

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 57 (1979)

Heft: 6

Artikel: Digitales Lichtwellenleiter-Versuchssystem für 8,448 Mbit/s. 1. Teil = Système d'essai de transmission numérique par fibre optique à 8,448 Mbit/s. 1re partie

Autor: Béguin, Claude

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875557>

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: 03.05.2026

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

Systeme d'essai de transmission numérique par fibre optique à 8,448 Mbit/s (1^{re} partie)

Claude BÉGUIN, Bern

621.376.5:621.383.52:621.391.63.037.37.681.7.068

Zusammenfassung. In einem ersten Teil werden die in digitalen, faseroptischen Systemen gebräuchlichen Modulationsarten, optoelektronischen Komponenten, Lichtwellenleiter und Übertragungscodes erläutert. Abschliessend beschreibt der Autor eine digital-optische Übertragungsstrecke, die in der Abteilung Forschung und Entwicklung der PTT-Betriebe für Mess- und Versuchszwecke entwickelt wurde.

Résumé. La première partie traite des genres de modulation usuels dans les systèmes numériques à fibre optique, de composants opto-électroniques, de guides de lumière et de codes de transmission. L'auteur décrit ensuite un trajet de transmission opto-numérique développé à la Division des recherches et du développement de l'Entreprise des PTT à des fins de mesures et d'essais.

Sistema di prova di trasmissione digitale con fibra ottica a 8,448 Mbit/s

Riassunto. Nella prima parte vengono spiegati i tipi di modulazione usati nei sistemi di trasmissione digitale con fibre ottiche, le componenti opto-elettroniche, i conduttori ottici e i codici di trasmissione. L'autore descrive in seguito un percorso di trasmissione opto-digitale sviluppato nella Divisione ricerche e sviluppo dell'Azienda delle PTT per effettuare misurazioni e prove.

1 Einleitung

Der Informationsaustausch über Lichtleitfasern bringt fernmeldetechnischen Anwendungen interessante Möglichkeiten sowohl beim Ausbau bestehender Übertragungsstrecken als auch beim Bereitstellen neuer Übertragungswege. Eine intensive Forschungs- und Entwicklungstätigkeit deutet darauf hin, dass auf dem Gebiet der optischen Kommunikation für die 80er Jahre wirtschaftliche Breitband-Übertragungssysteme zu erwarten sind. Die Aktivitäten konzentrieren sich hauptsächlich auf folgende Gebiete: Technologie der Komponenten, Untersuchungen der Übertragungssysteme und Codes, Ermitteln konkreter Eigenschaften im Versuch.

Für einen bedarfsbezogenen Netzausbau ist es von entscheidender Bedeutung, die technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Möglichkeiten neuer Übertragungsmedien möglichst frühzeitig beurteilen zu können. Um auf diesem neuen Gebiet Erfahrungen zu sammeln, wurde bei der Abteilung Forschung und Entwicklung PTT eine digitale Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecke entwickelt. Auf die wichtigsten Probleme, wie sie sich beim Entwurf digitaler optischer Systeme stellen, wird nachfolgend näher eingegangen.

2 Allgemeines zur Übertragung mit Lichtleitfasern

Als Informationsträger hoher Übertragungskapazität gewinnt Licht zunehmend an Bedeutung, dies wegen seiner hohen Frequenz ($\nu = 10^{14} \dots 10^{15}$ Hz).

Neben der mehr am Anfang der Entwicklung anvisierten «drahtlosen» Übertragung von Licht durch die Luft gelangen heute für grössere Entfernungen praktisch ausschliesslich Lichtleitfasern als Übertragungsmedium zur Anwendung. Optische Übertragungssysteme bestehen in ihrer einfachsten Form aus einem optischen Sender, einem Lichtleitmedium und einem Empfänger. Für die optische Kommunikation sind zurzeit hauptsächlich GaAs-Halbleiterelemente als Sender von Bedeutung, da sie neben dem Vorteil der kleinen Abmessungen eine direkte Modulation ermöglichen.

1 Introduction

L'échange d'informations par l'intermédiaire de fibres optiques ouvre de nouvelles perspectives intéressantes dans le domaine des télécommunications, tant pour l'extension d'artères de transmission existantes que pour la mise à disposition de nouveaux circuits. Les travaux de recherche et de développement très intenses qui s'effectuent dans ce domaine indiquent qu'on peut sans doute s'attendre, au cours des années de 1980, à l'apparition de systèmes de transmission à large bande d'un caractère économique dans le domaine des communications optiques. Les activités se concentrent surtout dans les secteurs suivants: technologie des composants, recherches portant sur des systèmes de transmission et des codes, détermination des propriétés réelles par voie expérimentale.

Pour qu'il soit possible d'agrandir le réseau des télécommunications en fonction des besoins, il est essentiel de pouvoir évaluer à temps les possibilités techniques, économiques et d'exploitation des nouveaux moyens de transmission. En vue de recueillir des expériences dans ce domaine, la Division des recherches et du développement des PTT a mis au point un trajet de transmission par fibre optique fonctionnant en mode numérique. Cet article expose les problèmes essentiels qui se sont posés lors de la planification de systèmes opto-numériques.

2 Généralités concernant la transmission par fibre optique

La lumière gagne de plus en plus en importance en tant que support d'information à haute capacité de transmission, en raison de sa fréquence élevée ($\nu = 10^{14} \dots 10^{15}$ Hz).

Au début du développement des télécommunications optiques, on avait tenté la transmission à l'air libre mais on s'était plus tard aperçu que le milieu idéal pour des transmissions à grande distance est la fibre optique. Sous sa forme la plus simple, un système de transmission optique comprend une source lumineuse, un guide de lumière dit «fibre optique» et un détecteur. En tant

21 Direkte Modulation

Bei lichtemittierenden Dioden (LED) und Laserdioden (LD) kann durch den Steuerstrom die Elektroneninjektion in den PN-Übergang beeinflusst und so die Ausgangsstrahlung direkt moduliert werden. Optische Halbleitersender benötigen somit keine getrennten Modulatoren, wie dies in anderen Übertragungstechnischen Sparten üblich ist. Mit dieser direkten Modulation lassen sich verschiedenartige Modulationsformen verwirklichen. Für fiberoptische Übertragungen eignen sich hauptsächlich drei Arten:

- die kontinuierliche Intensitätsmodulation (IM) und
- die Pulspositionsmodulation (PPM), die beide für analoge Zwecke verwendet werden, sowie
- die in digitalen Übertragungssystemen eingesetzte Pulsmodulation (PCM).

211 Intensitätsmodulation

Die Intensitätsmodulation (IM) bildet eine besondere Art der Amplitudenmodulation (AM). In beiden dienen variable Ströme oder Spannungen am Eingang als Steuergrößen. Der Unterschied liegt darin, dass bei der Amplitudenmodulation am Ausgang wieder eine proportionale Strom- oder Spannungsgröße auftritt, wogegen bei der Intensitätsmodulation eine proportionale Veränderung der Leistungs- beziehungsweise der Lichtintensität vorliegt. Der Vorteil der Intensitätsmodulation in optischen Systemen liegt darin, dass die Photodiode im Empfänger ebenfalls ein der Lichtintensität proportionales Ausgangssignal liefert. Damit ist eine lineare Beziehung zwischen dem Steuersignal im Sender und dem elektrischen Signal im Empfänger gegeben. Da lichtemittierende Dioden in weitem Bereich eine gute Linearität zwischen Steuerstrom und optischer Leistung aufweisen, eignen sich besonders LED für die kontinuierliche Intensitätsmodulation. Halbleiterlaser eignen sich weniger gut dazu, da keine ausgeprägte Linearität zwischen Injektionsstrom und Strahlungsleistung besteht. Aufwendige Regelschaltungen sind hier erforderlich, um diesem Umstand zu begegnen.

212 Pulspositionsmodulation PPM

Wird ein analoges Signal in seinem Amplitudenwert periodisch abgetastet und dieser Abtastwert als Mass einer zeitlichen Verschiebung des neu zu bildenden Impulses herangezogen, so ergibt sich die sogenannte Pulspositionsmodulation, die auch Pulsphasenmodulation genannt wird (Fig. 1). Das Leitungssignal besteht hier aus einer Folge von Impulsen der binären Wertigkeiten «Eins» oder «Null». Eine analoge Übertragungsart liegt hier deshalb vor, weil die Information in Form von zeitlich (analog) veränderlich erscheinenden Impulsen übertragen wird. Eine Wiederaufbereitung des Amplitudenwertes solcher nicht allzu stark gestörter Impulse kann jederzeit vorgenommen werden. Im Vergleich dazu ist die Regeneration eines gestörten, kontinuierlichen Signals bei der Intensitätsmodulation (IM) nicht durchführbar, weil sich einmal veränderte Signalwerte in nichts von unveränderten Signalwerten unterscheiden. Diese einfache Wiedergewinnung des Amplitudenwertes stellt damit den wesentlichsten Vorteil der Pulsposi-

que sources, ce sont surtout les semi-conducteurs en arséniure de gallium (Ga/As) qui jouent un rôle essentiel, vu leurs faibles dimensions et la possibilité de modulation directe.

21 Modulation directe

Dans les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser (LD), le courant de commande agit sur l'injection des électrons dans la zone de diffusion PN, ce qui conduit à une modulation directe du rayonnement de sortie. Il n'est donc pas nécessaire de disposer de modulateurs séparés pour les émetteurs optiques à semi-conducteurs, à l'opposé des solutions classiques dans les autres domaines de transmission. Cette modulation directe permet de réaliser des formes de modulation très diverses, dont trois genres conviennent particulièrement à la transmission par fibres optiques:

- la modulation continue d'intensité (IM),
- la modulation en variation de position des impulsions (PPM), les deux méthodes pouvant être utilisées dans des systèmes analogiques et
- la modulation par impulsions et codage (MIC), caractéristique pour les systèmes de transmission numérique.

211 Modulation d'intensité

La modulation d'intensité (IM) est une variante particulière de la modulation d'amplitude (AM). Dans les deux cas, les grandeurs de commande sont des courants ou des tensions variables à l'entrée. La différence

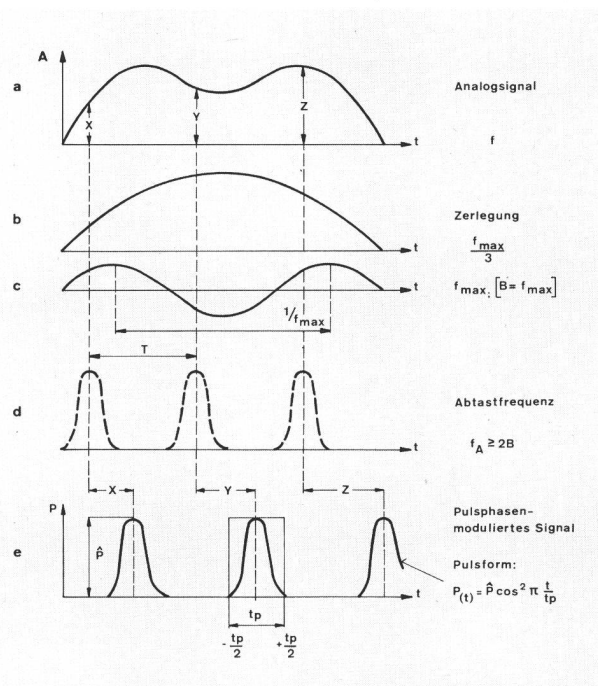


Fig. 1
Prinzip der Pulspositionsmodulation PPM — Principe de la modulation de position des impulsions PPM
Analogsignal — Signal analogique
Zerlegung — Décomposition
Abtastfrequenz — Fréquence d'échantillonnage
Pulsphasenmoduliertes Signal — Signal à modulation de position des impulsions
Pulsform — Forme de l'impulsion

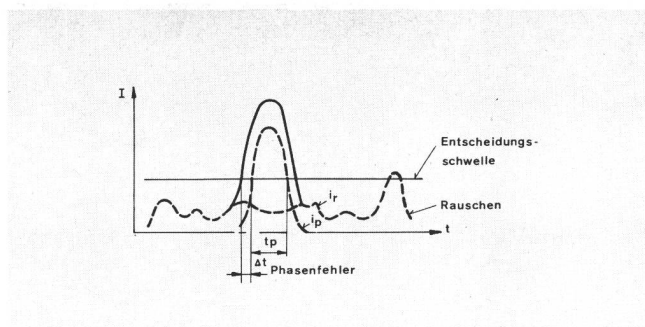


Fig. 2
Phasenfehler bedingt durch Rauschsignale — Erreur de phase due à des signaux de bruit
 Entscheidungsschwelle — Seuil de décision
 Rauschen — Bruit
 Phasenfehler — Erreur de phase

tionsmodulation zur Intensitätsmodulation dar. Nachteilig wirken sich dagegen bei der Pulsphasenmodulation Störungen aus, wie sie durch das «Rauschen» hervorgerufen werden (Fig. 2). Rauschströme i_r überlagern sich zum Nutzsignal i_p und verursachen einen Phasenfehler Δt im Empfänger. Die in jedem vollständigen Empfänger vorhandene Impulsschwellenschaltung untersucht, ob die empfangenen Signale als logische «Eins» oder «Nullen» zu werten sind. Überlagert sich nun ein Rauschsignal zum Nutzsignal, erscheint der Impuls gegenüber seiner tatsächlichen Lage verschoben, oder es entstehen sogar neue Impulse [1].

