

Zeitschrift:	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
Herausgeber:	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
Band:	67 (1989)
Heft:	5
Artikel:	Kohärente optische Übertragung = Transmission optique cohérente
Autor:	Béguin, Claude
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-874935

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.01.2026

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

Kohärente optische Übertragung

Transmission optique cohérente

Claude BÉGUIN, Bern

Zusammenfassung. Die kohärente, optische Übertragung – eine Technik, die noch am Anfang ihrer Entwicklung steht – wird aller Voraussicht nach eine bedeutende Rolle in anspruchsvollen, zukünftigen Lichtleitersystemen einnehmen. Der Hauptunterschied zwischen inkohärenter und kohärenter optischer Übertragung liegt in der Anwendung des Überlagerungsempfangs bei der kohärenen Technik, die wesentlich schmalbandigere und frequenzstabilere Lichtquellen verlangt. In einer Übersicht werden die Vorteile, die Anforderungen und die zu lösenden Probleme dieser kohärenten, optischen Übertragung beschrieben.

Résumé. La transmission optique cohérente, une technique qui n'en est encore qu'à ses débuts, jouera vraisemblablement un rôle important dans les systèmes futurs de guides optiques sophistiqués. La différence essentielle entre la transmission optique cohérente et non cohérente réside dans la mise en œuvre de la réception par «superposition» dans la technique cohérente, ce qui requiert des sources lumineuses nettement plus stables en fréquence et à bande plus étroite. L'auteur donne un aperçu des avantages, des exigences et des problèmes à résoudre inhérents à cette technique.

Trasmissione ottica coerente

Riassunto. La trasmissione ottica coerente – una nuova tecnica che si sta sviluppando rapidamente – assumerà con ogni probabilità un ruolo importante nei futuri sistemi a conduttori ottici. La differenza principale fra la trasmissione ottica incoerente e quella coerente risiede nel fatto che in quest'ultima trova applicazione la ricezione per sovrapposizione, che richiede sorgenti di luce a banda assai più stretta e una maggiore stabilità di frequenza. Nell'articolo sono descritti i vantaggi e le esigenze della trasmissione ottica coerente e i relativi problemi da risolvere.

1 Einleitung

Erfolgversprechende Forschungsergebnisse der letzten Jahre lassen darauf schliessen, dass die optische kohärente Übertragungstechnik eine grosse Bedeutung in künftigen Lichtleitersystemen erhalten wird. Der Grund dazu liegt in der erhöhten Empfindlichkeit und besseren Selektivität der kohärenten Empfänger. Grössere Empfindlichkeit und Selektivität werden ihrerseits zu beachtlichen Steigerungen sowohl im Bereich der Weitdistanzübertragung als auch im Gebiet der breitbandigen Ortsnetze führen. Bevor solche Systeme jedoch praktisch eingesetzt werden können, sind noch wesentliche Verbesserungen, namentlich in der Laserdiode-Technologie, nötig. Nach einer kurzen Charakterisierung heutiger «inkohärenter» Systeme soll auf das Prinzip der kohärenten optischen Übertragung eingegangen, Begriffe erklärt und anstehende Probleme erläutert werden.

2 Direktmodulierte optische Sender, direkte Empfangstechnik

In heute eingesetzten faseroptischen Systemen wird die Lichtintensität moduliert, wobei in der Mehrheit eine digitale Ein/Aus-Tastung Anwendung findet. Dabei steuert ein getasteter Strom durch die Laserdiode die Elektro-

nenninjektion im pn-Übergang und beeinflusst unmittelbar die Ausgangsstrahlung (Fig. 1). Man spricht hier von direkter Modulation, weil das Licht direkt mit dem Laserstrom moduliert wird. Es sind also keine zusätzlichen äusseren Modulatoren nötig.

