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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 70 (1992)

Heft: 8

Artikel: Optische Verstärker in der Telekommunikation

Autor: Béguin, Claude

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-873997

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: 18.11.2025

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

Optische Verstärker in der Telekommunikation

Claude BEGUIN, Bern

1 Einleitung

Im Bereich der Telekommunikation ist heute das Übertragen optischer Signale mit Glasfasern eine weitverbreitete und gut eingeführte Technik. In digitalen Fern-, Regional- und Interzentralen-Netzen stellt der Einsatz von Lichtwellenleitern die wirtschaftlichste Übertragungsart dar, wenn es darum geht, mit grossen Datenströmen bzw. hohen Kanalzahlen grössere Distanzen zu überwinden. Im Bereich der analogen Übertragung werden gegenwärtig erste Glasfasernetze für Fernsehverteilsysteme erprobt, die breitbandige Informationen in grösserem Umfang bis zum einzelnen Teilnehmer leiten.

Einen hervorstechenden Vorteil der faseroptischen Übertragung bildet dabei die verhältnismässig geringe Dämpfung des Lichts in der Faser, die im Wellenlängenbereich von $\lambda = 1300$ nm (2. Lichtfenster) etwa 0,35 dB/km und bei $\lambda = 1550$ nm (3. Lichtfenster) nur etwa 0,2 dB/km beträgt, wie aus *Figur 1* ersichtlich ist.

Wird ein optischer Datenstrom über eine weite Distanz übertragen, erfährt er eine entsprechende Abschwächung und Impulsverformung und muss nach einer längeren Faserstrecke wieder aufbereitet werden, und zwar sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage und der Flankensteilheit. Man spricht hier von einer *3R-Regeneration: R*etiming, *R*eshaping und *R*egeneration der Amplitude.

Die dazu verwendeten optoelektronischen Zwischenverstärker sind jedoch verhältnismässig komplexe und kostspielige Systemkomponenten, da das optisch empfangene Signal – auf einem Umweg – zuerst in ein elektrisches Signal umgewandelt, elektrisch verstärkt, aufbereitet und anschliessend wieder elektrisch-optisch rückgewandelt werden muss.

Es erschien daher naheliegend, dass mit zunehmender Verbreitung der Glasfasertechnik nach anderen Lösungen gesucht wurde. Optische Verstärker bieten hier die Möglichkeit, das Licht als sehr hochfrequenten Informationsträger direkt zu verstärken. Allerdings findet in einem optischen Verstärker nur eine Regeneration der Amplitude statt.

Wie erwähnt können optische Verstärker in Weitdistanznetzen als Linienverstärker (Line Amplifier) verwendet werden *(Fig. 2a)*. Eine weitere, interessante Anwendung ergibt sich auch als Leistungsverstärker in Breitbandnetzen *(Fig. 2b)*. Die so verstärkten, hohen Ausgangspegel erlauben, die optische Leistung in wesentlich mehr Pfade aufzuteilen. Damit lassen sich mehr Teilnehmer anschliessen, wobei die Verluste der passiven Verteilkomponenten und Koppler elegant kompensiert werden. Eine weitere Anwendung sind rauscharme Vorverstärker auf der Empfängerseite, wie dies *Figur 2c* zeigt [1, 2, 4, 24].

Für den praktischen Einsatz stehen heute zwei Arten optischer Verstärker zur Verfügung:

- einmal der optische Halbleiterverstärker SOA (*S*emiconductor *O*ptical *A*mplifier)
- und der optische Faserverstärker OFA (*O*ptical *F*iber *A*mplifier).

Bei der letzteren Art gibt es mehrere Typen, wobei jener mit einer erbiumdotierten Faser EDFA (*E*rbium *D*oped *F*iber *A*mplifier) am weitesten fortgeschritten ist und deshalb hier ausführlicher behandelt wird.

Mit den Entwicklungsfortschritten bei optischen Verstärkern und deren positiven Eigenschaften lässt sich die grosse Bedeutung erklären, die diesen Systemkomponenten in der Telekommunikation beigemessen wird.

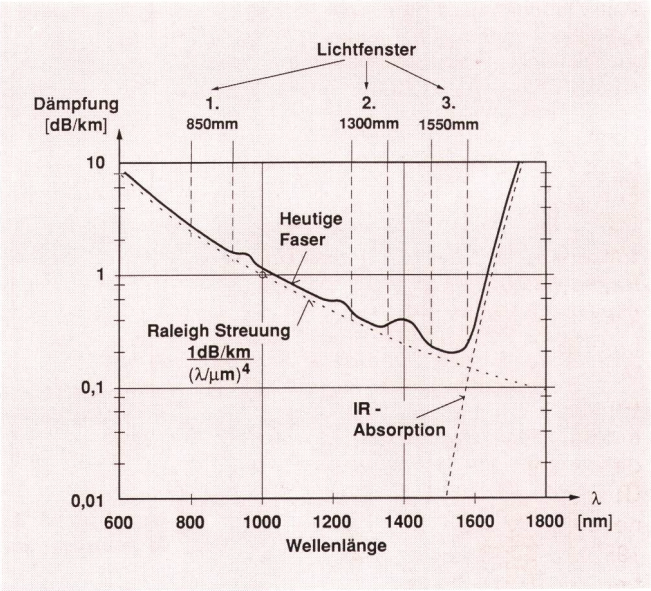


Fig. 1 Faserdämpfung in Funktion der Wellenlänge
2. Lichtfenster ~0,35 dB/km
3. Lichtfenster ~0,2 dB/km

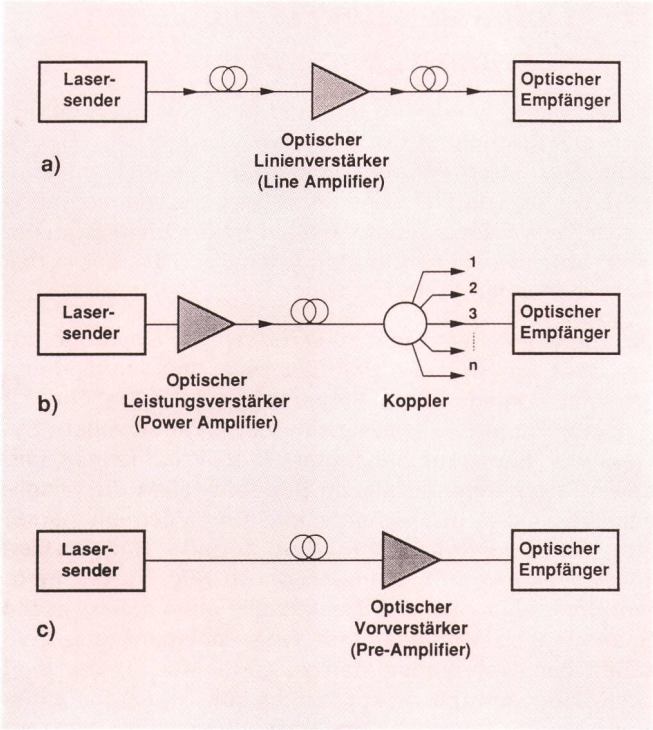


Fig. 2 Anwendungen optischer Verstärker
a) Optischer Linienverstärker (Line Amplifier)
b) Optischer Leistungsverstärker (Power Amplifier)
c) Optischer Vorverstärker (Pre-Amplifier)

2 Geschichtliches

Ein Blick auf die Entwicklungsgeschichte zeigt, dass schon anfangs des 20. Jahrhunderts die quantenmechanischen Grundlagen, das Prinzip der stimulierten Emission und damit der optischen Verstärkung durch *Albert Einstein* beschrieben wurden. Der Weg zur Laserentwicklung musste vorerst jedoch durch viele Materialuntersuchungen geebnet werden, die genaue Kenntnisse des Atomaufbaus vermittelten. Erst 1960 – also etliche Jahrzehnte später – gelang es erstmals, einen Rubinkristall in einem optischen Resonator zum «Lasern» zu bringen (das Wort *Laser* ist eine Abkürzung für *L*ight *A*mplification by *S*timulated *E*mission of *R*adiation).