213 Pulscodemodulation PCM

Noch günstiger als die Pulspositionsmodulation präsentiert sich die Pulscodemodulation (PCM), da sie gegenüber Verzerrungen und Störungen besonders unempfindlich ist. Die Pulscodemodulation beruht darauf, dass die Amplitudenwerte der «Analogquellen» zyklisch abgefragt und in genügend feine Stufen unterteilt werden (Fig. 3). Dabei ist jede Stufe durch eine binäre Zahlenfolge gekennzeichnet, die gewissermaßen den «Namen» der Stufe darstellt. Auf der Übertragungsstrecke werden folglich diese binären Zahlenfolgen übermittelt. Empfangsseitig wird jeder eintreffenden Zahlenfolge der entsprechende Amplitudenwert zugewiesen und durch Interpolation das ursprüngliche Analogsignal zurückgewonnen. Ein periodisch übertragenes Synchronisationszeichen erlaubt zudem ein zyklisch richtiges Zuordnen der Zahlenfolge zu den entsprechenden Empfangsstellen. Bedeutsam ist die Tatsache, dass bei der PCM-Übertragung ein Leitungssignal genügender Grösse jederzeit genau regeneriert werden kann, dies sowohl in der Amplitude als auch in der Phase.

Bei der Signalregeneration in PCM-Systemen übernimmt wiederum eine Schwellenuntersuchung die wichtige Funktion, zu entscheiden, ob empfangene Lichtimpulse als logische «Eins» oder «Nullen» zu werten sind (Fig. 4). Im Zeitpunkt $t = 0$ erfasst die Schwellenschaltung den Spitzenwert des Impulses \dot{U} und bildet daraus das Entscheidungskriterium im Punkt P. Hier wird festgestellt, ob die eintreffenden Spannungswerte grösser oder kleiner als P sind. Deutlich wird erkennbar, dass bei diesem Entscheidungsvorgang so lange keine

réside dans le fait qu'on retrouve, dans le cas de la modulation d'amplitude, des courants et des tensions de grandeur proportionnelle à la sortie, tandis que, dans la modulation d'intensité, on observe une modification proportionnelle de la puissance ou de l'intensité de la lumière. L'avantage de ce genre de modulation, dans les systèmes optiques, est le fait que la photodiode détectrice délivre également un signal de sortie proportionnel à l'intensité de la lumière incidente. De ce fait, il existe une relation linéaire entre le signal de commande de la source et le signal délivré par le détecteur. Vu que les diodes électroluminescentes possèdent des caractéristiques linéaires dans une gamme étendue, en ce qui concerne la relation entre le courant d'excitation et le signal optique délivré, on peut dire que les LED conviennent particulièrement bien pour la modulation d'intensité continue. A cet égard, les lasers à semi-conducteurs sont moins favorables, vu la relation beaucoup moins linéaire entre le courant d'injection et le signal optique délivré. Pour parer à cet inconvénient, il est ici nécessaire de recourir à des circuits régulateurs fort compliqués.

212 Modulation de position des impulsions PPM

Si l'on échantillonne périodiquement l'amplitude d'un signal analogique et si cette valeur d'échantillonnage constitue le critère temporel de déplacement de la nouvelle impulsion à former, il en résulte une modulation de position des impulsions (fig. 1). Le signal de ligne consiste en l'occurrence en un flux binaire des états «un» ou «zéro». Il s'agit ici d'un mode de transmission analogique, vu que l'information est transmise sous forme d'impulsions qui se modifient dans le temps (mode analogique). Il est possible de reconstituer en tout temps l'amplitude de telles impulsions, si elles ne sont pas trop fortement déformées. A l'opposé, il est impossible de régénérer un signal continu perturbé dans le cas de la modulation d'intensité (IM), parce que des signaux modifiés ne diffèrent en rien de signaux non modifiés. L'avantage essentiel de la modulation de posi-

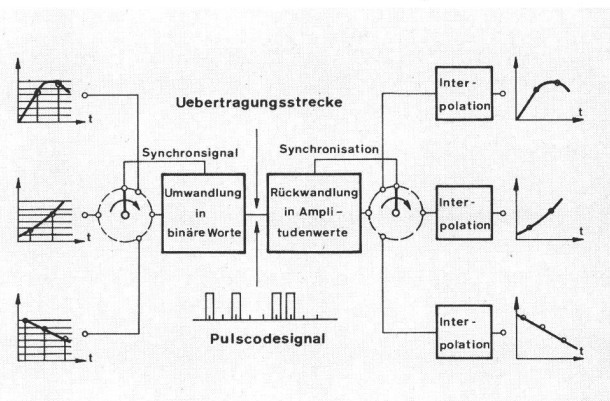


Fig. 3
Prinzip der Pulscodemodulation PCM — Principe de la modulation par impulsions et codage MIC
 Übertragungsstrecke — Trajet de transmission
 Synchronsignal — Signal de synchronisation
 Umwandlung in binäre Worte — Conversion en mots binaires
 Pulscodesignal — Signal d'impulsions codées
 Rückwandlung in Amplitudenwerte — Reconstitution des valeurs en amplitude

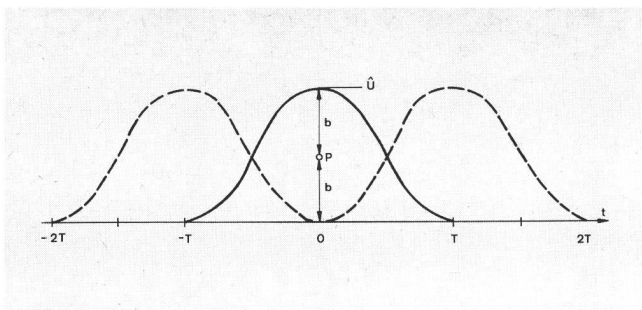


Fig. 4
Entscheidungskriterium bei Pulsmodulation — Critère de décision dans le cas de la modulation par impulsions

Schwierigkeiten auftreten, als die Abstände b gegenüber auftretenden Störsignalen genügend gross sind.

Wird die Impulsdarstellung durch die vorangehenden und die nachfolgenden Impulse erweitert, entsteht das sogenannte Augendiagramm, das die gegenseitige Impulsbeeinflussung veranschaulicht. Sollen Nachbarimpulse den Entscheidungspunkt P nicht stören, müssen diese zum Zeitpunkt $t = 0$ nach Möglichkeit verschwunden sein.

Die auch bei der fiberoptischen Übertragung in Erscheinung tretende Impulsaufweitung kann hier eine störende Überlappung bewirken. Weitere Fehlentscheidungen können entstehen, wenn auf der Übertragungsstrecke Impulsverformungen entstehen oder wenn sich im Empfänger Störungen dem Signal überlagern.

3 Komponenten für die fiberoptische Übertragung und deren Eigenschaften

31 Senderelemente

Als Lichtsender für Glasfaserstrecken sind heute GaAs-Halbleiter von Bedeutung, wie lichtemittierende Dioden LED und Laserdioden LD. Diese Komponenten weisen die Eigenschaft auf, elektrische Energie in optische Strahlung umzuwandeln. Die Forderungen, die für nachrichtentechnische Zwecke gestellt werden, lassen sich wie folgt umschreiben:

- die Emissionswellenlänge der Strahler sollte im Gebiet der minimalen Absorption der Lichtleitfasern liegen
- die Lichtquellen sollten bis zu hohen Frequenzen leicht modulierbar sein
- Lichtquellen sollten eine grosse Strahlungsdichte aufweisen und eine gute geometrische Anpassung an den Lichtleiter ermöglichen
- der Wirkungsgrad der eingespeisten elektrischen Leistung zur abgestrahlten optischen Leistung sollte möglichst hoch sein

311 Lichtemittierende Diode LED

Wird eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung betrieben, reichert sich die Sperrschicht mit Elektronen und Löchern an. Diese beiden Ladungsträgerarten rekombinieren miteinander, wobei energetisch betrachtet bei jeder Rekombination ein Elektron aus dem Leitungsband ins Valenzband übergeht. Bei diesem spontanen Vorgang wird ein Energiebetrag freigesetzt, der der Ener-

tion des Impulsens réside donc dans le fait qu'il est facile de reconstituer l'amplitude des signaux, contrairement à ce qui est le cas dans la modulation d'intensité. Un inconvénient est, en revanche, la sensibilité aux perturbations de la modulation de position des impulsions, perturbations qui peuvent par exemple être dues au «bruit» (fig. 2). Les courants dus au bruit i_r se superposent au signal utile i_p et engendrent un déphasage Δt dans le récepteur. Le détecteur de niveau des impulsions qui se trouve dans tout récepteur complet détermine si les signaux reçus sont des états logiques «un» ou «zéro». Si un signal dû au bruit se superpose au signal utile, l'impulsion paraît décalée par rapport à sa longueur effective et il peut même en résulter de nouvelles impulsions [1].

213 Modulation par impulsions et codage MIC

La modulation par impulsions et codage est encore plus favorable que la modulation de position des impulsions, vu qu'elle est particulièrement insensible aux distorsions et aux perturbations. Dans ce type de modulation, on échantillonne périodiquement les valeurs de l'amplitude de la «source analogique», que l'on répartit en une trame suffisamment fine (fig. 3). Chaque trame consiste en une succession d'éléments binaires qui la caractérise. Ce train binaire est alors envoyé sur le trajet de transmission. Côté réception, on attribue la valeur d'amplitude qui correspond à la succession d'éléments binaires et par interpolation on reconstitue le signal analogique d'origine. Un mot de synchronisation transmis périodiquement permet l'affectation cyclique correcte des successions d'éléments du côté réception. L'un des avantages essentiels des transmissions MIC réside dans le fait qu'un signal de ligne suffisamment puissant peut être en tout temps régénéré, tant en amplitude qu'en phase.

Dans les systèmes MIC, c'est à nouveau un détecteur de niveau qui assure la fonction importante de décider si les impulsions lumineuses reçues correspondent à un état logique «un» ou «zéro» (fig. 4). A l'instant $t = 0$, le détecteur de niveau interprète la valeur de crête de l'impulsion \hat{U} et en forme le critère de décision au point P . Il est alors examiné si les valeurs de tension sont plus grandes ou plus petites que P . On s'aperçoit sans peine que ce processus de décision ne soulève aucun problème aussi longtemps que les écarts b sont suffisamment grands par rapport aux signaux perturbateurs.

Lorsque la représentation des impulsions est élargie par la superposition des impulsions précédentes et subséquentes, on obtient le diagramme de l'œil, qui illustre l'état résultant des influences réciproques des impulsions. Si les impulsions adjacentes ne doivent pas perturber le point de décision P , il faut qu'elles aient autant que possible disparu à l'instant $t = 0$.

L'élargissement des impulsions que l'on observe dans les transmissions par fibres optiques peut conduire à un chevauchement gênant. D'autres décisions erronées peuvent se produire en cas de déformation des impulsions sur le trajet de transmission ou lorsque des perturbations se superposent au signal dans le récepteur.

giedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband entspricht. Die dabei freigewordene Energie kann sich je nach den gegebenen Voraussetzungen in Strahlungsenergie (Photonen) oder in Wärme (Gitterschwingung des Kristalls) umwandeln. LED nutzen zur Lichterzeugung die strahlende Rekombination aus. Strahlungserscheinungen dieser Art nennt man auch Injektionslumineszenz, da sie durch Injektion von Ladungsträgern in einer Sperrschicht hervorgerufen werden.

Wird beispielsweise Gallium-Arsenid (GaAs) als Halbleitermaterial verwendet, lässt sich aus der Breite des verbotenen Bandes $\Delta W = 1,38 \text{ eV}$ und unter Verwendung der Gleichung (1) [Plancksche Beziehung] die Wellenlänge λ bestimmen

$$\lambda = \frac{c_0 \cdot h}{W_{\text{Ph}}} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ m Ws}^2}{1,38 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ s Ws}} = 898 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad (1)$$

mit $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (annähernd in der Atmosphäre)

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ Plancksche Konstante
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$ (Umrechnung in SI-Einheiten)

Diese Strahlung liegt mit 898 nm Wellenlänge im Infrarotbereich und ist daher für das menschliche Auge nicht sichtbar. Von Bedeutung für optische Systeme ist jedoch, dass die im Empfänger als optoelektronischer Wandler verwendeten Photodioden besonders in diesem Wellenbereich empfindlich sind.