Mit dieser direkten Intensitätsmodulation des optischen Trägers lassen sich im elektrischen Bereich die bekannten digitalen Amplituden- (ASK), Frequenz- (FSK) oder Phasenumtastungen (PSK) verwirklichen (ASK = amplitude shift keying). Figur 2 zeigt, wie entweder die Ampli-

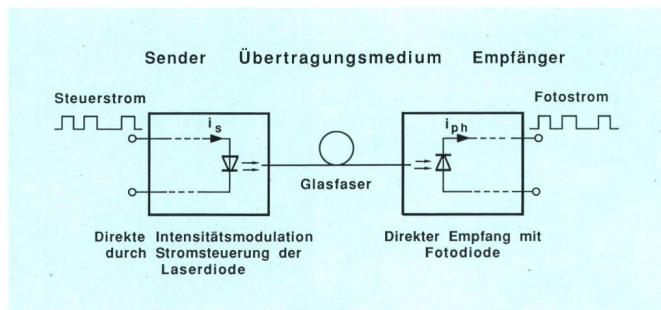


Fig. 1
Direktmodulierter optischer Sender und direkte Empfangstechnik

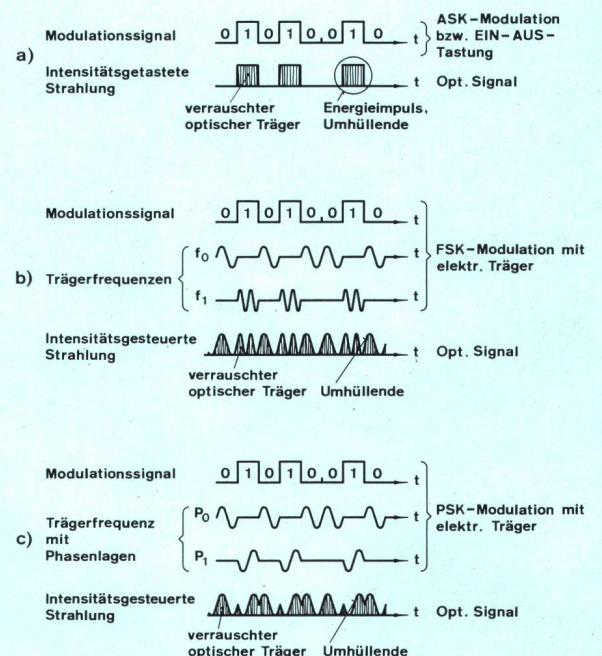


Fig. 2
Digitale Modulationsarten angewendet bei der Intensitätsmodulation
a) Amplitudenumtastung ASK
b) Frequenzumtastung FSK
c) Phasenumtastung PSK

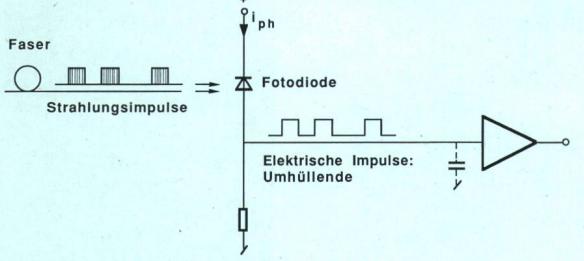


Fig. 3

Die Fotodiode im Empfänger wirkt als optoelektronischer Wandler mit Tiefpasscharakteristik

tude des Modulationssignals bzw. die Frequenz- oder Phasenlage eines *elektrischen Trägers* verändert wird. Das optische Signal bleibt in all diesen Fällen eine intensitätsgetastete Strahlung.

Empfangsseitig werden die eintreffenden Lichtsignale einer Photodiode zugeleitet, die diese *direkt* in elektrische Impulse umwandelt (Fig. 3). Die Photodiode wirkt hier als optoelektronischer Wandler mit Tiefpasscharakteristik (Mittelwertgleichrichter, square-law detector) und liefert dabei einen der optischen Leistung proportionalen elektrischen Strom, den Fotostrom i_{ph} .

Um sich bezüglich des Bandbreitenbedarfs solcher direktmodulierter Systeme ein Bild zu verschaffen, dient folgende Betrachtung:

– Angenommen sei ein auf der Wellenlänge $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ arbeitendes Fasersystem, das als Sender einen Laser mit einer spektralen Breite von ungefähr $\Delta\lambda = 0,75 \text{ nm}$ gemäß Figur 4, aufweist. Das Licht als Träger besitzt die Frequenz f_T :

$$f_T = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 10^{-6}} \text{ Hz} = 2 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \approx 200 \text{ THz} \quad (1)$$

– Wird mit Hilfe der Gleichung (2) auch die spektrale Breite $\Delta\lambda$ in den entsprechenden Frequenzbereich umgerechnet, ergibt sich die enorme Bandbreite des unmodulierten Lichtträgers zu:

$$\Delta f_T = \frac{c}{\lambda} \cdot 1 / \left(1 + \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \right) = 2 \cdot 10^{14} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Hz} \approx 100 \text{ GHz} \quad (2)$$

