderstand und der Serienschaltung der RL-Glieder. Die Impedanz dieser RL-Kaskade ist gegenüber dem differentiellen Widerstand der Laserdiode (LD) sehr gross gewählt. Damit ist die Ansteuerung der LD aus einer Stromquelle gewährleistet. Der Vorteil der Differenzstufe gegenüber anderen einfachen Schaltungskonfigurationen liegt darin, dass die Umwandlung der Eingangsspannung in ein Stromsignal sehr linear und mit definierter Transferfunktion geschieht. Die gemessenen Intermodulationsprodukte des Treibers ohne Laserdiode (*Fig. 9a*) zeigen, dass die Linearität der Schaltung selbst ausreicht, um Fernsehkanäle mit den geforderten Spezifikationswerten der Ta-

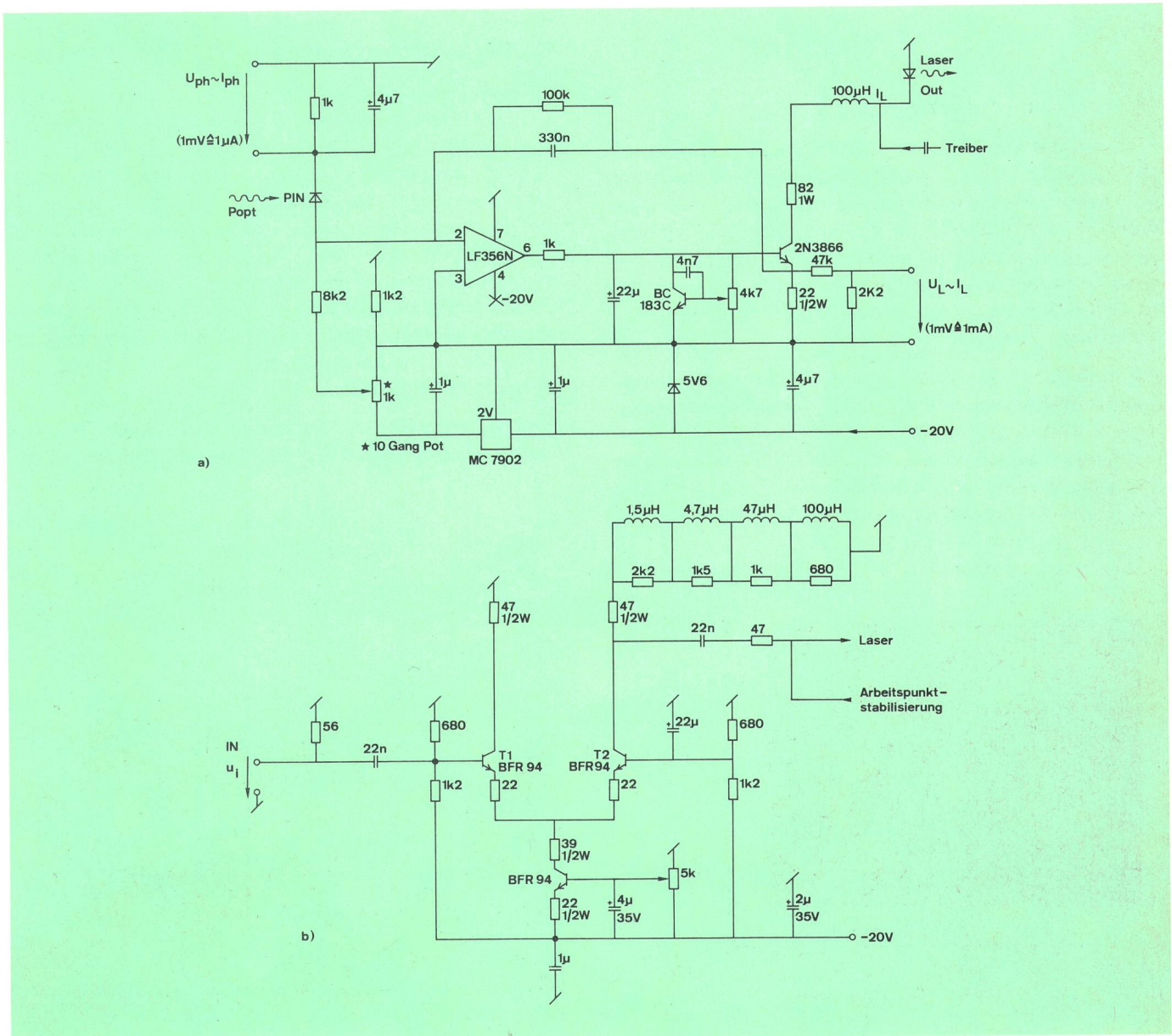


Fig. 8  
Elektronische Schaltung des optischen Senders für den Betrieb einer Laserdiode in einem analogen Faserübertragungssystem  
a) Arbeitspunktstabilisierung  
b) Treiber

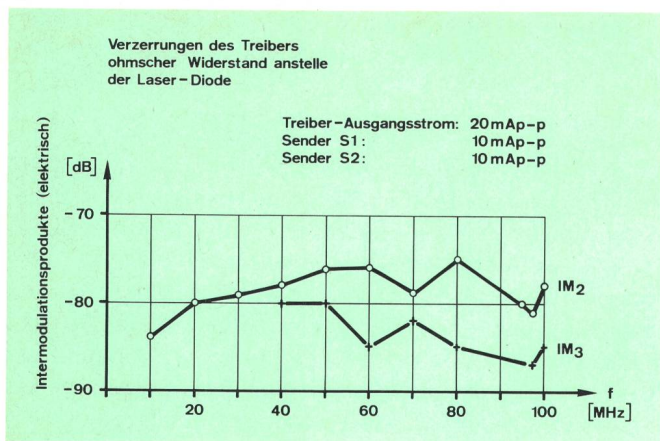


Fig. 9a  
Verzerrungen der Treiberschaltung, gemessen nach der Zweisendermethode (siehe Anhang A im Schluss), als Funktion der Frequenz des modulierenden Signals; die Signale  $S_1$  und  $S_2$  liegen frequenzmässig 2 MHz auseinander

belle I zu übertragen. Die 3-dB-Bandbreite der Treiberschaltung mit 250 MHz (0,1...250 MHz) erlaubt, das gesamte Kanalprogramm von vier TV- und sechs FM-Radiokanälen mit AM-IM oder FM-IM zu übertragen (Fig. 9b).

## 42 Faser und Faserkopplung

In den durchgeführten Faserübertragungsexperimenten gelangten ausschliesslich Gradientenindexfasern mit Kerndurchmessern von  $50 \mu\text{m}$  und numerischen Aperturen von etwa 0,2 zur Anwendung. Stufenindexfasern weisen wegen ihrer höheren Dispersionswerte kleinere Übertragungskapazitäten auf, was sich in einer Analog-Faserverbindung in der Dämpfung der höheren Frequenzen auswirkt.

In einer analogen Übertragungsstrecke ist für die erreichbaren Rauschabstände in den demodulierten Kanälen der Kopplungswirkungsgrad des Lichtes vom Laser in die Faser entscheidend. Im Laborsystem wurde in erster Linie die direkte Kopplung Laser-Faser angewendet. Die nackte Faserspitze wurde mit Hilfe von XYZ-

