

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	76 (1985)
Heft:	15
Artikel:	Bidirektionale Übertragungssysteme mit einer Glasfaser
Autor:	Heinzmann, P. / Meier, T. / Kugler, F.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-904647

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: 26.01.2026

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

Bidirektionale Übertragungssysteme mit einer Glasfaser

P. Heinzmann, T. Meier, F. Kugler, M. Loher

Bei faseroptischen Kommunikationssystemen wird in der Regel für jede Übertragungsrichtung eine separate Glasfaser verwendet. Bidirektionale Systeme mit nur einer Glasfaser sind wenig verbreitet, könnten aber sowohl aus Platz- wie auch aus Kostengründen interessant sein. Dieser Aufsatz beschreibt verschiedene Methoden für die bidirektionale Übertragung; dabei wird auch ein Funktionsmuster eines neuartigen Systems mit elektrooptischen Wandlern im Transceiverbetrieb vorgestellt.

Pour des systèmes de communication à fibres optiques, on emploie normalement une fibre pour chaque sens de transmission. Les systèmes bidirectionnels avec une seule fibre sont moins répandus, mais pourraient être intéressants pour des raisons d'encombrement et de coût. Diverses méthodes de transmission bidirectionnelle sont décrites et un modèle de fonctionnement d'un nouveau genre avec convertisseurs électro-optiques en service émetteur-récepteur est présenté.

1. Einleitung

Die meisten Nachrichtensysteme erfordern eine gleichzeitige Signalübertragung in beiden Richtungen; man spricht vom sogenannten Duplex- oder Bidirektionalbetrieb. Konventionelle faseroptische Nachrichtensysteme verwenden dazu für jede Übertragungsrichtung eine separate Glasfaser (Fig. 1).

Prinzipiell kann aber mit einer einzigen Glasfaser gleichzeitig in beiden Richtungen Licht bzw. Information übertragen werden (Fig. 2). Solche bidirektionale faseroptische Kommunikationssysteme (auch Duplexsysteme genannt) können grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Systeme, welche in beiden Übertragungsrichtungen mit derselben Wellenlänge arbeiten (Gleichwellenlängenübertragung)
- Systeme, welche für die beiden Übertragungsrichtungen verschiedene Wellenlängen verwenden (Wellenlängenmultiplexsysteme)

Bei den Systemen mit nur einer Wellenlänge muss außerdem noch zwischen Vollduplex- und Halbduplexbetrieb unterschieden werden. Halbduplexsysteme senden nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd in beiden Übertragungsrichtungen. Mittels geeigneter Zwischenspeicherung (Buffern)

ung) und dank genügend schneller Übertragungsrate in den abwechselnd betriebenen Übertragungsrichtungen kann die Umschaltung zwischen Senden und Empfangen durchaus so vor sich gehen, dass sie von aussen gar nicht zu erkennen ist. Ein solches System erlaubt also elektrisch gesehen einen Vollduplexbetrieb (bis zu einer bestimmten Übertragungsrate), obwohl der optische Teil nur im Halbduplexmodus arbeitet.

Den offensichtlichen Vorteilen bidirektionaler Systeme in bezug auf Kabel- und Montagekosten sind erhöhte Aufwendungen an den Endstellen bzw. reduzierte Übertragungsdistanz oder Übertragungsrate gegenüberzu stellen.

Die im folgenden betrachteten Systeme sollen Datenraten unter 10 Mbit/s über Distanzen bis zu einigen Kilometern übertragen. Man denkt hier vor allem an industrielle Anwendungen und zum Teil auch an das Telefonie-Ortsnetz; mehr als 70% der Ortsnetzleitungen sind kürzer als 4 km. Als elektrooptische Wandlerelemente sollen lichtemittierende Dioden (LED) beim Sender und PIN-Dioden beim Empfänger verwendet werden; die Lichtwellenleiter seien Multimode-Fasern mit 200 µm bzw. 50 µm Kern-durchmesser.

Fig. 1
Konventionelles
faseroptisches
Kommunikations-
system:

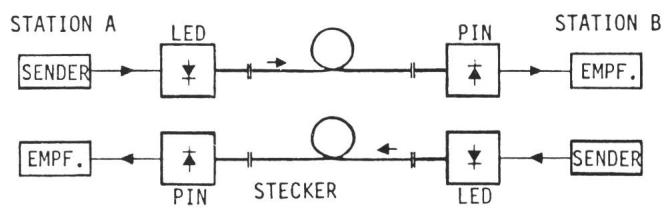
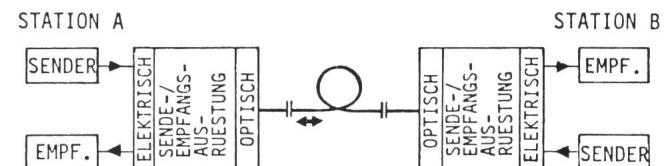
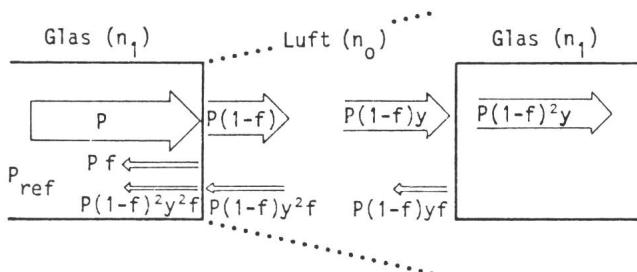


Fig. 2
Bidirektionales
faseroptisches
Kommunikations-
system mit nur einer
Glasfaser



Adresse der Autoren

P. Heinzmann, T. Meier, F. Kugler, Institut für Kommunikationstechnik, ETHZ, 8092 Zürich, und Dr. M. Loher, Huber & Suhner, 9100 Herisau.



2. Fresnel-Reflexion und Rayleigh-Streuung

Zwei wichtige Effekte, die bei bidirektionalen Übertragungssystemen mit einer einzigen Glasfaser beachtet werden müssen, sind die sogenannte Fresnel-Reflexion und die Rayleigh-Streuung. Beide führen dazu, dass das ausgesendete Licht teilweise zum Empfänger der sendenden Station zurückgelangt. Dieses reflektierte oder rückgestreute Licht wirkt als Störung und beschränkt die überbrückbare Übertragungsdistanz.