Das abgestrahlte Licht von LED wird als sogenannte «inkohärente Strahlung» bezeichnet, da ihm folgende charakteristischen Merkmale eigen sind:

- die spektrale Verteilung des Lichtes hat die ungefähre Form einer Gausskurve (Fig. 5), wobei für GaAs zwischen den 1/e-Punkten Spektralbreiten von 20...40 nm üblich sind (im Vergleich dazu beträgt der Wert für kohärente Laserdiodenstrahlung: $\Delta\lambda = 1...3 \text{ nm}$)
- es besteht keine feste Phasenbeziehung zwischen räumlich auseinanderliegenden Punkten einer Lichtwellenfront (keine räumliche Kohärenz)
- auch besteht keine starre Phasenbeziehung zwischen zeitlich (also längs der Ausbreitungsrichtung) ver-

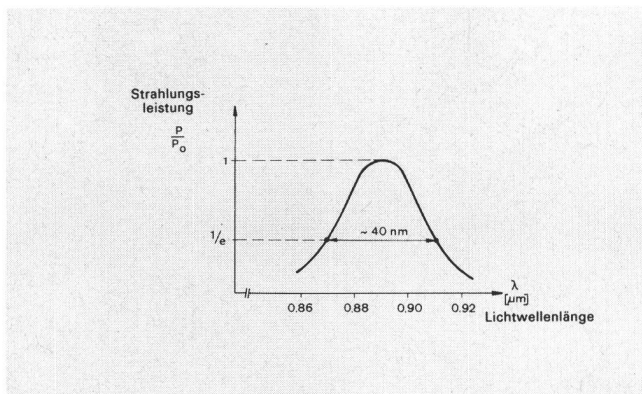


Fig. 5
Spektralcharakteristik einer LED – Caractéristique spectrale d’une diode LED
 Strahlungsleistung – Puissance rayonnée
 Lichtwellenlänge – Longueur d’onde de la lumière

3 Composants électroniques dans les transmissions par fibres optiques et leurs propriétés

31 Sources

Les sources les plus importantes dans le domaine des transmissions par fibres optiques sont aujourd’hui les semi-conducteurs GaAs, les diodes électroluminescentes LED et les diodes laser LD. Ces composants ont la propriété de convertir l’énergie électrique en rayonnement optique. Lorsqu’ils sont utilisés dans le domaine des télécommunications, ces composants doivent répondre aux exigences suivantes:

- la longueur d’onde d’émission des sources devrait se situer dans la gamme de l’absorption minimale de la fibre optique
- la modulation des sources lumineuses jusqu’aux fréquences les plus élevées devrait être facile à réaliser
- la densité de rayonnement des sources devrait être élevée et il devrait être facile de les adapter géométriquement au guide d’onde lumineuse
- le rapport entre la puissance électrique injectée et la puissance optique rayonnée devrait être aussi grand que possible

311 Diodes électroluminescentes LED

Si une diode semi-conductrice fonctionne en sens direct, la couche d’arrêt s’enrichit en électrons et en trous. Ces deux genres de porteurs de charge se recombinent mutuellement, ce qui, du point de vue énergétique, équivaut pour chaque recombinaison au passage d’un électron de la bande de conduction à la bande de valence. Ce processus spontané libère une certaine quantité d’énergie, qui correspond à la différence d’énergie entre la bande de conduction et la bande de valence. Suivant les conditions, cette énergie libérée peut se manifester sous forme de rayonnement (photons) ou de chaleur (agitation thermique du réseau cristallin). Dans les LED, la lumière est produite par la recombinaison radiative. De tels phénomènes de rayonnement sont aussi appelés luminescence par injection, vu qu’ils sont produits par l’injection de porteurs de charge dans une couche d’arrêt.

Si l’on utilise, par exemple, l’arséniure de gallium (GaAs) en tant que matériau semi-conducteur, on peut déterminer la longueur d’onde λ , en partant de la largeur de la bande interdite $\Delta W = 1,38 \text{ eV}$ et l’équation (1) [relation de Planck]

$$\lambda = \frac{c_0 \cdot h}{W_{\text{Ph}}} = \frac{2,998 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ m Ws}^2}{1,38 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ s Ws}} = 898 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad (1)$$

où

$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Vitesse de la lumière dans le vide
 (valeur approchée dans l’atmosphère)

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ Constante de Planck
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$ (Conversion en unités SI)

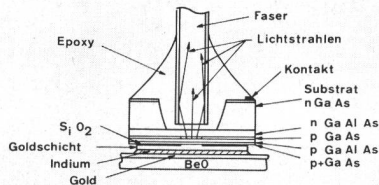


Fig. 6
Doppelhetero-LED mit Faserankopplung (Burrus-Typ) — LED à double hétérostructure couplée à une fibre (type Burrus)
 Epoxy — Résine époxyde
 Goldschicht — Couche d'or
 Gold — Or
 Faser — Fibre
 Lichtstrahlen — Rayons lumineux
 Kontakt — Contact

schobenen Teilen eines Lichtwellenzuges (keine zeitliche Kohärenz)
 – die Energie wird in einen verhältnismässig grossen Raumwinkel abgestrahlt (geringe Richtwirkung)

Sollen LED in optischen Übertragungssystemen wirkungsvoll eingesetzt werden, muss ein vertretbarer Wirkungsgrad zwischen eingespielter elektrischer Leistung und abgestrahlter optischer Leistung erreicht werden. Obwohl GaAs-LED einen inneren Wirkungsgrad von nahezu 100 % aufweisen, kann nur ein Bruchteil (typisch 2...4 %) der erzeugten Strahlungsquanten den Kristall verlassen. Die Ursachen liegen in der inneren Totalreflexion und Absorption. Um in nachrichtentechnischen Anwendungen befriedigende Wirkungsgrade zu erzielen, werden vielfach die PN-Übergänge als Doppelheterostrukturen DHS ausgebildet. *Figur 6* zeigt den Aufbau einer solchen «Leistungs-LED». Ein günstiger Kopplungswirkungsgrad wird bei dieser «Burrus-Typ» genannten Diode dadurch erreicht, dass die Faser direkt auf die LED gekittet wird.

Wie die Kennlinie in *Figur 7* zeigt, nimmt die optische Leistung vom Ursprung über einen weiten Bereich linear mit dem injizierten Diodenstrom zu. Ausserhalb dieses Bereichs flacht die Kurve infolge thermischer Sättigung ab. Damit sind die Schranken der grösstmöglichen Abstrahlleistung gegeben. Als typischer Grenzwert gilt im heutigen Zeitpunkt eine Lichtleistung von 3...5 mW im Dauerbetrieb.

LED, eingesetzt in optischen Übertragungsstrecken hoher Bitraten, müssen kurze Schaltzeiten aufweisen, damit die Steuerung des Signalstromes möglichst verzögerungsarm stattfinden kann (*Fig. 8*). Die Schaltzeit t_s ist dabei weitgehend von der Strahlungslebensdauer der injizierten Elektronen abhängig, die sich in der Grössenordnung von 1...10 ns bewegt. Wie Gleichung (2) zeigt, ist dadurch eine verzerrungsarme Modulation bis zu einer Grenzfrequenz f_g von ungefähr 100 MHz möglich

$$f_g \leq \frac{1}{2\pi \cdot t_s} \quad (2)$$

Bei Impulsmodulation von LED ist weiter zu berücksichtigen, dass eine Impulsverzögerung t_v zwischen dem

Compte tenu de sa longueur d'onde de 898 nm, ce rayonnement se situe dans la gamme de l'infrarouge et il est de ce fait invisible à l'œil humain. Il importe cependant de relever que, dans les systèmes optiques, les photodiodes utilisées comme convertisseurs optoélectroniques dans les récepteurs sont particulièrement sensibles à cette gamme d'ondes.

La lumière émise par les diodes électroluminescentes est appelée «rayonnement incohérent», vu qu'elle possède les caractéristiques suivantes:

- la répartition spectrale de la lumière épouse environ la forme d'une courbe de Gauss (*fig. 5*), étant entendu que, pour les diodes GaAs, des largeurs spectrales de 20...40 nm sont usuelles entre les points 1/e (comparé à cela, le rayonnement cohérent des diodes laser est de: $\Delta\lambda = 1...3$ nm)
- il n'existe pas de relation de phase fixe entre des points espacés dans l'espace d'un front d'ondes lumineuses (aucune cohérence spatiale)
- il n'existe pas non plus de relation de phase rigide entre les parties d'un train d'ondes lumineuses (c'est-à-dire le long de l'axe de propagation); il n'y a pas de cohérence temporelle
- l'angle solide de rayonnement de l'énergie est relativement grand (faible effet directif)

Un rendement efficace des diodes LED dans les systèmes de transmission optique suppose un rapport raisonnable entre l'énergie électrique injectée et l'énergie optique rayonnée. Bien que les diodes GaAs atteignent un rendement interne d'environ 100 %, seule une fraction des quantas rayonnés peuvent quitter le cristal (valeur typique 2...4 %). Les raisons en résident dans la réflexion et l'absorption interne totales. Pour atteindre le rendement satisfaisant indispensable aux applications spécifiques des télécommunications, on donne souvent aux jonctions PN la configuration d'une double hétérostructure DHS. La *figure 6* montre la composition d'une telle «LED de puissance». Un rendement de couplage favorable est obtenu dans cette diode appelée «type Burrus» par le fait que la fibre est directement collée à la diode.

Comme le montre la courbe caractéristique de la *figure 7*, la puissance optique augmente linéairement dès l'origine sur une large plage en fonction du courant injecté dans la diode. A l'extérieur de cette plage, la courbe s'aplatit en raison de la saturation thermique. Le

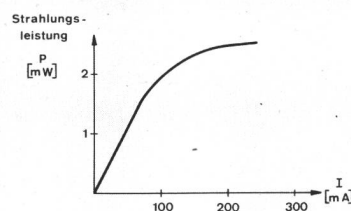
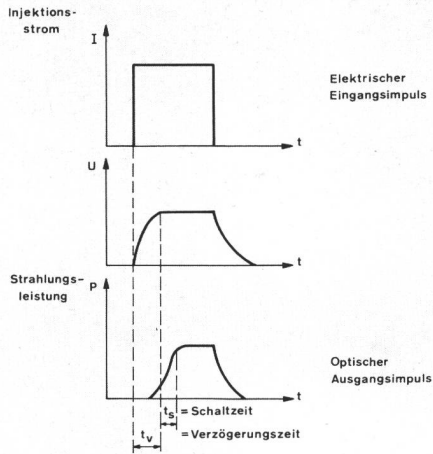


Fig. 7
LED-Strahlungsleistung in Funktion des Injektionsstromes — Puissance rayonnée par une LED en fonction du courant injecté
 Strahlungsleistung — Puissance rayonnée



angelegten elektrischen Stromimpuls und dem abgestrahlten Lichtimpuls auftritt (Fig. 8). Eine Erklärung dieses Verzögerungsvorganges liefert das elektrische Ersatzschema einer LED in Fig. 9. Idealisiert man für eine vereinfachte Betrachtungsweise vorerst die parasitäre Kapazität C_p und die Induktivität L_p , so wird ersichtlich, dass beim Einschalten die strahlungswirksame Spannung U vorerst über der parallel liegenden Kapazität C_D aufgebaut werden muss. Durch Einprägen eines Vorspannstromes gelingt es, diesen Verzögerungseffekt zu reduzieren.

Bei Lumineszenzdiode nimmt die emittierende Strahlungsleistung mit zunehmender Betriebsdauer ab (Alterung). Um die Grösse dieser Degradation zu beschreiben, wurde der Begriff der Lebensdauer eingeführt. Die Lebensdauer wird definiert als die Zeit, nach der die Strahlungsleistung auf die Hälfte abgeklungen ist. Für LED kann als gesicherter Wert eine Lebensdauer von 10^5 Stunden bei vorgegebenem Dauerdurchlassstrom und bei Zimmertemperatur in Rechnung gesetzt werden.

312 Laserdiode LD

Die Laserdiode (LD) unterscheidet sich von der lichtemittierenden Diode (LED) in Aufbau und Betriebsverhalten.

Beim Aufbau einer epitaktisch hergestellten Laserdiode sind eine flache Sperrschicht und zwei an den Kristallseiten gegenüberliegende Abstrahlflächen kennzeichnend. Fig. 10 zeigt einen im nachrichtentechnischen Bereich oft verwendeten Doppelheterokantenemitter, der sich durch hohe Strahlungsdichte und für Faserkopplung geeignete Geometrie auszeichnet.

Im Betrieb können zwei Strahlungsarten unterschieden werden (Fig. 11): Unter einem bestimmten Schwellstrom I_s arbeitet die Laserdiode gleich wie eine LED; oberhalb dieser Schwelle tritt jedoch stimulierte Emission auf, das heisst, es wird kohärente Strahlung mit wesentlich höheren Leistungswerten abgegeben. In Fi-

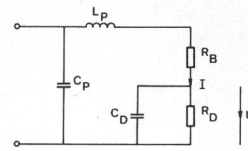


Fig. 9 Ersatzschema einer LED — Schéma équivalent d'une LED

Fig. 8 Schaltverzögerung einer LED — Temporisation de commutation d'une LED

Injektionsstrom — Courant injecté
Strahlungsleistung — Puissance rayonnée
Schaltzeit — Temps de commutation
Verzögerungszeit — Temporisation
Optischer Ausgangsimpuls — Impulsion optique à la sortie
Elektrischer Eingangsimpuls — Impulsion électrique à l'entrée

phänomène limite la puissance de rayonnement maximale. A l'heure actuelle, on situe la valeur limite typique de la puissance lumineuse à 3...5 mW en régime permanent.

