

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 4

Artikel: Optische Nachrichtenübermittlung
Autor: Jovanovic, A. / Schweizer, J. / Steffen, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915668>

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: 30.03.2025

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

Optische Nachrichtenübermittlung

Von A. Jovanovic, J. Schweizer und W. Steffen, Bern

621.391.63

1. Allgemeine Betrachtungen

Die Hauptgründe für das grosse Interesse am Laser in der Nachrichtenübermittlung liegen in der kohärenten Natur der Strahlung und der sehr kleinen Wellenlänge. Seit jeher hat sich die Übermittlungsindustrie bemüht, die Informationskapazität eines Übertragungskanals zu erhöhen. Mit der Entdeckung des Lasers eröffneten sich ungeahnte Möglichkeiten. Da sich der optische Frequenzbereich zwischen 10^{12} und 10^{15} Hz erstreckt und unter Annahme eines bescheidenen Modulationsgrades von 0,1 % daraus eine nutzbare Bandbreite von 10^{12} Hz resultiert, war es für die Übermittlungsindustrie verlockend, in dieses Gebiet einzusteigen.

In den letzten Jahren wurden sehr grosse Fortschritte in der Entwicklung optischer Komponenten registriert, insbesondere auf den Gebieten der Laser und der Detektoren. Als grosses Problem in der optischen Übermittlung hat sich jedoch der Modulator erwiesen. Das Fehlen von höchstfrequenten und stabilen Modulatoren bewog die Forschungs- und Studienabteilung der Hasler AG gerade dieses Gebiet zu bearbeiten. Da die zur Verfügung stehende Bandbreite sehr gross ist, muss der physikalische Effekt, der der Modulation zugrunde liegt, der hohen Modulationsfrequenz folgen können.

2. Modulationsmethoden

Eine grosse Anzahl Effekte kann zur Modulation von Laserlicht herangezogen werden. Einige dieser Mechanismen sind direkt mit dem Lichtezeugungsprozess im Laser gekoppelt, andere wirken auf einen oder mehrere Parameter des Lichtes (Amplitude, Phase usw.).

Als schnelle Modulatoren haben sich bis heute die mechano-optischen und die elektro-optischen bewährt. Im ersten Fall wird durch mechanische Veränderungen (Druck, Zug) der Brechungsindex eines Material periodisch verändert. Licht, das ein solcher Körper durchtritt, wird durch das induzierte «Gitter» gebeugt. Im zweiten Fall wird die Propagationscharakteristik eines Kristalls verändert, wenn das betreffende Material in ein elektrisches Feld eingebracht wird. Dieser Effekt ist seit über 100 Jahren unter den Namen Pockels- oder Kerreffekt bekannt, je nachdem, ob eine lineare oder quadratische Abhängigkeit mit dem Feld vorliegt. Die Grenzfrequenz dieses Effektes liegt über 10^{12} Hz, also hoch genug, um keine Begrenzung des Systems zu bewirken. Da der Modulator elektrisch als eine Kapazität betrachtet werden kann, muss er so dimensioniert werden, dass seine benötigte Treiberleistung möglichst niedrig bleibt. Minimalwerte liegen heute um mW/MHz Bandbreite. Elektrooptische Kristalle, die bezüglich der elektrischen und optischen Qualität optimal sind, sind schwierig zu finden; zur Lösung dieses Problems mussten geeignete Partner gesucht werden. Diese wurden gefunden, einmal am Institut für Festkörperphysik der ETHZ, wo hochqualitative Kristalle (LiNbO_3) gezüchtet werden, und zum andern am

Institut für Kristallographie der ETHZ, das das Bearbeiten dieser Kristalle übernimmt.