An einem Glas-Luft-Übergang (Faser- oder Steckerendflächen) wird aufgrund der Fresnel-Reflexion etwa 4% des senkrecht einfallenden Lichtes reflektiert. Folgt gleich darauf wieder ein Luft-Glas-Übergang (Steckerverbindungen), so lässt sich das gesamte reflektierte Signal abschätzen (Fig. 3). Die Formel für den Fresnel-Reflexionskoeffizienten bei senkrechtem Lichteinfall lautet:

$$f = (n_1 - n_0)^2 / (n_1 + n_0)^2 \quad (1a)$$

$$F = -10 \log f \quad (1b)$$

Mit $n_0 = 1$ und $n_1 = 1,5$ erhält man $f \approx 0,04$ bzw. $F \approx 14 \text{ dB}$.

Der Steckertransmissionskoeffizient berechnet sich zu:

$$a_v = P_{\text{out}} / P = (1-f)^2 y \quad (2a)$$

wobei y für nicht durch Fresnelreflexion verursachte Steckerverluste wie z.B. lateraler Versatz, Kerndurchmesserdifferenzen usw. steht. Die Steckerdämpfung ist definiert durch:

$$a_v = -10 \log [a_v] \quad (2b)$$

Unter Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen erhält man damit für die total reflektierte Leistung:

$$P_{\text{ref}} = P_f + P(1-f)^2 y^2 f [1 + (yf)^2 + (yf)^4 + \dots] \\ = P_f [1 + (1-f)^2 y^2 / (1 - (yf)^2)] \quad (3)$$

Fig. 3
Reflexion am Glas-Luft-Glas-Übergang
 P einfallende Strahlleistung
 P_{ref} reflektierte Strahlleistung
 f Fresnelreflexionskoeffizient
 y Koeffizient, der übrige Verluste berücksichtigt

oder für die totale Reflexion

$$F_y = -10 \log \frac{P_{\text{ref}}}{P} \quad (4)$$

Stecker mit einer Dämpfung von $\alpha_v = 1,3 \text{ dB}$ reflektieren also etwa -12 dB des einfallenden Lichtes, Stecker, die nur Fresnel-Verluste aufweisen ($y = 1$ bzw. Steckerdämpfung $\alpha_v = 0,36 \text{ dB}$), etwas mehr, nämlich -11 dB.

Inhomogenitäten (Mikroschwankungen des Brechungsindexes), deren geometrische Abmessungen wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts, produzieren in der Glasfaser Verluste aufgrund der sogenannten Rayleigh-Streuung. Der Rayleigh-Streukoeffizient ermittelt sich zu

$$a_s = r \lambda^{-4} \quad (5)$$

Die Proportionalitätskonstante r dürfte von der Faserkonstruktion abhängen; als Richtwert wird gemäß [1] $r = 0,18 \text{ } \mu\text{m}^4/\text{km}$ bzw. $R = 0,8 \text{ dB } [\mu\text{m}^4/\text{km}]$ angenommen. Bei $0,85 \text{ } \mu\text{m}$ ergibt sich damit für a_s ein Wert von $0,35 \text{ km}^{-1}$. Mit Hinzunahme der Verluste aufgrund von Absorption (Absorptionskoeffizient a_a) erhält man den so genannten Extinktionskoeffizienten

$$a = a_s + a_a \quad (6)$$

Die Abhängigkeit für die Intensität bzw. Lichtleistung entlang der Glasfaser lautet somit:

$$P(x) = P(0) \exp(-ax) \quad (7)$$

Weitere wichtige Begriffe sind die Dämpfung A und der Dämpfungskoeffizient α :

$$A = -10 \log [P(x) / P(0)] = ax \cdot 10 \log e \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

$$\alpha = A/x = a \cdot 10 \log e \quad [\text{dB/km}] \quad (9)$$

Durch Ableiten von (7) nach der Länge erhält man die Verluste pro Längeneinheit:

$$dP(x)/dx = -P(0) a \exp(-ax) \\ = -P(0) a_s \exp(-ax) - P(0) a_a \exp(-ax) \quad (10)$$

Der erste Term mit a_s beschreibt das Streulicht, der zweite mit a_a das absorbierte Licht. Da sich das Streulicht nach allen Richtungen ausbreitet (isotrope Strahlung), wird nur ein Teil davon in Rückwärtsrichtung geleitet. Der entsprechende Proportionalitätsfaktor G kann gemäß [1] folgendermassen ausgedrückt werden:

$$G = \frac{1}{4} \frac{(NA)^2}{n_0^2} \frac{p}{p+1} \quad (11)$$

Dabei steht NA für Numerische Apertur, n_0 für den maximalen Brechungsindex im Faserkern und p für den Profilparameter ($p = 2$ für Graded Index Profile und $p = \infty$ für Step Index).

Das im Abschnitt dx erzeugte Rückstreu Licht wird auf dem Weg zurück zum Faseranfang um den Faktor $\exp[-ax]$ gedämpft. So erhält man schliesslich für das gesamte aus dem Bereich 0 bis l am Faseranfang eintreffende Rückstreu Licht $P_s(l)$:

$$P_s(l) = \int_0^l GP(0)a_s \exp[-2ax] dx \\ = GP(0)(a_s/2a)[1 - \exp(-2al)] \\ = P(0) \frac{(NA)^2}{4n_0^2} \frac{p}{p+1} \frac{a_s}{2a} [1 - \exp(-2al)] \quad (12)$$