Les diodes LED utilisées dans les trajets de transmissions optiques à haut débit binaire doivent posséder des temps de commutation très brefs, afin que la commande du courant du signal soit aussi exempte que possible de temporisation (fig. 8). Le temps de commutation t_s dépend, dans une large mesure, de la durée de vie du rayonnement des électrons injectés, durée qui se situe entre 1...10 ns. L'équation (2) montre qu'une modulation pauvre en distorsions est ainsi possible jusqu'à une fréquence limite f_g d'environ 100 MHz:

$$f_g \leq \frac{1}{2 \pi \cdot t_s} \quad (2)$$

Lorsqu'on module les LED par des impulsions, il faut en plus tenir compte du fait de la temporisation des impulsions t_v entre l'impulsion de courant électrique appliquée et l'impulsion lumineuse émise (fig. 8). Le schéma équivalent électrique d'une LED explique ce phénomène (fig. 9). Si, pour simplifier les explications, on idéalise la capacité parasite C_p et l'inductance L_p , on voit que la

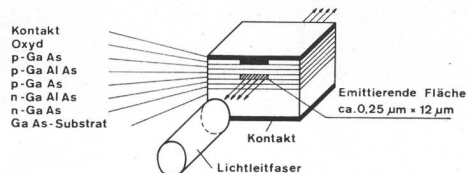


Fig. 10 Doppelhetero-Laser in Streifengeometrie — Laser à double hétéro-structure en géométrie stratifiée

Kontakt — Contact
Oxyd — Oxyde
Lichtleitfaser — Fibre optique
Emittierende Fläche — Surface émettrice

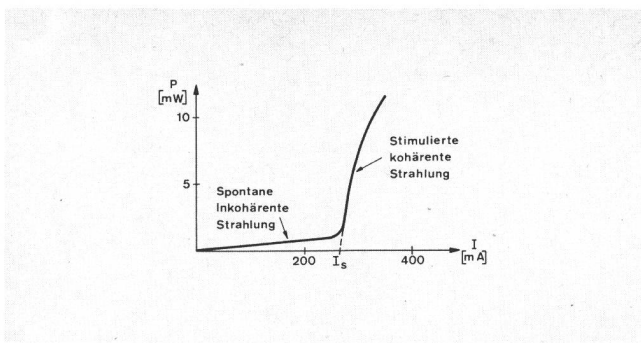


Fig. 11
Laser-Strahlungsleistung in Funktion des Stromes — Puissance rayonnée par un laser en fonction du courant
 Spontane inkohärente Strahlung — Rayonnement incohérent spontané
 Stimulierte kohärente Strahlung — Rayonnement cohérent stimulé

Fig. 12 sind die Abstrahlverhältnisse wiedergegeben. Planparallel zur Sperrschicht wird ein Öffnungswinkel von ungefähr $\pm 3^\circ$ und vertikal dazu ein solcher von $\pm 30^\circ$ beobachtet.

Wenn eine Anregung nur in einer Eigenschwingung vorliegt, ist die spektrale Verteilung der emittierten Strahlung sehr schmal (Fig. 13a). Praktisch werden jedoch mehrere Eigenschwingungen angeregt, die von der Linienbreite und der Materialdichte — des als optischen Resonator wirkenden Laserkristalls — abhängen (Fig. 13b). Trotzdem ist die Halbleiterlaserstrahlung noch schmalbandig im Vergleich zu einer LED-Strahlung (Fig. 5).

Von der Betriebsart aus betrachtet, unterscheidet man Laserdioden, die bei Raumtemperatur nur gepulst betrieben werden dürfen, und solche, die im Dauerstrichbetrieb (CW-Betrieb = continuous wave) arbeiten. Als Richtwert einer dauernd abgestrahlten optischen Leistung gilt gegenwärtig 10 mW.

Da Laserdioden einerseits eine höhere Ausgangsleistung abgeben als LED und andererseits in einem engeren Winkelbereich strahlen, kommt es, dass mit Laserdioden ungefähr 10...20 dB mehr optische Leistung in eine Lichtleitfaser eingekoppelt werden kann als mit LED. Im Gegensatz dazu erfordern Halbleiterlaser einen restrikti-

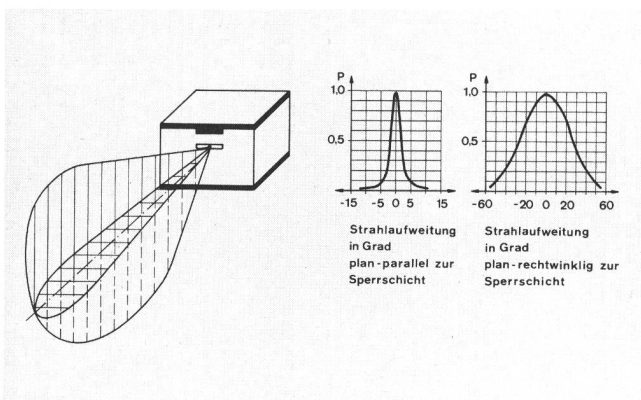


Fig. 12
Abstrahlverhältnisse bei Laserdioden — Caractéristiques du rayonnement d'une diode laser
 Strahlaufweitung in Grad plan-parallel zur Sperrschicht — Elargissement du faisceau en degrés dans un plan parallèle à la couche d'arrêt
 Strahlaufweitung in Grad plan-rechtwinklig zur Sperrschicht — Elargissement du faisceau en degrés dans un plan perpendiculaire à la couche d'arrêt

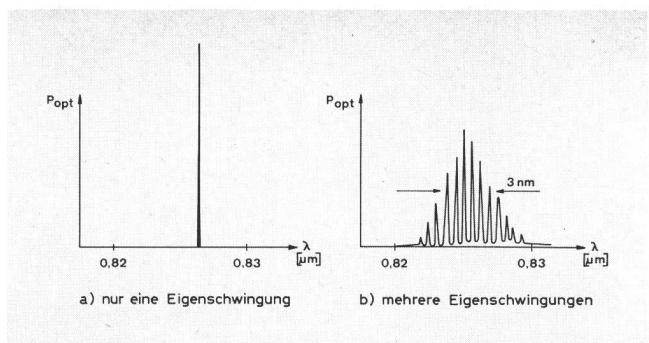


Fig. 13
Spektrale Verteilung von Laserdiodenstrahlungen — Répartition spectrale du rayonnement d'une diode laser
 a) Nur eine Eigenschwingung — Une oscillation propre
 b) Mehrere Eigenschwingungen — Plusieurs oscillations propres

tension U qui produit le rayonnement doit d'abord, lors de l'enclenchement, s'établir aux bornes du condensateur C_D monté en parallèle. Cet effet de temporisation peut être réduit par injection d'un courant de polarisation.

La puissance rayonnée émise par les diodes électroluminescentes diminue en fonction des heures d'exploitation (vieillessement). Pour définir cette dégradation, on a recouru à la notion de durée de vie. Par durée de vie, on entend la durée après laquelle la puissance de rayonnement a baissé de 50 %. Pour les LED, une durée de vie certaine de 10^5 heures en régime permanent peut être admise, en tant que la valeur prescrite du courant direct est respectée et que les éléments sont exploités à une température ambiante normale.

312 Diodes laser LD

La diode laser (LD) diffère de la diode électroluminescente (LED), tant par sa structure que par son comportement.

La configuration d'une diode laser fabriquée selon le procédé épitaxial est caractérisée par une couche d'arrêt plate et deux surfaces de rayonnement de part et d'autre du cristal. La figure 10 montre un laser à double hétérostructure en géométrie stratifiée fréquemment utilisé dans le domaine des télécommunications, vu que sa haute densité de rayonnement et sa géométrie conviennent particulièrement bien pour le couplage aux fibres optiques.

On distingue deux genres de rayonnement (fig. 11): au-dessous d'un courant de seuil déterminé I_s , la diode laser fonctionne comme une diode LED; au-dessus de ce seuil, l'émission est toutefois stimulée, ce qui signifie qu'un rayonnement cohérent est émis, dont la puissance est sensiblement plus élevée. La figure 12 illustre les conditions de rayonnement. L'angle d'ouverture sur le plan horizontal de la couche d'arrêt est d'environ $\pm 3^\circ$ et de $\pm 30^\circ$ dans le plan vertical.

Lorsque l'excitation ne se fait que par une oscillation propre, la répartition spectrale du rayonnement émis est très étroite (fig. 13a). En pratique, cependant, plusieurs oscillations propres sont excitées, qui dépendent de la largeur des lignes spectrales et de la densité de matériau du cristal laser utilisé en tant que résonateur optique (fig. 13b). Malgré cela, le rayonnement du laser

veren Strombetrieb als LED, weil der Schwellstrom in Abhängigkeit der Temperatur und Alterung (Fig. 14) ändert. Regelungen und Kompensationsschaltungen sind hier nötig. Lasertreiberschaltungen müssen geringe dynamische Ausgangsimpedanzen aufweisen und zudem garantieren, dass weder der Strommittelwert noch der Spitzenstrom überschritten wird, da sonst die Laserdiode Schaden nimmt.

Wird eine Laserdiode mit einem Rechteckimpuls angesteuert, ist ein Einschwingen zu beobachten, wie dies in Figur 15 wiedergegeben ist. Dieser Einschwingvorgang beruht auf der Wechselwirkung zwischen den elektrischen Ladungsträgern und der Lichtwelle im Diodenkristall. Das emittierte Lichtsignal bildet dabei eine Überlagerung eines Rechteckimpulses mit einer gedämpften Schwingung [2]. Die Frequenz dieser Schwingung liegt zwischen 200 MHz und 2 GHz und ist ebenso wie die Dämpfungskonstante vom Steuerstrom abhängig. Bei schneller Impulsmodulation (>100 Mbit/s), wo die Impulsdauer in den Bereich dieser Einschwingdauer gelangt, können dadurch Beeinträchtigungen auftreten. Mit geeigneten Gegenmassnahmen, wie Einspeisen eines konstanten Vorstromes, gelingt es jedoch, dieses Einschwingverhalten stark zu vermindern.

Ein weiterer Effekt wird beobachtet, wenn eine Laserdiode mit einem Impulszug hoher Bitrate angesteuert wird. Wie Figur 16 zeigt, kann ein beträchtlicher Unterschied zwischen dem Muster des Steuersignals und dem des Lichtimpulses entstehen. Dieser sogenannte Bit-Pattern-Effekt tritt dann in Erscheinung, wenn die Impulsabstandszeiten Werte annehmen, die etwa der spontanen Lebensdauer der elektrischen Ladungsträger im Laserkristall entsprechen. In diesem Fall findet jeder neue Impuls eine Restladungsdichte vor, die vom vorausgegangenen Impuls herrührt. Die Amplitude des neuen Lichtimpulses wird dadurch von seiner jeweiligen «Vorgeschichte» abhängig.

Intensiv wurden in letzter Zeit die Probleme der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit angegangen. Als vorläufiges Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit Laserdioden CW-Betriebszeiten von über 10 000 Stunden registriert wurden. Dabei wurden Degradationen der optischen Leistung von 1...5 % je 1000 Stunden festgestellt. Die ständigen Verbesserungen zeigen, dass durch sehr sorgfältige Materialwahl und Verarbeitungsprozesse künftig weitere Fortschritte zu erwarten sind.

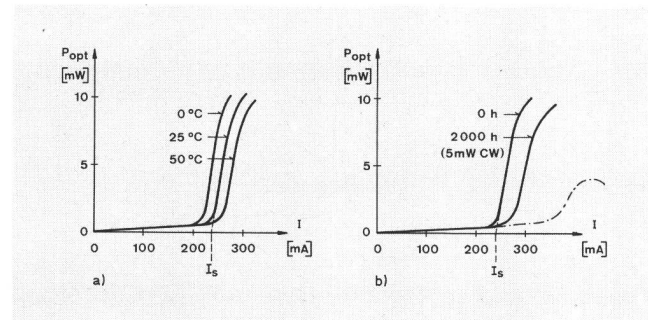


Fig. 14 Einfluss a) der Temperatur und b) der Alterung auf den Laserdioden-Schwellstrom — Influence a) de la température et b) du vieillissement sur le courant de seuil des diodes laser

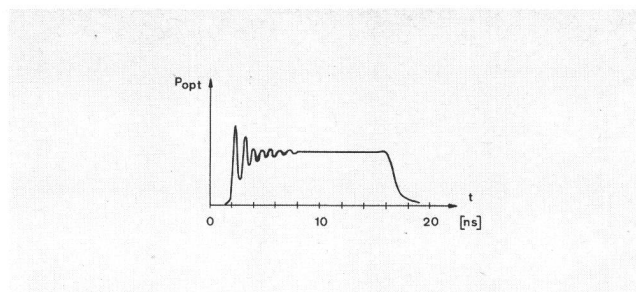


Fig. 15 Einschwingverhalten bei Laserdioden — Comportement à l'amorçage des diodes laser

semi-conducteur est d'une grande étroitesse de bande par rapport au rayonnement de la diode LED (fig. 5).

Du point de vue de l'exploitation, on différencie les diodes laser modulées par impulsions à la température ambiante de celles qui travaillent en régime continu (régime CW = continuous wave). Une valeur indicative d'une puissance optique rayonnée en continu est actuellement 10 mW.

