

# Kohärente optische Übertragung = Transmission optique cohérente

Autor(en): **Béguin, Claude**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **67 (1989)**

Heft 5

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874935>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# 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 Überlagerungsempfangers bei der kohärenten 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 gestauter Strom durch die Laserdiode die Elektro-

ninjektion 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). Fig. 2 zeigt, wie entweder die Ampli-

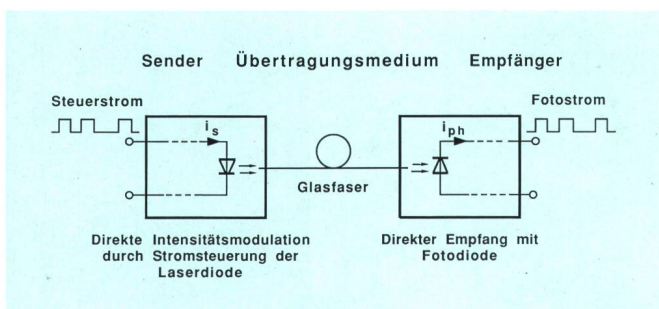


Fig. 1 Direktmodulierter optischer Sender und direkte Empfangstechnik

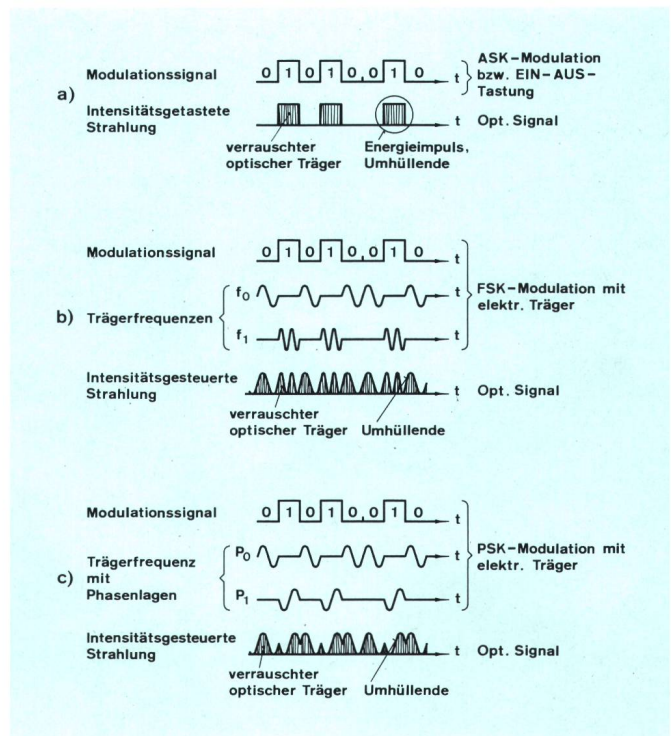


Fig. 2 Digitale Modulationsarten angewendet bei der Intensitätsmodulation  
a) Amplitudenumtastung ASK  
b) Frequenzumtastung FSK  
c) Phasenumtastung PSK

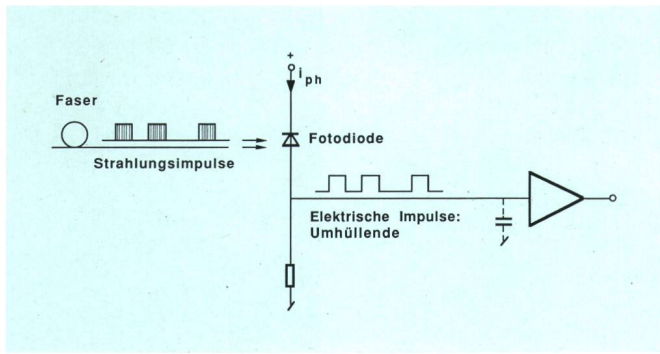


Fig. 3 Die Fotodiode im Empfänger wirkt als optoelektronischer Wandler mit Tiefpasscharakteristik

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 Fotodiode zugeleitet, die diese *direkt* in elektrische Impulse umwandelt (Fig. 3). Die Fotodiode 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  $f_T$ :

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

- 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:

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

Als dritte Frequenzgrösse kann die Signalbandbreite  $\Delta f_S$  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  $\Delta f_T$  von 100 GHz aufweist – mit einer Signalfrequenz  $\Delta f_S$  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:

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

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:

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

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 «grob-schlächting» 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