Rückstreu dämpfung:

$$A_s(l) = -10 \log [P_s(l) / P(0)] \quad (13)$$

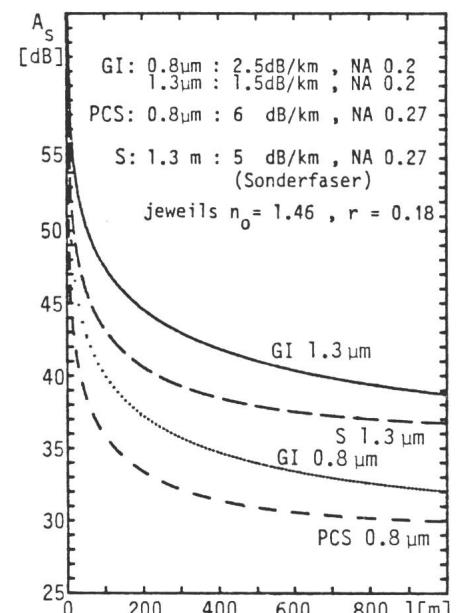


Fig. 4 Rückstreu dämpfung A_s in Funktion der Faserlänge l

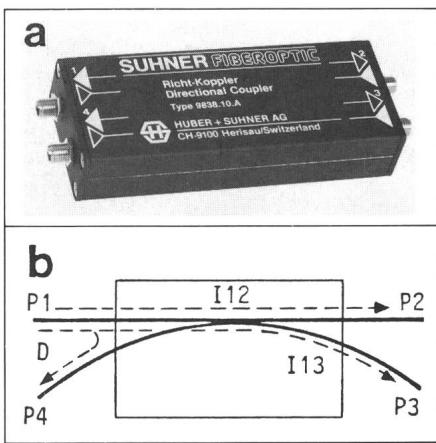


Fig. 5 Optischer Richtkoppler

- a Baustein
- b Schema

Die Figur 4 zeigt die Rückstreu-dämpfung in Funktion der Faserlänge für zwei häufig verwendete Glasfaser-typen (bei $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$).

3. Optische Koppler

Optische Koppler werden zum Verteilen von Licht aus einer Eingangsfaser auf verschiedene Ausgangsfasern, bzw. zum Sammeln von Licht aus verschiedenen Eingangsfasern auf eine Ausgangsfaser eingesetzt. Je nach Konstruktion und Anzahl Ein- bzw. Ausgangsfasern spricht man von Combinern bzw. Splittern oder Dividern und von T-tap-, Star- und Directional-Coupler. Die Prinzipien und Herstellungsverfahren von Kopplern werden in [2] beschrieben.

In Figur 5a und 5b ist ein einfaches (symmetrisches) optisches Viertor zu sehen. Die wichtigsten Parameter für den Aufbau bidirektionaler Verbindungen können der Tabelle I entnommen werden. Die auf dem Gebiet der optischen Koppler verwendeten Bezeichnungen sind ziemlich unübersichtlich und uneinheitlich; sie werden deshalb im folgenden definiert.

Übertragungsmatrix des 1:1-Kopplers gemäss Figur 5

Tabelle I

Dämpfungs-werte in dB	$P_{1\text{out}}$	$P_{2\text{out}}$	$P_{3\text{out}}$	$P_{4\text{out}}$
$P_{1\text{in}}$	40	3,5	3,5	40
$P_{2\text{in}}$	3,5	40	40	3,5
$P_{3\text{in}}$	3,5	40	40	3,5
$P_{4\text{in}}$	40	3,5	3,5	40

Einfügedämpfung (Insertion loss):

$$I_{12} = -10 \log i_{12} \text{ mit } i_{12} = P_{2\text{out}}/P_{1\text{in}} \quad (14)$$

$$I_{13} = -10 \log i_{13} \text{ mit } i_{13} = P_{3\text{out}}/P_{1\text{in}} \quad (15)$$

Multimode-Koppler

Tabelle II

Hersteller/Typ	Prinzip	Dimensionen (mm)	Standard-Teilungs-verhältnisse	Fasertypen bzw. Kern/Mantel-durchmesser ¹ (μm)	Nebensprech-dämpfung (dB)	Zusatzverluste (dB)	Temperaturbereich ($^{\circ}\text{C}$)
AETNA/APC-3M	fused	48×8×6	1:1/9:1	100/140 GI	40	0,5	-50 ... +80
ANT/OVZ 003	Schweiss-koppler	Ø 28×4	28:1	50/125	50	5	-20 ... +60
CANSTAR/TC3	fused bi-conical	108×38×95	1:1/3:1/15:1	50 o. 62,5/125GI 100/140 SI	40	1	-
C.L.T.O.	polishing technique	60×25×10 80×30×10	2:1/4:1/10:1	50/125 GI 100/140 SI	30	1,5	-20 ... +80
Huber+Suhner	verdrillte PCS-Fasern	150/120/ 100×42×20	3:2/3:1/10:1	200/380 PCS	-	0,22	-10 ... +70
JDS Optics	-	-	diverse	-	45	1	-
GTE-ATAE LANtap	fused PCS	80×12×8	1:1/3:1/10:1	200/380 PCS	40	1	-10 ... +100
KAPTRON/DC 09	reflective optic	63×Ø12	1:1/7:3/9:1	50/125 100/140	35	1	-40 ... +65
PHALO/MC3	biconically tapered	50×11×8	1:1/3:1/15:1	50/125 GI 100/140 SI	40	1	-40 ... +85

¹ GI = Graded Index, SI = Step Index, PCS = Plastic clad silica

Kopplernebensprechen (Rückspredampfung, Directivity, Crosstalk, Isolation):

$$D = I_{14} = -10 \log d \text{ mit } d = i_{14} = P_{1\text{in}}/P_{4\text{out}} \quad (16)$$

Kopplungsgrad (Teilungsverhältnis, Splitting ratio, Coupling ratio):

$$S = -10 \log s = I_{12} - I_{13} \text{ mit} \quad (17)$$

$$s = P_{2\text{out}}/P_{3\text{out}} = i_{12}/i_{13} \quad (18)$$

Zusatzverlust (Excess loss):

$$E = -10 \log e \text{ mit} \quad (19)$$

$$e = (P_{2\text{out}} + P_{3\text{out}})/P_{1\text{in}} = i_{12} + i_{13} \quad (20)$$

Die Tabelle II zeigt eine Zusammenstellung einiger zur Zeit auf dem Markt erhältlicher optischer Koppler. Ihre Preise liegen in der Gegend von 200...500 sFr.

Die in den Tabellen angegebenen Werte beziehen sich auf Koppler mit abgeschlossenen Faserenden. Damit müssen für die Bestimmung der Kopplerparameter allfällige Störungen durch Fresnelreflexionen nicht berücksichtigt werden.