Als dritte Frequenzgröße kann die Signalbandbreite Δf_S mit 1 GHz angenommen werden, da heute im Einsatz stehende Systeme üblicherweise noch unterhalb dieser Frequenz moduliert werden. In Figur 4 wird deutlich, dass eine Lichtträgerfrequenz f_T von 200 THz – die selbst eine Rauschbandbreite Δf_T von 100 GHz aufweist – mit einer Signalfrequenz Δf_S von 1 GHz in der Intensität moduliert wird. Hierbei handelt es sich eigentlich um eine Signalübertragung mit bereits rauschmoduliertem Träger (getastetes 100-GHz-Rauschsignal), die vergleichbar mit den ersten Funken-Sendegeräten zu Marconis Zeiten ist. Charakteristisch für diese Übertragungsart ist die wesentlich grössere Trägerbandbreite im Vergleich zur Signalbandbreite. Hier gilt also:

$$\Delta f_T \gg \Delta f_S \quad (3)$$

Das Bandbreitenverhältnis des Signals zum Träger liegt in der Größenordnung von:

$$\frac{\Delta f_S}{\Delta f_T} \approx \frac{1 \text{ GHz}}{100 \text{ GHz}} = 10^{-2} \quad (4)$$

Gerade umgekehrt ist die Situation in den meisten konventionellen Übertragungssystemen, wie z. B. der Radiotechnik; dort weisen die Träger sehr schmale Bandbreiten (einige Hz) auf, und die Signalbandbreiten liegen Zehnerpotenzen ($\sim 10 \text{ kHz}$) höher. Hier gilt:

$$\Delta f_T \ll \Delta f_S \quad (5)$$

Hier liegt das Bandbreitenverhältnis im folgenden Bereich:

$$\frac{\Delta f_S}{\Delta f_T} \approx \frac{10 \text{ kHz}}{10 \text{ Hz}} = 10^3 \quad (6)$$

Man erkennt, dass zwischen diesen beiden Übertragungsarten ein Faktorunterschied der Größenordnung 10^5 besteht.

Faseroptische Systeme mit solch «breitbandigen» Lasern und mit direkter Empfangstechnik sind daher im Vergleich zu den selektiven Radio- oder Mikrowellenverbindungen eher als «grobschlächtig» zu bezeichnen, obwohl sie schon heute ähnliche Übertragungskapazitäten aufweisen. Der Vorteil heutiger optischer «inkohärenter» Systeme erklärt sich demnach in ihrer relativen Einfachheit, dies in den Sende- wie in den Empfangseinheiten.

3 Kohärente optische Übertragung

Wie angedeutet, liegt die Zukunft der optischen Übertragung vermutlich in der Anwendung jener Techniken, die in der Radio- und Mikrowellentechnik verbreitet sind. Wird der dort längst bekannte *Überlagerungsempfang* herangezogen, lässt sich das grosse Potential des optischen Spektrums erst richtig ausnutzen. Figur 5 zeigt das Prinzip der kohärenten optischen Übertragung

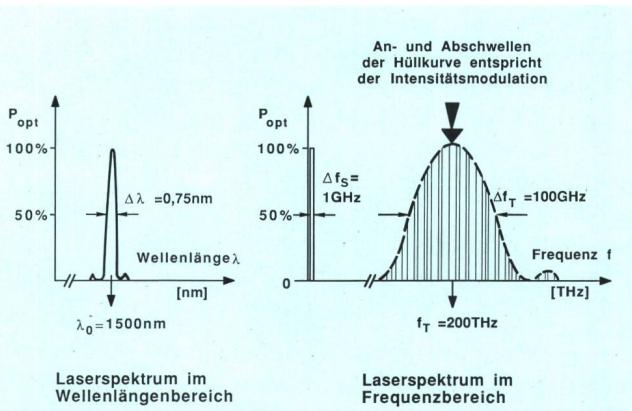


Fig. 4
Bandbreitenbedarf direktmodulierter Sender mit handelsüblichen Halbleiter-Lasern