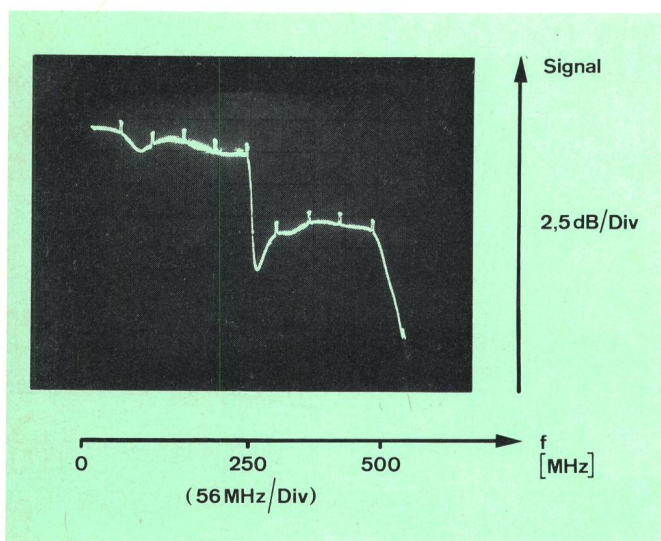


Fig. 9b  
Frequenzgang des Treibers (ohne Laserdiode gemessen; die Laserdiode ist durch einen ohmschen Abschlusswiderstand ersetzt)

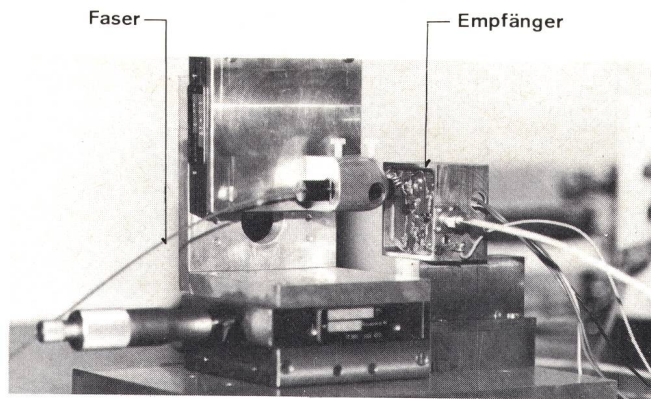


Fig. 10  
Optischer Empfänger mit angekoppelter Faser

Mikromanipulatoren wenige  $\mu\text{m}$  vor dem Laserspiegel justiert. Die Faserenden waren dabei plan geschnitten oder zu Mikrolinsen geschmolzen. Die Faserlängen von 2...4 km wurden durch Verschweissen von etwa 1 km langen Faserstücken mit einem Lichtbogenschweisgerät erreicht.

## 43 Der optische Empfänger

Figur 10 zeigt eine Aufnahme des Faserendes mit dem optischen Empfänger. Die Detektordiode ist direkt auf den Schaltungsprint gelötet. Für unsere Analog-Übertragungsversuche kamen fast nur Silizium-PIN-Dioden zur Anwendung. Sie generieren kein Exzessrauschen und zeichnen sich zudem durch eine sehr lineare Licht-Strom-Charakteristik aus. Selbst bei verhältnismässig grossen optischen Signalleistungen (etwa  $-10 \text{ dBm}$ ) bleiben die Verzerrungen des Fotostroms unter dem Schrot-rauschpegel [28]. Avalanche-Fotodioden dagegen generieren messbare Verzerrungen, die vom Gainfaktor abhängig sind (Fig. 11).

In faseroptischen Systemen, in denen grosser Rauschabstand bei kleiner optischer Signalleistung ver-

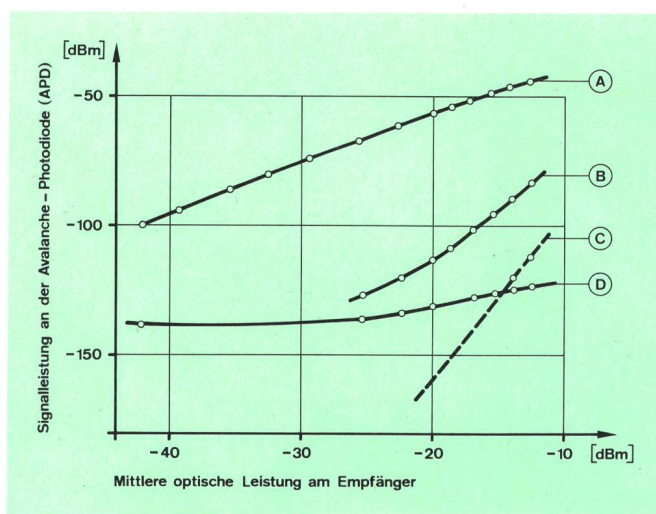


Fig. 11  
Intermodulationsverzerrungen einer Avalanche-Photodiode (APD) nach T. Ozeki [28]