4. Bidirektionale Systeme mit Gleichwellenlängenübertragung

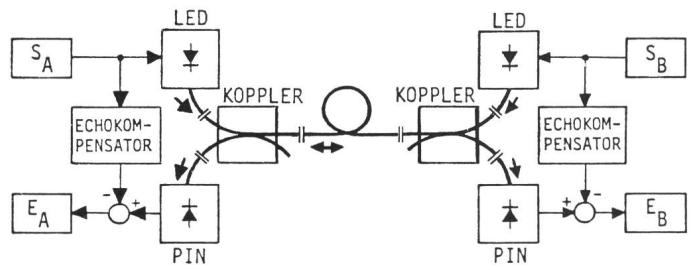
4.1 Prinzip

Mit Hilfe eines optischen Kopplers kann das Licht der Sendediode auf die Übertragungsstrecke geführt werden, während gleichzeitig das ankommende Licht durch den Koppler auf die Empfangsdiode geleitet wird (Fig. 6).

Es sei angenommen, dass in beiden Stationen die gleiche optische Leistung eingekoppelt wird, d.h. $P_{A\text{in}} = P_{B\text{in}}$ ist und dass die Streckendämpfung a beträgt. Damit die übertragene Leistung $P_{AB} = P_{A\text{in}}i_{12}ai_{13}$ maximal wird, muss das Produkt $i_{12}i_{13}$ maximal sein. Dies ist der Fall bei $i_{12} = i_{13} = e/2$, d.h. bei einem optimalen Kopplungsgrad $s = 1$.

Bei der Bestimmung der Nebensprechdämpfung können das Kopplerübersprechen (-30...-45 dB) und das

Fig. 7
Echokompensation



Rayleigh-Rückspredampfung (etwa -25 dB) gegenüber den Fresnel-Reflexionen beim ersten Stecker ($F_y = -11$ dB) in erster Näherung vernachlässigt werden. Die Nebensprechdämpfung A_N des bidirektionalen Übertragungssystems berechnet sich damit zu:

$$A_N = P_{A\text{refl}}/P_{BA} = P_{A\text{refl}}/P_{AB} = \frac{P_{A\text{in}}i_{12}fi_{13}}{P_{A\text{in}}i_{12}ai_{13}} = f/a \quad (21)$$

und entsprechend

$$A_N(l) = -10 \cdot \log a_N = F - \alpha l \quad (22)$$

Mit $F = 11$ dB und einer Streckendämpfung $\alpha = 6$ dB/km ergibt sich somit bereits bei 1,8 km Faserlänge ein Übersprech- bzw. Störsignal, welches gleich gross ist wie das Nutzsignal.

Im folgenden werden verschiedene Methoden zur Verminderung der Störungen durch reflektierte Signale beschrieben.

4.2 Verfahren zur Störunterdrückung

Echokompensation

Echokompensatoren zählen vom empfangenen Signal das entsprechend verzögerte und gedämpfte Sendesignal ab und kompensieren so die aufgetretenen Reflexionen (Fig. 7). Im Gegensatz zu den von der Telefonie her bekannten komplizierten Schaltungen für die Anwendung bei konventionellen Ortsleitungen [3; 4; 5] sind bei den optischen Systemen einfache Lösungen möglich, weil die reflektierten Signale durch den Übertragungskanal

kaum verzerrt werden. Am Institut für Kommunikationstechnik wird gegenwärtig an optischen Systemen mit Echokompensatoren gearbeitet.

Frequenzmultiplex

Die frequenzmässige Trennung der beiden Übertragungsrichtungen erfordert einen relativ grossen Schaltungsaufwand und wird zudem aufgrund der nichtlinearen Kennlinien der elektrooptischen Wandler in ihrer Wirkung meist stark beeinträchtigt.

Zeitmultiplex

Beim Zeitmultiplexverfahren wird der Kanal abwechselnd in den beiden Übertragungsrichtungen betrieben (Halbduplexbetrieb). Die zu übertragenden Daten werden zwischengespeichert und dann paketweise mit mehr als doppelter Übertragungsrate abgeschickt. Auf der Empfangsseite liest man die Daten nach kurzer Zwischen speicherung wieder mit der ursprünglichen Eingangsdatenrate aus.

Optische Verfahren

Die Elimination des Luftspaltes zwischen den Faserendflächen durch die Verwendung von Spleissen anstelle von Steckern ist bei den meisten Systemen aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Es ist aber möglich, den Luftspalt zwischen den Steckerendflächen mit sogenanntem Index Matching Oil oder Gel auszufüllen und damit die Fresnel-Reflexion wegzuschaffen. Allerdings ist die Verwendung von «nassen» Steckern bei vielen Anwendern verpönt.

Stecker mit schießen Endflächen ergeben wesentlich geringere Fresnel-Reflexionswerte von 0,03% (-35 dB) bei einer Steckerdämpfung von 0,6 dB erreicht worden [6]. Die Methode erfordert aber eine sehr aufwendige Positionierung der Stecker, damit die Parallelität der schießen Endflächen gewährleistet ist.

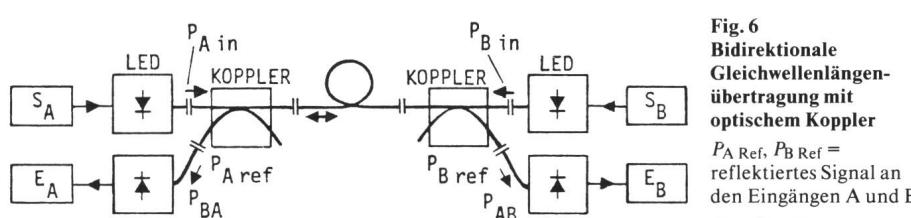


Fig. 6
Bidirektionale Gleichwellenlängenübertragung mit optischem Koppler

$P_{A\text{Ref}}$, $P_{B\text{Ref}}$ = reflektiertes Signal an den Eingängen A und B
 P_{BA} , P_{AB} = Nutzsignal an den Eingängen A und B

Hersteller/Typ	Prinzip	Dimensionen (mm)	Standard-Fasertypen	Nebensprechdämpfung (dB)	Einfügedämpfung (dB)	Wellenlängen (mm)	Temperaturbereich (°C)
AETNA	-	20×20×14	50/125 100/140	40	2	850/1300	-20 ... +65
ANT/OMUX 001	Interferenzfilter	Ø 28×4	50/125 GI	35	1,5	850/1300	-20 ... +60
JDS/WD 813	-	-	50/125 GT	28	2	800-870/ 1150-1600	
KAPTRON	mirrors with dichoric coatings	Ø 11×63,5	50/125 100/140	30	1,5	820/1300 1200/1300 1300/1530	-40 ... +65
LITTON/FO 3650	-	52×20×20	100/140 SI	30	4	800/830	-

Mit dem sogenannten LED-Spectrum Division Multiplexing-Verfahren lassen sich die Störungen, die durch reflektierte oder rückgestreute Signale verursacht werden, um mehr als 20 dB abschwächen; dabei nützt man die unterschiedliche Interferenzfilter-Bandpasscharakteristik für transmittiertes und reflektiertes Licht aus [7]. Diese Methode, bei welcher in der einen Übertragungsrichtung das durch das Interferenzfilter transmittierte und in der anderen Richtung das am Filter reflektierte LED-Licht genutzt wird, ist allerdings mit relativ hohen Zusatzverlusten verbunden.