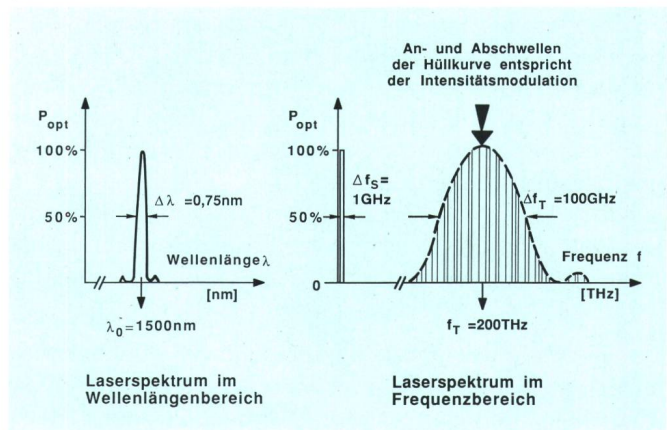


Fig. 4 Bandbreitenbedarf direktmodulierter Sender mit handelsüblichen Halbleiter-Lasern

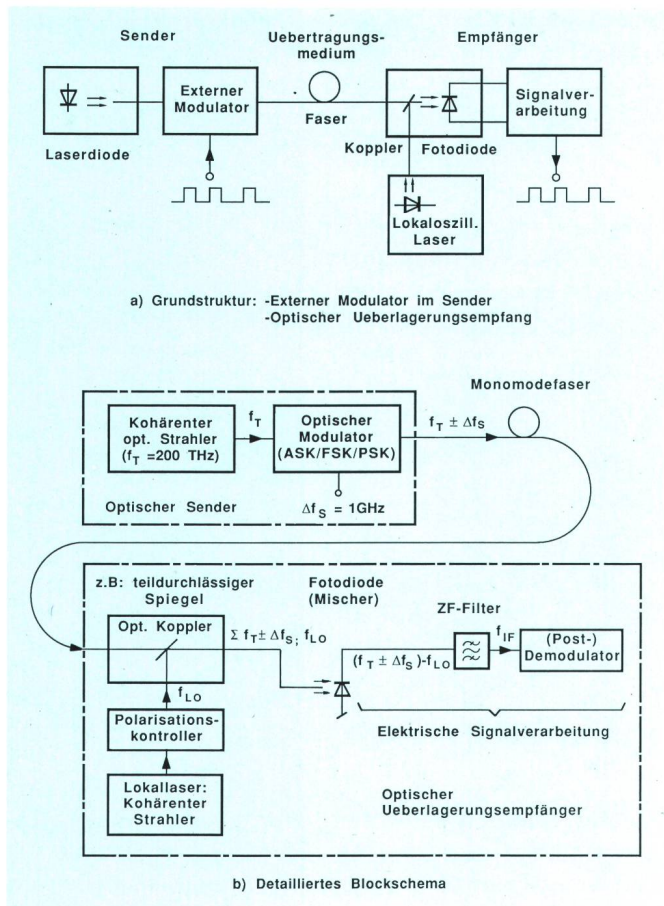


Fig. 5  
Prinzip der kohärenten optischen Übertragung

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 Lokaloszillatorsignal 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 Fotodiode 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 Telefonkanäle enthalten! Diese theoretisch er-