3. Propagation von Laserlicht

Anlässlich praktischer Übertragungsversuche eines optischen PCM-Systems mit freier atmosphärischer Lichtausbreitung auf einer Strecke von 4 km wurden sehr wichtige Erkenntnisse in bezug auf Propagationseigenschaften von Laserlicht gewonnen. Man gelangte bald zur Überzeugung, dass auf diese Art keine sicheren Übermittlungssysteme gebaut werden konnten, da Niederschläge, Nebel und Luftturbulenzen eine freie Ausbreitung des Lichtes zum Teil verunmöglichen. Alle Störungen sind nichtdeterministischer Natur, so dass es eine unendliche Anzahl Möglichkeiten gibt, die atmosphärischen Bedingungen zu beschreiben. Da gewisse Effekte irreversible Degradationen der Kohärenz hervorrufen, ist es am einfachsten, sämtliche Störungen damit zu eliminieren, dass sich das Licht in einem kontrollierbaren Medium ausbreiten kann. Es wurden deshalb sofort Arbeiten mit Lichtleitern aufgenommen. Die riesigen Dämpfungsverluste von Glasfasern veranlassten die Forschungslaboratorien, andere Lösungen zu finden. In der Zwischenzeit wurden pathologische Gebilde wie Linsenleiter gebaut und getestet, d. h. Rohre, die Linsen oder Spiegel enthielten, und die vor allem mechanisch justiert werden konnten, damit der Strahl sich nicht irgendwo an der Rohrwand totlief.

Die Hersteller der Glasfasern sind aber nicht untätig geblieben. Heute sind bereits Dämpfungsverluste von nur noch 20 dB/km erreicht worden für Fasern von über 100 m Länge. In absehbarer Zeit werden Längen von über 1000 m realisiert werden, so dass bald einmal die eingegrabenen Kupferleitungen durch solche aus Glas ersetzt werden können.

4. Detektion von optischen Signalen

Die Umwandlung der ankommenden Lichtintensität in ein elektrisches Signal geschieht entweder durch einen thermoelektrischen oder mit einem photoelektrischen Detektor. Da thermische Prozesse langsam sind, können sie fallen gelassen werden. Aufgrund ihres Arbeitsmechanismus können die Photodetektoren in photoemissive, photoleitende oder photovoltaische Detektoren aufgeteilt werden. Für schnelle Datenübermittlung kann jeder der aufgezählten Detektionsprozesse verwendet werden. Am besten bewährt haben sich bis jetzt Photovervielfacher für schwache Lichtleistungen und Photodioden mit sehr kleiner elektrischer Kapazität für sehr hohe Frequenzen.

Das Empfangssystem kann, wie in der Radiotechnik, als direktes oder heterodynes System aufgebaut werden. Im ersten Fall wird das ankommende Licht direkt in ein elektrisches Signal umgewandelt. Da aber der Photodetektor nur auf die totale einfallende Energie anspricht, wird er nur die Intensi-

tätsvariationen des Lichtes reproduzieren. Frequenz- und Phaseninformationen gehen dabei verloren. Beim Überlagerungsempfang wird das Signallicht mit einer Referenzwelle des Lokalszillators, hier durch einen zweiten Laser gebildet, auf dem Photoempfänger gemischt und detektiert. Der Empfangsgewinn, d. h. das Rückgewinnen der Phasen oder Frequenzinformation, muss mit einem komplizierten Gerät erkaufte werden.

5. Optische Übermittlungssysteme

Praktische Systeme sind bis heute noch nicht über das Laborstadium hinausgewachsen. Es bestehen noch sehr viele offene Fragen, so dass es noch einer grossen Forschungs- und Entwicklungsarbeit bedarf, ehe endgültige Beurteilungen und praktische Anwendungen möglich sind.