5. Bidirektionale Systeme mit Wellenlängenmultiplexern

Bei den Wellenlängenmultiplex- oder WDM(Wavelength division mul-

tiplex)-Systemen [2; 8; 9; 10] werden für die beiden Übertragungsrichtungen verschiedene Wellenlängen verwendet, so dass Reflexionen mit Hilfe von optischen Filtern (bzw. Gittern) vom Empfänger ferngehalten werden können (Fig. 8). Die Tabelle III zeigt eine Zusammenstellung von Kopplern mit Wellenlängenselektivität; die Preise liegen zwischen 700 und 1700 sFr.

Durch die Verwendung von mehr als zwei Wellenlängen könnten noch weitere Kanäle übertragen werden. Das Wellenlängenmultiplexverfahren hat vor allem beim deutschen Systemversuch Bigfon (Breitbandiges integriertes Glasfaser-Ortsnetz) weite Verbreitung gefunden. Von den sechs an diesem Projekt beteiligten Firmen verwenden vier Wellenlängenmultiplexierung für die bidirektionale Übertragung [11].

6. Bidirektionale Übertragung mittels Transceiver

6.1 Prinzip

Lichtemittierende Dioden und Laserdioden werden im Normalfall in Vorwärtsrichtung betrieben und somit als elektrooptische Wandlerelemente eingesetzt. Es ist aber auch ein inverser Betrieb als optoelektrische Wandler möglich, indem man diese Sendeelemente in Sperrichtung vorspannt oder im photovoltaischen Mode (mit 0 V Vorspannung) betreibt. Wandler, welche sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung (d.h. als Sender und als Empfänger) betrieben werden (Fig. 9), bezeichnet man als Transceiver (z.B. Single Junction Transceiver SJT).

Empfänger mit optischen Transceiverlementen weisen eine um 4 bis 15 dB schlechtere Empfindlichkeit auf als grossflächige PIN-Dioden. Einerseits ergeben sich Verluste dadurch, dass nur ein Teil des vom Faserende austretenden Lichts auf die sehr kleine aktive Zone der LED fällt (Einkoppelverluste); anderseits nimmt die Responsivität (Empfindlichkeit) der LED bei der Wellenlänge maximaler Emission bereits stark ab (spektrale Verluste) [12; 13; 14]. Die Sperrsichtkapazitäten sind etwa 50mal grösser bzw. die Bandbreiten etwa 50mal kleiner als diejenigen der PIN-Dioden und können wegen der beschränkten maximalen Rückwärtsspannung nur unwe-

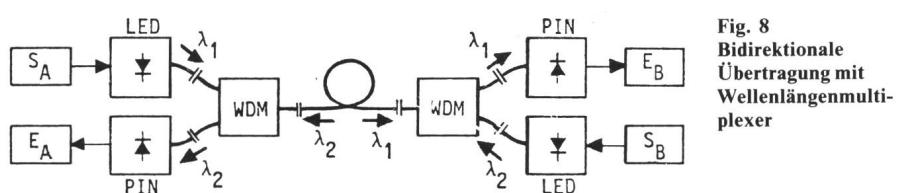


Fig. 8
Bidirektionale Übertragung mit Wellenlängenmultiplexern

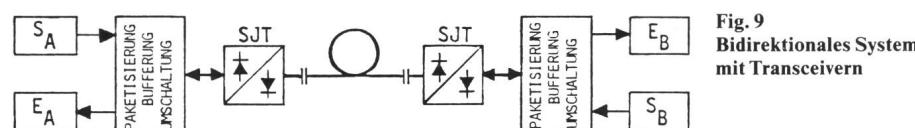


Fig. 9
Bidirektionales System mit Transceivern

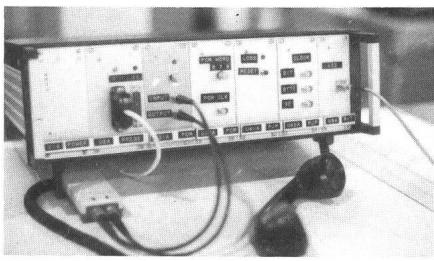


Fig. 10 Transceiver-Vollduplex-Station für einen Sprach- und zwei RS-232-Kanäle

RS-232-Datenrate 2,4 kbit/s
RS-232-Betriebsart XON/XOFF

sentlich verändert werden. Die Umschaltzeit von Senden auf Empfangen sollte grösser als $10 \mu s$ sein; umgekehrt sind etwa $2 \mu s$ Umschaltzeit einzurechnen. Mit den am Institut für Kommunikationstechnik (IKT) verwendeten LED wurden 3-dB-Bandbreiten von etwa 20 MHz erreicht (mit Lastwiderstand $R_L = 50 \Omega$). Beziiglich Rauschverhalten war keine wesentliche Verschlechterung gegenüber konventionellen Systemen festzustellen. Über den Einfluss des Transceivermodes

auf die LED-Lebensdauer können zur Zeit noch keine Angaben gemacht werden.

An verschiedenen Stellen wurden bereits bidirektionale Systeme mit Transceivern beschrieben, welche aber nur den Halbduplexbetrieb erlauben [13; 15; 16]. Am IKT ist nun ein Funktionsmuster für ein bidirektionales Übertragungssystem mit Transceivern entwickelt worden, welches Vollduplexbetrieb erlaubt (Fig. 10). Aufgrund der eingesetzten elektronischen Standardbausteine (UART) und wegen des Verwendungszwecks (Übertragung von einem Sprach- und zwei RS-232-C-Kanälen) ist eine Vollduplex-Datenrate von 64 kbit/s festgelegt worden.

