

**Zeitschrift:** Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

**Herausgeber:** Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

**Band:** 43 (1970)

**Heft:** 7

**Artikel:** Optische Nachrichtenübermittlung

**Autor:** Schweizer, J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-562955>

#### **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:** 23.02.2026

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

# Optische Nachrichtenübermittlung

## 1. Einleitung

Mit der Entdeckung des Lasers\* erfuhr das Spektrum der für die Nachrichtenübermittlung verwendbaren elektromagnetischen Wellen eine gewaltige Erweiterung. Laser erzeugen kohärentes Licht, d. h. monochromatische, elektromagnetische Wellen, die dieselben Eigenschaften aufweisen wie ein Radiosignal. Ein optisches Übertragungssystem muss somit als eine logische Weiterentwicklung der Mikrowellensysteme aufgefasst werden. Es sind alle aus der klassischen Elektronik bekannten Modulationsarten wie Amplituden-, Frequenzmodulation usw. realisierbar.

Das grosse Interesse, das der optischen Übertragung entgegengebracht wird, ist dem Umstand zuzuschreiben, dass plötzlich Kanalkapazitäten zur Verfügung stehen, die bis jetzt undenkbar waren. Eine Verbindung mit rotem Licht mit einer Trägerfrequenz von  $5 \cdot 10^{14}$  Hz kann zum Beispiel  $10^9$  Telephonespräche gleichzeitig übertragen. Von ebenso grosser Wichtigkeit ist die grosse Bündelbarkeit der Lichtwellen. Je grösser das Verhältnis vom Antennendurchmesser zur betreffenden Wellenlänge ist, desto schärfer wird die abgestrahlte Welle gebündelt. Im optischen Gebiet wird die Antenne von einem Linsen- oder Spiegelsystem gebildet. Aus der starken Bündelung des Lichtes resultiert ein geringer Leistungsverlust, so dass dadurch grosse Entfernungen überbrückt werden können.

Die Komponenten eines optischen Übertragungssystems können in vier Teilgebiete zerlegt werden:

1. Erzeugung der Trägerfrequenz
2. Modulation
3. Transmissionsmedium
4. Detektion.

Diese Elemente sind schematisch in Fig. 1 dargestellt. Es werden zwei Übertragungstypen einander gegenübergestellt, die sich nur in der Art der Detektion unterscheiden: a) direkte Detektion und b) Überlagerungsempfang.

Das Licht, das im Laser erzeugt worden ist, durchläuft den Modulator und anschliessend eine «Antenne». Im Empfänger wird das Licht wiederum von einer «Antenne» gesammelt und auf einen photoelektrischen Wandler fokussiert. Zur Herabsetzung der Hintergrundstrahlung (Störlicht) wird ein Schmalbandfilter vor den Empfänger gesetzt. Das Laserlicht wird durchgelassen, das übrige unterdrückt.

Um grosse Distanzen überbrücken zu können, werden grosse Leistungen benötigt. Diese können entweder durch

\* 1960: Rubinlaser durch A. L. Schawlow, C. H. Townes, T. H. Maiman.  
1961: Gaslaser durch A. Javan, W. R. Bennet und D. R. Herriot.

1961: Halbleiterlaser durch M. I. Nathan, R. N. Hall u. a.

Erschienen in den HASLER-Mitteilungen Nr. 1/1970. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung der Herausgeberin

Bündelung des Lichtes (Vergrösserung der Antenne) oder durch Einsatz von leistungsstarken Lasern erzielt werden. Die Bedeutung der Leistung kann noch besser veranschaulicht werden, wenn sie in Relation zum Photonenfluss gestellt wird. Photonen oder Lichtquanten sind die kleinsten Informationsträger im optischen Bereich. Im Idealfall kann ein Bit durch ein Photon dargestellt werden. In der Praxis werden jedoch mindestens deren 20 bis 50 benötigt.

Die Anzahl der heute zur Verfügung stehenden Laser erlaubt, den ganzen optischen Spektralbereich zu überstreichen. Man wird den betreffenden Laser nach den Bedürfnissen des Übertragungskanals auswählen. Wenn eine terrestrische Verbindung aufgebaut werden muss, deren Transmissionsmedium einfach von der Atmosphäre gebildet wird, so wird man eine Lichtquelle verwenden, deren Licht in ein sog. optisches Fenster fällt, d. h. in einen Frequenzbereich, der von der Atmosphäre wenig gestört wird. In Fig. 2 ist die Transmission der Atmosphäre in Funktion der Wellenlängen aufgetragen. Gleichzeitig sind die Wellenlängen der wichtigsten Laser eingezeichnet.

Grundsätzlich wird man Laser verwenden, die kontinuierlich betrieben werden können, wie zum Beispiel Gaslaser Helium-Neon, Argon, Xenon, Stickstoff oder Kohlendioxid. Die Festkörperlaser (Rubin, Neodym usw.) werden meist gepulst betrieben. Doch sind in letzter Zeit verschiedene Typen erhältlich geworden, die kontinuierlich arbeiten. Da aber ihr Ausgangslicht meist im Infraroten liegt, müssen zur Wellenlängenumwandlung in den sichtbaren Spektralbereich Konversionselemente hinzugefügt werden. Mit gewissen ferroelektrischen Kristallen lassen sich Harmonische der Grundlichtwellen erzeugen, deren Wellenlänge im Sichtbaren liegt. Halbleiterlaser eignen sich vorderhand noch nicht für Signalübermittlungen über grössere Distanzen, da sie für grosse Ausgangsleistungen im kontinuierlichen Betrieb gekühlt werden müssen.

Im Wettstreit mit den bisherigen Übertragungssystemen kann das optische System erst dann als konkurrenzfähig gelten, wenn

- a) kontinuierliche Festkörperlaser grosser Leistung oder
- b) Gaslaser grosser Leistung und langer Lebensdauer oder
- c) Halbleiterlaser grosser Leistung

erhältlich sein werden.

Die Ausnutzung der Kanalkapazität einer Laser-Nachrichtenverbindung hängt nur von der Fähigkeit ab, den optischen Träger passend zu modulieren. Wie bereits erwähnt, sind alle bekannten Modulationsarten möglich. Das Signal kann entweder durch interne Modulation, d. h. durch Variation der Parameter innerhalb des Lasers, oder durch externe Modulation, d. h. durch Verändern eines Parameters des Lichtes, nachdem es im Laser erzeugt worden ist, dem

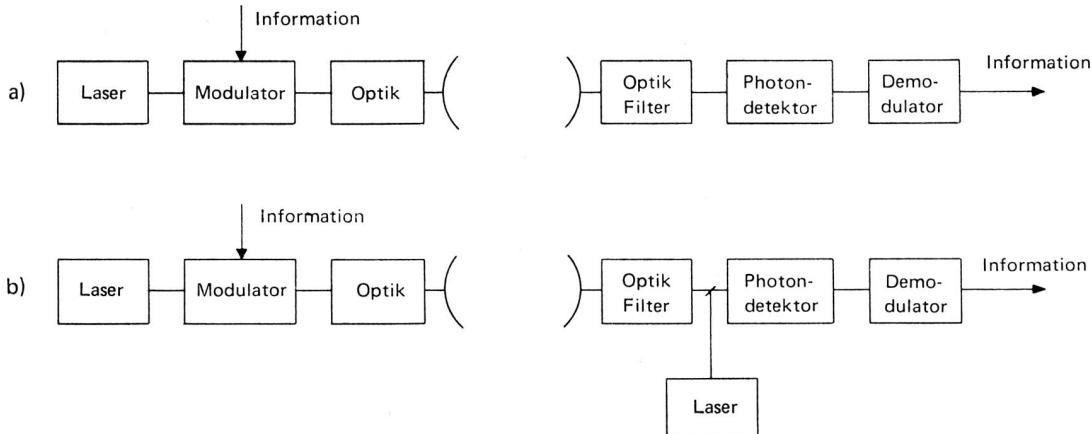


Fig. 1 Elemente eines Übertragungssystems: a) «Geradeaus»-Empfang, b) Überlagerungsempfang

Licht aufgeprägt werden. Die Modulation selbst erfolgt durch die Variation eines Wellenparameters wie Amplitude, Frequenz, Phase oder Polarisation. In letzter Zeit sind auch pulscodeierte Systeme bekannt geworden, in welchen die Information durch Ein- und Ausschalten des Trägers in bestimmten Zeitintervallen übermittelt wird. Die Modulation von Laserlicht wird im nächsten Kapitel eingehender beschrieben.