Im Moment sind zwei Tendenzen zu verzeichnen, einerseits der Aufbau von Systemen mit kontinuierlichen Lasern, und andererseits solche mit «mode-locked» Lasern. Beide unterscheiden sich wesentlich in der Modulationsmethode. Im ersten Fall wird der Lichtstrahl mit einer Mikrowellenfrequenz moduliert, die ihrerseits die digitale Information als Phasenmodulation enthält. Das Besondere an dieser Modulationstechnik ist, dass die Leistungsaufnahme des Modulators annähernd konstant ist, und dass der elektronische Aufwand relativ bescheiden sein kann. Mit diesem System wurden 500 Mbit/s übermittelt. Im zweiten Fall wird der Laser so moduliert, dass sein Ausgangslicht als Lichtimpulsfolge erscheint. (Typische Werte: PRF \approx 200 MHz, Impulsbreite \approx 100 ps.) Dieser Impulszug muss nun noch codiert werden. Die Ansprüche an die Elektronik für die Codierung können bezüglich der Pulsform recht bescheiden sein, weil der Impuls nur unterdrückt oder durchgelassen zu werden braucht, da er optisch bereits auf die richtige Form gebracht wurde. Dieses Grundsystem kann nun zu einem optischen Multiplex ausgebaut werden. Das System als ganzes betrachtet, ist recht aufwendig. Vor allem werden sehr strenge Bedingungen an die Elektronik gestellt (Synchronisation, Jitter). Der Impulszug wird dabei in einzelne Strahlen aufgeteilt und die Impulsbreite gegeneinander verschoben, als einzelne Kanäle mit entsprechenden Informationen moduliert und zu einem einzigen Strahl wieder zusammengefügt. Auf diese Art kann ein Informationsfluss von einigen Gbit/s resultieren.

In der Forschungs- und Studienabteilung der Hasler AG werden gegenwärtig verschiedene Systeme bearbeitet für einen Informationsfluss von 200 Mbit/s. Das eine System HOT 2 («HOT» = Hasler Optical Transmission) besitzt als Lichtquelle einen «mode-locked» Argon-Laser und einen externen Modulator. Der Schwerpunkt liegt vorläufig noch am Modulator. Sein Aufbau und seine Leistungen werden im Abschnitt 6 dieses Aufsatzes dargestellt.

Ein anderes System HOT 1, das einen Halbleiter als Lichtquelle besitzt, existiert als Laborsystem und ist erfolgreich getestet worden. Die Modulation ist hier relativ einfach zu realisieren, da die Intensität des Lichtes durch die Strommodulation variiert werden kann. Im Abschnitt 7 werden Arbeitsweise und Charakteristiken dieses Systems beschrieben.

6. Der kompensierte elektrooptische Modulator des Systems HOT 2

Die üblichen elektrooptischen Modulatoren begrenzen vorläufig die Bandbreite der optischen Übertragungssysteme und

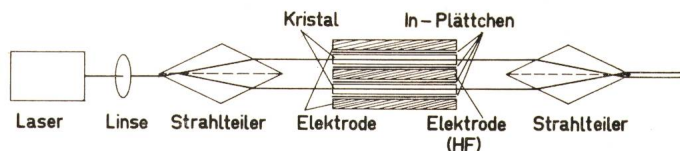


Fig. 1
Elektrooptischer Lichtmodulator

stellen sehr hohe Forderungen bezüglich der Treiberleistung und der Temperaturstabilisation. Ein Modulator wird durch die maximal ausnutzbare Bandbreite, den Kontrastfaktor (Modulationsverhältnis I_{\max}/I_{\min} der Lichtintensität) und die Störanfälligkeit charakterisiert.

Die üblichen Einkristall-Modulatoren enthalten auch bei der Anwendung bester elektrooptischer Kristalle folgende Nachteile:

- a) Wegen starker Temperaturabhängigkeit der Brechungsindizes beträgt die Toleranz ca. 0,01 °C;
- b) Die Kohärenzlänge muss wesentlich grösser als der Unterschied der optischen Weglänge für den ordinären und extraordinären Strahl sein;
- c) Die Kristallerwärmung erniedrigt den Kontrastfaktor schon ab 10 MHz spürbar;
- d) Der Kontrastfaktor ist ausserdem begrenzt durch
 - da) Verschiedene Winkeldispersion der beiden Strahlen
 - db) Diffraktion;
- e) Eine kleine Fresnel-Zahl (ca. 50) und hohe Spannung (ca. 200 V) sind für die gewählte Apertur (1 mm) der Phasendifferenz (π) notwendig;
- f) Verschiedene Propagationsgeschwindigkeiten der Lichtwelle und der elektrischen Welle reduzieren den Kontrastfaktor schon ab etwa 300 MHz.