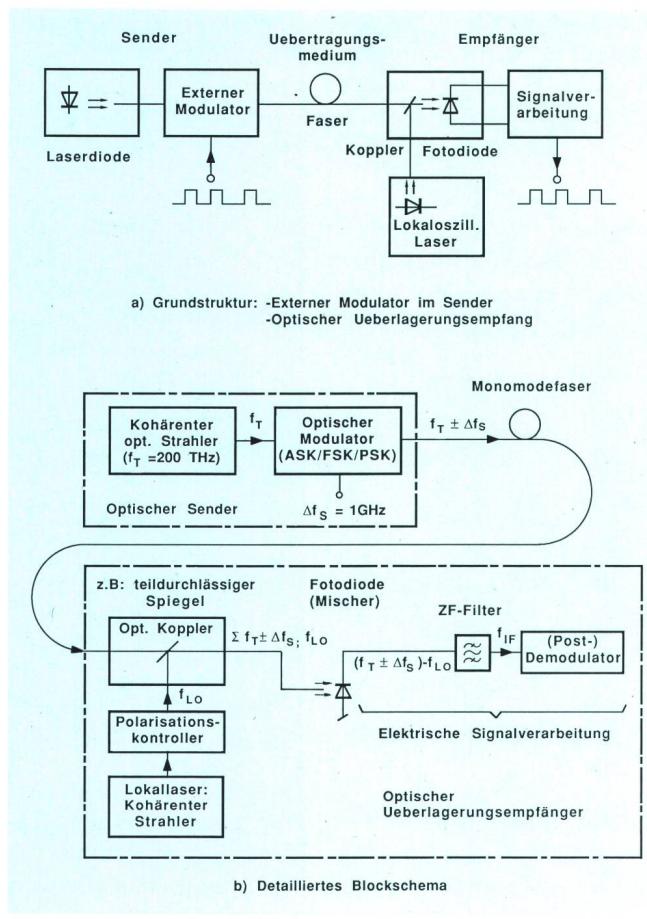


Fig. 5
Prinzip der kohärenten optischen Übertragung

mit externer Modulation im Sender und mit Überlagerungsempfänger.

In kohärenten Systemen wird das ankommende optische Signal vorerst in einem optischen Koppler zu einem zweiten, örtlich erzeugten optischen Signal, dem Lokaloszillatorträger mit der Frequenz f_{LO} , addiert. Dabei muss beachtet werden, dass für eine optimale Ausnutzung die beiden zu überlagernden optischen Wellen die gleiche Schwingungsrichtung (Polarisation) aufweisen müssen (Fig. 6). Als optischer Koppler kann beispielsweise ein teildurchlässiger Spiegel verwendet werden, der als passives lineares Netzwerk die optischen Wellen überlagert. Das so erhaltene Signal wird anschliessend in der Fotodiode optoelektronisch gewandelt, wobei die Fotodiode als «Mischer» mit Tiefpasscharakteristik nur die tieferliegende Differenzfrequenz liefert. Unter optimalen Bedingungen wird das Ausgangssignal der Photodiode eine genaue Kopie der Eingangsintensität darstellen, dies jedoch im Zwischenfrequenzbereich f_{IF} , also um mehrere Frequenzdekaden ($10^5 \dots 10^6$) nach unten verschoben. Liegt die Zwischenfrequenz im Gigahertzbereich oder tiefer, ist es vergleichsweise einfach, diese mit elektronischen Mitteln der Mikrowellentechnik zu verstärken und zu demodulieren.

Da die Übertragungskanäle nun nicht – wie bei der Wellenlängenmultiplexierung – im optischen, sondern im Mikrowellenbereich getrennt werden können, ist es möglich, mehrere Träger mit Abständen im Gigabitbereich zu übertragen. Dies würde bedeuten, dass allein über eine Faser im dritten Lichtfenster (Frequenzspek-

trum etwa 20 THz, Fig. 7) ungefähr tausend Lichtträger übertragen werden könnten, die ihrerseits einige tausend Telefonikanäle enthalten! Diese theoretisch er-