Diese Erfindung, zusammen mit einer markanten Verbesserung der Glasfaserqualität, löste eine stürmische Entwicklung aus, die zur grossen Verbreitung der Glasfasertechnik führte. Nur zwei Jahre später, also im Jahre 1962, wurde schon der erste Halbleiterlaser erfunden. Interessant ist dabei, dass während der Einführung der Glasfaser, also zwischen ungefähr 1970 und 1987, verhältnismässig wenig Arbeiten zur Entwicklung optischer Verstärker durchgeführt wurden, obwohl schon 1964 der Amerikaner *Snitzer* auch Faserverstärker zum Funktionieren gebracht hatte. Offenbar erst der Übergang von der Multimode- auf die Monomodefaser als Standard-Übertragungsmedium der Glasfasertechnik weckte erneut das Interesse an optischen Verstärkern. So löste 1987 *N. D. Payne* mit einer Publikation über erbiumdotierte Faserverstärker eine lawinenartige Zunahme der Entwicklungen aus. Heute stehen brauchbare optische Faserverstärker für den 1,5-µm-Wellenbereich im Handel zur Verfügung.

3 Physikalische Beschreibung

Um optische Verstärker in ihren technischen Eigenschaften zu erfassen und beurteilen zu können, ist es nützlich, die Funktionsmechanismen, die im Innern von Lasern und optischen Verstärkern ablaufen, kurz erläutern.

31 Lichtentstehung

Wie aus *Figur 3a* ersichtlich ist, kreisen Elektronen in Bahnen (Quantenbahnen) um den Atomkern, ohne dabei Energie abzugeben; sie befinden sich in einem thermodynamischen Gleichgewicht. Sie können durch äussere Einflüsse von einer Quantenbahn in die andere wechseln, wobei ihr Energieniveau ändert. Springt ein Elektron in eine weiter aussen liegende Bahn, ist dies mit einer Energieaufnahme von aussen verbunden, z. B. wenn ein Photon (Lichtquant) auf das Atomgefüge aufprallt und von diesem absorbiert wird.

Springt dagegen ein Elektron von einem angeregten Zustand auf eine Quantenbahn über, die energetisch tiefer, also dem Atomkern näher liegt, wird Energie frei und kann in Form eines Photons abgestrahlt werden.

Im Beispiel einer brennenden Kerze erzeugt der chemische Prozess eine grosse Hitze, die Atome und Moleküle in der Flamme stark anregt bzw. die Elektronen in eine äussere Bahn hebt *(Fig. 3b)*. Diese angeregten Zustände sind nicht stabil. Ohne jede äussere Beeinflussung fallen die Elektronen nach einer mittleren Verweilzeit von selbst, d. h. *spontan* in den Grundzustand zurück. Da bei diesem Prozess verschiedenartige Atome und Moleküle in der Gasflamme beteiligt sind, entstehen Lichtquanten

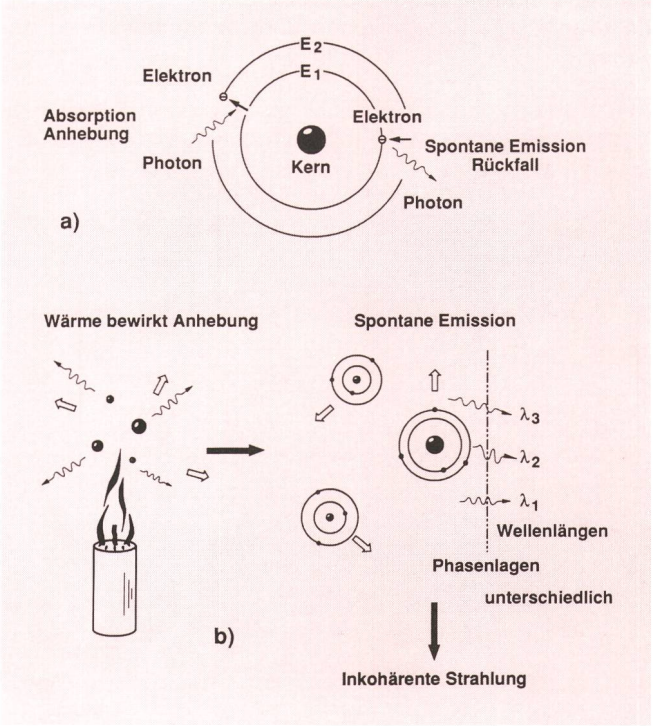


Fig. 3 Atommodell und Lichterzeugung
a) Absorption, spontane Emission
b) Kerzenlicht und die physikalische Erklärung

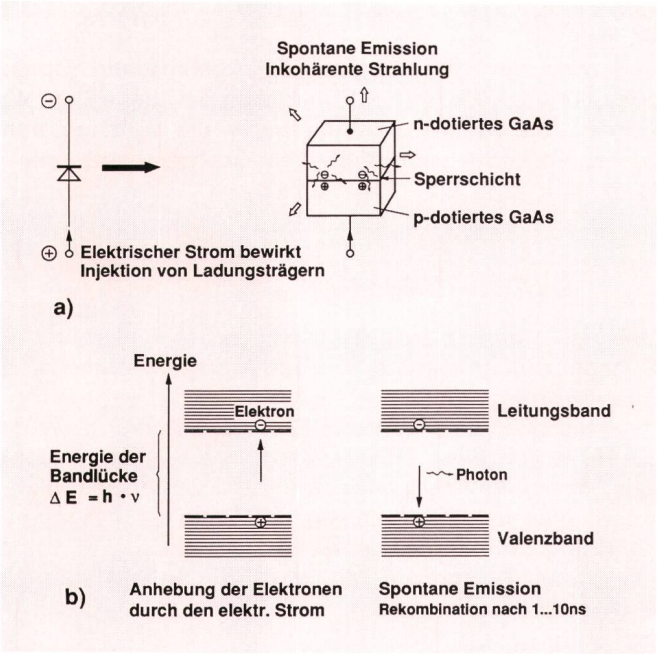


Fig. 4 Lichterzeugung in Halbleitern
a) Spontane Emission
b) Energieniveau-Diagramm

unterschiedlicher Energien bzw. Wellenlängen. Das in alle Richtungen abgestrahlte Licht einer solchen Quelle setzt sich daher aus vielen Frequenzen zusammen. Auch besteht bei dieser *spontanen Emission* keine Gesetzmässigkeit bezüglich der Phasenlage und Ausbreitungsrichtung zwischen den Lichtquanten. Diese Strahlung wird als zeitlich und räumlich inkohärentes Licht bezeichnet.

Damit Emissionsprozesse andauern können, muss fortwährend Energie zugeführt werden, was im Beispiel der Kerze durch den chemischen Verbrennungsvorgang geschieht.

32 *Lichterzeugung in Halbleitern, spontane Emission*

In Halbleitern können Atome und Moleküle auch mit einem elektrischen Strom angeregt werden, wie *Figur 4* zeigt. Der Strom erzeugt in der pn-Sperrschicht eine hohe Dichte von Elektronen und Löchern, die sich nach kurzer Verweilzeit wieder vereinen (rekombinieren). Dieser Prozess setzt Energie proportional zur *Bandlücke* des entsprechenden Materials frei.

Um mit Halbleitern Licht zu erzeugen, ist es jedoch nötig, dass ein *direkter Bandübergang* im verwendeten Material vorliegt Diese Forderung wird vor allem mit Halbleitermaterialien der nach dem Periodischen System der Elemente benannten *III-V-Verbindungen* und deren Mischungen erfüllt. In Betracht fallen die Mischhalbleiter GaAs (Galliumarsenid), AlAs (Aluminiumarsenid), InP (Indiumphosphid) und InGaAs (Indium-Galliumarsenid) und Mischungen davon *(Fig. 5)*. Um mehrere Schichten solcher Mischkristalle ohne mechanische Spannung zu verbinden, ist eine Fehlanpassung zwischen den Gitterkonstanten zu vermeiden. Daher sind nur Materialien mit praktisch gleichen Gitterkonstanten kombinierbar (ausgezogene Verbindungslinien, horizontal).

Wie *Figur 6a* weiter veranschaulicht, werden Halbleiter, deren Maxima und Minima der Bänder direkt übereinander liegen, als direkte Halbleiter bezeichnet. Das häufigste Beispiel einer Halbleiter-Lichtquelle bildet eine Sperrschicht aus dem GaAs-Mischkristall. Werden *L*icht-*E*mittierende *D*ioden LED aus diesem binären Mischkristall hergestellt, so strahlen sie Licht im ersten Lichtfenster bei $\lambda = 870$ nm ab.