Alle bekannten Verbesserungen (andere Kristallorientierungen, Zwei-Kristall-Anordnungen, Arbeitstemperatur in der Nähe der Phasenumwandlung usw.) reduzieren zwar einige dieser Nachteile, aber vergrössern andere oder erzeugen sogar neue Störungen.

Durch eine neue Anordnung ist es gelungen, die meisten der Nachteile wesentlich zu vermindern. Im folgenden wird ein Vergleich der neuen Anordnung mit den konventionellen Modulatoren gemacht.

6.1 Aufbau des neuen Modulators

Der Hasler-Modulator enthält zwei identische LiNbO_3 -Kristalle und zwei identische, speziell konstruierte Strahlteiler (Fig. 1). Wegen der Symmetrie und der Ausnützung nur des extraordinären Strahles verschwinden die Nachteile a), b), c) und da). Die ca. 6mal kleinere effektive Halbwertspannung reduziert auch wesentlich die Nachteile db) und e).

Eine Kompensation der Differenz der Propagationsgeschwindigkeiten für die Lichtwelle und elektrische Welle kann die Bandbreite über 30 GHz erweitern. Bei einer Triplate-Bauweise kann der Modulator direkt in die letzte Verstärkerstufe der elektronischen Datenverarbeitung integriert werden.

6.2 Ergebnisse

Das Gebiet mit den notwendigen Interferometertoleranzen erstreckt sich auf den ganzen Strahlengang zwischen der Strahlverteilung und Strahlsuperposition. Darum genügt die mechanische Stabilität der Versuchsanordnung mit Goniometern und Mikroschrauben gerade noch den minimalen Anforderungen. Andererseits war dieser Aufbau notwendig, um die theoretischen Voraussagen bezüglich der Toleranzen zu überprüfen. Die Erwartungen wurden bestätigt, und die Verdrehungstoleranz liegt teilweise unter 1°.