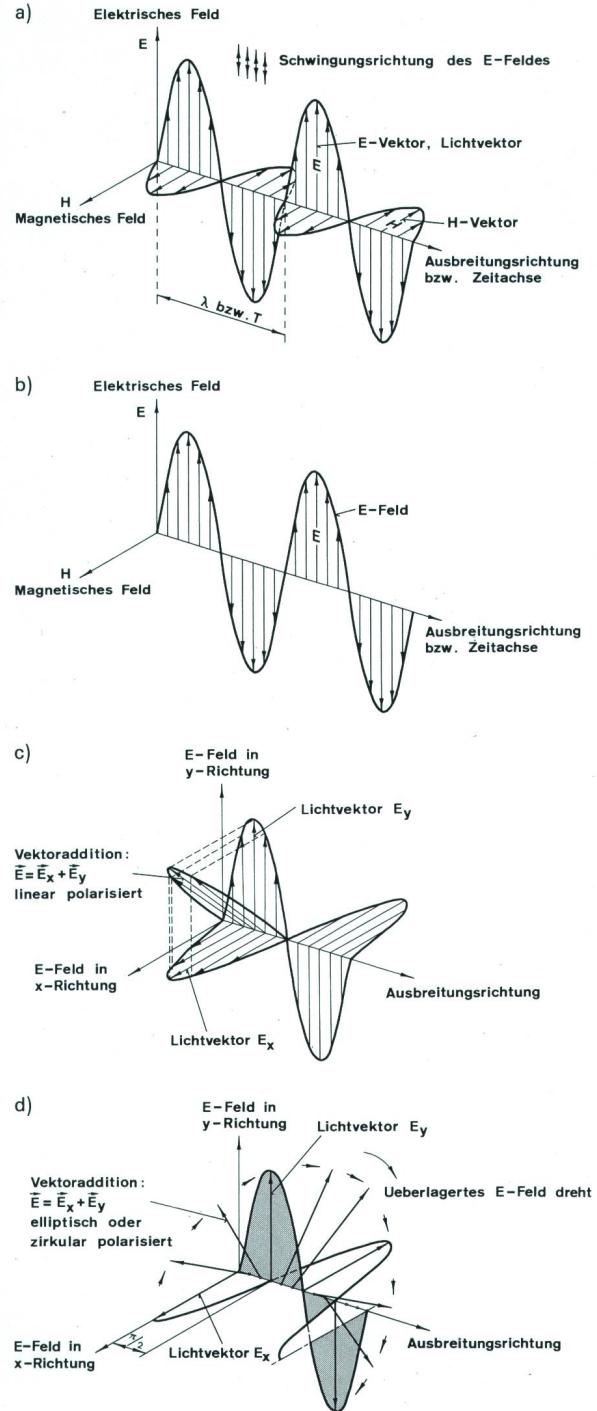


Fig. 6: Lichtwellen und Polarisation

- a) Elektromagnetisches Feld der Lichtwelle.
Hier dargestellt:
– lineare, vertikale Polarisation
- b) Übliche Darstellung der Lichtwelle:
– reduziert auf E-Feld
- c) Überlagerung zweier Lichtwellen:
– linearer Polarisation
– gleicher Phasen
– unterschiedlicher Polarisationsrichtungen } → keine optimale E-Feld-Amplitudenaddition (linear polarisiert)
- d) Überlagerung zweier Lichtwellen:
– linearer Polarisation
– unterschiedlicher Phasen
– unterschiedlicher Polarisationsrichtungen } → keine optimale E-Feld-Amplitudenaddition (ellip. oder zirkular polarisiert)

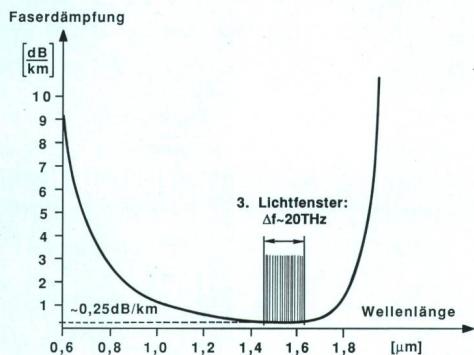


Fig. 7
Faserdämpfung per Kilometer in Funktion der Wellenlänge

mittelte Kanalzahl trägt allerdings dem auftretenden Problem der Intermodulationsprodukte und anderen störenden Effekten nicht Rechnung, so dass sich in der Praxis weniger hohe Kanalzahlen ergeben. Gleichwohl mag man daraus erkennen, dass kohärente optische Systeme mit ihrer sehr *hohen Kanalzahl* der Kommunikationstechnik neue Aspekte für die Zukunft eröffnen.