Kein Licht, sondern nur Wärme wird im Gegensatz dazu bei den indirekten Halbleitern wie Si (Silizium), Ge (Germanium) und Se (Selen) erzeugt *(Fig. 6b)*, bei denen der Elektronenübergang schräg abläuft und die Energie in

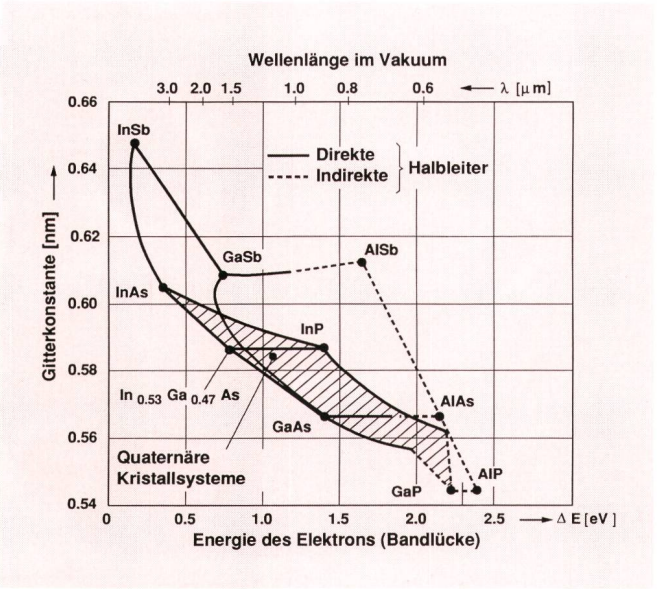


Fig. 5 Gitterkonstante in Funktion der Bandlücken-Energie und der Vakuum-Lichtwellenlänge in III-V-Halbleitermaterialien

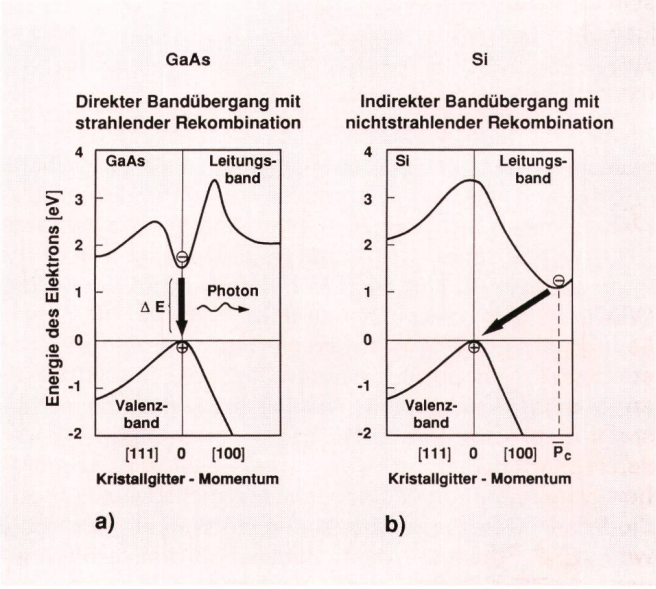


Fig. 6 Bandstrukturen zweier Halbleiter
a) Galliumarsenid, direkter Bandübergang mit Lichtemission
b) Silizium, indirekter Bandübergang ohne Lichterzeugung

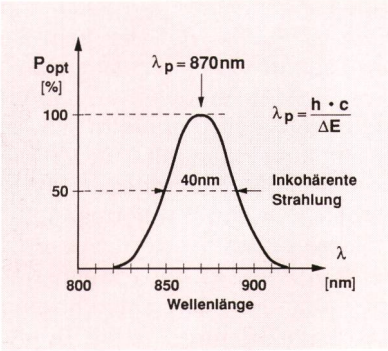


Fig. 7 Strahlungsspektrum einer Lichtemittierenden Diode (LED)

Form eines Impulses an das Kristallgitter übertragen wird. Diese Materialien sind ausserdem reine Halbleiter [15, 16].

Wie erwähnt, bewirkt ein Strom durch die Sperrschicht eines direkten Halbleiters eine Anregung einer Minderheit von Atomen und Molekülen. Es liegt ein *normaler Besetzungszustand* vor. Auch hier rekombinieren anschliessend die Elektronen und Löcher miteinander und es entsteht Licht. Die dabei emittierte Energie hat den Wert ΔE, entsprechend der Energiedifferenz der Quantenbahnen bzw. der Bandlücken-Energie im Halbleiter (GaAs: $\Delta E = 1{,}43$ eV). Mit der von *Max Plank* aufgestellten Formel lässt sich die Lichtwellenlänge im Vakuum berechnen:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = 870 \text{ nm} \qquad (1)$$

$h = 6{,}625 \cdot 10^{-34} Ws^2$; Plank'sche Konstante
$c = 2{,}998 \cdot 10^8 m/s$; Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$1eV = 1{,}602 \cdot 10^{-19} Ws$; Umrechnung in SI-Einheiten

Dieses Phänomen der Lichterzeugung wird als *spontane Emission* bezeichnet. Die Strahlung weist ähnliche Eigenschaften wie jene einer Kerze auf, mit dem Unterschied, dass die spektrale Breite mit 40 nm wesentlich kleiner ist *(Fig. 7)*. Die abgestrahlten Photonen haben auch hier keine Phasenbeziehung untereinander, und das Licht ist deshalb inkohärent.

33 Lichterzeugung in Laserdioden, stimulierte Emission

Wird durch weiteres Erhöhen des Stromes die Anzahl Ladungsträger gesteigert, so ergibt sich einmal der Zustand, wo nahe der Bandkante mehr Ladungsträger in angeregtem Zustand als im Grundzustand sind. Man spricht hier von einer Besetzungsinversion oder kurz Inversion. Der Vorgang zum Erreichen dieser Inversion heisst Pumpen *(Fig. 8a)*. Wird die aktive Zone der Laserdiode als dünner und schmaler Streifen ausgebildet und wird durch zusätzliches Anbringen von zwei Spiegeln das Licht mehrfach im Lasermedium hin- und herreflektiert, entsteht eine intensive Strahlung *(Fig. 8b)*. Da die Streifenhöhe und die Breite sehr klein sind, kann sich das Licht praktisch nur *längs* des Streifens ausbreiten, und es entsteht deshalb eine *gerichtete Lichtwelle*. In diesem optischen Resonanzraum, dem *Fabry-Perot-Resonator*, kommt es zu einer positiven Überlagerung (konstruktiven Interferenz) der Lichtwellen; es entsteht eine stehende optische Welle *(Fig. 8c)*. Die Gleichung (2) beschreibt die dabei zu erfüllende Interferenzbedingung im Resonator:

$$L = q \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot n} \qquad (2)$$

L = Resonatorlänge
q = ganze Zahl
λ = Lichtwellenlänge im Vakuum
n = Brechungsindex des Resonatormaterials

In Worten ausgedrückt: Die Distanz zwischen den Spiegeln muss einem ganzzahligen Vielfachen der halben Lichtwellenlänge im Material entsprechen.

Ist die im Resonator sich ausbreitende Lichtwelle intensiv genug, beeinflusst sie neue Ladungsträger, die kurz zuvor in grosser Zahl angehoben wurden. Bei dieser Beeinflussung werden nun die angeregten Zustände «gewaltsam» zur Emission eines neuen, zweiten Photons angeregt (stimuliert). Licht wird hier verstärkt, wie in *Figur 9* dargestellt ist. Dabei nimmt das neu erzeugte Photon die gleiche Ausbreitungsrichtung ein wie das einfallende. Die Frequenz des verstärkten Lichtes stimmt zudem mit jener der anfänglich vorhandenen Lichtwelle überein. Auch überlagern sich die verschiedenen Wellen so, dass die sich ausbreitende Welle phasenrichtig verstärkt wird. Fabry-Perot-Laserdioden strahlen deshalb kohärente Strahlung ab, und zwar im wesentlichen nur in Richtung der Resonatorachse.

Der beschriebene Vorgang wird als *stimulierte Emission* bezeichnet, weil ein anfänglich vorhandenes Photon den Rekombinationsprozess stimuliert bzw. erzwingt und ein weiteres Photon entsteht.