- (A) Grundfrequenz
- (B) Zweite Harmonische
- (C) Dritte Harmonische
- (D) Rauschgrenze des Messsystems



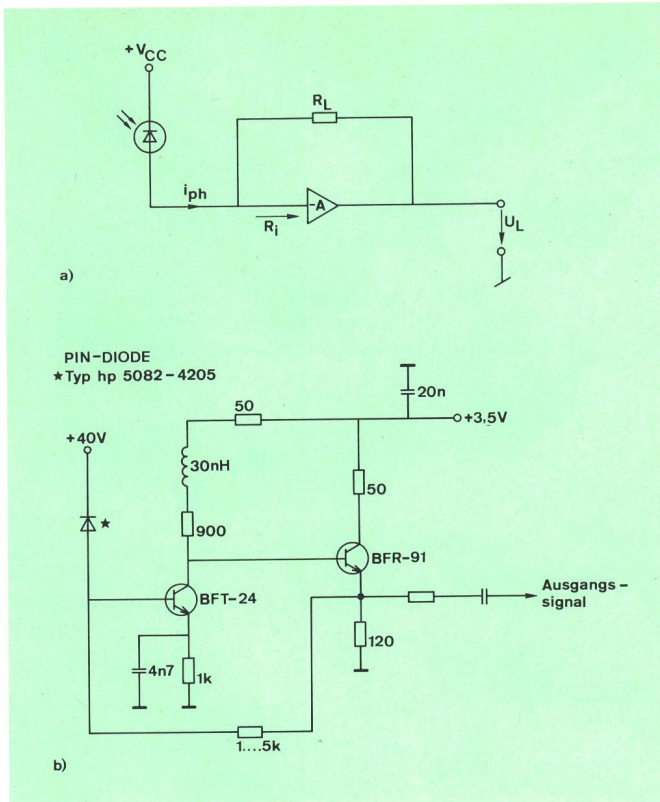


Fig. 12  
Prinzipschaltbild a) und realisierte Version eines Transimpedanzempfängers b)

langt wird, spielt die Wahl des Empfängerverstärkers eine wichtige Rolle. Ein geeignetes Schaltungsprinzip, bei dem gute Empfindlichkeit mit grosser Bandbreite verbunden werden kann, ist der Transimpedanzverstärker (Fig. 12a) [29]: der Fotostrom  $i_{ph}$  wird hier über den Widerstand  $R_L$  in eine Spannung  $u_L$  gewandelt. Unter der Annahme, die Verstärkung  $A$  sei sehr gross ( $\rightarrow$  unendlich), gilt für tiefe Frequenzen die Beziehung:

$$u_L = -R_L \cdot i_{ph}$$

Bei dieser Schaltung wird die Anode der Diode für Wechselstromsignale praktisch auf Masse gehalten. Zur Reduktion der Sperrschichtkapazität der Diode legt man eine Vorspannung  $V_{cc}$  von 20...100 V an.

Die Empfindlichkeit eines Transimpedanzverstärkers mit PIN-Diode wird begrenzt durch das thermische Rauschen des Eingangs- und des Rückkopplungswiderstandes  $R_i$  beziehungsweise  $R_L$  sowie des Eigenrauschens der ersten Verstärkerstufe. In einer Schaltung mit Bipolartransistoren ist bei tiefen Frequenzen vor allem der Schrotrauschterm des Basisstroms zu beachten. Kleine Basisströme des ersten Transistors und grosse Werte für  $R_i$  und  $R_L$  erhöhen die Empfindlichkeit der Empfangschaltung. Für einen empfindlichen Transimpedanzverstärker mit grosser Bandbreite sind in der ersten Stufe zudem Transistoren mit hoher Transitfrequenz bei kleinen Basisströmen unerlässlich.