Drei wichtige Voraussetzungen müssen allerdings erfüllt sein, um ein kohärentes optisches System aufzubauen:

- Als erstes müssen Lichtquellen mit sehr schmalen spektralen Linienbreiten verfügbar sein. Dabei muss die Linienbreite um einen bestimmten Faktor schmä-

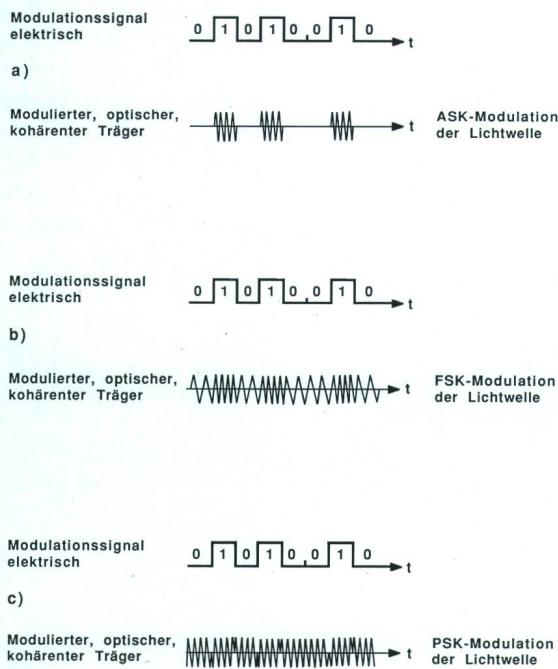


Fig. 8
Digitale Modulationsarten angewendet bei der kohärenen optischen Übertragung
a) Amplitudentastung ASK
b) Frequenzumtastung FSK
c) Phasenumtastung PSK

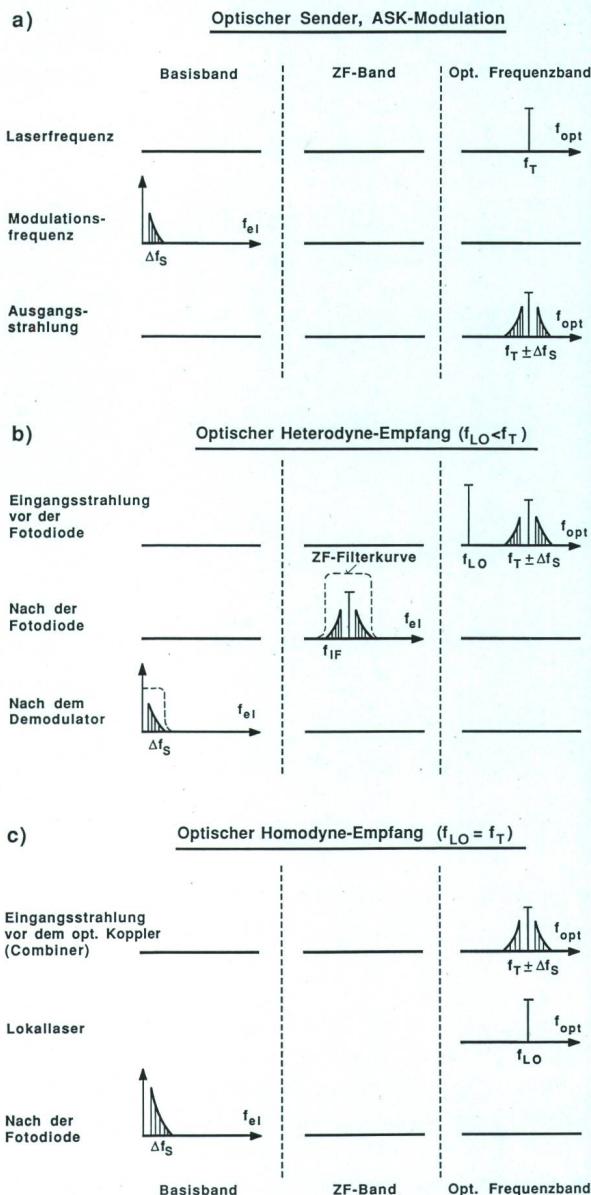


Fig. 9
Frequenzsituation bei der kohärenen optischen Übertragung
a) im Sender
b) im Heterodyne-Empfänger
c) im Homodyne-Empfänger

ler als die Daten- bzw. Signalbandbreite sein. Auch sollte die Stabilität der Laserfrequenz in derselben Größenordnung liegen. Wird beispielsweise eine Lichtwellenlänge von 1500 nm angenommen, ist eine Linienbreite bzw. eine Frequenzstabilität von mindestens 10^{-8} erforderlich, was einer Frequenzbandbreite bzw. Stabilität von $200 \text{ THz}/10^8 = 2 \text{ MHz}$ entspricht. Ist einmal eine solche Quelle vorhanden, lassen sich damit die bekannten digitalen Modulationsarten wie ASK, FSK und PSK unmittelbar an der *optischen Trägerfrequenz* anwenden (Fig. 8).