Im Gegensatz zu Radio- und Mikrowellensignalen, für welche die Atmosphäre normalerweise durchsichtig ist, wird die Ausbreitung des sichtbaren und infraroten Lichtes sehr stark gestört. Absorption, Turbulenz und Streuung erzeugen Fluktuationen in der Ausbreitungsrichtung, der Phase, der Intensität und der Polarisation der optischen Wellenfront. Die relativen Störungen, die durch diese Effekte verursacht werden, hängen vom gewählten Übertragungssystem ab. Phasenfluktuationen wirken sich störend beim Überlagerungsempfang aus, und Intensitätsfluktuationen rufen in amplitudenmodulierten Signalen eine zusätzliche Modulation hervor. Zudem kann in einem kohärenten Lichtstrahl Interferenz zwischen verschiedenen Teilen des Strahles entstehen, so dass die Wellenfront komplett zerstört wird. Wie

diese Störungen umgangen werden können, wird in einem späteren Abschnitt beschrieben.

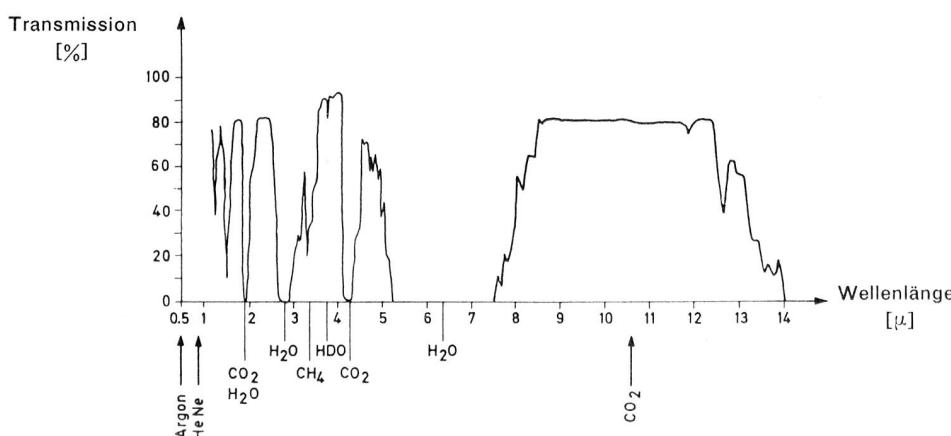
Wie bereits in Fig. 1 angedeutet, kommen für die Detektion zwei Systeme in Frage. Beide Systeme sind ungefähr gleichwertig, wird doch die untere Empfindlichkeitsgrenze durch das Rauschen des Detektors selbst bestimmt.

## 2. Modulation

Da ein optisches Übertragungssystem eine ungeheuer grosse Kanalkapazität besitzt, müssen Modulatoren fähig sein, Signale mit Bandbreiten von einigen 100, ja sogar einigen 1000 MHz zu verarbeiten. Somit muss auch der physikalische Effekt, auf welchem die Modulation des Lichtes beruht, schnell genug sein, um diesen Frequenzen zu folgen. Elektrische und magnetische Felder, die sich über den elektro-optischen oder magneto-optischen Effekt auswirken, werden sicher schnell genug sein. Thermische oder gar mechanische Methoden müssen fallengelassen werden, da sie zu langsam sind.

Eine Methode, die in der internen Modulation einige Wichtigkeit erlangt hat, wird als «Pumpmodulation» bezeichnet.

Fig. 2 Transmission der Atmosphäre



In einem Gas-, Festkörper- oder Halbleiterlaser kann durch Variation der Pumpleistung oder des Entladestromes die Ausgangsleistung moduliert werden. Die Leistungsänderung beruht im wesentlichen auf einem Auf- bzw. Abbau der im Laserresonator gespeicherten Energie. Dieser Vorgang weist aber einen schweren Nachteil auf, da eine solche Veränderung nicht schneller erfolgen kann, als es die Bandbreite des Resonators erlaubt. Für einen Gaslaser üblicher Grösse liegt dieser Wert bei etwa 100 kHz, für einen Halbleiterlaser hingegen beträchtlich höher.

Der physikalische Effekt, der heute zur Modulation von Licht herangezogen wird, ist der elektro-optische Effekt. Das Anlegen eines elektrischen Feldes an eine Flüssigkeit oder einen festen Körper bewirkt eine kleine Änderung des Brechungsindexes. Wenn dieser verkleinert wird, erfährt ein den Körper durchlaufender Lichtstrahl eine grössere Geschwindigkeit. Wenn der Brechungsindex hingegen erhöht wird, so ist diese kleiner. Das Medium wird unter dem Feld-einfluss meistens doppelbrechend, d. h. ein Lichtstrahl mit verschiedenen linearen Polarisationsrichtungen durchdringt den Körper mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Durch die Geschwindigkeitsänderung des Lichtes wird die Phase der Welle beeinflusst. Somit kann ein elektro-optischer Modulator als Phasenmodulator betrachtet werden. Für die Phasenverschiebung  $\Gamma$  zwischen zwei Lichtstrahlen verschiedener Polarisationsrichtungen, die ein elektro-optisches Medium durchlaufen, gilt

$$\Gamma = \beta E^m(L) L \quad (1)$$

wo  $\beta$  eine Materialkonstante,  $E$  das elektrische Feld,  $L$  die Länge des Modulationselementes und  $m$  eine Konstante ist, die je nach linearem oder quadratischem elektro-optischem Effekt den Wert 1 oder 2 annimmt. Allgemein werden diese Erscheinungen Pockels- bzw. Kerr-Effekt genannt.

Eine Möglichkeit für die quadratische Modulation bietet die bekannte Kerrzelle. Eine solche besteht aus einem mit Nitrobenzol gefüllten Kondensator, zwischen dessen Platten Licht hindurchtreten kann. Die Zelle wird zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren gelegt. Im spannungslosen Zustand ist diese Anordnung undurchsichtig. Wird jedoch eine hohe elektrische Spannung an den Kondensator gelegt, so kommt infolge der Doppelbrechung im Nitrobenzol eine Aufhellung zustande.

Anstelle der Kerrzelle verwendet man heute Kristalle, die einen linearen oder quadratischen elektro-optischen Effekt besitzen. Die meistbenutzten Kristalle weisen einen linearen

Effekt auf und gehören der ADP- oder ferro-elektrischen Perovskitgruppe an. Zur ADP-Gruppe gehören Ammoniumdihydrogenphosphat (ADP), Kaliumdihydrogenphosphat (KDP) und deuteriertes KDP (KDDP), während zu der ferro-elektrischen Perovskitgruppe Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ), Bariumniobat ( $\text{BaNbO}_3$ ) und Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) gehören. Im spannungslosen Zustand sind diese Kristalle einachsig. Sobald aber ein elektrisches Feld angelegt wird, werden neue Achsen induziert, die im Falle von KDP um  $45^\circ$  gegenüber den ursprünglichen gedreht sind. Die Orientierung der Achsen geht aus Fig. 3 hervor.