In Fig. 12b ist eine realisierte Schaltung mit zwei ausgesuchten Bipolartransistoren gezeigt. Der Frequenzgang des optischen Empfängers ist in Fig. 13 aufgezeichnet. Mit einer Rückkopplungsimpedanz von 2 k $\Omega$  wurde ein äquivalenter Rauschstrom  $I_N$  von 70  $\mu$ A gemessen.  $I_N$  ist derjenige DC-Photostrom der Photodiode,

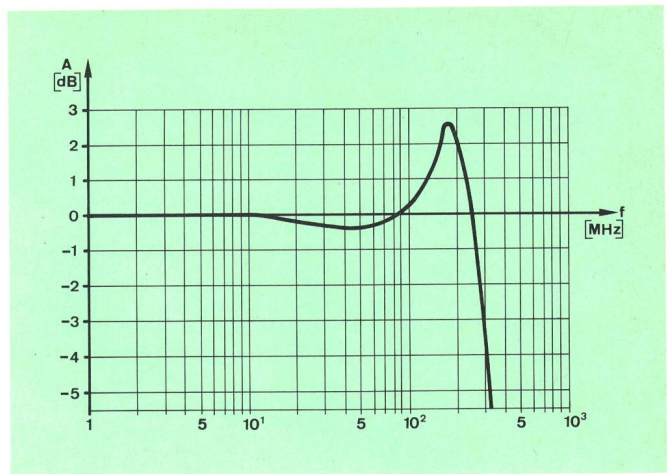


Fig. 13  
Frequenzgang des optischen Empfängers nach Fig. 12b

der eine Verdoppelung der Rauschleistung am Verstärkerausgang bewirkt [30] und ein gutes Mass für die Charakterisierung des Eigenrauschens einer optischen Empfängerschaltung darstellt.

### Bibliographie

- [1] Collier M. E. und Horsley A. W. Mögliche Anwendungen faseroptischer Übertragungssysteme. Stuttgart. Elektrisches Nachrichtenwesen 53 (1978) 2, S. 136.
- [2] Maurer R. D. Glass Fibers for Optical Communications. New York, Proceedings of the IEEE 61 (1973) 4, p. 452.
- [3] Miya T. et al.: Low Loss Single Mode Fiber at 1,55  $\mu$ m. London, Electronic Letters 15 (1979) 106.
- [4] Asatani K., Sato K. and Ishio H. Feasibility Experiments on Analog Video Transmission Using a Semiconductor Laser Diode over 30 km Transmission at 1,3  $\mu$ m Wavelength. Amsterdam, 5th European Conference on Optical Communication, September 17-19, 1979.
- [5] Rawson E. G. Fibernet: Multimode Optical Fibers for Local Computer Networks. New York, IEEE Transactions on Communications, Com-26 (July 1978) 7.
- [6] Panish M. B. Heterostructure Injection Laser. New York, Proceedings of the IEEE 64 (1976) 10.
- [7] Casey A. and Panish M. Heterostructure Lasers. New York, Academic Press, 1978.
- [8] Berg A. A. and Dean P. J. Light Emitting Diodes. Proceedings of the IEEE 60 (1972) 2.
- [9] Kressel H. and Butler J. K. Semiconductor Lasers + Heterojunction LED's. New York, Academic Press, 1977.
- [10] Midwinter E. Optical Fiber Transmission Systems. London, Post Office Electrical Engineers Journal 70 (1977) 3.
- [11] Fagenbaum J. Optical Systems: A Review. New York, IEEE Spectrum 16 (1979) 10, p. 70.
- [12] Gundlach R. Fiber-Optic Developments Spark Worldwide Interest. New York, Electronics 49 (1976) 16, p. 81.
- [13] Optical Spectra und IFOC Fiber Optics. Monthly publications, from 1981 on.
- [14] Montgomery J. D. Fiber Optic Applications and Markets. New York, IEEE Transactions on Communications, Com-26 (1978) 7.
- [15] Cannon T. C. Installation and Performance of the Chicago Lightwave Transmission System. New York, IEEE Transactions on Communications, Com-26 (1978) 7.
- [16] Sekifa M. and Kavamura T. TV Video Transmission by Analog Baseband Modulation of a 1,3  $\mu$ m-Bande Laser Diode. York, 6th European Conference on Optical Communications, September 1980.
- [17] Miyaskita T. IEEE/OSA Topical Meeting on Optical Fiber Communication, Washington, March 6-8, 1979.
- [18] Henshall G. D. and Green P. D. In GaAsP/InP DH Lasers for CW Operation at 1,5  $\mu$ m Wavelength. 7th IEEE International Semiconductor Laser Conference, September 8-10, 1980.