Vu que les diodes laser possèdent une puissance de sortie plus élevée que les LED et que leur angle de rayonnement est plus étroit, on parvient à coupler dans une fibre optique une puissance optique de 10...20 dB supérieure avec une diode laser qu'avec une diode LED. En revanche, les lasers à semi-conducteurs exigent une exploitation en courant plus restrictive que les LED, étant donné que le courant de seuil se modifie en fonction de la température et du vieillissement (fig. 14). Il est alors nécessaire d'utiliser des circuits régulateurs et compensateurs. Les circuits d'excitation des lasers doivent posséder une faible impédance de sortie dynamique et garantir que ni la valeur moyenne du courant ni le courant de crête ne soient dépassés, ce qui détériorerait la diode laser.

Si l'on commande une diode laser par des impulsions rectangulaires, on observe une oscillation transitoire, comme le montre la figure 15. Ce phénomène d'amorçage est dû à l'effet alterné des porteurs de charge électriques et de l'onde lumineuse dans le cristal de la diode. Le signal lumineux émis est une superposition d'une impulsion rectangulaire et d'une oscillation amortie [2]. La fréquence de cette oscillation se situe entre 200 MHz et 2 GHz et dépend, comme la constante d'affaiblissement, du courant de commande. Dans le cas

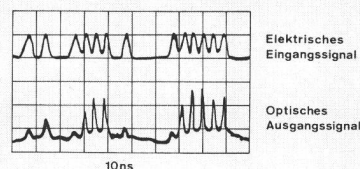


Fig. 16 Bit-Pattern-Effekt — Effet «bit pattern» Elektrisches Eingangssignal — Signal électrique à l'entrée Optisches Ausgangssignal — Signal optique à la sortie

32 Empfängerelemente

Photodetektoren, die als Empfangselemente in fiberoptischen Übertragungssystemen eingesetzt werden, müssen gewissen Forderungen bezüglich ihrer Betriebseigenschaften und ihrer Anpassfähigkeit an das System genügen. Die wichtigsten Erfordernisse sind:

- hohe Empfindlichkeit bei der Emissionswellenlänge der Strahlungsquelle
- minimales zusätzliches Rauschen, hervorgerufen durch das Detektorelement selbst
- genügend grosse Bandbreite beziehungsweise hohe Ansprechgeschwindigkeit
- geringe Beeinträchtigung der Eigenschaften durch Temperatureinwirkung und Alterung

Weitere wichtige Forderungen sind kleine geometrische Abmessungen sowie eine gute Kopplungsmöglichkeit an Lichtleitfaser und Elektronik.

Grundsätzlich bieten sich als Empfangselemente sowohl Vakuumphotodioden, wie Photomultiplieröhren, als auch Halbleiterphotoempfänger an. Nur Halbleiterphotoempfänger erfüllen jedoch die Forderung der kleinen Abmessungen und der verhältnismässig einfachen Kopplungs- und Speisemöglichkeiten. Dies ist auch der Grund, weshalb in fiberoptischen Übertragungssystemen fast ausschliesslich Halbleiterphotoempfänger verwendet werden.

Das Verarbeiten kurzer Schaltzeiten schliesst weiterhin den Einsatz der verhältnismässig langsamen Phototransistoren aus, da deren Grenzfrequenz nur bei einigen 100 kHz liegt.

Als geeignete Bauelemente für Datenübertragungssysteme mittlerer und hoher Bitraten verbleiben die PIN-Photodioden und die Photoavalanchedioden, die beide den inneren lichtelektrischen Effekt ausnützen. Betrieben werden Photodioden mit einer in Sperr-Richtung gepolten Vorspannung. Ohne Bestrahlung fliesst durch das Halbleiterelement ein kleiner Sperrstrom, der sogenannte Dunkelstrom. Mit Siliziummaterial hergestellte Photodioden werden vorwiegend bei Lichtwellenlängen zwischen 700 nm und 950 nm eingesetzt, da sie besonders in diesem Bereich empfindlich sind.

321 PIN-Photodioden

PIN-Photodioden unterscheiden sich technologisch von gewöhnlichen PN-Photodioden dadurch, dass zwischen dem n-leitenden Substrat und der p-leitenden Zone eine hochohmige, eigenleitende i-Schicht aufgebaut ist (i steht dabei für intrinsic = wirklich reines Silizium). *Figur 17* zeigt den Aufbau einer planaren PIN-Photodiode. Mit dieser Zwischenschicht wird eine grössere Raumladungszone erreicht, die einerseits eine höhere Sperrspannung zulässt und andererseits eine kleinere Kapazität der Sperrschicht zur Folge hat. Höhere Sperrspannungen (also höheres elektrisches Feld) und geringere Sperrschichtkapazität sind Ursachen, weshalb PIN-Photodioden sehr kurze Schaltzeiten aufweisen. Trifft Licht auf die strahlungsempfindliche Oberfläche, wird ein Grossteil davon in der Raumladungszone absorbiert, und es entstehen aufgrund des inneren Photoeffektes

d'una modulation par impulsions plus rapide (> 100 Mbit/s), où la durée d'impulsion pénètre dans la plage de la durée d'amorçage, on peut observer une diminution du rendement. Il est cependant possible de réduire considérablement ce phénomène d'amorçage grâce à des contre-mesures appropriées, telles que l'injection d'un courant de polarisation constant.

Un autre effet apparaît encore lorsqu'une diode laser est excitée par un train d'impulsions d'un haut débit binaire. Comme le montre la *figure 16*, on peut observer une différence considérable entre la configuration du signal de commande et celle de l'impulsion lumineuse. Cet effet appelé «bit pattern», apparaît lorsque la durée des écarts entre les impulsions correspond environ à la durée de vie spontanée des porteurs de charge électrique. Dans ce cas, chaque nouvelle impulsion rencontre une charge résiduelle provenant de l'impulsion précédente. L'amplitude de la nouvelle impulsion lumineuse dépend de ce fait du phénomène impulsif qui vient de se produire.

On s'est beaucoup préoccupé ces derniers temps des problèmes touchant à la durée de vie et à la fiabilité de ces éléments. En tant que résultat provisoire, on peut noter que les diodes laser exploitées en régime continu ont atteint des durées de vie dépassant 10 000 heures. A ce propos, les dégradations des performances optiques n'ont pas dépassé 1...5 % après 1000 heures. Les améliorations constantes montrent que de nouveaux progrès seront sans doute encore réalisés, si l'on voue tout le soin voulu au choix des matériaux et des processus de traitement.

32 Détecteurs

Les photodétecteurs que l'on utilise comme éléments de récepteurs dans les systèmes de transmission par fibres optiques doivent répondre à certaines exigences. Les principaux critères quant aux propriétés d'exploitation et à l'adaptabilité au système sont les suivants:

- haute sensibilité à l'égard de la longueur d'onde d'émission de la source de rayonnement
- faible bruit intrinsèque additionnel
- largeur de bande suffisante et temps de réaction très bref
- faible altération des propriétés en raison des influences thermiques et du vieillissement

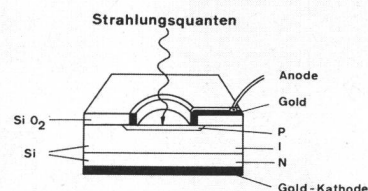


Fig. 17
Aufbau einer Silizium-PIN-Photodiode — Structure d'une photodiode PIN au silicium
Strahlungsquanten — Quantas incidents
Gold — Or
Goldkathode — Cathode en or

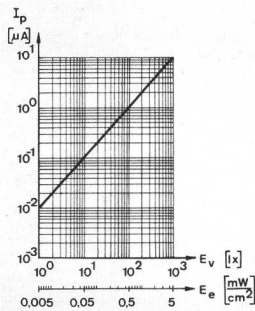


Fig. 18
 Photostrom einer PIN-Diode in Funktion der Beleuchtungsstärke E_v beziehungsweise der Bestrahlungsstärke E_e — Courant photoélectrique d'une diode PIN en fonction de l'intensité d'éclairement E_v et de l'intensité du rayonnement E_e dirigé sur elle

Elektronen-Loch-Paare, die im elektrischen Feld getrennt werden. Während sich diese Elektronen und Löcher unter der Krafteinwirkung des elektrischen Feldes in entgegengesetzter Richtung durch die Raumladungszone bewegen, fließt im Lastkreis der Diode ein Photostrom I_p . Dieser ändert sich linear mit der Beleuchtungsstärke E_v über einen sehr weiten Bereich von mehreren Zehnerpotenzen (Fig. 18). Das Verhältnis der durch Photonenanregung erzeugten Ladungsträger zur Gesamtzahl der mit dem Lichtstrahl auf die Photodiode einfallenden Photonen wird als Quantenausbeute oder Quantenwirkungsgrad η bezeichnet.

322 Photoavalanchediode

Photoavalanchedioden (PAD) sind Sperrschichtdetektoren, die den Empfang optischer Signale mit einer internen Verstärkung des Photostromes verbinden. Verglichen mit PIN-Dioden lassen sich mit Photoavalanchedioden 5...20 dB niedrigere Strahlungsleistungen nachweisen (Fig. 19). Der interne Verstärkungsvorgang findet statt, sobald die Ladungsträger beim Durchlaufen des elektrischen Feldes genügend Energie gewonnen haben, um durch Stossionisation neue Elektronen-Loch-Paare erzeugen zu können. Man spricht dabei vom Lawineneffekt. Diese Ladungsträgermultiplikation nimmt mit steigender Sperrspannung zu, bis es zum Durchbruch kommt. Mit zunehmender Sperrspannung beziehungsweise Ladungsträgermultiplikation nimmt nahe des Durchbruchs ($U_{Br} = 70...400$ V) auch das Rauschen der Photoavalanchediode zu, dies jedoch in überproportionalem Verhältnis. Betrieben werden Photoavalanchedioden daher einige Zehntel Volt unterhalb der Durchbruchspannung, wo eine günstige Ausnutzung der Signalverstärkung ($M = 50...300$) bei verhältnismässig geringem Rauschen erfolgt. Da ausserdem die Durchbruchspannung stark temperaturabhängig ist (Fig. 20), sind entsprechende Regelschaltungen unbedingt erforderlich. Das richtige Einstellen der Betriebsspannung stellt beim Bemessen einer Schaltung mit Photoavalanchedioden einen wichtigen Punkt dar, da diese Spannung hohen Konstanz- und Temperaturkompensationsanforderungen genügen muss.

Il est encore souhaitable que ces éléments soient aussi compacts que possible et qu'ils soient faciles à coupler aux fibres et aux dispositifs électroniques.

En principe, les éléments récepteurs peuvent être des photodiodes à vide, telles que les tubes photomultiplicateurs, mais aussi des photorécepteurs à semi-conducteurs. Seuls les photorécepteurs à semi-conducteurs satisfont aux exigences sur le plan de la compacité et de la simplicité de couplage et d'alimentation. C'est aussi la raison pour laquelle on utilise presque exclusivement des photorécepteurs à semi-conducteurs dans les systèmes de transmission par fibres optiques.

La nécessité de traiter des temps de commutation très brefs exclut par ailleurs l'utilisation des phototransistors relativement lents, dont la fréquence limite ne dépasse guère 100 kHz.

Des éléments qui conviennent bien au système de transmission de données à vitesses moyennes et élevées sont les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche, qui utilisent toutes deux un effet photoélectrique interne. Les photodiodes fonctionnent avec une tension de polarisation appliquée dans le sens indirect. Lorsqu'ils ne subissent aucun rayonnement, ces éléments semi-conducteurs sont parcourus par un faible courant de blocage, appelé courant d'obscurité. Les photodiodes fabriquées avec du silicium sont surtout employées dans les gammes de longueur d'ondes lumineuses allant de 700 nm à 950 nm, étant donné qu'elles sont particulièrement sensibles dans cette plage.

321 Photodiodes PIN

Du point de vue technologique, les photodiodes PIN se différencient des photodiodes PN ordinaires du fait qu'elles comprennent une couche à conduction intrinsèque i située entre le substrat à condition n et la zone conductrice p (i signifie ici intrinsèque = silicium de haute pureté). La figure 17 montre la structure d'une photodiode PIN en technique planaire. La couche inter-

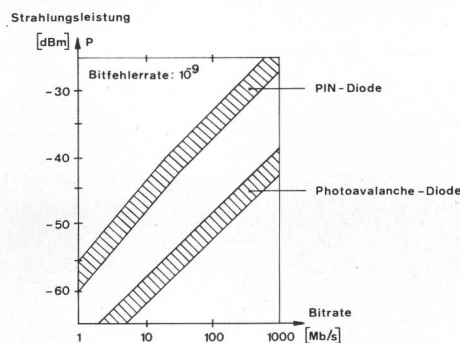


Fig. 19
 Empfindlichkeitsgrenzen optischer Empfänger in Funktion der Informationsrate — Limites de sensibilité des récepteurs optiques en fonction du débit binaire d'informations
 Strahlungsleistung — Puissance rayonnée
 Bitfehlerrate — Taux d'erreurs de bits
 PIN-Diode — Diode PIN
 Photoavalanche-Diode — Photodiode à avalanche
 Bitrate — Débit binaire

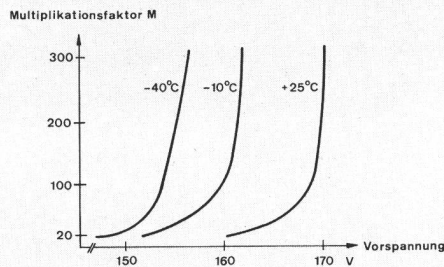


Fig. 20
Multiplikationsfaktor in Funktion der Vorspannung einer Photoavalanche-Diode bei verschiedenen Temperaturen — Facteur de multiplication en fonction de la polarisation d'une photodiode à avalanche pour diverses températures
 Multiplikationsfaktor M — Facteur de multiplication M
 Vorspannung — Polarisation

Neben dem hohen Strahlungsnachweisvermögen weisen Photoavalanchediode als weiteren Vorteil hohe Grenzfrequenzen auf. Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt liegt bei gängigen Typen zwischen 50 und 200 GHz. Auch heute noch ist die Herstellung von Photoavalanchediode verhältnismässig kostspielig, weil dazu perfekt strukturierte PN-Übergänge und äusserst homogene Halbleitermaterialien erforderlich sind.