Die induzierten Brechungsindizes betragen:

$$n_x' = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E_z \quad (2)$$

$$n_y' = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E_z$$

$$n_z' = n_0$$

$n_0$  = ordentlicher

$n_0$  = ausserordentlicher } Brechungsindex

$r_{63}$  = elektro-optische Konstante

$E_z$  = angelegtes elektrisches Feld.

Aus (2) folgt nun, dass ein Lichtstrahl mit Polarisation in  $x'$ -Richtung einen Kristall mit angelegtem elektrischem Feld in einer kürzeren Zeit durchläuft als einen solchen ohne Feld. Wenn der Strahl aber in  $y'$ -Richtung polarisiert ist, wird seine Propagationszeit erhöht. Anders ausgedrückt heisst das, dass durch das Anlegen eines elektrischen Feldes im Kristall eine Doppelbrechung induziert wird. Diese Erscheinung wird nun zur Modulation von Licht ausgenutzt. Der prinzipielle Aufbau eines Modulators ist in Fig. 3 dargestellt. Der Laserstrahl, dessen linearpolarisiertes Licht parallel zur  $x$ -Achse schwingt, durchläuft den Kristall längs der  $z$ -Achse, die zugleich Richtung des elektrischen Wechselfeldes ist. Der Lichtstrahl wird in zwei Komponenten (Polarisation parallel zu  $x'$ - und  $y'$ -Achse) zerlegt, die sich nun mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortpflanzen. Ihre Phasen stimmen also am Ausgang des Kristalles nicht mehr überein, so dass die Rekombination der beiden Komponenten nicht mehr die ursprünglich linear polarisierte Welle ergibt. Diese ist vielmehr elliptisch polarisiert oder phasenmoduliert. Da ein gewöhnlicher Photodetektor diese Phasenvariation nicht detektieren kann, muss die Phasenmodulation in eine Amplitudenmodulation umgewandelt werden, was durch Anbringen eines zweiten Polarisationsfilters geschieht. Je nach Codierung stehen die Achsen der Filter senkrecht oder parallel zueinander.

Die Amplituden der einzelnen Komponenten betragen nach dem Kristall:

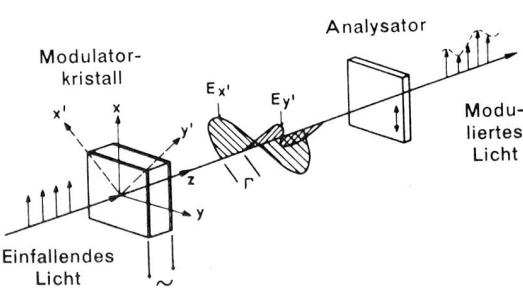
$$E_x' = A e^{i \varphi_x'} = A e^{i (\omega/c) [n_0 - \frac{1}{2} n_0^2 r_{63} E_z] L} \quad (3)$$

$$E_y' = A e^{i \varphi_y'} = A e^{i (\omega/c) [n_0 + \frac{1}{2} n_0^2 r_{63} E_z] L}$$

$\omega$  = Kreisfrequenz des Lichtes

$c$  = Lichtgeschwindigkeit

$L$  = Länge des Kristalls



195 Fig. 3 Schematischer Aufbau eines Modulators

Die Verzögerung  $\Gamma$  ergibt sich aus der Phasendifferenz  $\varphi_y' - \varphi_x'$

$$\Gamma = \varphi_y' - \varphi_x' = \frac{\omega n_0^3 r_{63} E_z L}{2 c} \quad (4)$$

Damit man bequemer rechnen kann, führt man folgende Abkürzungen ein:

$\lambda_0 = 2\pi c/\omega$  = Vakuum-Wellenlänge des Lichtes

$V_z = E_z L$  = angelegte Spannung in z-Richtung

$$V\lambda/2 = \frac{\lambda_0}{2 n_0^3 r_{63}} = \text{Halbwellenspannung}$$

Die Halbwellenspannung ist diejenige Spannung, die benötigt wird, um die Phase des Lichtes um  $\pi$  zu drehen. Für (4) schreibt man schliesslich nur noch

$$\Gamma = \pi \frac{V_z}{V\lambda/2} \quad (5)$$

Die Wirkungsweise des Modulators ist nun einfach. Wenn keine Spannung angelegt ist, so ist  $\Gamma = 0$  und der austretende Lichtstrahl besitzt die gleiche Polarisationsrichtung wie der einfallende. Für  $V_z = V\lambda/2$  wird aber  $\Gamma = \pi$  und die Polarisationsrichtung steht senkrecht zur x-Achse.

Wenn dieses Verzögerungselement oder Pockelszelle, wie es allgemein genannt wird, zwischen gekreuzte Polarisatoren gestellt wird, so ist die Transmission des Systems für  $\Gamma = 0$  auch Null und für  $\Gamma = \pi$  gleich Eins. Die Transmission beträgt allgemein

$$T = \frac{1}{2} (EE^*) \quad (6)$$

wo  $(EE^*)$  das Skalarprodukt der Feldstärken bedeutet. Der Stern steht für konjugiert komplex.

Wenn  $E_y' = E_x' = 1$  eingesetzt werden, so erhält man

$$T = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \quad (7)$$

für gekreuzte und

$$T = \cos^2 \frac{\Gamma}{2} \quad (8)$$

für parallele Polarisatoren.

Der Transmissionsverlauf (8) ist in Fig. 4 dargestellt.

Für  $\Gamma$  wird nun eine zeitabhängige Funktion eingesetzt.

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 + \sin \omega_m t \quad \omega_m \ll \omega \quad (9)$$

$\omega_m$  = Modulationsfrequenz

Die durchgelassene Lichtwelle besitzt einen modulierten Anteil. Wie aus Fig. 4 ersichtlich ist, kann mit  $\Gamma_0$  der Arbeitspunkt festgelegt werden. Für  $\Gamma_0 = 0$  befindet sich der Arbeitspunkt im nichtlinearen Gebiet der Transmissionscharakteristik (Fig. 4a). Die maximale Ausgangsamplitude wird für  $\Gamma_0 = \pi/2$  erhalten (Fig. 4b). Diese Verschiebung kann entweder mit einer entsprechenden elektrischen Vorspannung oder mit einem optischen Phasenschieber erfolgen. Da eine hohe elektrische Vorspannung aus technischen Gründen nicht erwünscht ist, setzt man mit Vorteil ein optisches Filter ein, in diesem Falle eine  $\lambda/4$ -Platte. Diese wird aus einem Quarzkristall hergestellt. Die Plattendicke ist so gewählt worden, dass der Phasenunterschied für die betreffende Wellenlänge gerade  $\pi/2$  entspricht.

Der eben beschriebene Modulator weist einige schwerwiegende Nachteile auf. Da das Licht und das elektrische Feld parallel verlaufen – man spricht von einem longitudinalen Modulator –, müssen entweder durchsichtige Elektroden auf den Kristall aufgedampft oder Aussparungen in Metallelektroden ausgelassen werden, die das elektrische Feld stören. Die Modulationsspannung ist in diesem Falle sehr hoch und von den Kristallmessungen unabhängig. Wenn nun bei sehr hohen Frequenzen Modulationsspannungen von einigen Kilovolt an den Kristall angelegt werden müssen, so kann die im Modulator erzeugte Verlustleistung  $P$  (der Modulator stellt im wesentlichen eine kapazitive Last dar)

$$P = \frac{\omega_m C V^2}{2 Q} \quad (10)$$

$\omega_m$  = Modulationsfrequenz

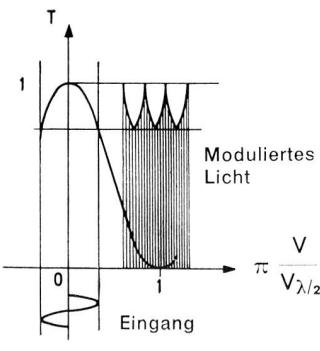
$C$  = Kapazität } des Modulators

$Q$  = Güte

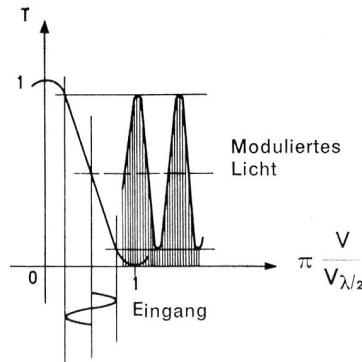
so hoch werden, dass der Kristall durch die erzeugte Wärme zerstört werden kann.