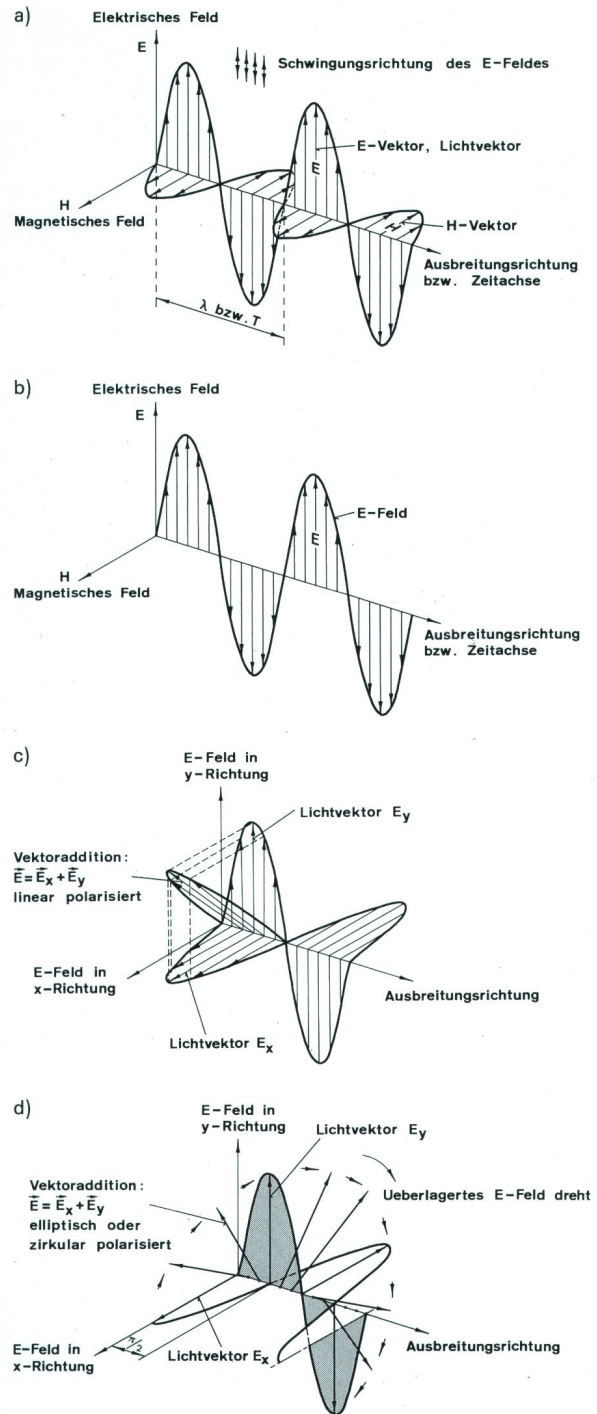


Fig. 6: Lichtwellen und Polarisation

- 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)

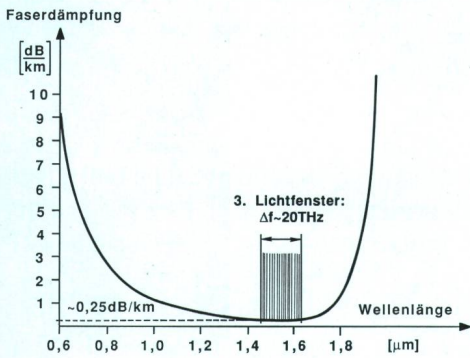


Fig. 7 Faserdämpfung per Kilometer in Funktion der Wellenlänge

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-

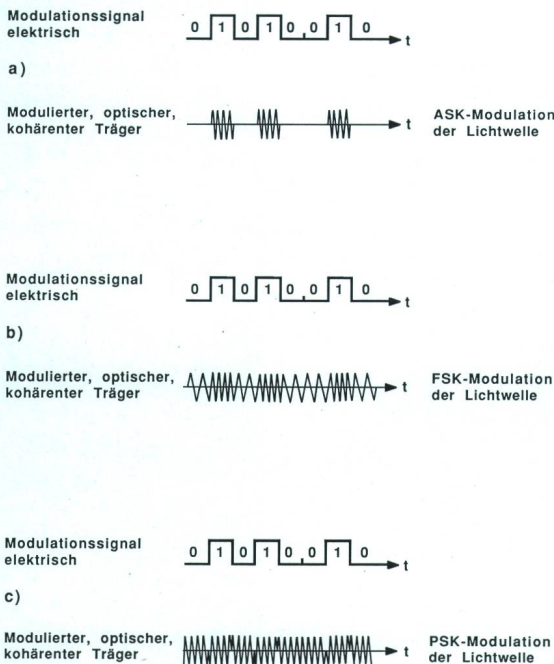


Fig. 8 Digitale Modulationsarten angewendet bei der kohärenten optischen Übertragung