- [19] *Melchior H.* Detectors for Lightwave Communication. Physics Today 30 (1977) November.
- [20] *Personick S. D.* Receiver Design for Optical Fiber Systems. New York, Proceedings of the IEEE 65 (1977) 12, p. 1670.
- [21] *McCumber D. E.* Intensity Fluctuations in the Output of CW Laser Oscillators. Physical Review 141 (January 1966) 1.
- [22] *Jäckel H.* Lichtemissionsrauschen und dynamisches Verhalten von GaAlAs-Heterostruktur-Diodenlasern im Frequenzbereich von 10 MHz bis 8 GHz. Zürich, Dissertation ETH Nr. 6447, 1980.
- [23] *Kim H. B.* and *Conradi J.* A long Wavelength LED Based Multichannel Video Transmission System Using FM. 6th European Conference on Optical Communication, September 1980.
- [24] *McDevitt F. R.* Optimized Designs for Fiber-Optic Cable Television Systems. New York, IEEE Transactions on Cable Television CATV-2 (1977) 4.
- [25] *Schwartz H., Bennett W.* and *Stein S.* Communication Systems and Techniques. McGraw-Hill, 1966.
- [26] *Mitsutake S. et al.* Pulse Interval and Width Modulation for Video Transmission. New York, IEEE Transactions on Cable Television CATV-3 (1978) 4.
- [27] *Sandbank C. P.* Optical Fiber Communication Systems. John Wiley+ Sons (1980) p. 159.
- [28] *Ozeki T.* and *Hara E. H.* Nonlinear Distortions in Measurement of Photodiodes. Electronic Letters 12 (1976) February.
- [29] *Melchior H.* Noise in Semiconductor Lasers: Topical Meeting on Integrated + Guided-Wave Optics. Newada, January 30, 1980.
- [30] *Paoli T. L.* Intrinsic Fluctuation in the Output of Metro-structure Junction Lasers Operating Continuously at 300 ° K. New York, Applied Physics Letters 24 (1974) 4, p. 187.

*Adresse der Autoren:* R. Welter, Hp. Berger, G. Guekos, A. Dill, A. Sollberger, H. Melchior, c/o ETH Hönggerberg, Institut für angewandte Physik, 8093 Zürich, und W. Steffen, c/o Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Viktoriastrasse 21, 3030 Bern.

---

**Die nächste Nummer bringt unter anderem  
Vous pouvez lire dans le prochain numéro**

**4/82**

- |  |  |
|--|--|
| R. Novák   | Optische Stecker<br>Connecteurs optiques   |
| W. Grundbacher   | Prüfverbindungsautomat — Hilfsmittel zur Prototypprüfung von Telefonzentralen  |
| A. Gachet,<br>F. Moser   | Die Ausbildung der Ingenieure und Handwerker der PTT über Mikrocomputer<br>La formation des ingénieurs et des artisans des PTT dans le domaine des micro-ordinateurs |
| R. Welter,<br>H. Berger,<br>G. Guekos,<br>A. Dill,<br>A. Sollberger,<br>H. Melchior,<br>W. Steffen | Möglichkeiten und Grenzen der AM- und FM-Übertragung von Fernsehsignalen auf Glasfasern  |
-