Wenn bei gleichbleibender Kristallorientierung die Elektroden senkrecht zur Lichtausbreitung angeordnet werden, so erhöht sich in KDP die Modulationsspannung um einen Faktor drei. Dafür zeigt sich aber, dass die Halbwelspannung durch die geometrischen Abmessungen des Kristalls beeinflusst werden kann. Die erforderliche Spannung

Fig. 4 Modulatorcharakteristik



a)



b)

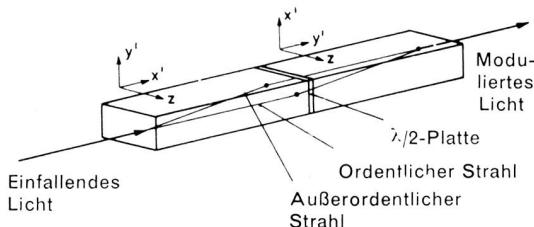


Fig. 5 Schematischer Aufbau eines transversalen Modulators

kann um einen Faktor, der sich aus dem Verhältnis der Länge des Kristalls zum Elektrodenabstand ergibt, erniedrigt werden. Auf diese Weise können Modulatoren aufgebaut werden, die eine Halbwellesspannung von der Größenordnung 100 V benötigen, d. h. sie können mit transistortisierten Verstärkern betrieben werden. In einer solchen Konfiguration, die schematisch in Fig. 5 gezeigt ist, tritt leider zusätzlich die Doppelbrechung der Kristalle in Erscheinung. Diese ist temperaturabhängig, d. h. ein so gebauter Modulator muss auf einer konstanten Temperatur gehalten werden, wenn zusätzlich keine Modulation geduldet werden kann.

Durch einen kleinen Kunstgriff kann aber dieser Temperatureffekt elegant umgangen werden. Es werden zwei verschiedenen orientierte Kristalle optisch in Serie geschaltet, so dass der ordentliche Lichtstrahl im ersten Kristall zum außerordentlichen im zweiten Kristall wird, und umgekehrt. Die Phasenschiebung um  $\pi$  wird mit einer  $\lambda/2$ -Platte erzeugt. Auf diese Weise werden die beiden Lichtwege innerhalb des Modulators gleich lang.

Da der verwendete Kristall hygroskopisch ist, muss er vor Umgebungseinflüssen geschützt werden, etwa in einem Gehäuse aus Plexiglas. Die Stirnflächen des Kristalls deckt man mit exakt geschliffenen Glasplatten ab. Um einen guten optischen Kontakt zu gewährleisten, wird der Zwischenraum Glas/Kristall mit einem Silikonöl ausgefüllt, das denselben Brechungsindex besitzt. Diese Glasplatten erlauben es zudem, auf den äusseren Seiten eine Antireflexschicht aufzudampfen. Die optischen Verluste werden dadurch beachtlich verringert.

In Tabelle I sind der Vollständigkeit halber die Halbwellesspannungen der heute gebräuchlichsten elektro-optischen Kristalle aufgeführt. Der geometrische Faktor wurde als 1 angenommen und alle Werte wurden auf die Wellenlänge des Helium-Neon-Lasers ( $\lambda = 0,6328 \mu$ ) umgerechnet.

Kristall	Halbwellesspannung in Kilovolt	
	longitudinal	transversal
ADP	11,5	7,67
KDP	9,25	22,0
KDDP	3,9	ca. 30,0
$\text{LiNbO}_3$	4,2	2,9
$\text{LiTaO}_3$	—	2,8
$\text{SrBaNb}_2\text{O}_6$	—	0,048

Tabelle I Halbwellesspannungen der gebräuchlichsten Modulatorkristalle für das sichtbare Spektrum

Es ist schwierig zu sagen, welches elektro-optische Material schliesslich die besten Resultate liefern wird. Es sieht so aus, als würden Lithiumniobat und Lithiumtantalat die grössten Modulations-Bandbreiten liefern. Diese Materialien sind viel besser zu handhaben und lassen sich leicht bearbeiten. Da sie andere Kristallstrukturen besitzen, können nicht dieselben elektro-optischen Relationen wie für KDP benutzt werden. Insbesondere besitzen sie eine natürliche Doppelbrechung, d. h. auch ohne angelegtes elektrisches Feld werden zwei verschiedene polarisierte Lichtkomponenten mit verschiedenen Geschwindigkeiten den Kristall durchsetzen. Solange die Temperatur über dem ganzen Kristall gleich bleibt, ist die «thermische» Verzögerung konstant. Wenn diese hingegen schwankt – was sicher der Fall sein wird, da der Modulator als Kapazität mit endlicher Güte betrachtet werden kann –, so wird die Doppelbrechung dieser Variation folgen und eine zusätzliche Modulation erzeugen. Dieser Effekt kann nur durch eine Konstanthaltung der Temperatur über dem Kristall verhindert werden. Deshalb muss der Modulator in ein thermostabilisiertes Gehäuse, dessen Temperatur auf  $0,03^\circ\text{C}$  konstant gehalten wird, eingebaut werden.

Man kann aber auch eine andere Orientierung des Kristalls wählen, in welcher er keine natürliche Doppelbrechung zeigt. Die Halbwellesspannung erhöht sich für  $\text{LiNbO}_3$  dabei von 2900 V auf 4000 V.

Unter gewissen Bedingungen wäre es also besser, eine erhöhte Modulationsleistung zuzuführen. Bei der Berechnung des Leistungsbedarfes muss aber die Dielektrizitätskonstante berücksichtigt werden. Im zweiten Fall ist diese fast doppelt so gross wie im ersten. Wenn die Treiberleistungen schliesslich miteinander verglichen werden, ergibt sich für den zweiten Fall ein rund 4mal höherer Leistungsbedarf.

### 3. Detektion

Ähnlich wie in der Radiotechnik kommen bei der optischen Übertragung zwei Systeme in Frage:

- direkte Demodulation,
- Überlagerungsempfang.

#### a) Direkte Photodetektion (inkohärente Detektion)

Wie in Fig. 1 schematisch dargestellt ist, setzt sich der Empfänger aus einer Linse oder einem Teleskop, einem optischen Schmalbandfilter, das die Hintergrundstrahlung unterdrückt, und dem photoelektrischen Wandler zusammen. Obwohl die Demodulation derjenigen eines Kristalldetektors in der Radiotechnik gleicht, ist sie in der Tat ganz anders, da der Photodetektor auf einzelne Photonen und somit auf die totale einfallende Energie anspricht. Er wird also nur die Intensitätsvariationen reproduzieren, aber nur solange die Frequenz kleiner als die Bandbreite des Detektors ist. Dadurch gehen leider Frequenz- und Phaseninformationen verloren. Die Empfindlichkeitsbegrenzung wird durch drei verschiedene Ursachen hervorgerufen:

- durch Quantenrauschen,
- durch internes Rauschen und
- durch Hintergrundrauschen.