323 Gütekriterien der Photodioden

Eine ganze Reihe von Kriterien sind bekannt, die das Verhalten von Photodioden unter ihren besonderen Betriebsbedingungen beschreiben. Die heute gebräuchlichsten Kriterien geben Auskunft über:

- die Photoempfindlichkeit (welches elektrische Signal liefert der Empfänger je Einheit einfallender Strahlungsleistung?)
- die Empfangsgrenze (welche minimale Strahlungsleistung ist gerade noch nötig, damit Nutz- und Rauschsignal gleich gross werden?)

Die *Fotoempfindlichkeit R* (responsivity) eines Empfängers ist als Quotient der Signalantwort *S* und der auftretenden Strahlungsleistung *P* definiert

$$R = \frac{S}{P} \quad (3)$$

Der Ausdruck *R* weist die Dimensionen AW^{-1} oder VW^{-1} auf, je nachdem, ob dem Nutzsignal ein Strom oder eine Spannung zugrunde liegt.

Wird weiter eine Empfangsgrenze definiert, führt dies zu jener Strahlungsleistung, bei der das Signal/Rausch-Verhältnis gerade eins wird. Da in diesem Fall das Nutzsignal gleich dem Rauschsignal ist, bezeichnet man diesen Term als *rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP* (noise equivalent power).

33 Rauschverhalten optoelektronischer Empfänger

Die Analyse der Rauschursachen in einem Halbleiterphotodetektor führt zu mehreren unterschiedlichen

médiaire permet d'agrandir la zone de charge d'espace, qui, à son tour, admet une tension de blocage plus élevée et entraîne une plus faible capacité de la couche d'arrêt. Vu les tensions de blocage plus élevées (c'est-à-dire le champ électrique plus intense) et la capacité réduite de la couche d'arrêt, les photodiodes PIN ont des temps de commutation très brefs. Si de la lumière parvient sur la couche photosensible, la majeure partie est absorbée dans la zone de charge d'espace; il en résulte, compte tenu de l'effet photoélectrique interne, des paires d'électrons et de trous séparés par le champ électrique. Alors que ces électrons et ces trous se déplacent en sens inverse dans la zone de charge d'espace en raison des forces engendrées par le champ électrique, le circuit de charge de la diode est parcouru par un courant photoélectrique I_p . Ce dernier se modifie linéairement, en fonction de l'intensité d'éclairement E_v sur toute l'étendue d'une très large plage portant sur plusieurs puissances de dix (fig. 18). Le rapport entre les porteurs de charge induits par les photons et le nombre total des photons parvenant sur la couche photosensible avec le rayonnement incident est appelé rendement quantique η .

322 Photodiodes à avalanche

Les photodiodes à avalanche (PAD) sont des détecteurs à couche d'arrêt, qui associent la réception des signaux optiques à une amplification interne du courant photoélectrique. Comparées aux diodes PIN, les photodiodes à avalanche nécessitent une puissance rayonnée inférieure de 5...20 dB (fig. 19). Le processus interne d'amplification s'amorce dès que les porteurs de charge traversant le champ électrique ont accumulé suffisamment d'énergie pour engendrer de nouvelles paires d'électrons et de trous par ionisation due à des chocs. On parle à ce propos d'effet d'avalanche. Cette multiplication des porteurs de charge s'accroît en fonction de l'augmentation de la tension de blocage, jusqu'à ce que se produise l'effet d'avalanche (rupture). Toutefois, avec l'augmentation de la tension de blocage et la multiplication des porteurs de charge, le bruit des photodiodes à avalanche augmente à proximité du point de claquage ($U_{Br} = 70...400 \text{ V}$), selon une loi non linéaire. De ce fait, on exploite les photodiodes à avalanche à quelques dixièmes de volts au-dessous de la tension de claquage, où il est possible de réaliser une bonne amplification des signaux ($M = 50...300$), compte tenu d'un bruit relativement faible. Etant donné que la tension de claquage dépend fortement de la température (fig. 20), il est absolument indispensable de recourir à des circuits régulateurs. Le réglage correct de la tension d'exploitation constitue un point important dans la mise au point des circuits à photodiodes à avalanche, vu que cette tension doit être rigoureusement constante et compensée en température.

En plus de leur haute sensibilité de détection du rayonnement, les photodiodes à avalanche présentent encore l'avantage d'opérer à des fréquences limites élevées. Pour les modèles usuels, le produit amplification-largeur de bande se situe entre 50 et 200 GHz. Aujourd'hui encore, la fabrication des photodiodes à avalanche est relativement coûteuse, les jonctions PN devant être parfaitement structurées et les matériaux semi-conducteurs d'une haute homogénéité.

323 Critères de qualité des photodiodes

On connaît toute une série de critères qui décrivent le comportement des photodiodes dans des conditions d'exploitations spécifiques. Ceux qui sont aujourd'hui usuels renseignent sur:

- la photosensibilité (signal électrique délivré par le récepteur en fonction de l'unité de puissance rayonnante incidente)
- la limite de réception (puissance de rayonnement minimale nécessaire pour que le signal utile soit égal au signal de bruit, rapport signal sur bruit égal à 1)

La *photosensibilité* R (responsivity) d'un récepteur est le quotient entre le signal de réponse S et la puissance de rayonnement incidente P

$$R = \frac{S}{P} \quad (3)$$

L'expression R prend la dimension AW^{-1} ou VW^{-1} , suivant que le signal utile est un courant ou une tension.

Si l'on veut encore définir une limite de réception, on parvient à la puissance de rayonnement pour laquelle le rapport signal sur bruit est égal à 1. Vu que, dans ce cas, le signal utile est équivalent au signal de bruit, on parle de *puissance de rayonnement avec équivalence de bruit* NEP (noise equivalent power).

Fig. 21 Rauschquellen in optischen Empfängern — Sources de bruit des récepteurs optiques

Photodetektor — Photodétecteur
Lichtsignal — Signal lumineux
Photoelektrischer Effekt — Effet photoélectrique
Avalanche-Multiplikation — Multiplication par effet d'avalanche
Elektrische Verstärkung — Amplification électrique
Verstärker — Amplificateur
Quantenrauschen — Bruit quantique
Dunkelstromrauschen — Bruit dû au courant d'obscurité
Multiplikationsrauschen — Bruit dû à la multiplication des photons
Thermisches Rauschen des Diodenlastwiderstandes und des Verstärkers — Bruit thermique dû à la résistance de charge de la diode et à l'amplificateur

Rauschmechanismen (Fig. 21). Von Bedeutung sind hauptsächlich die vier folgenden:

- Quantenrauschen
- Dunkelstromrauschen (1/f-Rauschen)
- Multiplikationsrauschen bei Photoavalanchediode
- thermisches Rauschen (Johnson-Rauschen)

Das *Quantenrauschen* zeigt sich als Schrotrauschen im Photonenstrom und rührt von der statistisch zufälligen Ankunftszeit der Photonen her. Es ist deshalb abhängig vom Signalpegel.

Das *Dunkelstromrauschen* tritt durch das Vorhandensein eines kleinen Leckstromes in der Photodiode (Dunkelstrom) auf. Es hat ebenfalls den Charakter des zufallsbedingten Schrotrauschens.

Das *Multiplikationsrauschen* bei Photoavalanchediode tritt als Folge des Vervielfacherprozesses in Erscheinung und äussert sich auch als Schrotrauschen.

Das *thermische Rauschen* setzt sich aus dem thermischen Rauschen des Diodenlastwiderstandes und dem Rauschen des nachfolgenden Verstärkers zusammen.

Die Empfangsgrenze eines Photodiodenempfängers wird letztlich durch das Gesamttrauschen bestimmt, das sich aus der Überlagerung der verschiedenen Rauschteile ergibt.

Figur 22 zeigt die typische Schaltung eines hochohmigen Photodetektorverstärkers mit zugehörigem Ersatzschaltbild. Die beiden Schaltbilder ermöglichen ein quantitatives Erfassen und Beurteilen des Empfänger-rauschens.

Grundlegende Untersuchungen, die eine Berechnung empfindlicher Photoempfänger zum Ziele haben, wurden von *S. D. Personick* [3] und *J. E. Goell* [4, 5] durchgeführt. Diese Arbeiten zeigen, dass im Falle einer PIN-Diode — die keine interne Verstärkung aufweist — im allgemeinen das thermische Rauschen des Lastwider-

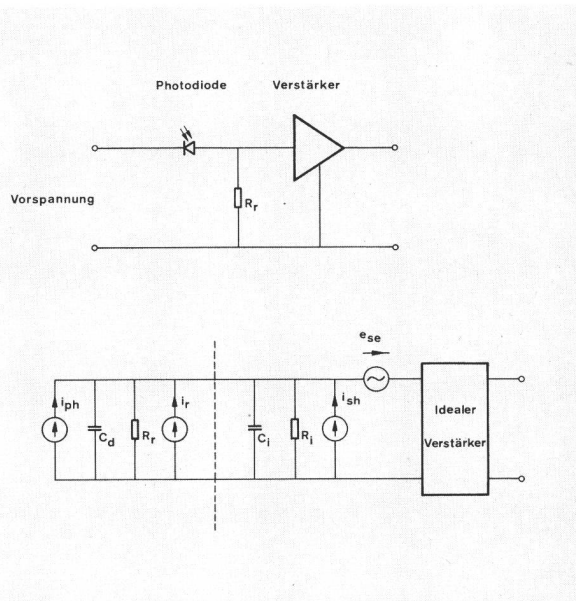


Fig. 22 Typische Schaltung eines hochohmigen Photodetektor-Verstärkers mit zugehörigem Ersatzschaltbild — Circuit typique d'un amplificateur à photodétecteur haute résistance et schéma équivalent

i_{ph} Photostrom der Diode — Courant photoélectrique de la diode
 R_r Vorwiderstand — Résistance d'entrée
 i_r Rauschstrom des Vorwiderstandes — Courant de bruit de la résistance d'entrée
 C_d Diodenkapazität — Capacité de la diode
 C_i Eingangskapazität des Verstärkers — Capacité d'entrée de l'amplificateur
 R_i Eingangswiderstand des Verstärkers — Résistance d'entrée de l'amplificateur
 i_{sh} Rauschstrom des Verstärkers — Courant de bruit de l'amplificateur
 e_{se} Rauschspannung des Verstärkers — Tension de bruit de l'amplificateur
Photodiode — Photodiode
Verstärker — Amplificateur
Vorspannung — Polarisation
Idealer Verstärker — Amplificateur idéal

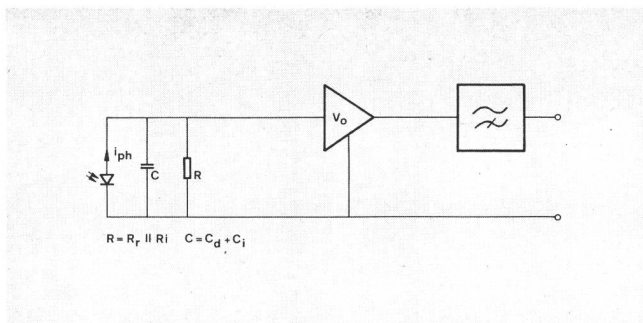


Fig. 23
Hochohmiger Eingangsverstärker mit Equalizer (Ersatzschema) – Amplificateur d'entrée à haute résistance avec égaliseur (schéma équivalent)

standes und des nachfolgenden Verstärkers überwiegt. Dies bedeutet, dass bei PIN-Diodendetektoren die Empfangsgrenze (kleinster Signale) durch das thermische Rauschen bestimmt wird.

Anders ist es bei Photoavalanchedioden, wo infolge des internen Verstärkungsvorganges die Anteile des Quanten-, Dunkelstrom- und Multiplikationsrauschens vorherrschen. Das thermische Rauschen kann hier im allgemeinen vernachlässigt werden, womit sich vor allem bei hohen Frequenzen ein der PIN-Diode gegenüber besseres Rauschverhalten ergibt.