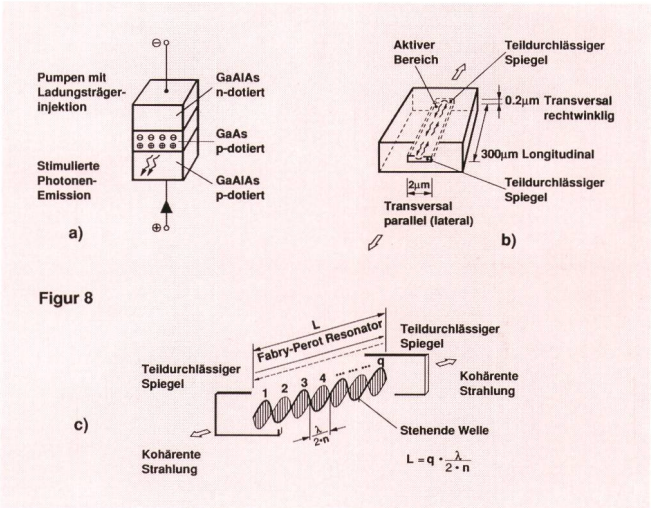


Fig. 8 Lichterzeugung in Laserdioden
a) Elektrisches Pumpen im Laserchip
b) Fabry-Perot-Resonator
c) Stehende, optische Welle; Interferenzbedingung im Resonator

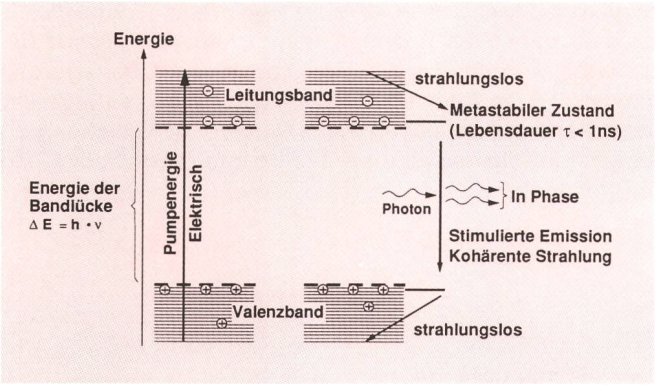


Fig. 9 Energieniveau-Diagramm von Laserdioden
Stimulierte Emission mit kohärenter Strahlung

Es sei hier angefügt, dass in Wirklichkeit bei Laserdioden das Rückfallen der Elektronen in den Grundzustand über mehrere Energieniveaus erfolgt. Man spricht hier von einem Quasi-Vier-Niveausystem, wie dies in der Figur 9 angedeutet ist. Laserstrahlung entsteht nur beim Übergang vom Leitungsband ins Valenzband.

Viele Arten von Halbleiterlasern sind heute auf dem Markt verfügbar, die sich im Aufbau und dem Herstellungsprozess unterscheiden. Am meisten verbreitet sind die *Doppel-Heterostrukturen DH (Fig. 10a).* Hier liegt die aktive Schicht beispielsweise aus GaAs in zwei sie umgebenden Schichten aus GaAlAs eingebettet (GaAs-Sandwich). Aus dem Energieniveau-Diagramm ist ersichtlich *(Fig. 10b),* dass ein vorwärtsgepolter Strom die Elektronen waagrecht von links oben (n-dotiertes Material) und die Löcher von rechts unten (p-dotiertes Material) in die aktive Zone fliessen lässt. Dank der Heterobarrieren wird ein weiteres Abfliessen der Ladungsträger aus der aktiven Zone verhindert, dort entsteht eine Anhäufung von Ladungsträgern (Charge Carrier Confinement). Da zugleich der kleinste Bandabstand in der aktiven Zone vorliegt, vereinen sich die Ladungsträger in diesem Bereich, womit die Lichtverstärkung nur hier entsteht.

Wird die Lichtausbreitung im Streifen untersucht, so erkennt man, dass der Brechungsindex der umgebenden GaAlAs-Schichten etwas kleiner ist als jener in der aktiven GaAs-Schicht *(Fig. 10c).* Damit ergibt sich eine Lichtführung der Strahlen längs der Sperrschicht durch Totalreflexion an den Schichtübergängen, wie dies aus der Theorie der Lichtwellenleiter bekannt ist (Optical Confinement).

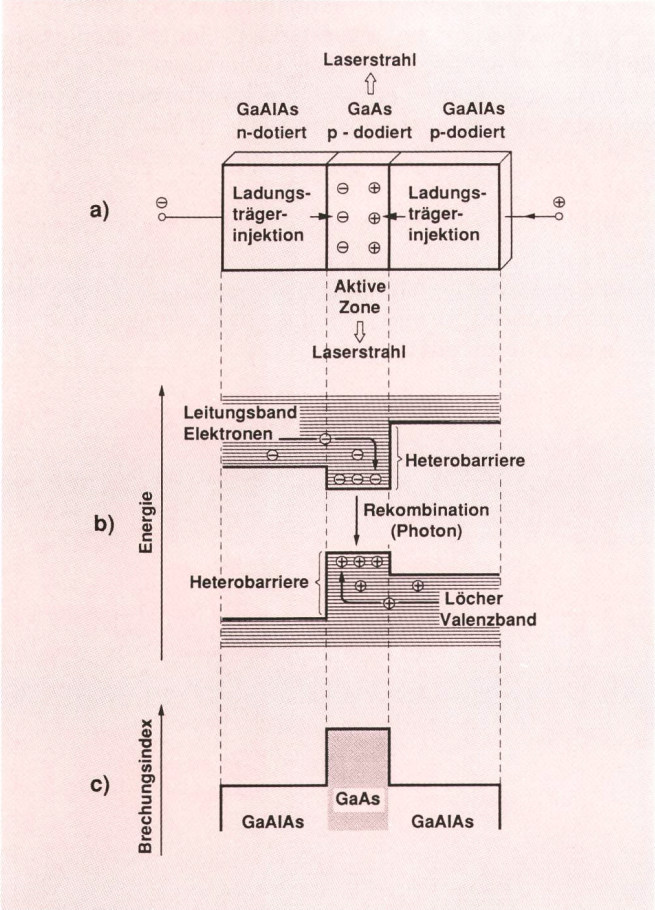


Fig. 10 Aufbau und Funktionsprinzip einer Laserdiode mit Doppelheterostruktur
a) pn-Sperrschichtaufbau
b) Energieniveau-Diagramm mit Heterobarrieren bei vorwärts gepoltem Strom (Charge Carrier Confinement)
c) Brechungsindex-Profil (Optical Confinement)

4 Lasermoden

Strahlt eine Laserdiode kohärentes Licht ab, so hat sich im Resonator gleichzeitig eine stehende, optische Welle gebildet, weil das Licht hin- und herreflektiert wird. Die Wellenfronten verlaufen dabei parallel zu den teildurchlässigen Resonatorspiegeln. Diese stehende Welle besteht aus *longitudinalen* und *transversalen Moden (Fig. 11).* Longitudinale Moden stellen die Situation in Richtung der Resonatorachse, also in der Z-Achse, dar. Transversale Moden drücken die Verhältnisse rechtwinklig zur Resonatorachse aus (X- und Y-Richtung).

Die *transversalen Moden* lassen sich in planparalle und rechtwinklig zur Sperrschicht schwingende unterteilen.

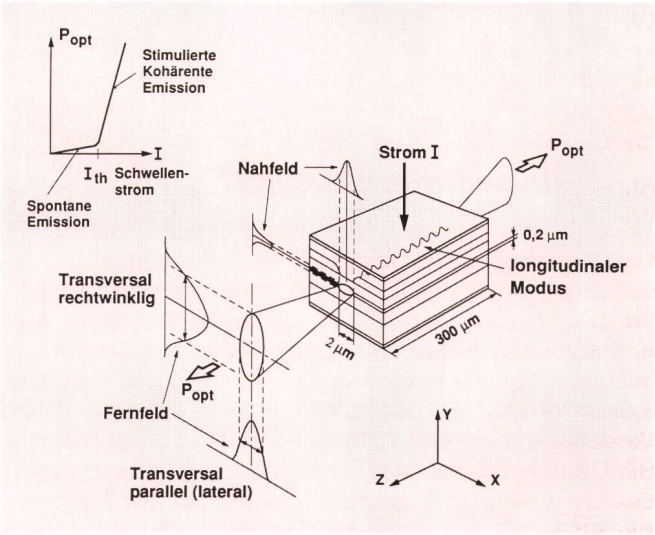


Fig. 11 Lasermoden im Halbleiterchip
Links oben: optische Leistung in Funktion des Laserstroms