Im optischen Frequenzbereich entspricht einem detektierbaren Signal eine Anzahl Photonen  $n$  mit der dazugehörigen Energie  $hv$  ( $h$  = Plancksche Konstante,  $v$  = Frequenz des Lichtes). Der Minimalwert des Empfängerrauschen kann anhand eines Zwei-Niveau-Überganges in einem Molekularverstärker bestimmt werden. Die Ladungsträger sollen nur zwei Werte annehmen, die sich um den Energiebetrag  $hv$  unterscheiden. Der Übergang aus dem höheren in das tiefere Niveau erfolgt nach zwei Mechanismen:

1. Kohärenter, stimulierter Übergang (Verstärkung)
2. Inkohärenter, spontaner Übergang (Thermisches Rauschen)

Neben dem thermischen Rauschen tritt zusätzlich noch das Quantenrauschen auf, das eine Folge der Unschärferelation ist, die besagt, dass der Energiebetrag eines Signales und die dazugehörige Eintreffzeit nicht beliebig genau gemessen werden können. Die Rauschleistung pro Hertz Bandbreite eines idealen Verstärkers setzt sich somit aus zwei Anteilen zusammen:

$$W(v) = hv + \frac{hv}{\exp(hv/kT) - 1} \quad (11)$$

wo  $k$  die Boltzmannkonstante und  $T$  die absolute Temperatur bedeuten. Für  $hv \ll kT$  kann der erste Summand in Relation (11) vernachlässigt werden.

$$W(v) = kT \quad (12)$$

Diese Approximation ist statthaft bis zu etwa 10<sup>12</sup> Hz. Für alle Radiofrequenzen beträgt deshalb die Rauschleistung  $N$

$$N = \int W(v) bv \simeq kTB \quad (13)$$

Für einen Radioempfänger ergibt sich bei einer Temperatur von 300° K  $N = 4 \cdot 10^{-21} B$  [Watt].

Im optischen Bereich gilt aber die Ungleichung  $hv \gg kT$ , so dass der zweite Term in Relation (11) vernachlässigt werden kann. Das Rauschen, das durch die statistische Natur der Quantenprozesse gegeben ist, übertrifft das thermische Rauschen. Anstatt (12) erhält man:

$$W(v) = hv \quad (14)$$

Für eine Wellenlänge  $\lambda = 0,63 \mu$  (HeNe-Laser) folgt analog  $N = 1,4 \cdot 10^{-19} B$  [Watt]. Dieser Wert ist beträchtlich grösser als derjenige von Relation (13).

Im Idealfall liefert der Photodetektor für jedes ankommende Photon ein Photoelektron. Da aber der Photonenumwandlungsfaktor (Quantenwirkungsgrad) kleiner als 1 ist, geht ein Teil der ankommenden Strahlung verloren. Der Photostrom beträgt bei einer einfallenden Lichtleistung  $P_s$

$$I_s = \frac{\eta e}{hv} P_s \quad (15)$$

wo  $\eta$  der Quantenwirkungsgrad,  $e$  die Elementarladung und  $hv$  die Photonenenergie bedeuten. In  $P_s$  ist die Signalleistung wie auch die Hintergrundstrahlung enthalten. Da bei den meisten Photodetektoren das Schrotrauschen und das thermische Rauschen vorherrschen, wird die untere Empfindlichkeitsgrenze durch diese begrenzt. Im Falle einer

Begrenzung durch das Schrotrauschen, etwa bei Kühlung des Detektors, beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis

$$\text{SNR} = \frac{\eta P_s}{2 hv B} \quad (16)$$

$B$  = Signalbandbreite

#### b) Überlagerungsempfang (kohärente Detektion)

Es wurde ursprünglich angenommen, dass die Photomischung dieselben Vorteile wie die konventionelle Überlagerungstechnik bieten würde. Während im allgemeinen keine wesentlichen Empfindlichkeitsverbesserungen möglich sind, besitzt die Photomischung gegenüber der direkten Photodetektion nur geringfügige Vorteile wie Fig. 6 zeigt, wird das Empfangssignal mit dem Licht eines zweiten Lasers (Lokaloszillator) gemischt.

Da die Leistung des «Lokaloszillators» meistens gross gegenüber dem Empfangssignal ist, erzeugt sie im Detektor einen grossen Photostrom und somit ein grosses Schrotrauschen. In einem idealen Überlagerungssystem beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis 2mal den Wert, der für die direkte Demodulation erhalten wurde. Dies röhrt davon her, dass die Phasen-Information in der Detektion erhalten bleibt.

In den meisten Fällen kann aber der Idealfall nicht realisiert werden, da die räumliche Kohärenz des ausgesendeten Strahles durch die Turbulenz der Atmosphäre zerstört wird. Hinzu kommen noch Justierungsprobleme, da die räumlichen Phasen der beiden Lichtquellen auf dem Detektor genau übereinstimmen müssen.

Die Umwandlung des optischen Signales in ein elektrisches geschieht über den Photoeffekt, wobei zwischen einem äusseren und einem inneren Effekt unterschieden wird. Im ersten Fall bewirkt die absorbierte Photoenergie eine Emission eines Elektrons aus einer Kathode, während im zweiten Fall ein Ladungsträgerpaar in einem Halbleiter erzeugt wird.

Die Zahl der photoelektrischen Wandlertypen ist sehr gross. Darum sollen aus dieser Menge nur einige typische Vertreter der Hochfrequenztechnik erläutert werden:

#### 1. Halbleiterdetektor

Jeder rückwärts gepolte pn-Übergang kann als Photodetektor verwendet werden. Die pin-Diode als typischer Vertreter dieser Gruppe ist in Fig. 7 dargestellt.

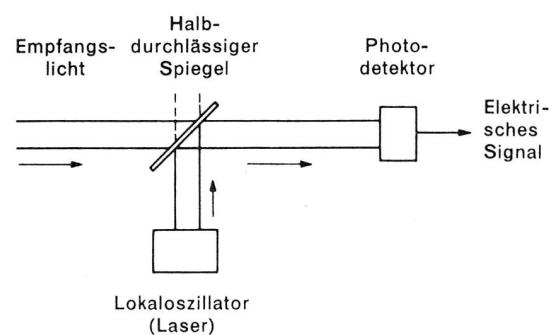


Fig. 6 Optischer Überlagerungsempfang

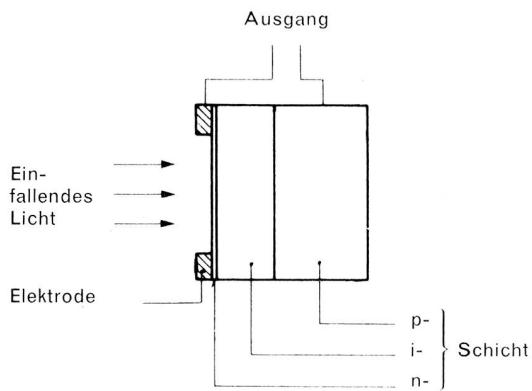


Fig. 7 Schematischer Aufbau einer pin-Diode

Das absorbierte Licht erzeugt im Halbleiter ein Ladungsträgerpaar, das durch das elektrische Feld separiert wird. Das Element kann somit Strom an ein externes Netzwerk abgeben. Die optische Bandbreite, das Frequenzverhalten, die Empfindlichkeit usw. sind charakteristische Größen, nach denen sich die Einsetzbarkeit zu richten hat. Gesamthaft zeichnen sich die Halbleiterdetektoren dadurch aus, dass sie eine grosse Quantenansprechwahrscheinlichkeit besitzen, d. h. fast jedes Photon erzeugt ein Ladungsträgerpaar.