6.2 Beschreibung des IKT-Vollduplex-Systems mit Transceivern

Die synchron mit der Datenrate R_0 ankommenden Daten werden in Pakete zu Kbit zusammengefasst und mit je einem Start- und Stopp-bit versehen auf die Zeitdauer T_B komprimiert (Fig. 11). Diese $K+2$ bit werden nun mit maximaler Halbduplexdatenrate R_H über die optische Strecke geschickt, wo sie entsprechend der Ausbreitungsgeschwindigkeit von $5 \mu s/km$ eine Verzögerung T_L erfahren. Sobald nun die Station B ein solches Datenpaket empfangen hat, schaltet sie ihren Transceiver von Empfangen auf Senden um (T_U) und sendet ihrerseits ein Datenpaket ab. Das eben empfangene Paket wird nach einer Serie-Parallel-Wandlung in einem Zwischenspeicher abgelegt, bis die Daten entsprechend der Vollduplexdatenrate parallel-seriell gewandelt und ausgelesen werden können.

Die maximale Paket- bzw. Vollduplexübertragungsrate wird durch die genannten Verzögerungen bzw. durch die Paketgrösse bestimmt. Bei Bidirektionalsystemen im Transceivermode hängt somit die überbrückbare Distanz mit Vollduplexdatenraten bis zu einigen Mbit/s nicht in erster Linie von der Dämpfung, sondern von der Signallaufzeit und der Empfangs-Sende-Umschaltzeit des Transceivers ab (Fig. 12).

Die maximale Vollduplex-Datenrate beträgt:

$$R_0 \leq \frac{K}{T_p} = \frac{K}{2(T_L + T_B + T_U)}$$

$$= \frac{K}{2(\ln c + (K+2)/R_H + T_U)} \quad (23)$$

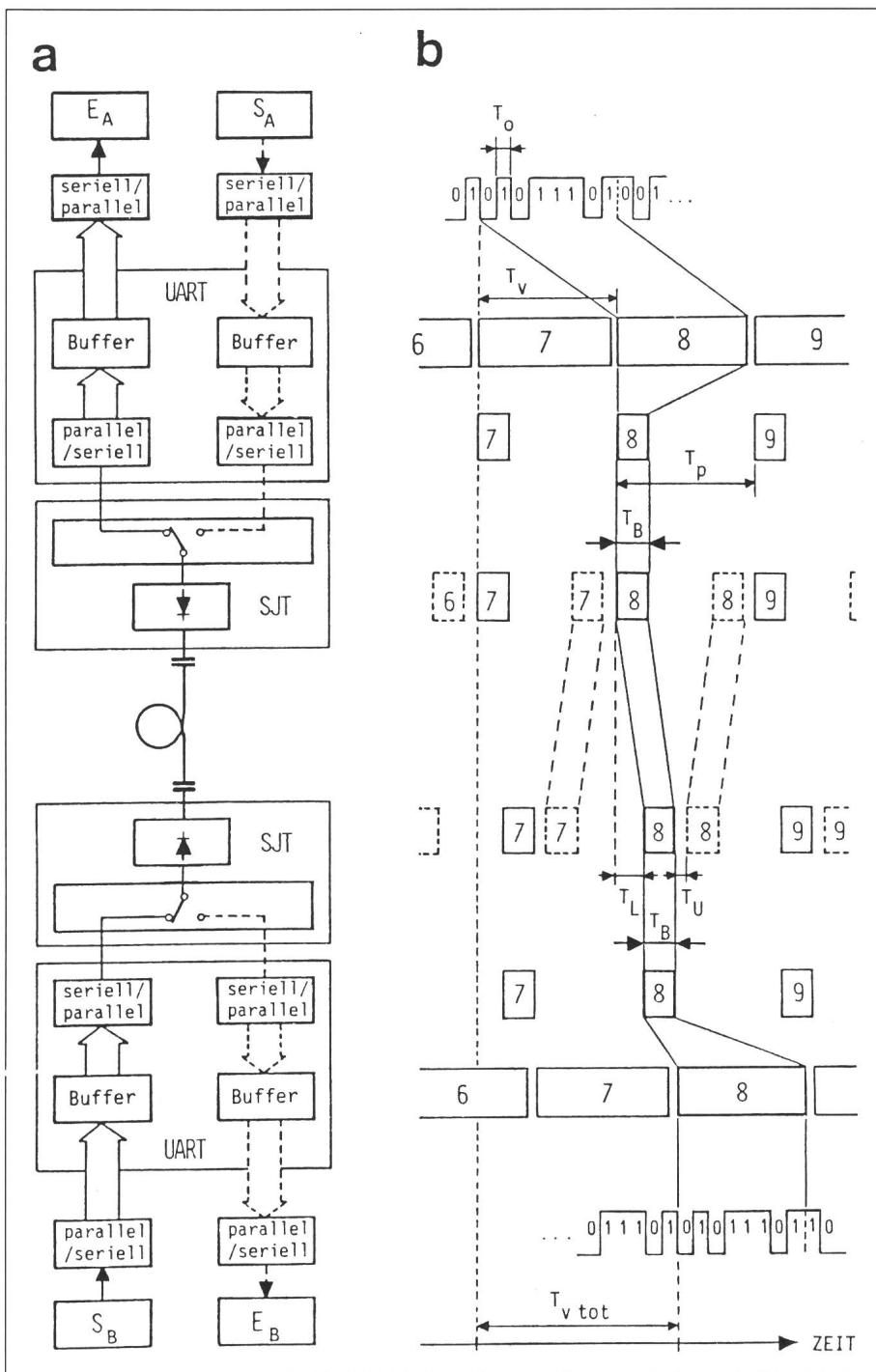


Fig. 11 Vollduplexsystem mit SJT

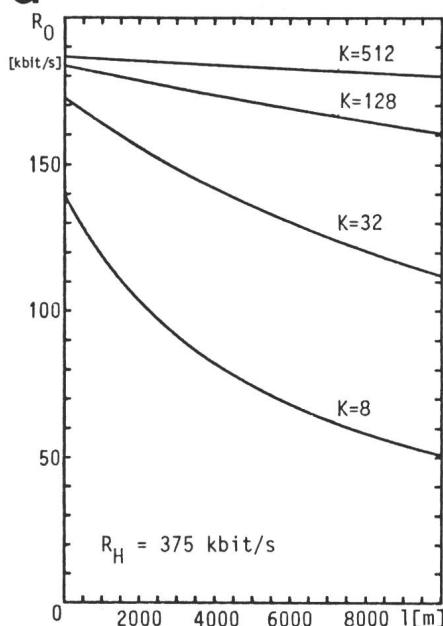
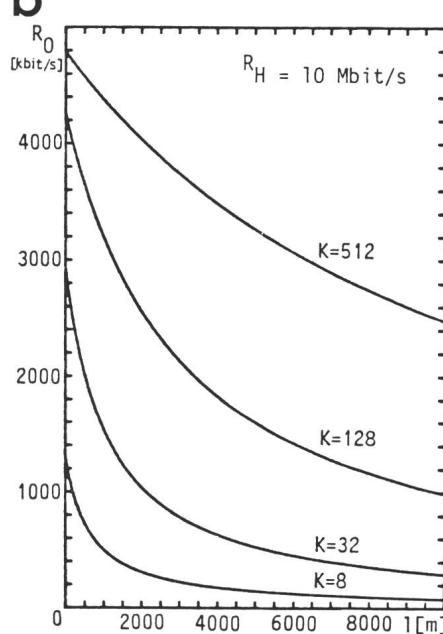
a**b**

Fig. 12 Maximale Datenrate R_0 mit Transceiver-Vollduplex-System für verschiedene Paketgrößen und Halbduplex-Datenraten R_H

l Streckenlänge

- a $R_H = 375$ kbit/s
b $R_H = 10$ Mbit/s

wobei beim realisierten System folgende Werte einzusetzen sind:

$$n/c = 5 \mu\text{s}/\text{km}, K = 8, R_H = 375 \text{ kbit/s},$$

$$T_U = 2 \mu\text{s}$$

Verzögerungszeit:

$$T_{V\text{tot}} \approx T_V + T_L + T_B = K(1/R_0 + 1/R_H) + \ln(c/2)/R_H \quad (24)$$

Vergleich der verschiedenen Lösungen zur faseroptischen Bidirektionalübertragung Tabelle IV

	e/o- und o/e-Wandlerelemente	Zusatzdämpfung pro Übertragungsrichtung in Koppler- und Wandlungselementen (dB)	Zusätzliche Anzahl Stecker pro Übertragungsrichtung	Gesamte Anzahl Stecker	Optische oder elektrische Zusatzeinrichtungen
Konventionelles 2-Faser-System	2 LED 2 PIN	0	0	4	-
Gleichwellen-Längen-Multiplex	2 LED 2 PIN	9 (Koppler-Einfügedämpfungen)	2	6	- Koppler - (Echo-Unterdrückungseinrichtung)
Wellenlängen-Multiplex (WDM)	1 LED 0,8 μm 1 LED 1,3 μm 1 PIN 0,8 μm 1 PIN 1,3 μm	5 (WDM-Einfügedämpfungen)	2	6	- WDM
Transceiver	2 LED (SJT)	4...15 (verminderter Empfängerempfindlichkeit)	0	2	- Paketisierung/ Bufferung/ Umschalt- elektronik

7. Verschiedene Lösungen der Bidirektionalübertragung im Vergleich mit der Einzelfaserlösung

Die verschiedenen Prinzipien zur Bidirektionalübertragung weisen sowohl systemtechnisch als auch bezüglich Kosten wesentliche Unterschiede auf (Tab. IV und Fig. 13). Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile zeigt die Tabelle V.

Die Übertragungsdistanz von Einfaser-Bidirektionsystemen ist, bedingt durch die höhere Dämpfung (zusätzliche Stecker und optische Elemente) sowie durch die geringere Empfangsempfindlichkeit der Transceiver gegenüber den konventionellen Zweifaser-Bidirektionsystemen, reduziert. Aufgrund ungenügender Nebensprechdämpfung kann sie noch zusätzlich eingeschränkt sein. Je nach Datenrate können bei Transceiversystemen auch die maximale Paketrate bzw. die Signallaufzeit die Reichweite bestimmen.

Unter der Annahme einer in die Faser eingekoppelten Leistung von 0 dB_m (1 mW) (LED in 200-μm- oder LD in 50-μm-Faser) und von einer Empfängerempfindlichkeit von -30 dB_m (Bitfehlerrate 10^{-9} , einige Mbit/s Da-

tenrate) ergeben sich mit den kostengünstigeren 200-μm-Faser-Systemen maximale Übertragungsdistanzen von etwa 1 km mit SJT, 3 km mit Gleichwellenlängenmultiplex und 4 km mit Wellenlängenmultiplex. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Auf-

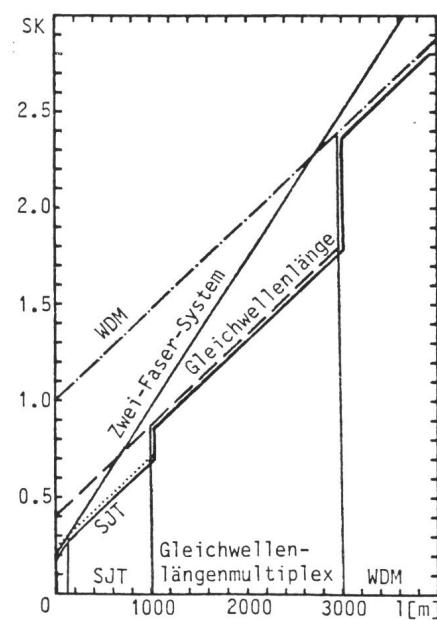


Fig. 13 Systemkosten der verschiedenen Bidirektionsysteme in Funktion der Streckenlänge bezogen auf ein WDM-System ohne Kabel