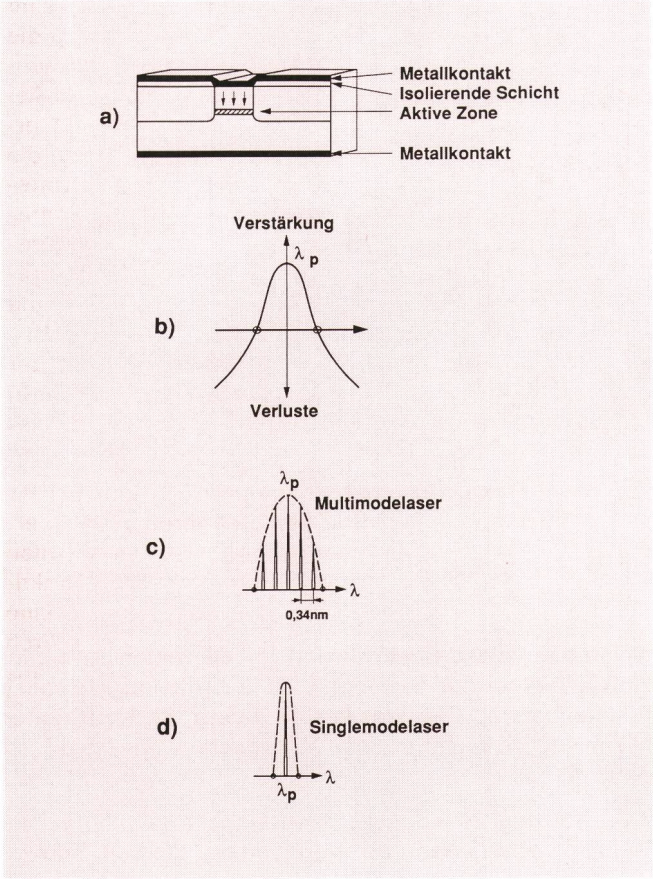


Fig. 12 Eigenschaften von Laserdioden
a) Aufbau
b) Verstärkungskurve
c) Mehrmodenlaser (Mulitmode Laser)
d) Einmodenlaser (Single Mode Laser)

Planparallele, in X-Richtung schwingende Moden werden oft auch laterale Moden genannt. Durch geometrisch kleine Abmessungen der aktiven Zone gelingt es heute, die Abstrahlung auch lateral nur einmodig zu halten, dies sowohl bei «Index Guided» Lasern (IGL) als auch bei «Gain Guided» Lasern (GGL).

Figur 8 verdeutlicht die Entstehung der stehenden Welle im *longitudinalen Modus* im aktiven Laserstreifen und Gleichung (2) beschreibt die Interferenz-Bedingung. Emittiert beispielsweise eine Laserdiode mit einer Resonatorlänge $L = 300\ \mu m$ Licht bei $\lambda = 850$ nm (Brechungsindex von GaAs: $n \sim 3{,}5$), so zeigt die Rechnung, dass 2470 Halbschwingungen im Resonator Platz finden.

Ändert die Zahl q jeweils um eins, so ergeben sich neue Wellenlängen, die um $\Delta\lambda = 0{,}34$ nm verschieden sind.

Um Verstärkung zu erhalten, muss die Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone einen gewissen kritischen Wert überschreiten. Da der Laser als Lichtverstärker funktioniert, weist er eine optische Verstärkung auf, die mit einer typischen Verstärkungskurve dargestellt werden kann *(Fig. 12a+b)*. Bei Halbleiterlasern hat diese Verstärkungskurve ungefähr die Form der gezeigten Hüllkurve, gegeben durch die unterschiedlich langen Energieübergänge vom Leitungs- ins Valenzband. Die Wellenlänge λ_p, bei der das Verstärkungsmaximum auftritt, wird dabei durch die Bandlücken-Energie des Halbleitermaterials bestimmt (Gleichung 1).

Wie gezeigt, können sich mehrere longitudinale Moden bilden, die sich in der Wellenlänge um 0,34 nm unterscheiden. Abhängig von der Breite der Verstärkungskurve werden mehr oder weniger longitudinale Moden verstärkt. Erscheinen mehrere longitudinale Moden unter dieser Hüllkurve, liegt ein *Multimodelaser* vor *(Fig. 12c)*.

Durch Erhöhen der Resonatorgüte mit verbesserter Laserstruktur, Materialwahl und Injektionsart erreicht man, dass praktisch nur noch *ein* longitudinaler Modus unter der Verstärkungskurve in Erscheinung tritt *(Fig. 12d)*. Man spricht in diesem Fall von einem *Singlemodelaser* [15, 16, 20].

5 *Halbleiterverstärker SOA (Semiconductor Optical Amplifier)*

Ein Halbleiter-Laserverstärker-Chip ist ähnlich wie eine gewöhnliche Laserdiode aufgebaut, mit dem Unterschied, dass die Reflexion beider Lichtaustrittsflächen mit Antireflexschichten so klein wie möglich gehalten und damit die Resonatoreigenschaft aufgehoben wird *(Fig. 13)*. Dadurch wird ein Hin- und Herpendeln der Welle verhindert [7, 8, 9, 10].

Zum Ein- und Auskoppeln von Lichtsignalen sind die Ein- und Ausgangsfacetten mit Faseranschlüssen verbunden. Wird der Laserchip mit einem Strom wenig unterhalb der Laserschwelle vorgespannt, bildet sich in der optisch aktiven Zone eine grosse Zahl angeregter Atome (Inversionszustand), und es entsteht eine *verstärkte Spontanemission* ASE (*A*mplified *S*pontaneous *E*mission).

Wird nun zusätzlich Licht von aussen in die aktive Zone eingestrahlt, entsteht stimulierte Emission. Dadurch wird die Emission neuer Photonen erzwungen, die so zur Verstärkung des Eingangslichtes führt. Da es sich hier um einen Laser ohne reflektierende Spiegelflächen handelt, die Verstärkung also in *einem* Durchgang erfolgt, spricht man von einem *Wanderwellenverstärker* TWA (Traveling Wave Amplifier). Halbleiterverstärker weisen

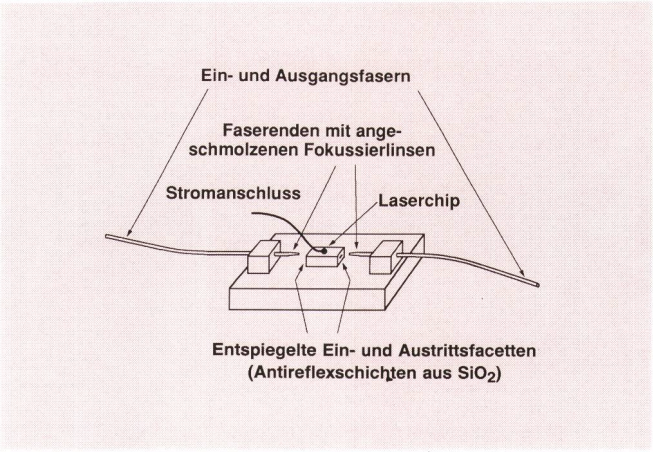


Fig. 13 Aufbau eines Halbleiterverstärkers

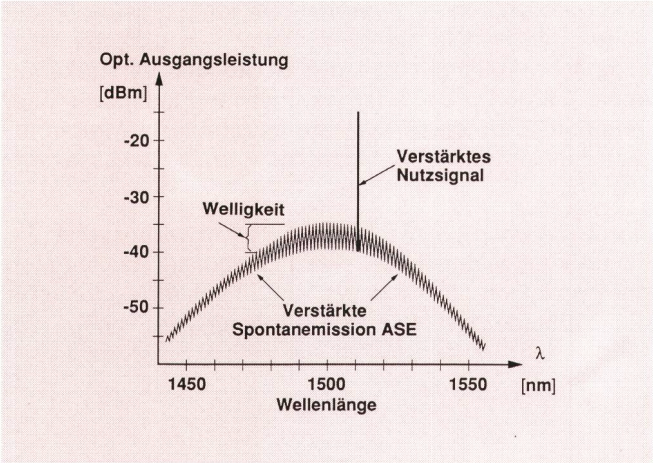


Fig. 14 Halbleiterverstärker
Verstärkung in Funktion der Wellenlänge
ASE Amplified Spontaneous Emission

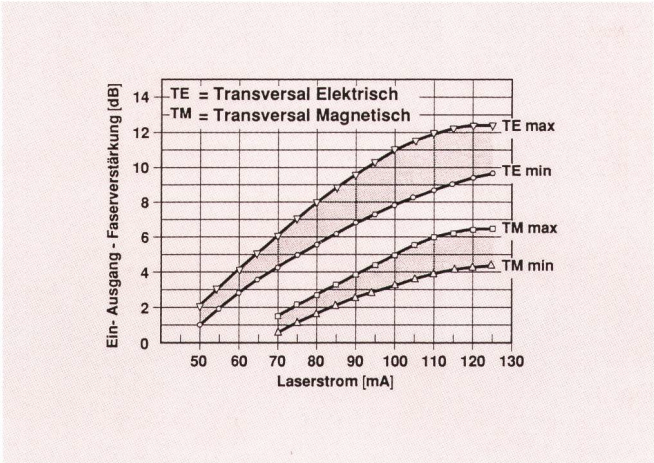


Fig. 16 Verstärkungsschwankungen bei TE- und TM-Polarisation in Funktion des Laserstroms
Die Maximal- und Minimalwerte ergeben sich durch die Welligkeit, wobei mit dem Laserstrom die Wellenlänge verändert wird

Verstärkungsfaktoren im Bereich von 10...20 dB auf, gemessen zwischen der Ein- und Ausgangsfaser. Sie können in beiden Richtungen betrieben werden (bidirektional). Dies bringt den Vorteil, dass auf einer Faser Informationen in beiden Richtungen übertragen werden können. Als Nachteil erweisen sich die von Steckern und Spleissstellen herrührenden Reflexionen, die Störungen verursachen können.