Normalerweise haben Halbleiterdetektoren keine verstärkenden Eigenschaften. In neuester Zeit wurden jedoch solche Komponenten hergestellt, die mit einem Verstärkungsmechanismus versehen sind, zum Beispiel die Lawinenphotodiode (avalanche photodiode APD). In dieser werden zwei günstige Eigenschaften miteinander vereinigt, nämlich grosser Quantenwirkungsgrad und Stromverstärkung. Das Bandbreite-Verstärkungsprodukt beträgt rund 100 GHz, so dass eine hohe Verstärkung erzielt werden kann. Leider weisen diese Dioden ein sehr grosses Rauschen auf, das auf die statistische Natur des Lawinenprozesses zurückzuführen ist. Der Rauschfaktor beträgt 10 db bei einer Verstärkung von 20 db.

## 2. Photowanderwellenröhre (travelling-wave phototube: TWP)

Um den störenden Einfluss der Elektronenlaufzeit auszuschalten, werden die emittierten Elektronen in einen Wendelleiter fokussiert, so dass das modulierte Signal gleich wie in einer Wanderwellenröhre ausgekoppelt werden kann (Fig. 8).

Die Wendel verhält sich als über die ganze Röhre verteilter Auskoppler und erzeugt keine Verstärkung. Da für sehr kleine Signale kein richtiger Elektronenstrahl zustande kommt, kann ein drei- bis vierstufiger Elektronenvervielfacher zwischen Kathode und Wendel eingesetzt werden, um den Strom zu verstärken. Das Frequenzband erstreckt sich von etwa 1 bis 4 GHz.

## 3. Photovervielfacher mit gekreuzten Feldern (crossed-field photomultiplier: CFPM)

Durch geeignete Wahl von statischen, magnetischen und elektrischen Feldern kann ein Photomultiplier gebaut wer-

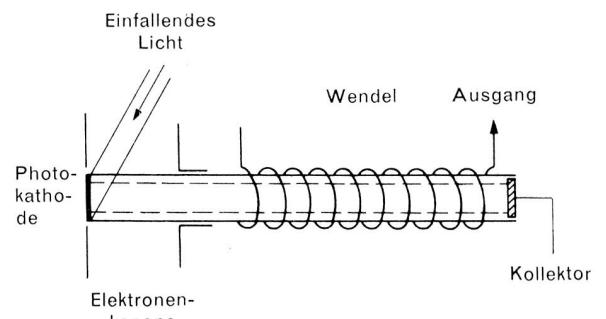


Fig. 8 Schematische Anordnung einer Photo-Wanderwellenröhre

den, dessen Elektronenlaufzeitunterschiede nur durch die Statistik der Sekundärelektronenemission bestimmt werden. Eine schematische Anordnung ist in Fig. 9 gegeben. Die Bandbreite eines solchen Systems erstreckt sich von 0 bis 5 GHz, die Verstärkung beträgt über 100 db. Ein CFPM kann deshalb im Grundband verwendet werden und eignet sich damit für die optische Pulsmodulation ohne Träger. Leider besitzt er ein sehr grosses Eigenrauschen, das durch die Auskopplung und die nicht genaue Fokussierung der Elektronen zustande kommt.

Bei der Anwendung irgendeines Photodetektors müssen aber primäre Fragen abgeklärt werden, wie zum Beispiel die Wellenlängenabhängigkeit, die Grösse der Empfangsfläche, die Grösse des Ausgangssignales in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtenergie usw.

## 4. Übertragungssysteme

Eine optische Richtstrahlverbindung wurde im Jahre 1967 von der Hasler AG zwischen dem Amt für Mass und Gewicht, Wabern, und dem Sendehaus Radio Schweiz AG, Allmendingen bei Bern, aufgebaut. Die Distanz betrug ziemlich genau 4 km.

Neben der eigentlichen Aufgabe, die Effekte der Atmosphäre auf das sich ausbreitende Laserlicht zu untersuchen, wurden Informationen mit diversen Modulationssystemen übertragen. Es wurde unter anderem das Verhalten von amplituden (AM)- und pulsmodemulierten (PCM) Lichtsignalen untersucht.

Das Blockschema des optischen PCM-Systems ist in Fig. 10 dargestellt. Als Grundeinheit stand eine in der Hasler AG

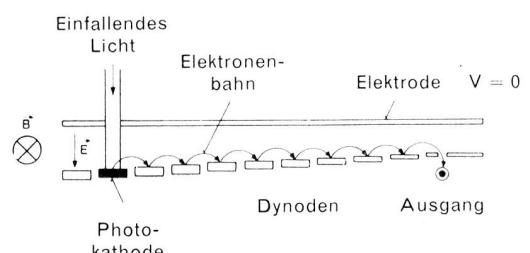


Fig. 9 Photovervielfacher mit gekreuzten Feldern

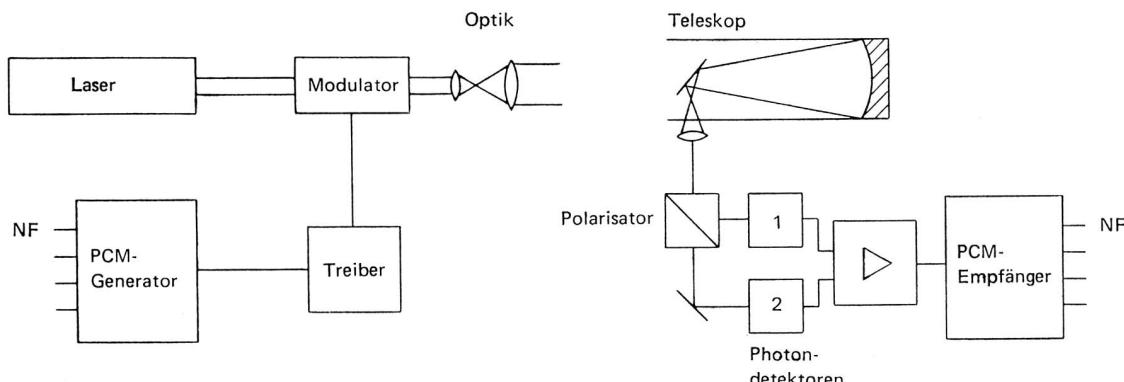


Fig. 10 Blockschema des optischen Übertragungssystems

entwickelte PCM-Anlage zur Verfügung, die an die Erfordernisse des optischen Systems angepasst wurde.

In der optischen Übertragung zeigt sich die PCM allen anderen Modulationsarten überlegen. Sie besitzt den Vorteil, dass die Modulationstiefe oder der Modulationsgrad dem elektrischen Modulationssignal nicht exakt proportional sein muss, wie zum Beispiel in der Amplitudenmodulation. Da in der PCM die Information durch das Vorhandensein oder das Fehlen eines Lichtpulses übertragen wird, ist dieses System gegenüber Störquellen wie Rauschen, Fluktuationen in der Lichtintensität usw. unempfindlich. Als weiterer Vorteil kann die simultane Übertragung von mehreren unkorrelierten Informationen erwähnt werden, die mittels Zeitmultiplex geschieht, wie weiter unten beschrieben wird.

Als Lichtquelle diente ein HeNe-Laser mit einer Leistung von 20 mW und einem Strahldurchmesser von 1 mm. Der Modulator enthielt ADP als elektro-optisches Medium und wurde so konzipiert, dass in der transversalen Anordnung die Halbwellenspannung auf 300 V erniedrigt werden konnte. Der transistorisierte Modulatorverstärker lieferte 100 V bei einer Impulsfrequenz von 2,5 MHz, womit ein Modulationsgrad von rund 35 % erreicht wurde. Zur besseren Bündelung des Strahles wurde dieser mit einem Refraktionsteleskop mit 10facher Vergrößerung expandiert. Die Strahldivergenz reduzierte sich auf 0,1 mrad, so dass der Empfangsfleckendurchmesser in Abwesenheit atmosphärischer Störungen nur 40 cm betrug. Der Informationsgenerator wurde von einem PCM-Sender gebildet. An diesem konnten gleichzeitig 30 Niederfrequenzkanäle (Telephon) angeschlossen werden.