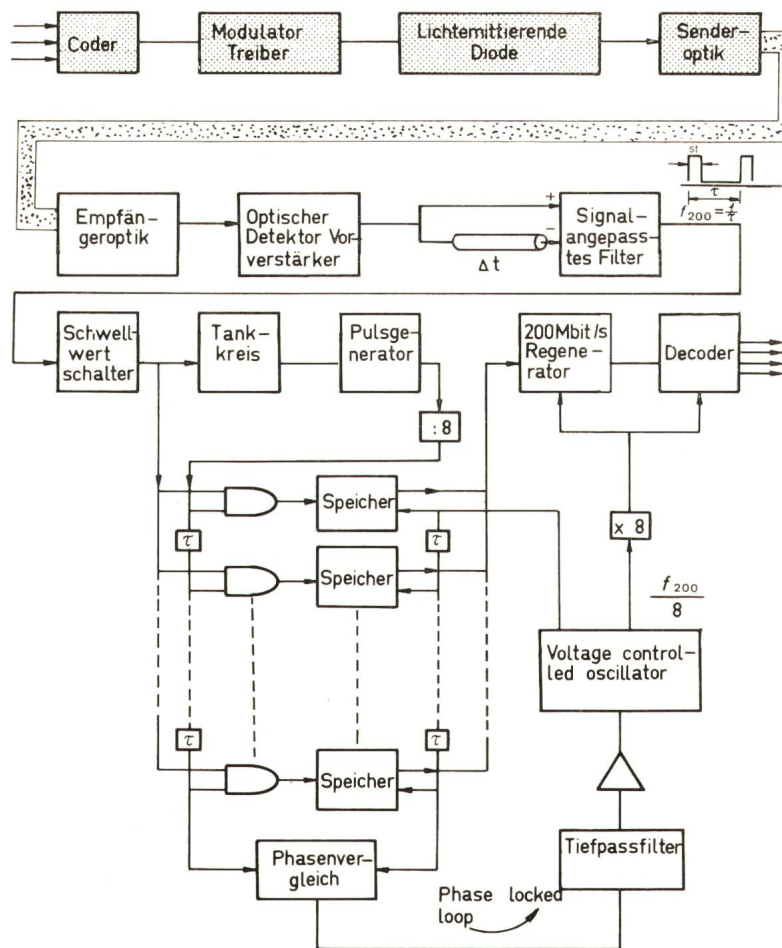


Fig. 2
Blockdiagramm des 200 Mbit/s Nachrichtensystems HOT 1

zwei Größenordnungen gewonnen, denn die elektronische Grenze für die Grundbandmodulation liegt bei den erwähnten Forderungen und beim momentanen Stand der Technik bereits um oder unter einem GHz, und der Aufwand steigt rascher als die Bandbreite. Eine weitere Erhöhung der Bandbreite ist nur durch ein zusätzliches Zeitmultiplex möglich. Dieses Multiplex kann man entweder elektronisch oder optisch ausführen.

Ein elektronisches Multiplex muss auf die Seitenbandmodulation zurückgreifen. Die entsprechende Erhöhung der Trägerfrequenz stellt extreme Forderungen an die Elektronik und verlangt zusätzliche Verfeinerungen des Modulators. Die Abweichungen einzelner Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von der Phasengeschwindigkeit sind nicht mehr a priori vernachlässigbar. Die effektive Modulatorimpedanz wird noch kleiner, die Toleranz der Impedanzanpassungen schärfer, usw. Dagegen scheint das optische Zeitmultiplex durch das Mode-Coupling von Gaslasern technisch viel leichter realisierbar zu sein. Die Repetitionsfrequenz einzelner Kanäle ist durch die Eigenfrequenz der Laserkavität bestimmt und beträgt bei Gaslasern einige 100 MHz. Die Übertragungskapazität des Systems ist durch die Bandbreite der Laserlinie begrenzt und kann bei Gas-Lasern einige Gbit/s erreichen.

Die speziell konstruierten Strahlteiler wirken wegen 4 Durchgängen bei Brewster-Winkel schon als genügend gute Polarisatoren für die Nachrichtenübertragung. Bei der Untersuchung der Anordnung ist jedoch polarisiertes Licht erforderlich. Für die Messung des Kontrastfaktors wurde die Durchlassrichtung gewählt. Der beste erreichte Kontrastfaktor beträgt 20 und genügt somit für die Nachrichtenübertragung. Durch eine Verbesserung der optischen Qualität der Modulatorkristalle kann er um eine Größenordnung erhöht werden. Eine noch grössere Erhöhung wäre wohl möglich, doch bringt der wesentlich grössere Aufwand nachrichtentechnisch keine Vorteile.

Die Temperaturstabilität ist durch die mechanische Stabilität der Halterung und nicht mehr durch die Kristalleigenschaften bedingt. Somit ist das begrenzende Glied der Modulation der Treiber geworden, denn auch dieser Modulator verlangt für eine Phasendifferenz π ca. 50 V Spannung bei einer quasikapazitiven Last von 12 pF.

6.3 Ausblicke

Durch die Modulatorverbesserungen hat man bei der Bandbreite nur eine bis

7. Das elektrooptische System HOT 1 mit Halbleiterlichtquellen

Kohärente Injektionslichtquellen (Halbleiterlaser) können viel leichter als andere Quellen moduliert werden, z. B. durch direkte Modulation des Treiberstromes. Raumtemperaturlaser für kontinuierlichen Betrieb sind allerdings zur Zeit noch nicht erhältlich. Es scheint daher zweckmässig, statt dessen vorder-