Die in *Figur 14* dargestellte Verstärkungsbandbreite weist mehr oder weniger grosse periodische Schwankungen auf, die als Verstärkungswelligkeit (Gain Ripple) bezeichnet werden und von Restreflexionen herrühren (Spuren von Fabry-Perot Resonatormoden). Optische Halbleiterverstärker mit markanter Welligkeit in der Grössenordnung von 3 dB werden daher auch als *N*ear *T*raveling *W*ave *A*mplifier NTWA bezeichnet [17, 19, 20, 21].

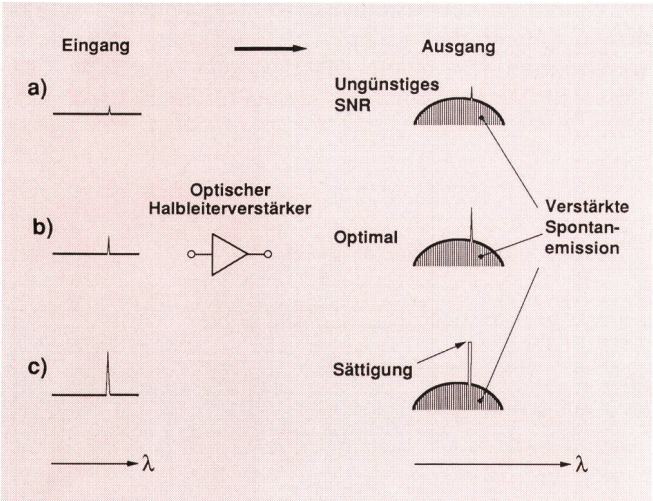


Fig. 15 Verstärkungssituationen
a) Eingangssignal zu klein, ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)
b) Eingangssignal angepasst, optimale Verstärkung
c) Eingangssignal zu gross, Sättigung des Verstärkers
λ Wellenlänge

Gelingt es, diese Restreflexion mit perfekten Antireflexionsschichten zu beseitigen, ist auch keine Welligkeit feststellbar. In der Praxis sind heute Restreflexionen kleiner 10^{-4} erreichbar, was Welligkeiten um 0,5 dB ergibt.

Figur 15 zeigt den qualitativen Aspekt des optischen Signals vor und nach der Verstärkung. Ein sehr schwaches Eingangssignal wird verstärkt und erscheint am Ausgang in Verbindung mit dem verhältnismässig starken Rauschen der Spontanemission. Daraus ergibt sich ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis SNR (Signal to Noise Ratio). Wird anderseits ein sehr grosses Eingangssignal verstärkt, erreicht der optische Verstärker die Sättigung und der Verstärkungsfaktor wird herabgesetzt. Es muss daher beachtet werden, dass nur ein angepasstes mittleres Eingangssignal optimal verstärkt werden kann.

Da die optisch aktive Zone eines Halbleiter-Laserverstärkers einen rechteckigen Querschnitt aufweist, ist er empfindlich auf die Polarisation des eingestrahlten Lichtes. In einer rechteckigen Streifenleiterstruktur eines Laserverstärkers wird planparallel zur Sperrschicht polarisiertes Licht (TE-Polarisation: *T*ransversal *E*lektrisch) bevorzugt verstärkt *(Fig. 16)*. Wird Licht mit ändernder Polarisation in einen Halbleiterverstärker eingegeben, treten störende Leistungsschwankungen im Ausgangssignal auf. Bei neueren Entwicklungen mit besser angepassten Laserstrukturen ist es gelungen, die Polarisationsempfindlichkeit auf weniger als 0,5 dB zu vermindern.

6 *Optische Faserverstärker OFA (Optical Fibre Amplifier)*

Wie erwähnt, bestehen mehrere Typen optischer Faserverstärker. Da heute die Entwicklung der *erbiumdotierten Faserverstärker* (EDFA) am weitesten fortgeschritten ist und die dort erzielten Verstärkungsfaktoren am höchsten sind, wird vor allem dieser Verstärker näher beschrieben.

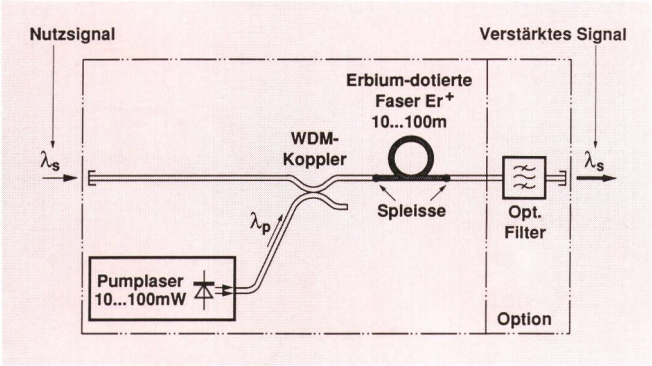


Fig. 17 Schematischer Aufbau eines optischen Faserverstärkers
WDM Wavelength Division Multiplexer

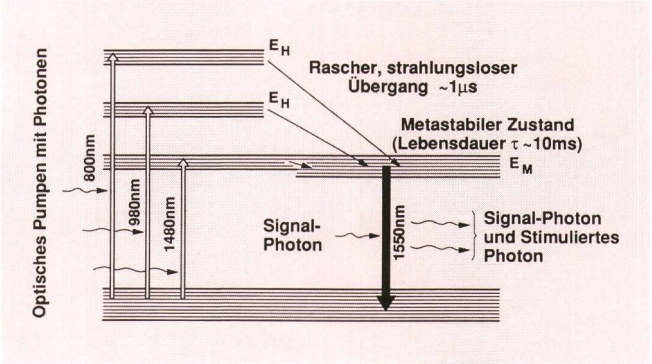


Fig. 19 Energieniveau-Diagramm bei erbiumdotierten Faserverstärkern

61 Aufbau eines optischen Faserverstärkers

Die optischen Faserverstärker bestehen aus drei Grundkomponenten *(Fig. 17)*:

- einer 1...100 m langen Glasfaser, mit Spuren von Erbium-Atomen angereichert (Konzentration der Atome ungefähr 10...1000 ppm)
- einem Pumplaser mit einer Leistung im Bereich von 10...500 mW
- und einem wellenlängenselektiven Koppler WDM (*W*avelength *D*ivision *M*ultiplexer).