Auf der Empfangsseite war ein Spiegelteleskop eingesetzt, in welchem das Empfangslicht auf die Photodetektoren fokussiert wurde. Damit bei der Umwandlung von phasen- in amplitudenmoduliertes Licht – die Photodetektoren sprechen ja nur auf die ankommende Intensität an – nicht die halbe Leistung verloren geht, wurde der Strahl mit einem von der Polarisationsrichtung abhängigen Strahlteiler (Rochonprisma) in zwei Komponenten aufgespalten und zwei Detektoren zugeführt, die über einen Differentialverstärker miteinander gekoppelt waren.

Nach dem Verstärker durchlief das Signal einige Anpassungsglieder, bevor es im Empfänger ausgewertet werden konnte.

Unter normalen Ausbreitungsbedingungen war die Qualität der optischen Übertragung sehr gut. Sie entsprach der üblichen PCM-Qualität, d. h. die Bandbreite eines einzelnen Kanals ist auf 3,4 kHz beschränkt. Nur bei Niederschlägen oder leichtem Nebel war ein Knacken in der Übertragung hörbar (Ausfallen der Synchronisation). Bei Abschwächungen des optischen Signals von mehr als 20 db wurde eine Übertragung verunmöglicht. Mit einer besseren Empfangselektronik lässt sich die Empfindlichkeit sicherlich um einige 10er-Potenzen erhöhen

Anhand dieses Beispiels sieht man, wie die optische Nachrichtenübermittlung sehr stark von den atmosphärischen Verhältnissen abhängt. Für eine kommerzielle Anwendung ist die Ausfallrate zu hoch. Verkürzt man aber die Übertragungsstrecke, so werden alle geometrischen Verhältnisse besser, der ganze Strahl wird dadurch vom Empfangsteleskop gesammelt, so dass die Zuverlässigkeit sehr rasch steigt.

Eine verbesserte und leistungsfähigere PCM-Verbindung kann aufgebaut werden, wenn das Zeitmultiplexverfahren angewendet wird. Das Blockschema dieses Systems ist in Fig. 11 dargestellt. Zusätzliche Information kann auf einem Lichtstrahl übertragen werden, wenn der ursprüngliche Impulszug in zwei Teilzüge aufgespalten wird, was mit einem halbdurchlässigen Spiegel geschehen kann. Der erste Impulszug wird gegenüber dem zweiten so verzögert, dass die Rekombination der beiden Strahlen wiederum einen Impulszug ergibt, der aber die doppelte Pulsrepetitionsfrequenz aufweist. Die Informationskapazität wird auf diese Weise verdoppelt. Je kürzer ein einzelner Impuls gestaltet werden kann, desto mehr «Kanäle» können nebeneinander geschachtelt werden. Jeder Kanal stellt für sich allein ein normales PCM-System dar.

Die Decodierung erfolgt relativ einfach, indem die Polarisationsrichtung der ankommenden Impulse abwechselungsweise zwischen zwei Extremstellungen geändert wird. Dadurch können die ankommenden Impulse wiederum in die ursprünglichen Impulszüge separiert werden. Mit diesem System konnte ein Informationsfluss von 224 Mbit/s erreicht werden. Da die Entwicklung noch in ihren Anfängen steckt, dürfte diese Zahl bald durch grössere abgelöst werden. Die theoretische Grenze liegt bei ca.  $2 \cdot 10^{14}$  bit/s.

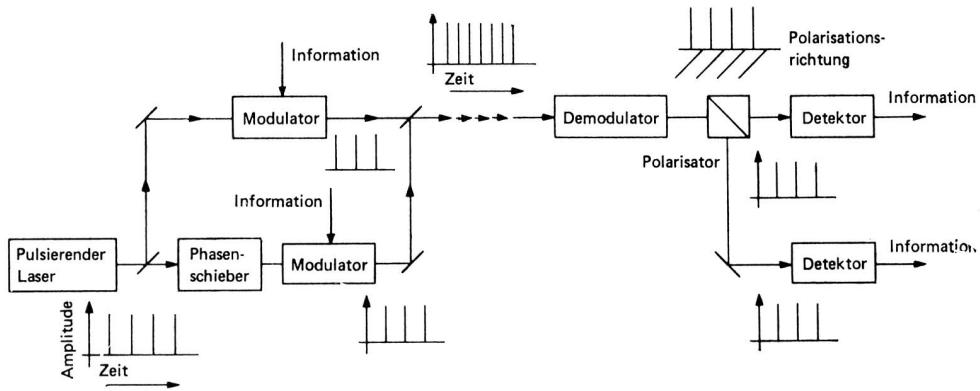


Fig. 11 Optisches Übertragungssystem mit Zeitmultiplex

### 5. Propagation von Laserlicht

Wie schon am Anfang des Aufsatzes erwähnt, wird die Ausbreitung von Laserlicht durch die Atmosphäre sehr stark beeinträchtigt. Zeitweise wird sogar jeglicher Nachrichtenverkehr unterbrochen. Dieser Effekt kann auf die Hauptstörquellen zurückgeführt werden, nämlich die Absorption, die Streuung und die Turbulenz der Atmosphäre.

#### a) Absorption und Streuung

In der niedrigen Atmosphäre hängt die Absorption hauptsächlich von der Luftfeuchtigkeit und der Luftverschmutzung ab. Im allgemeinen besteht die Lufthülle aus einem Gasgemisch, in welchem suspendierte Teilchen verschiedener Grösse schweben. Das Gasgemisch selbst wirkt als Absorptionsmedium, während die suspendierten Teilchen das Licht streuen. Da die Absorption in Abhängigkeit der Wellenlänge bekannt ist, wird man mit Vorteil eine Lichtquelle verwenden, deren Frequenz in einen Bereich hoher Transmission fällt. Die Theorie der Streuung ist so komplex, dass sie nicht geschlossen angegeben werden kann, besonders da sie von der Teilchengrösse abhängt und diese letztere über mehrere Grössenordnungen variieren kann. Rauchteilchen zum Beispiel bewegen sich zwischen  $1\text{ }\mu$  und  $100\text{ }\mu$ . Dadurch ist es schwierig, die genaue Abschwächung zu berechnen, die ein optisches Signal erfährt. Man ist deshalb

auf experimentelle Werte angewiesen. In Tabelle II sind verschiedene Absorptionsfaktoren für Signale verschiedener Frequenzen aufgeführt.

Zustand der Atmosphäre	Mikrowellen $\sim 10^9\text{Hz}$	Millimeter-W. $\sim 10^{10}\text{Hz}$	Submillimeter-W. $\sim 10^{11}\text{Hz}$	Optische Wellen $\sim 10^{14}\text{Hz}$
klar, trocken	0,01	0,1	10	0,01–0,1
leichter Dunst	—	—	—	1,0–10,0
Nebel	0,02	2,0	200	sehr gross
Leichter Regen (1 mm/Std.)	0,01	0,4	—	sehr gross
Regen (16 mm/Std.)	0,02	5,0	unbekannt	unbekannt

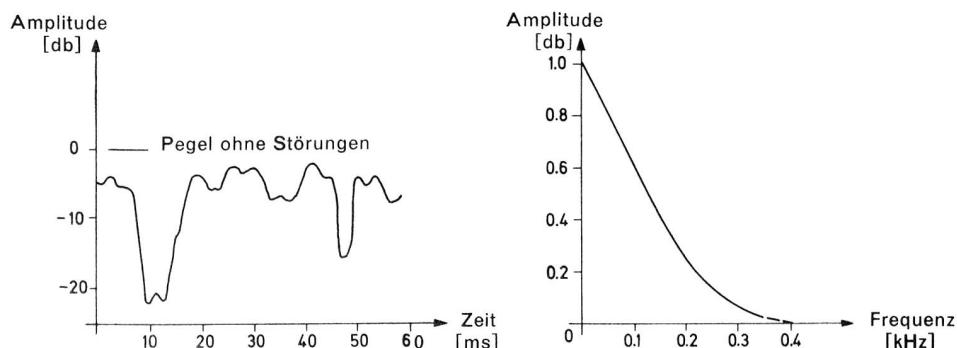
Tabelle II Absorptionsfaktoren für Signale verschiedener Frequenzen in db/km

Die grössten Probleme werden durch Niederschläge und Nebel gestellt. Während Regenfällen wurden Absorptions von mehr als 60 db gemessen, so dass während dieser Zeit eine Übertragung verunmöglich wird.