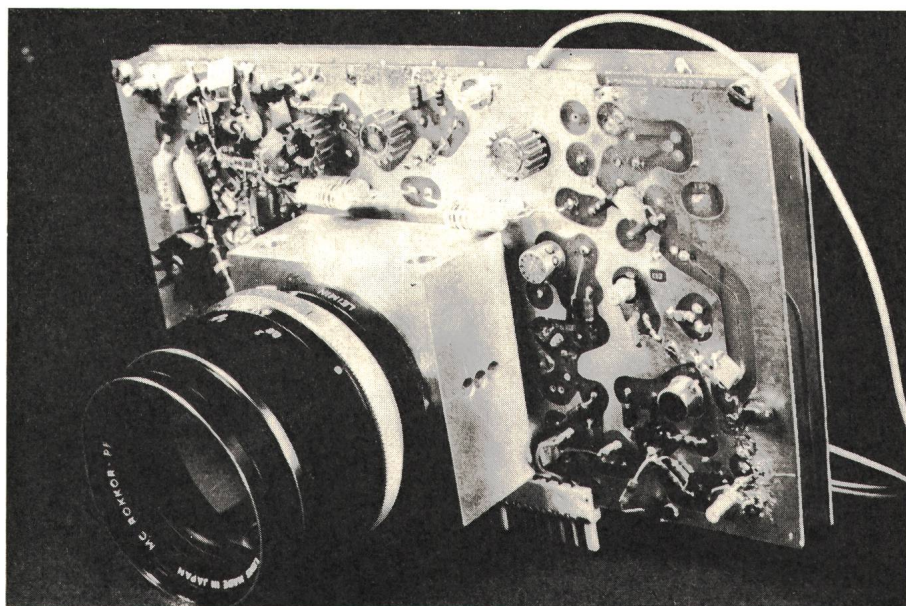
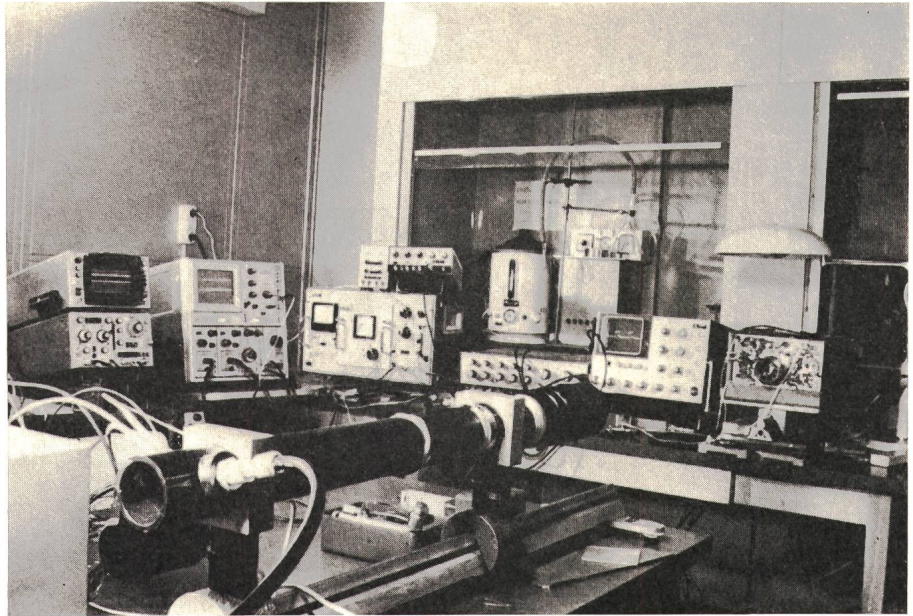


Fig. 3
Senderaufbau

Fig. 4
Aufgebautes System HOT 1



hand mit einer anderen Halbleiterlichtquelle, der sog. LED (light-emitting diode), zu experimentieren. Für den Anwender könnte hiermit ein Indoor-System entstehen, das einen billigen und zuverlässigen Datenkanal durch Luft oder via Fiberleitung darstellt. Unter Indoor-System versteht man ein Hausinformationssystem, also z. B. eine Verbindung zwischen Computer-Moduln auf verschiedenen Stockwerken. Die Erfahrungen mit dem 200 Mbit/s-System können dabei auch nutzbringend bei viel tieferen Modulationsfrequenzen angewendet werden. Der Übergang auf Halbleiterlaser kann zur gegebenen Zeit ohne grossen technischen Aufwand erfolgen.