- a) Amplitudentastung ASK
- b) Frequenzumtastung FSK
- c) Phasenumtastung PSK

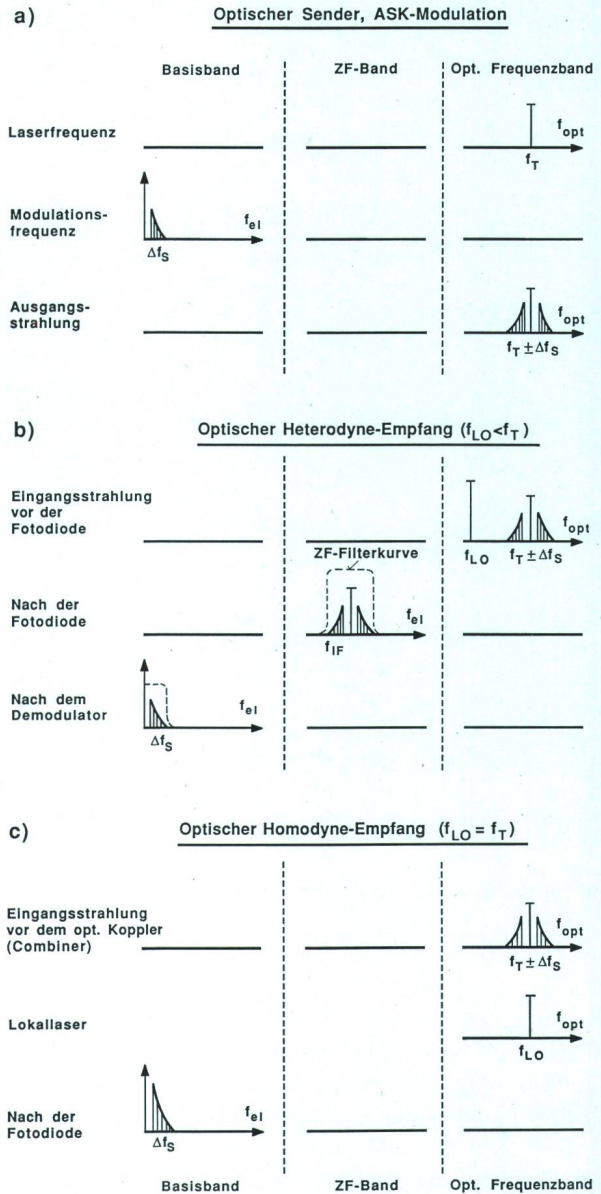
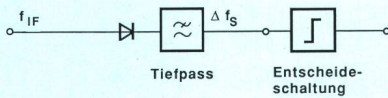


Fig. 9 Frequenzsituation bei der kohärenten optischen Übertragung  
a) im Sender  
b) im Heterodyne-Empfänger  
c) im Homodyne-Empfänger

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).

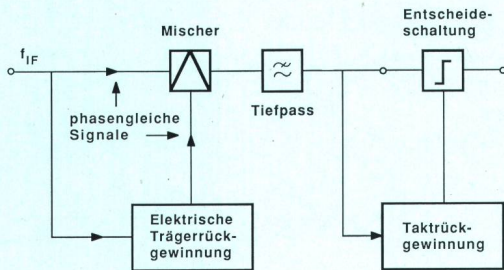
- Die zweite Forderung an kohärente Systeme ist ein Lichtleitmedium, das die ebene, optische Phasenfront während der Ausbreitung aufrechterhält. Dies kann nur mit Monomodeleitern erfüllt werden.
- Schliesslich muss als dritte Voraussetzung ein optischer Lokaloszillator-Laser im Empfänger eingesetzt

### Hüllkurvendetektor



a) Nicht-synchrone, nicht-kohärente Demodulation

### Synchron - Detektor



b) Synchrone, kohärente Demodulation

Fig. 10  
Zwei übliche Demodulationsarten der Zwischenfrequenz

werden, der in einer sehr stabilen Beziehung zum eintreffenden 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 Lokaloszillator 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 Lokaloszillator auf der gleichen Lichtfrequenz wie der entfernte Senderlaser, wobei der Lokaloszillator 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 Fotodiode der Träger des «Zwischenfrequenzbandes» auf Null und die Seitenbänder erscheinen direkt im Basisband (*Fig. 9c*; unteres Seitenband gefaltet). Es ist einzusehen, dass in Homodyne-Systemen 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-

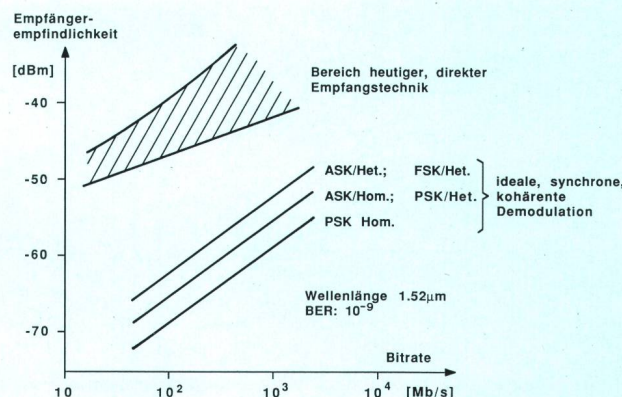


Fig. 11  
Theoretische Empfindlichkeiten kohärenter optischer Empfänger

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.,<br>Isler E. und<br>Santschi R. | Système de signalisation CCITT No 7 – Sous-système de transport de messages (MTP)<br>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  |
-