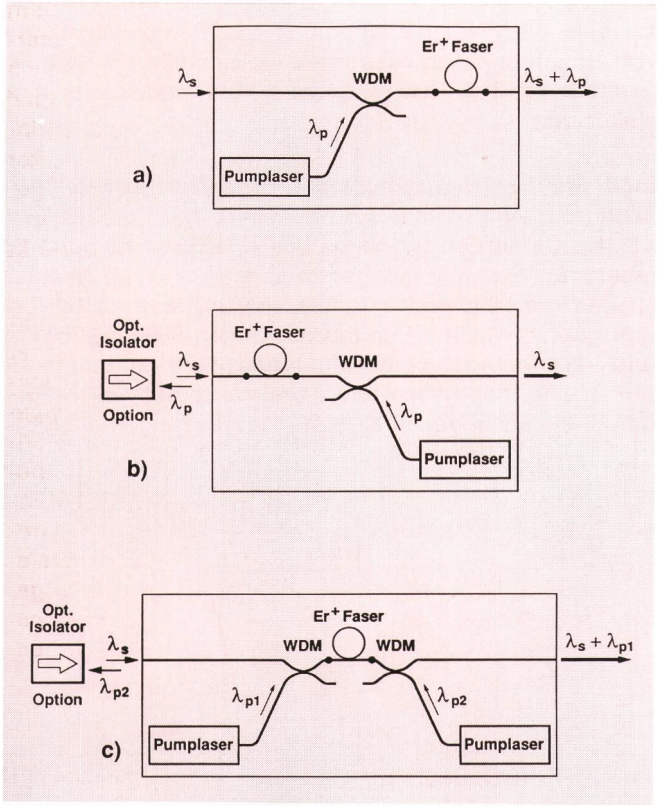


Fig. 18 Pumparten
a) Pumpen in Richtung des Nutzsignals (Co-Propagation)
b) Pumpen in Gegenrichtung zum Nutzsignal (Counter-Propagation)
c) Bidirektionales Pumpen
λ Signalwellenlänge
λ Pumpwellenlänge
Er*Faser mit positiven Erbiumionen dotierte Faser
WDM Wellenlängenmultiplexer

In vielen Anwendungen ist es zudem nötig, das störende Pumplicht und jenes der verstärkten Spontanemission mit einem optischen Filter abzublocken. Das Nutzsignal und die optische Pumpleistung werden im Koppler zusammengeführt und dem erbiumdotierten Faserteil zugeleitet. Die Pumpleistung kann dabei sowohl in der gleichen Richtung wie das zu verstärkende Signal als auch in Gegenrichtung dazu eingespeist werden. Daraus ergeben sich drei mögliche Pumparten: Pumpen in Richtung des Nutzsignals *(Co-Propagation)*, in Gegenrichtung des Nutzsignals *(Counter-Propagation)* und *bidirektionales* Pumpen *(Fig. 18)*.

Die erbiumdotierte Glasfaser ist ähnlich wie eine gewöhnliche Monomodefaser (13 % GeO_2 / 87 % SiO_2) zusammengesetzt, aber deren Kern ist mit wenigen Ionen *seltener Erden* aus dem Periodischen System der Elemente angereichert wie Erbium Er, Praseodym Pr, Neodym Nd und Ytterbium Yb. Sie haben die Eigenschaft, dass an den Atomkern gebundene Elektronen auf ein höheres Energieniveau angehoben werden können, wenn sie der Lichtstrahlung einer bestimmten Wellenlänge ausgesetzt werden.

62 Verstärkungsvorgang im EDFA (Erbium-Doped Fibre Amplifier)

Die optische Energie eines Pumplasers regt die Erbiumionen im Kern einer Glasfaser an, wodurch die Lichtwelle des Eingangssignals in ihrem Lauf vom Eingang zum Ausgang – ohne reflektiert zu werden – verstärkt wird. Auch hier handelt es sich um einen optischen Wanderwellenverstärker.

Der Lichtverstärkungsprozess *(Fig. 19)* beginnt, wenn Photonen der Pumpquelle ihre Energie einem Erbiumion abgeben. Dieses wird aus dem stabilen Grundzustand auf ein höheres Energieniveau E_H gehoben. Dieser Zustand ist jedoch instabil, so dass das Ion je nach Anregungsart in den metastabilen Zustand E_M fällt, ohne dabei Strahlung abzugeben. Es verweilt nun während einer verhältnismässig langen Zeit von ungefähr 10 ms in diesem metastabilen Zustand. Wenn nichts weiteres pas-

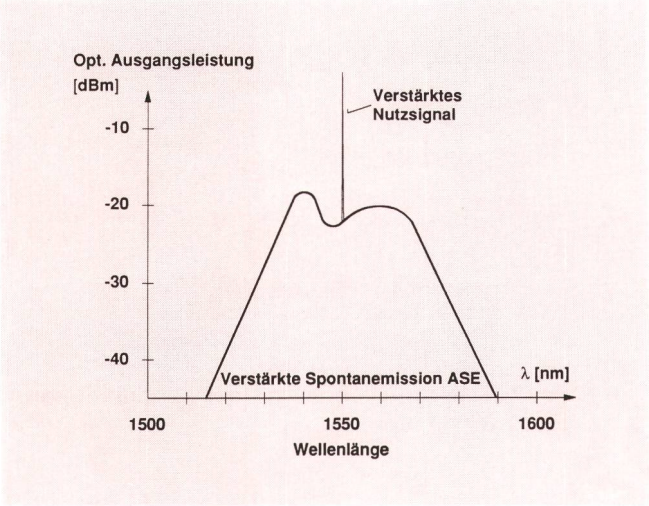


Fig. 20 Optische Ausgangsleistung in Funktion der Wellenlänge

siert, fällt danach das Ion spontan unter Abgabe eines Photons in den Grundzustand zurück. Diese Lichtabgabe wird als Fluoreszenz im Spektrum der verstärkten Spontanemission bezeichnet *(Fig. 20)* [3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 18, 21, 24].

Trifft jedoch während dieser Zeit ein ankommendes Signal-Photon der Wellenlänge um $\lambda = 1550$ nm auf das angeregte Erbiumion des Glasgefüges auf, so fällt das Ion gewaltsam unter Freigabe eines neuen, zusätzlichen Photons der gleichen Wellenlänge und Phase in den Grundzustand zurück. Dieses geschieht mit allen in der Glasfaser vorhandenen Erbiumionen und dauert an, solange genügend optische Pumpleistung nachgeliefert wird. Das Fluoreszenzspektrum weist in diesem Fall eine zusätzliche, markante Leistungsspitze bei der Wellenlänge des ankommenden Signals auf *(Fig. 20)*.

Es ist wichtig zu wissen, dass mit einer erbiumdotierten Faser nur Wellenlängen zwischen ungefähr 1530 nm und 1570 nm verstärkt werden können. Verschieden breite Verstärkungsspektren können durch zusätzliche Dotierung mit Spuren von Phosphor P, Aluminium Al oder Germanium Ge erreicht werden *(Fig. 21)*.

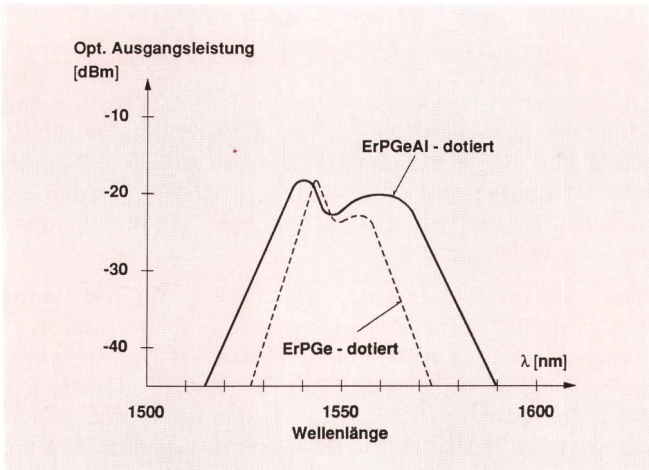


Fig. 21 Unterschiedliche Verstärkungsspektren mit zusätzlichen Dotierungsmaterialien

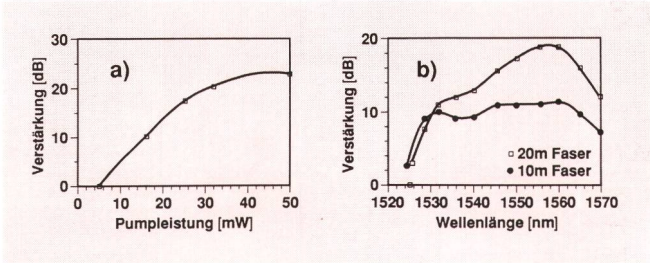


Fig. 22 Eigenschaften der erbiumdotierten Faserverstärker
a) Verstärkung in Funktion der Pumpleistung
b) Verstärkung in Funktion der Wellenlänge für verschiedene Faserlängen

Der Verstärkungsfaktor ist von der Pumpleistung abhängig *(Fig. 22a)*. Durch Optimieren der Faserlänge kann zudem bei gegebener Pumpleistung entweder eine hohe Verstärkung oder eine grosse Bandbreite eingestellt werden *(Fig. 22b)*.

Die erbiumdotierte Faser muss mit einer Lichtwellenlänge gepumpt werden, deren Photonenenergie einem Energieniveau E_H im Absorptionsspektrum des Erbiums entspricht. Dieses ist stets höher als das des metastabilen Zustandes E_M. Aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen gelten für diesen Verstärker die Pumpwellenlängen bei 800 nm, 980 nm und 1480 nm als die aussichtsreichsten. Die grosse Toleranzbreite des Erbiums auf Verschiebungen in der Pumpwellenlänge von ungefähr 20 nm gestattet es, anstelle von teuren Einmodenlasern auch günstigere Multimode-Laser einzusetzen.