7.1 Systembetrachtungen

Allgemein: Das Blockdiagramm für HOT 1 zeigt Fig. 2. Die Information wird zum Modulationsformat codiert (PCM); der Treiber erzeugt ein der LED angepasstes Signal (On/Off-Modulation). Das modulierte Licht wird dann gesammelt und durch eine Linsenoptik abgestrahlt. Die von der Empfängeroptik aufgefangene Lichtleistung wird auf die Photomultiplierkathode fokussiert. Durch direkte Demodulation erhält man somit das elektrische Signal, welches über verschiedene Zwischenstufen zum Decoder gelangt:

a) Die im Intervall Δt von einem Puls ausgesendeten Photonen werden gezählt und am Ende des Intervalls mit einem festen Schwellwert verglichen. Diese Schwelle ist so berechnet, dass für die a-priori Wahrscheinlichkeiten $p(L)$ und $p(O)$ (Wahrscheinlichkeit für das Aussenden einer L bzw. O) die Fehlerwahrscheinlichkeit minimal wird. Der betrachtete optimale Empfänger, bestehend aus Integrator und Schwellwertschalter, ist nichts anderes als eine spezielle Form des in der Nachrichtentechnik verwendeten Korrelationsempfängers (signalangepasstes Filter). Zur Rückstellung des Integrators verwendet man den um die Zeit Δt verzögerten Puls, der via Verzögerungsleitung zum invertierten Eingang gelangt.

b) Das schliesslich empfangene Signal nach langen Übertragungstrecken, wie man sie mit Halbleiterlasern zu überbrücken beabsichtigt, ist mit einem Phasenjitter behaftet, der die Systemeigenschaften stark beeinträchtigt, weil in jedem Repeater die Phase des regenerierten Signals vom Pulsmuster abhängig ist (im vorliegenden LED-System ist der Jitter der totalen Transitzeit des Photomultipliers ausschlaggebend). In sehr langen Systemen müssten daher in gewissen Abständen Schaltungen zur Jitterunterdrückung («jitter-smoothing») eingebaut werden, um den angehäuften Jitter zu reduzieren. Aus diesem Grunde ist es nötig, einen «dejitterizer» nach Fig. 2 zu verwenden, der zur Hauptsache aus einem «phase-locked loop» und einem Speicher besteht. Nach der Regeneration wird der verjitterte Pulszug sequentiell mit einem noch nicht jitterfreien Taktsignal in den Speicher eingelesen. Zum Auslesen des Speichers verwendet man das durch den «phase-locked loop» und den Tiefpass

erzeugte, relativ jitterarme Taktsignal. Die Zusammenhänge, die dieses System kennzeichnen, sind sehr komplex; es gilt z. B. abzuklären, wieviele Speicherelemente nötig sind, welche Stabilität die Oszillatoren im System haben müssen usw.

Es muss zudem betont werden, dass zum Aufbau solcher Systeme hohe technologische Anforderungen nötig sind, ganz abgesehen davon, dass das HF-Verhalten gewisser Bauteile noch unzureichend bekannt ist. So treten z. B. in der LED Speichereffekte auf, die nur schwer auf elektronischem Wege behoben werden können; bei sehr hohen Repetitionsraten ist es unmöglich, die Diode voll zu modulieren. Zur Aussteuerung dieses Elementes eignen sich Stromgeneratoren mit Kippverhalten, die mit Streifenleitern zur LED verbunden sind.

In Fig. 3 sieht man den Senderaufbau mit Abstrahlungsoptik. Als Monitor zur Kontrolle der Senderleistung wurde eine Sampling-Stromsonde entwickelt, die direkt koaxial an der LED angebracht ist. Die ersten Stufen des Empfängers sind im Rohr auf Fig. 4 koaxial aufgebaut.

8. Ausblicke

Im Hinblick auf ein zukünftiges System mit Halbleiterlasern und Repeaterstrecken laufen parallel wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Faser-Wellenleiter. Zur direkten Ansteuerung der Laser mit Gunndioden sind einige Vorversuche mit Erfolg abgeschlossen worden. Falls alle technologischen Probleme gelöst werden können, wäre damit der Weg zu einem äusserst einfachen und wirksamen Repeater vorgezeichnet.

Adresse der Autoren:

A. Jovanovic, J. Schweizer und W. Steffen, Hasler AG, Belpstrasse 23, 3000 Bern 14.