#### b) Turbulenz

Ein zusätzliches Problem wird durch die Temperaturinhomogenität der Atmosphäre gestellt. Blasen aus warmer Luft

Fig. 12 Zeitlicher und frequenzabhängiger Intensitätsverlauf eines Laserstrahls



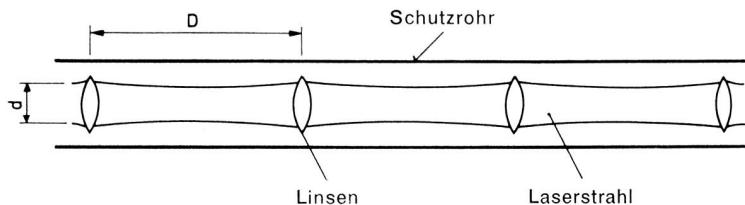


Fig. 13 Schematische Darstellung einer Linsenleitung

bilden sich in der Nähe der Erdoberfläche und steigen auf. Da die Dichte der Blasen gegenüber der umgebenden Lufthülle verschieden ist, können sie wie eine Linse oder ein Prisma wirken und den Lichtstrahl brechen. Dadurch wird der Lichtweg ständig gebrochen und die Phasenfront vollständig zerstört. Im Empfänger treten Intensitätsfluktuationen auf, deren Grösse über mehrere Potenzen variieren kann. Eine typische Aufnahme, die während eines warmen Sonnentages registriert wurde, ist in Fig. 12 gezeigt. Daraus ist deutlich ersichtlich, dass ein Amplitudenmoduliertes Signal zur Übertragung von Nachrichten sehr ungeeignet ist.

Es zeichnen sich einige Möglichkeiten ab, um diese Effekte zu umgehen oder zumindest zu reduzieren.

Um Phasenverzerrungen zu verhindern, müsste der Strahl durchmesser kleiner als die Inhomogenität gewählt werden. Doch damit würden die Verluste, die durch die Streuung entstehen, so gross, dass meistens der Detektor ausserhalb des Strahles zu liegen käme. Eine andere Möglichkeit ist die Diversity-Schaltung, die von der Mikrowellentechnik her bekannt ist. Diese besteht aus einer Anzahl von Empfängern, die untereinander so gekoppelt sind, dass jeweils das beste Empfangssignal selektiert werden kann. Doch lassen sich damit die durch die Turbulenz hervorgerufenen Verzerrungen auch nicht beseitigen.

Alle Probleme können elegant umgangen werden, wenn das Licht in Lichtleitern eingeschlossen wird. Der Lichtleiter stellt das optische Analogon zum Hohlleiter der Mikrowellen dar und gestattet, alle Wettereinflüsse auszuschalten, weil sich das Licht in einer kontrollierten Atmosphäre ausbreiten kann. Der Einsatz einer solchen Leitung kommt jedoch nur für terrestrische Übertragungssysteme in Frage. Der Lichtleiter besteht aus einem Rohr, das mit einem trockenen Gas gefüllt ist (Fig. 13). Als Fortpflanzungsmedium werden Gasgemische gewählt, die für die betreffende Wellenlänge möglichst transparent sind. Das Gas muss frei von unerwünschten Dichteschwankungen sein, denn eine Temperaturänderung von einigen tausendstel Grad genügt bereits, um auf einer Strecke von 1 km den Strahl um mehr als einen Strahl durchmesser seitlich zu verschieben.

Weil das Licht divergent ist, müssen in gewissen Abständen Linsen angebracht werden, um den Strahl zu fokussieren. Mit Linsen ohne Fehler bleibt die Feldverteilung des Strahlquerschnittes über die ganze Übertragungsstrecke bestehen. Wenn sie aber Aberration oder auch andere Fehler besitzen, so sieht das Signal nach einer grossen Anzahl Linsen verschieden aus. Ein Strahlquerschnitt mit Gaußscher Intensitätsverteilung kann im Extremfall mehrere Maxima in der Feldverteilung aufweisen.

Eine seitliche Versetzung der Linsen bewirkt, dass der Strahl eine Zickzackbahn durchläuft, so dass zusätzliche

Verluste entstehen. Für einen Linsenabstand von 100 m, eine Brennweite der Linsen von 50 m und eine Versetzung von 0,1 mm müssen deshalb 0,2 db/km in Kauf genommen werden. Es ist aber fraglich, ob eine solch genaue Justierung über einer grösseren Strecke eingehalten werden kann. Über längere Zeiten wird sich auch der Untergrund bewegen, so dass ein Servomechanismus eingebaut werden muss, der die Lage der Linsen dauernd nachreguliert.

Die Abschwächung des Strahles, bedingt durch Absorption und Reflexion der Linsen, beträgt bei sehr hoher Vergütung (Reflexverminderung) etwa 0,02 db pro Linse. Wenn aber der Linsenabstand verkürzt werden muss, so erhöhen sich die Verluste sehr rasch. Die Linsen werden deshalb mit Vorteil durch «Gas»-Linsen ersetzt, d. h. durch ein Rohr, in welchem sich ein radiales Temperaturgefälle und somit ein Dichtegradient erzeugen lässt, das dieselbe Wirkung besitzt wie eine übliche Linse. Da das Medium im ganzen Rohr dasselbe bleibt, entfallen die Reflexionsverluste.

Die Anwendung eines Linsenleitungssystems hängt jedoch sehr stark vom Preis ab. Es sind sehr viele Variablen, die die Kosten bestimmen, wie die Justierung, das Vergraben usw. Vorerhand bleibt es aber die einzige Lösung, die atmosphärischen Einflüsse zu umgehen.

Die Technologie der Linsenleitungen wird in Zukunft sehr stark gefördert werden müssen, damit billige optische Nachrichtensysteme mit den heutigen Mikrowellensystemen konkurrieren können.

## 6. Schlussbemerkungen

Trotz der vielen Vorteile, die eine Laserübertragung bietet, ist die Konkurrenz der herkömmlichen Übertragungssysteme sehr gross. Der kommerzielle Erfolg liegt nicht unbedingt in der Perfektion eines optischen Übertragungssystems, denn eine Kombination der heute vorhandenen Übertragungsmittel wie Koaxialkabel, Richtstrahlverbindungen usw. kann die zur Verfügung stehende grosse Bandbreite des optischen Systems noch ersetzen. Jedes neue System muss grundsätzlich billiger sein als das vorhergehende und entscheidende Verbesserungen aufweisen. Bis heute hat sich die Tendenz der elektrischen Übertragungssysteme zu höheren Frequenzen und grösseren Bandbreiten als ökonomisch erwiesen. Eine einzige breitbandige Verbindung wird vielen parallelen schmalbandigen vorgezogen. Wenn diese Einsicht weiterhin Geltung besitzt, so kann mit Sicherheit vorausgesagt werden, dass der Laser in Zukunft in Übertragungssystemen eine grössere Rolle spielen wird.

J. Schweizer