- Die zweite Forderung an kohärente Systeme ist ein Lichtleitmedium, das die ebene, optische Phasenfront während der Ausbreitung aufrechterhält. Dies kann nur mit Monomodeleitern erfüllt werden.
- Schliesslich muss als dritte Voraussetzung ein optischer Lokaloszillator-Laser im Empfänger eingesetzt

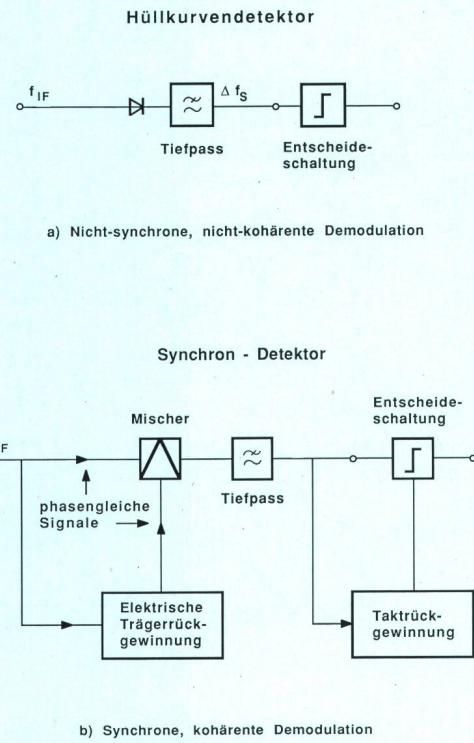


Fig. 10
Zwei übliche Demodulationsarten der Zwischenfrequenz

werden, der in einer sehr stabilen Beziehung zum ein-treffenden Signal des entfernten Senders steht, damit überhaupt ein Überlagerungsempfang möglich wird (Heterodyne- oder Homodyne-Empfänger). In jedem Fall ist eine automatische Frequenzregelung des Lokaloszillators erforderlich. In Homodyne-Empfängern muss zusätzlich der Lokaloszillator phasenstarr an die optische Trägerwelle angekoppelt werden.

4 Heterodyne-Empfang

In Heterodyne-Systemen arbeiten der Lokallaser im Empfänger und der entfernte Senderlaser auf unterschiedlichen Lichtfrequenzen. Dadurch entsteht im Empfänger, also am Ausgang der Fotodiode, die elektrische Zwischenfrequenz f_{IF} . Die Verhältnisse bezüglich der Frequenz im optischen und elektrischen Bereich zeigen Figur 9a und b. Die gewonnene Zwischenfrequenz wird anschliessend verstärkt und einem Demodulator zugeführt, wo die Rückwandlung der Information vom Zwischenfrequenzband ins Basisband stattfindet. Diese elektrische Demodulation, im englischen Sprachgebrauch auch «post-detection» genannt («Nach-Detektion», weil sie anschliessend an die erste, optische Detektion kommt), kann auf mehrere Arten geschehen.

Zwei Prinzipien stehen im Vordergrund, wie in Figur 10a und b dargestellt:

- die inkohärente bzw. nicht-synchrone und
- die kohärente oder synchrone Demodulation.

Inkohärente Demodulation wird mit einem Hüllkurvendetektor erreicht, bestehend aus einem Gleichrichter und einem nachgeschalteten Tiefpassfilter (envelope detection).

Dagegen verlangen kohärente Demodulatoren eine präzise Rückgewinnung der elektrischen Trägerfrequenz. Ein anschliessendes Mischen derselben mit dem Zwischenfrequenzband liefert nach geeigneter Filterung das gewünschte Basisband.