Zwei Arten von Verstärkerschaltungen eignen sich besonders gut als Empfänger optischer Signale:

- hochohmige Verstärker ohne Rückkopplung (Ersatzschema siehe Fig. 23). Der hohe Widerstand R am Eingang bildet hier gleichzeitig mit der Kapazität C einen Tiefpass, der das Signal bei höheren Frequenzen unerwünscht abschwächt. Will man ein Symbolübersprechen verhindern, muss diese Verformung in einer nachfolgenden Stufe (Equalizer) wieder kompensiert werden
- Transimpedanzverstärker (Verstärker mit spannungsgesteuerter Stromrückkopplung, Fig. 24). Die Eingangsimpedanz wird durch Rückkopplung dynamisch verkleinert, was zu hoher Bandbreite führt

Verschiedene Untersuchungen [6, 7, 8] haben gezeigt, dass sich Transimpedanzverstärker praktisch ebenso rauscharm verwirklichen lassen wie hochohmige Eingangsverstärker mit Equalizer. Transimpedanzverstärker können sowohl mit Bipolar- als auch mit Feldeffekttransistoren aufgebaut werden. Gegenwärtig lassen sich unterhalb von 10...20 MHz empfindlichere Empfänger mit

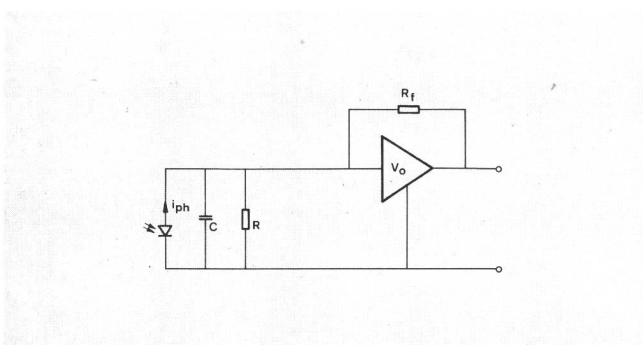


Fig. 24
Transimpedanzverstärker (Ersatzschema) – Amplificateur-adaptateur d'impédances (schéma équivalent)

33 Bruit des récepteurs opto-électroniques

L'analyse des causes du bruit dans les photodétecteurs à semi-conducteurs révèle plusieurs mécanismes de bruit différents (fig. 21). Parmi les principaux, on peut citer:

- le bruit quantique
- le bruit dû au courant d'obscurité (bruit 1/f)
- le bruit dû à la multiplication des photons dans les photodiodes à avalanche
- le bruit thermique (bruit de Johnson)

Le *bruit quantique* se manifeste sous forme de bruit de grenaille dans le courant photoélectrique et provient du temps d'arrivée statistiquement aléatoire des photons. Il est de ce fait indépendant du niveau du signal.

Le *bruit dû au courant d'obscurité* apparaît en raison de la présence d'un faible courant de perte dans la diode photoélectrique (courant d'obscurité). Il a également le caractère aléatoire du bruit de grenaille.

Le *bruit dû à la multiplication des photons* dans les photodiodes à avalanche est également généré par le processus de multiplication des photons et se traduit par le bruit de grenaille.

Le *bruit thermique* se compose du bruit thermique de la résistance de charge de la diode et du bruit de l'amplificateur subséquent.

En fin de compte, la limite de réception d'un récepteur à photodiodes est déterminée par le bruit global qui résulte de la superposition des différentes composantes de bruit.

La figure 22 montre un montage typique d'un amplificateur-photodétecteur à haute impédance et son circuit équivalent. Les deux schémas permettent une mise en évidence quantitative et une évaluation du bruit du récepteur.

S. D. Personick [3] et J. E. Goell [4,5] ont entrepris des recherches fondamentales en vue de calculer les caractéristiques de photorécepteurs sensibles. Ces travaux ont montré que le bruit thermique de la résistance de charge et de l'amplificateur monté en aval d'une diode PIN était, en général, d'importance prépondérante, vu que ce composant ne procure pas d'amplification interne. Cela signifie que la limite de réception pour les signaux très faibles est déterminée par le bruit thermique dans les diodes détectrices PIN.

Les conditions sont différentes dans les photodiodes à avalanche, vu qu'en raison du mécanisme d'amplification interne les composantes de bruit quantique, de bruit dû au courant d'obscurité et de bruit dû à la multiplication des photons prédominent. Le bruit thermique peut en général être négligé, d'où il résulte que les caractéristiques de bruit sont en général meilleures que celles de la diode PIN, surtout aux fréquences élevées.

Deux circuits d'amplification conviennent particulièrement bien pour la réception de signaux optiques:

- les amplificateurs à haute impédance sans contre-réaction (schéma équivalent, fig. 23). La résistance d'entrée élevée R et la capacité C forment un filtre passe-bas qui atténue de manière indésirable le signal aux fréquences élevées. Si l'on veut empêcher une

Feldeffekttransistoren verwirklichen, wogegen oberhalb dieser Frequenz bipolare Eingangsstufen höhere Empfindlichkeiten ergeben.

34 Lichtleitfasern

Lichtleitfasern sind dielektrische Wellenleiter, die aus hochtransparenten Glasmaterialien bestehen. *Figur 25a* zeigt eine Stufenprofilfaser, die einen Kerndurchmesser von typisch 30...80 μm mit einem Manteldurchmesser von 100...150 μm aufweist. Der Brechungsindex n_1 ist dabei grösser als der Brechungsindex n_2 des Mantels. Die Lichtführung in der Faser beruht auf der Totalreflexion des Lichtes an der Grenzschicht n_1/n_2 , wenn es mit einem Winkel φ auf die Grenzschicht auftritt, der kleiner ist als $\varphi = \arccos n_2/n_1$.

Nur Wellentypen (Moden), die sich im Kern bilden, sind ohne grössere Verluste über weite Distanzen ausbreitungsfähig. Man bezeichnet sie als Kernmoden. Mantelmoden dagegen werden im Übergang Mantel/Umgebung nur noch teilweise reflektiert und sind deshalb schon nach kurzer Distanz absorbiert. In einer Stufenprofilfaser kann die Anzahl ausbreitungsfähiger Kernmoden annähernd berechnet werden [9, 10] mit der Gleichung

$$N = \frac{1}{2} V^2 \quad (4)$$

Darin stellt der Ausdruck V die sogenannte normalisierte Frequenz dar

$$V = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (5)$$

mit r Radius des Faserkerns
 λ Lichtwellenlänge
 n_1 Brechungsindex des Kerns
 n_2 Brechungsindex des Mantels

Werden folgende typische Werte eingesetzt: $r = 25 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$; $n_1 = 1,51$; $n_2 = 1,50$, ergibt sich eine Modenzahl N von 514. Solche Fasern werden daher als Multimodefasern bezeichnet.

Die Gleichung (5) enthält weiter die Grösse der *numerischen Apertur NA*, die als Kennzahl bei Lichtleitern von grosser Bedeutung ist

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin \Theta \quad (6)$$

Θ ist der *Akzeptanzwinkel*, unter dem alle auf die Faserstirnseite einfallenden Strahlen eingekoppelt werden (im erwähnten Beispiel: $\Theta = 10^\circ$).

Durch Verkleinern des Kerndurchmessers lässt sich die Zahl der Moden reduzieren. Wird der Kerndurchmesser im vorgenannten Beispiel auf 2,2 μm reduziert, so zeigt die Rechnung, dass nur noch ein einziger Mode ausbreitungsfähig ist. Eine derartige Faser wird als *Monomodefaser* (Einwellenfaser) bezeichnet (*Fig. 25c*). Modenbedingte Laufzeitverzerrungen treten bei diesem Fasertyp keine mehr auf. Es entstehen nur noch Laufzeitverzerrungen, die durch geringe Brechungsindexunterschiede des Glases (Materialdispersion) hervorgerufen werden. Aus diesem Grunde weisen Monomodefasern von allen Fasertypen die grösste Übertragungskapazität

diaphonie de trame, il y a lieu de compenser cette déformation dans un étage suivant (égaliseur)
 – les amplificateurs-transformateurs d'impédance (amplificateurs avec contre-réaction de courant commandée en tension, *fig. 24*). Il y a réduction dynamique de l'impédance d'entrée par contre-réaction, d'où résulte une grande largeur de bande

Diverses études [6, 7, 8] ont montré que les amplificateurs-transformateurs d'impédance pouvaient être réalisés avec un bruit aussi faible que les amplificateurs d'entrée à haute impédance associés à un égaliseur. On peut les construire aussi bien avec des transistors bipolaires qu'avec des transistors à effet de champ. A l'heure actuelle, les récepteurs équipés de transistors à effet de champ sont plus sensibles au-dessous de 10...20 MHz, cependant que les étages d'entrée bipolaires présentent une plus haute sensibilité au-delà de cette fréquence.

34 Fibres optiques

Les fibres optiques sont des systèmes de guides d'ondes lumineuses diélectriques constitués en verres hautement transparents. La *figure 25a* montre une fibre à saut d'indice ayant un diamètre de cœur typique de 30...80 μm et un diamètre de manteau (appelé aussi «cladding») de 100...150 μm . Dans ce cas, l'indice de réfraction n_1 est supérieur à l'indice de réfraction n_2 du manteau. La propagation de la lumière dans la fibre repose sur un phénomène de réflexion totale de la lumière à l'interface n_1/n_2 , lorsque celle-ci tombe sur l'interface avec un angle $\varphi = \arccos n_2/n_1$.

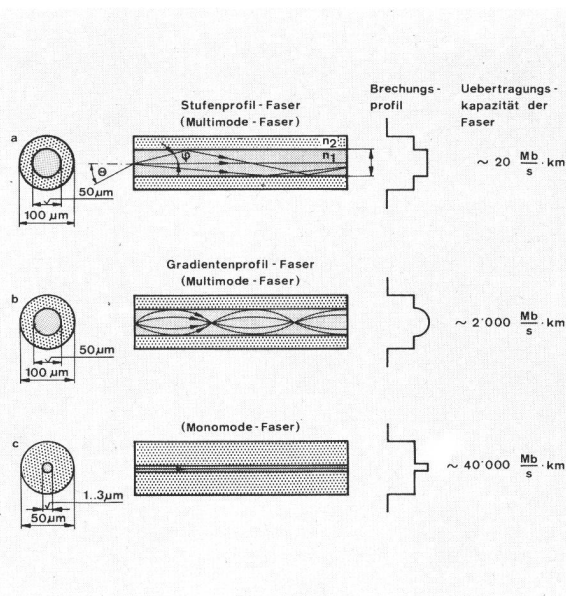


Fig. 25
 Drei gebräuchliche Lichtwellenleiter für Weitdistanzübertragung (Faserdämpfung 4 dB/km bei $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$) — Trois guides d'ondes lumineuses usuels pour transmissions à grande distance (atténuation de la fibre 4 dB/km pour $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$)
 Stufenprofil-Faser (Multimode-Faser) — Fibre à saut d'indice (fibre multimode)
 Gradientenprofil-Faser (Multimode-Faser) — Fibre à gradient d'indice (fibre multimode)
 Monomode-Faser — Fibre monomode
 Brechungsprofil — Profil de réfraction
 Übertragungskapazität der Faser — Capacité de transmission de la fibre

auf. Relativ schwierig und zurzeit noch nicht befriedigend gelöst ist, die Ankopplung beziehungsweise die Verbindung solcher sehr dünnen Monomodefasern.

Will man breitbandige Lichtwellenleiter erhalten, ohne auf die schwer zu handhabenden Monomodefasern zurückzugreifen, muss das Brechungsprofil des Faserkerns so gestaltet werden, dass die Laufzeitunterschiede der einzelnen Moden gering werden. Dies wird erreicht durch einen kontinuierlichen, annähernd parabolischen Verlauf des Brechungsprofils von der Fasermitte bis zum Mantel (Fig. 25b). Solche Lichtwellenleiter werden als *Gradientenprofilfasern* bezeichnet. Das Licht durchläuft die Faser nicht im Zickzack, sondern in wellenförmigen Bahnen, infolge der stetigen Änderung des Brechungsprofils. Die modenbedingten Laufzeitunterschiede sind hier gering, da der längere Weg der äusseren Strahlen durch die grössere Fortpflanzungsgeschwindigkeit in diesem Gebiet (kleinerer Brechungsindex) weitgehend ausgeglichen wird.

Durchläuft ein rechteckiger Lichtsignalimpuls einen Faserabschnitt, so können zwei Effekte beobachtet werden:

- die Amplitude des Impulses wird abgeschwächt
- der Rechteckimpuls erfährt eine Verbreiterung, verbunden mit einer Abrundung seiner Form

341 Faserdämpfung

Die Abschwächung des Signals tritt infolge der Absorption und der Streuung des Lichtes auf. Sie wird mit dem Begriff der Faserdämpfung erfasst, die auf vier Hauptgründe zurückzuführen ist:

- die Rayleighstreuung wird durch «eingefrorene», mikroskopisch kleine Inhomogenitäten im Glasmaterial hervorgerufen
- die Streuung an grösseren Inhomogenitäten. Diese liegen in der Grössenordnung der Lichtwellenlänge oder darüber und entstehen bei der Herstellung der Faser oder deren Ausgangsmaterialien
- die Absorption durch Ausläufer der UV-Absorptionsbanden. Gläser weisen im UV-Bereich ausgeprägte Absorptionseigenschaften auf, wobei der Absorptionsverlauf bei höheren Wellenlängen exponentiell abnimmt
- die Absorption durch Fremdionen. Geringste Spuren von Metall- und OH-Ionen absorbieren das Licht sehr stark im Wellenbereich 0,5...1 μm . Um diese unerwünschte Dämpfung unter 1 dB/km zu halten, müssen die Konzentrationen von Metallionen im Glas unter $1...2 \cdot 10^{-9}$ und jene der OH-Ionen unter 10^{-6} liegen

Trotz dieser hohen Forderungen an Reinheit und Homogenität der Faser gelingt es den meisten Herstellern heute, alle drei Fasertypen mit einer Dämpfung von durchschnittlich 5 dB/km bei einer Wellenlänge von $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ zu erzeugen.