SK Systemkosten
l Streckenlänge

	Gleichwellenlängensysteme	WDM-Systeme	SJT-Bidirektionalsysteme
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Faserausnutzung innerhalb beschränkter spektraler Breite möglich, - einfaches und robustes Verfahren. 	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Faserausnutzung, - in der Regel geringere Einfügedämpfung als nicht-wellenlängenselektive Koppler, - grosse Nebensprechdämpfung, - WDM-Systeme sind vielerorts bereits in Erprobung (Bigfon). 	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Faserausnutzung innerhalb beschränkter spektraler Breite, - einfache, keine optischen Zusatzelemente, - kostengünstig, nur eine LED und nur ein Stecker pro Station.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Nebensprechdämpfung muss mittels z.T. aufwendigen oder unpraktischen Methoden verbessert werden, - erfordert zwei zusätzliche Steckverbindungen pro Übertragungsrichtung, sofern die Wandlerelemente nicht direkt an die Koppler angeschlossen oder angespeist werden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ hoher Preis, - erfordert 1,3-µm-Komponenten oder ausgesuchte Laserdioden, die beide zur Zeit noch sehr kostspielig sind, - erfordert zwei zusätzliche Steckverbindungen pro Übertragungsrichtung, sofern die Wandlerelemente nicht direkt an die WDM angeschlossen oder angespeist werden, - es wird ein zusätzlicher Wellenlängenbereich belegt, was allfällige Systemerweiterungen erschwert, - schmalbandige optische Filter erfordern unter Umständen den Einsatz von Laserdioden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Datenrate von Übertragungsdistanz (bzw. Paketgrösse) abhängig, - noch keine Erfahrungen über Lebensdauer von SJT, - Zusatzelektronik notwendig, welche zusätzliche Signalverzögerung mit sich bringt.

wendungen beim Glasfaserkabel ergibt sich damit der Kostenvergleich in Figur 13.

Bei Preisvergleichen ist zu beachten, dass diese im Faseroptiksektor aufgrund der wenig gefestigten Marktsituation und wegen der fehlenden Standardisierung nur mit Vorbehalten anzustellen sind. Vor allem die Preise der optischen Sender variieren je nach Spezifikation sehr stark. Die grobe Kostenabschätzung in Figur 13 geht von der Annahme mittlerer Komponenten- und folgender Kabelpreise aus:

50/125-GI-Faser-Kabel:

- einfäsig sFr. 5.—/m
- zweifäsig sFr. 7.—/m

200/380-PCS-Faser-Kabel

- einfäsig sFr. 4.70/m
- zweifäsig sFr. 7.65/m

Kopplern mit eingebauten elektrooptischen Wandlern verbessert werden und damit für Anwendungen im Ortsnetz in Frage kommen. Weil Wellenlängenmultiplexersysteme immer noch sehr teuer sind, scheint ihr Einsatz auch weiterhin erst bei grösseren Übertragungsdistanzen (>3 km) sinnvoll zu sein.

Wie aus Figur 13 ersichtlich ist, steht und fällt der Kostenvergleich mit der Entwicklung der Faserpreise. Die in diesem Bericht aufgeführten Überlegungen erlauben aber trotzdem auch bei veränderter Marktsituation Aussagen darüber zu machen, welches System bei welcher Übertragungsdistanz die kostengünstigste Lösung darstellt. Abschliessend soll noch darauf hingewiesen werden, dass bei Systementwicklungen neben den explizit erwähnten Problemen auch den Punkten Systemausbaufähigkeit (benutzte Wellenlängen), Zuverlässigkeit (Anzahl und Art der Wandlerelemente, Elektronik) und Wartbarkeit (Stecker) Beachtung geschenkt werden muss.

Literatur

- [1] D. Schicketanz: «Theorie der Rückstreuungsmessung bei Glasfasern», Siemens-Forschungs- und -Entwicklungsberichte, Bd. 9, Nr. 4, 1980.
- [2] R. Th. Kersten: «Einführung in die optische Nachrichtentechnik», Springer, 1983.
- [3] S. Hentschke: «Untersuchungen und Entwürfe von hochintegrierten Echokompensationsverfahren zur Duplexübertragung», Frequenz 36, Nr. 11, 1982.
- [4] S. Hentschke: «Gate-Array-Baustein zur adaptiven Kanalentzerrung und Echokompensation», NTZ, Bd. 37, Heft 3, 1984.
- [5] W. Groesch, V. Hespelt, K. Kiethe, W. Ohmenhäuser, R. Till und H. Wahl: «Ein Vollduplexmodem mit adaptiver Sprechrecholösung zur Übertragung von 4800 Bit/s über Fernsprechkanäle», NTZ, Bd. 36, Heft 11, 1983.
- [6] T. Ichida, T. Tsutsumi, Y. Tsujimoto, H. Serizawa, K. Hattori, T. Tanaka and H. Souda: «Bidirectional Video Transmission System using a single optical fiber», Conf. Proceedings of the 5th European Conference on Optical Communication, Amsterdam, 1979.
- [7] R. Ishikawa, H. Nishimoto and T. Usui: «Bidirectional LED-Spectrum Division Multiplexing Data Link with High Stability», Conf. Proceedings of the 7th European Conference on Optical Communication, Copenhagen, 1981.
- [8] O. Krumpolz et al.: Optische Multiplextechnik. Bull. SEV/VSE 76(1985)15, S. 897–900.
- [9] M. De Bortoli and G. Pellegrini: «Economic Comparison of W.D.M. Systems with Viable Alternative Solutions», Conf. Proceedings of the 9th European Conference on Optical Communication, Genf, 1983.
- [10] R.J.S. Bates, J.D. Spalink and S.J. Butterfield: «1.3 µm/1.5 µm bidirectional WDM optical-fibre transmission system experiment at 144 Mbit/s», Electronics Letters, Vol. 19, No. 13, June, 1983.
- [11] K. Kneisel: «Bigfon – Vergleich der verschiedenen firmenindividuellen Systemlösungen», NTZ, Bd. 36, Heft 7, 1978.
- [12] K.C. Fischer: «LEDs as Semiconductor-Junction Transceivers», Laser Focus/Electro-Optics, June 1984.
- [13] A. Alping, R. Tell and S.T. Eng: «High Data-Rate Detection Experiments using GaAlAs/GaAs Injection Lasers», Conf. Proceedings of the 9th European Conference on Optical Communication, Genf, 1983.
- [14] J.J. Geddes, P.E. Peterson, D. Chen and K.P. Koene man: «Semiconductor Junction Transceiver for Fiber Optic Communication», Electronic Letters, Vol. 14, No. 7, March 1978.
- [15] L. D'Auria, G. Chevalier and P. Maillot: «Libido using Eros: Half-Duplex Optical Link», Electronics Letters, Vol. 15, No. 25, Dec. 1979.
- [16] A. Alping and R. Tell: «100-Mbit/s Semiduplex Optical Fiber Transmission Experiment Using GaAs/GaAlAs Laser Transceivers», Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 5, Oct. 1984.