5 Homodyne-Empfang

In Homodyne-Empfängern arbeitet der Lokallaser auf der gleichen Lichtfrequenz wie der entfernte Senderlaser, wobei der Lokallaser optisch frequenz- und phasenstarr an das Empfangssignal gekoppelt werden muss. Da in diesem Fall Frequenzgleichheit beider optischer Wellen besteht, fällt nach dem Mischvorgang in der Photodiode der Träger des «Zwischenfrequenzbandes» auf Null und die Seitenbänder erscheinen direkt im Basisband (Fig. 9c; unteres Seitenband gefaltet). Es ist einzusehen, dass in Homodyne-Sytemen nur ASK und PSK als digitale Modulationsart anwendbar sind, da die optische Frequenzgleichheit zwischen Sender und Empfänger eine FSK-Modulation ausschliesst. Mit dem Homodyne-Empfang, also mit der unmittelbaren Rückgewinnung des Basisbandes, erübrigt sich auch eine weitere Demodulation des Signals.

6 Kombinationsmöglichkeiten der Modulations- und Empfangstechniken

Das Verknüpfen der unterschiedlichen Modulations-, Empfangs- und Demodulationsarten ergibt nun eine Vielzahl möglicher Kombinationen aus ASK, FSK, PSK-Modulation, Heterodyne-, Homodyne-Empfang, kohärenter und nichtkohärenter Demodulation. Theoretische Arbeiten [1...6] haben gezeigt, dass je nach gewählter Kombination die Empfindlichkeit im Überlagerungsempfänger um 5 dB...20 dB gegenüber dem Direktempfänger verbessert werden kann. Der Figur 11 können diese theoretischen Empfängerempfindlichkeiten unterschiedlicher Kombinationen in Funktion der Bitrate ent-

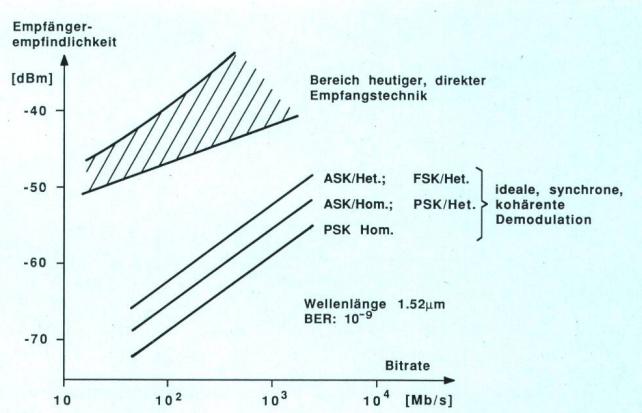


Fig. 11
Theoretische Empfängerempfindlichkeiten kohärenter optischer Empfänger

nommen werden. Die daraus ersichtliche Empfindlichkeitsverbesserung bildet, neben der schon erwähnten Kanalzahlerweiterung, denn auch den zweiten markanten Vorteil der kohärenten optischen Übertragungstechnik.

Bibliographie

- [1] Hooper R.C., Midwinter J.E., Smith D.W. and Stanley I.W. Prozess in monomode transmission techniques in the

- United Kingdom. *Journal of Lightwave Technology*. Vol. LT-1, No. 4, Dec. 1983.
[2] Yamamoto Y. and Kimura T. Coherent optical fiber transmission systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. Vol. QE-17, No. 6, June 1981.
[3] Smith D.W. Coherent fiberoptic communications. *Laser Focus*, Nov. 1985.
[4] Okoshi T. et al. Computation of bit-error rate of various heterodyne and coherent-type optical communication schemes. *Journal of Optical Communications* 2 (1981) 3.
[5] Okoshi T. Heterodyne and coherent optical fiber communication: Recent progress. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-30, No. 8, Aug. 1982.
[6] Salz J. Coherent lightwave communications. *AT&T Technical Journal*, Vol. 64, No. 10, Dec. 1985.

Die nächste Nummer bringt unter anderem:

Vous pourrez lire dans le prochain numéro:

6/89

- | | |
|--|---|
| Zbinden F. | Konzept des ISDN und Verwirklichung in der Schweiz mit Swissnet |
| Freudiger M.,
Isler E. und
Santschi R. | Système de signalisation CCITT No 7 – Sous-système de transport de messages (MTP)
Sistema di segnalazione CCITT n° 7 – Parte trasferimento di messaggi (MTP) |
| Béguin C. | Komponenten der kohärenten optischen Übertragung |
| Debrunner W. E. | Störungen und Ausbreitungsverzerrungen frequenzmodulierter Signale |
-