Figur 26 zeigt den Dämpfungsverlauf einer heute gebräuchlichen Gradientenprofilfaser. Deutlich sichtbar sind die durch OH-Ionen verursachte Absorptionsspitze

Seuls les types d'ondes (modes) qui se forment dans le cœur peuvent se propager sans fortes pertes à des grandes distances. On les appelle «modes axiaux» (modes cœur). En revanche, les «modes limites» (modes manteau) ne sont plus réfléchis que partiellement à l'interface cœur-manteau et de ce fait absorbés après une courte distance déjà. Dans une fibre à saut d'indice, il est possible de calculer approximativement le nombre des «modes axiaux» capables de se propager [9, 10] à l'aide de l'équation

$$N = \frac{1}{2} V^2 \quad (4)$$

V symbolise ici la fréquence normalisée

$$V = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (5)$$

où

- r Rayon du cœur de la fibre
- λ Longueur d'onde de la lumière
- n_1 Indice de réfraction du cœur
- n_2 Indice de réfraction du manteau

En introduisant les valeurs typiques suivantes: $r = 25 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$; $n_1 = 1,51$; $n_2 = 1,50$, on obtient un nombre de modes N de 514. De telles fibres sont de ce fait appelées fibres multimodes.

L'équation (5) contient, de plus, la valeur de l'*ouverture numérique NA*, qui est un coefficient extrêmement important des fibres optiques:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin \Theta \quad (6)$$

Le symbole Θ est ici l'*angle d'acceptance* sous lequel tous les rayons incidents sont couplés sur le front de la fibre (dans notre exemple: $\Theta = 10^\circ$).

Si l'on diminue le diamètre du cœur, on s'aperçoit que le nombre des modes diminue aussi. En ramenant le diamètre du cœur, comme dans l'exemple précédent, à 2,2 μm , on trouve par calcul qu'un seul mode est encore capable de se propager. Une telle fibre est alors appelée *fibre monomode* (fig. 25c). Des dispersions de temps de propagation dues aux différents modes ne se produisent plus dans ce type de fibre. On n'observe plus que des dispersions imputables à de faibles différences d'indices de réfraction du verre (dispersion dans le matériau). Pour cette raison, la capacité de transmission des fibres monomodes est la plus grande. Coupler la source à ces fibres monomodes extrêmement minces ou les relier entre elles est en revanche relativement difficile et c'est un problème qui n'est pas encore résolu actuellement de manière satisfaisante.

Si l'on veut obtenir des guides d'ondes lumineuses à large bande, sans être obligé pour cela de recourir aux fibres monomodes d'un maniement délicat, il faut faire en sorte que le profil de réfraction du cœur de la fibre soit tel qu'il en résulte de faibles différences de temps de propagation des divers modes. On peut y parvenir grâce à un profil de réfraction continu, d'une configuration pratiquement parabolique, en partant du cœur de la fibre jusqu'au manteau (fig. 25b). De tels guides d'ondes

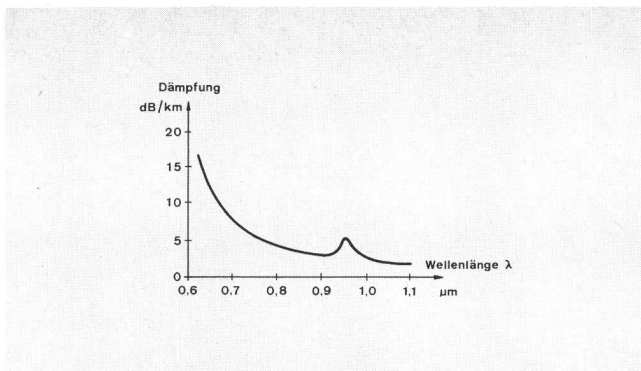


Fig. 26
Spektraler Dämpfungsverlauf einer Gradientenprofilfaser — Allure de l'atténuation spectrale d'une fibre à gradient d'indice
Dämpfung — Affaiblissement
Wellenlänge — Longueur d'onde

bei 0,95 μm und der starke Dämpfungsanstieg bei kleinen Wellenlängen infolge der Rayleighstreuung.

Wie die Figur 26 weiter zeigt, liegt der günstigste Wellenbereich für eine dämpfungsarme Glasfaserübertragung oberhalb 1 μm . Dies erklärt auch, weshalb zurzeit eine intensive technologische Weiterentwicklung von Halbleiterlichtquellen und -empfängern für diesen Spektralbereich im Gange ist.

342 Dispersion

Der zweite erwähnte Effekt, der eine Verformung und Abrundung von rechteckigen Lichtimpulsen in der Faser bewirkt, wird als *Impulsdispersion* bezeichnet, der im wesentlichen zwei Ursachen zugrunde liegen:

- die Materialdispersion: Der Brechungsindex und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist geringfügig wellenlängenabhängig. Abhängig von der spektralen Breite der verwendeten Lichtquelle entstehen daher Laufzeitdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Wellenlängen. Wird zum Beispiel eine Laserdiode als Lichtquelle geringer spektraler Breite verwendet, so erreicht die Materialdispersion Werte, die weit unterhalb von 1 ns je Kilometer liegen
- die Laufzeitdispersion: Die verschiedenen Kernmoden einer Faser weisen unterschiedliche Laufzeiten auf (Fig. 27). Der verformte Ausgangsimpuls entsteht dabei aus der Überlagerung der zeitlich gestaffelt ankommenden Moden

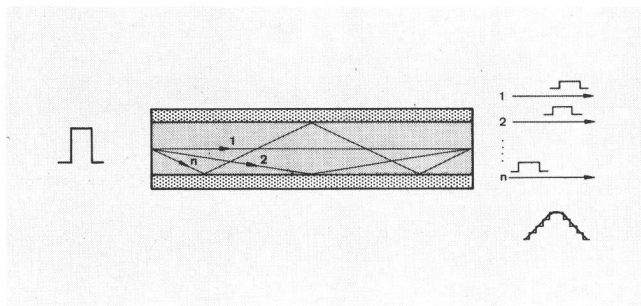


Fig. 27
Laufzeitdispersion in Lichtwellenleitern; Überlagerung der zeitlich gestaffelt eintreffenden Moden 1...n — Dispersion des temps de propagation dans les guides optiques; superposition des modes 1...n échelonnés dans le temps

lumineuses sont appelés *fibres à gradient d'indice*. La lumière ne traverse pas la fibre en zigzag, mais selon une trajectoire ondulatoire, en raison de la variation axiale de l'indice de réfraction. Les différences de temps de propagation dues à la différence des modes sont ici très faibles, vu que le chemin plus long parcouru par les rayons extérieurs est compensé par la vitesse de propagation accrue dans cette zone (indice de réfraction plus faible).

Si un train d'impulsions lumineuses rectangulaires traverse un secteur de fibre optique, on peut observer deux effets différents:

- l'amplitude de l'impulsion est affaiblie
- l'impulsion rectangulaire s'aplatit et ses arêtes s'arrondissent

341 Atténuation due à la fibre

Deux causes sont responsables de l'affaiblissement du signal: l'absorption et la dispersion de la lumière. On parle, en l'occurrence, de l'affaiblissement de fibre, qui est imputable à quatre raisons principales:

- la dispersion de Rayleigh est due à des inhomogénéités microscopiques «figées» dans le verre
- la dispersion due à de plus grandes inhomogénéités. Celles-ci sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière ou supérieures et naissent lors de la fabrication de la fibre ou des matières premières
- l'absorption due à des franges des bandes d'absorption de l'ultraviolet. Les verres ont des propriétés d'absorption prononcées dans la gamme de l'ultraviolet, cependant que cette absorption diminue exponentiellement aux longueurs d'onde plus élevées
- l'absorption par des ions étrangers. Les plus infimes traces d'ions métalliques et d'ions OH absorbent très fortement la lumière dans la gamme des longueurs d'ondes de 0,5...1 μm . Pour ramener cet affaiblissement indésirable en dessous de 1 dB/km, il est nécessaire que la concentration des ions métalliques dans le verre se situe au-dessous de $1...2 \cdot 10^{-9}$ et celle des ions OH au-dessous de 10^{-6}

Malgré ces exigences extrêmement poussées quant à la pureté et à l'homogénéité des fibres, la plupart des fabricants parviennent aujourd'hui à réaliser les trois types de fibres avec un affaiblissement moyen de 5 dB/km à une longueur d'onde de $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$.

La figure 26 montre l'allure de l'affaiblissement dans une fibre à gradient d'indice, telle qu'on l'utilise communément aujourd'hui. La crête d'absorption vers 0,95 μm , due aux ions OH, est clairement visible ainsi que l'accroissement de l'affaiblissement aux faibles longueurs d'ondes, en raison de la dispersion de Rayleigh.

Ainsi qu'on l'aperçoit aussi sur la figure 26, la longueur d'onde la plus favorable pour une transmission peu atténuée dans une fibre optique se situe au-dessus de 1 μm . Ce fait explique pourquoi on assiste actuellement à un développement technologique intense des sources et des détecteurs à semi-conducteurs dans cette gamme du spectre.

Bei *Stufenprofilfasern* kann die Laufzeitdispersion τ_L beachtlich grosse Werte erreichen. Sie lässt sich annähernd berechnen nach der Gleichung

$$\tau_L = (n_1 - n_2) n_1 \frac{L}{c} \quad (7)$$

n_1 = Brechungsindex des Faserkerns

n_2 = Brechungsindex des Mantels

L = Faserlänge

c = Vakuumlichtgeschwindigkeit

Eine Stufenprofilfaser der Länge $L = 1$ km mit Brechungsindex von $n_1 = 1,51$ und $n_2 = 1,50$ weist demnach eine kilometrische Laufzeitdispersion von 50 ns auf. Mit einem solchen Lichtwellenleiter lassen sich Bitraten von nur ungefähr 10 Mbit/s einen Kilometer weit übertragen.

Bei *Gradientenprofilfasern* kann die Laufzeitdispersion τ_L annähernd nach Gleichung (8) berechnet werden

$$\tau_L = \frac{(n_0 - n_2)^2}{2} \frac{n_0 \cdot L}{c} \quad (8)$$

n_0 = Brechungsindex des Faserkernzentrums

n_2 = Brechungsindex des Mantels

Die gleichen Zahlenwerte des obigen Beispiels ergeben für einen Kilometer Gradientenprofilfaser eine Laufzeitdispersion von 0,25 ns und eine ungefähre Übertragungsbitrate von 2,0 Gbit/s. *(Fortsetzung folgt)*

$$\tau_L = \frac{(n_0 - n_2)^2}{2} \frac{n_0 \cdot L}{c} \quad (8)$$

n_0 = Indice de réfraction du centre du cœur de la fibre

n_2 = Indice de réfraction du manteau

Les mêmes valeurs que celles de l'exemple précédent conduisent à une dispersion de temps de propagation de 0,25 ns et à un débit binaire de 2,0 Gbit/s pour une fibre à gradient d'indice d'une longueur de 1 km.

(à suivre)

342 Dispersion

Deux raisons essentielles provoquent la déformation et l'arrondissement des flancs des impulsions lumineuses rectangulaires dans la fibre, phénomène que l'on appelle *dispersion des impulsions*:

- la dispersion due au matériau: l'indice de réfraction et, partant, la vitesse de propagation de la lumière, dépendent dans une faible mesure de la longueur d'onde. On observe, de ce fait, des différences de temps de propagation entre les diverses longueurs d'ondes dépendant de la largeur du spectre de la source lumineuse utilisée. Si la source lumineuse est par exemple une diode laser à faible largeur de spectre, la dispersion due au matériau atteint des valeurs situées nettement au-dessous de 1 ns par kilomètre
- la dispersion due au temps de propagation: les divers «modes axiaux» d'une fibre ont des temps de propagation différents (*fig. 27*). L'impulsion de sortie déformée est de ce fait engendrée par la superposition des modes incidents échelonnés dans le temps

Il est connu que la dispersion due au temps de propagation τ_L des *fibres à saut d'indice* peut atteindre des valeurs élevées. On peut la calculer approximativement au moyen de la formule:

$$\tau_L = (n_1 - n_2) n_1 \frac{L}{c} \quad (7)$$

n_1 = Indice de réfraction du cœur de la fibre

n_2 = Indice de réfraction du manteau

L = Longueur de la fibre

c = Vitesse de la lumière dans le vide

Il en résulte qu'une fibre à saut d'indice de longueur $L = 1$ km, ayant des indices de réfraction de $n_1 = 1,51$ et $n_2 = 1,50$ présente une dispersion de temps de propagation kilométrique de 50 ns. Une telle fibre optique permet de transmettre à une distance d'environ 1 km des débits binaires ne dépassant guère 10 Mbit/s.

Dans les *fibres à gradient d'indice* la dispersion des temps de propagation τ_L peut être calculée de manière approchée à l'aide de l'équation (8):