Eine wichtige Eigenschaft zur Charakterisierung optischer Verstärker bildet der Rauschfaktor. Er ist definiert als das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) am Eingang zu jenem am Ausgang des Verstärkers. Praktische Ausführungen von erbiumdotierten Faserverstärkern weisen bei den gebräuchlichen Pumpwellenlängen 800 nm, 980 nm und 1480 nm unterschiedliche Rauschfaktoren auf. In *Figur 23* sind theoretisch ermittelte Werte bei verschiedenen Pumpleistungen und Verstärkungen dargestellt [25].

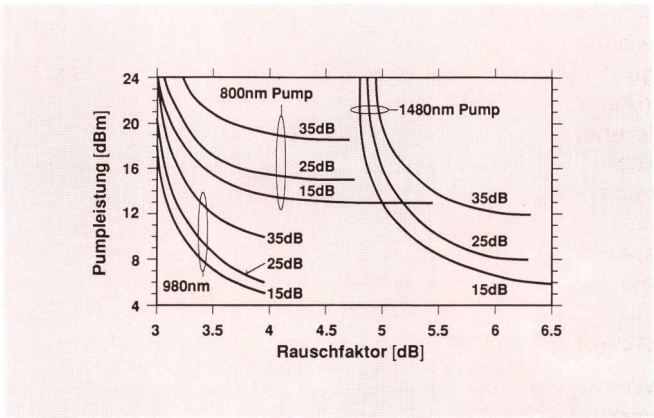


Fig. 23 Rauschfaktoren bei verschiedenen Pumpleistungen und Pumpwellenlängen
Als Parameter:
15 dB, 25 dB, 35 dB Kleinsignalverstärkung

63 Vergleich des erbiumdotierten Faserverstärkers gegenüber dem optischen Halbleiterverstärker

Vorteile:

- grösserer Verstärkungsfaktor
- Polarisationsunabhängigkeit
- höhere Ausgangsleistung
- praktisch kein Kanalübersprechen im Sättigungsbereich des Verstärkers
- geringes Rauschen
- keine Verstärkungswelligkeit

Nachteile:

- optische Ausgangsleistung vorhanden bei unerwünschter Wellenlänge (vom Pumplaser)
- verhältnismässig hoher Pegel der verstärkten Spontanemission
- grössere geometrische Abmessungen
- geringe Aussichten für eine planare Integration.

7 Einsatzarten

Optische Verstärker können in einem Glasfasernetz auf verschiedene Arten eingesetzt werden:

- als Linienverstärker in der Übertragungsstrecke eingeschlauft
- als Treiber- oder Leistungsverstärker, direkt der Sendelaserdiode nachgeschaltet
- als Vorverstärker im Empfangsbereich

71 Linienverstärker (Line Amplifier)

In der Einsatzart als Linienverstärker *(Fig. 24)* kann die erbiumdotierte Faser direkt in die Faserstrecke eingespleisst werden. Optische Linienverstärker können entweder am Standort der erbiumdotierten Faser oder ferngepumpt werden.

Beim direktgepumpten optischen Verstärker wird die Pumpleistung in unmittelbarer Nähe der erbiumdotierten Faser eingekoppelt. In der ferngepumpten Konfiguration befindet sich stets ein bestimmter Streckenabschnitt des Glasfasernetzes zwischen Pumplaser und erbiumdotierter Faser. Da ausserhalb der Fernmeldegebäude oft rauhe Umgebungsbedingungen auftreten können, kann mit der ferngepumpten Betriebsart der temperaturempfindliche Pumplaser entweder in der geschützten Zentrale oder aber in einer abgesetzten Verteilanlage aufgestellt werden. Steht er in der Zentrale, entfällt zudem ein elektrisches Speisegerät. Die ferngespeiste Betriebsart erfordert allerdings einen Pumplaser bei 1480 nm, da nur in diesem *dritten Lichtfenster* die Faserdämpfung so klein ist, dass genügend Pumpleistung die verstärkte erbiumdotierte Faser erreicht.

Werden optische Verstärker in mehrkanaligen Fernsehverteilnetzen eingesetzt, können durch Reflexionen an Stecker und Spleiss erhebliche Störungen entstehen, die unter dem Begriff Mehrfach-Reflexionsrauschen (*M*ultiple *R*eflexion *N*oise, MRN) zusammengefasst werden. Diese Art von Rauschen entsteht durch das Überlagern von Lichtwellen (Interferenzen) zwischen dem ausgesendeten und dem mehrmals zwischen Steckern, Spleiss und anderen optischen Komponenten hin- und herreflektierten Licht. Der Einsatz optischer Verstärker als Linienverstärker verlangt daher Stecker und Spleisse mit sehr kleinen Reflexionsfaktoren, da sonst die berechneten Übertragungsdistanzen und Empfängerempfindlichkeiten nicht erreicht werden. Das Mehrfach-Reflexionsrauschen kann zudem mit *optischen Isolatoren* am Ein- und Ausgang der erbiumdotierten Faser eliminiert werden (Fig. 24). Ein optischer Isolator lässt Licht in der einen Richtung durch und sperrt dieses in der Gegenrichtung.

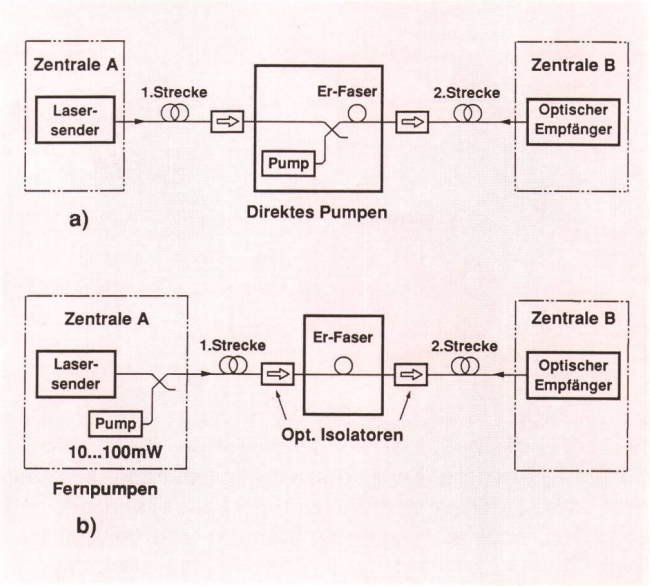


Fig. 24 Optische Linienverstärker mit unterschiedlichen Standorten der Pumpquelle
a) Direktes Pumpen, Standort bei der Erbium-Faser
b) Fernpumpen, Standort in der Zentrale

Werden Linienverstärker mit optischen Leistungen von 10...500 mW ferngepumpt, können diese hohen Intensitäten die Augen des Installations- und Betriebspersonals gefährden, so dass entsprechende Sicherheitsmassnahmen zu treffen sind.

72 Leistungsverstärker (Power Amplifier)

Wird der optische Verstärker in einer Netzkonfiguration als Leistungstreiber eingesetzt, so befindet er sich unmittelbar hinter dem modulierten Lasersender, also in der gleichen Umgebung wie die Lasersenderausrüstung *(Fig. 25)*. Meist wird dies eine Fernmeldezentrale mit ausgeglichenen Temperaturen sein oder eine abgesetzte, fernüberwachte Anlage. Die dortigen Umgebungsbedingungen wirken sich günstig auf die Lebensdauer der Pumplaser aus und haben zudem einen geringen Schaltungsaufwand für Temperatur- und Leistungsregelungen zur Folge.

Ein wichtiges Merkmal des Leistungsverstärkers bildet die Möglichkeit, ein optisches Signal auf einen Pegel

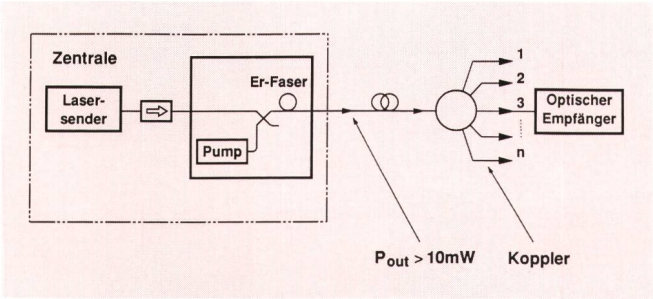


Fig. 25 Optischer Leistungsverstärker

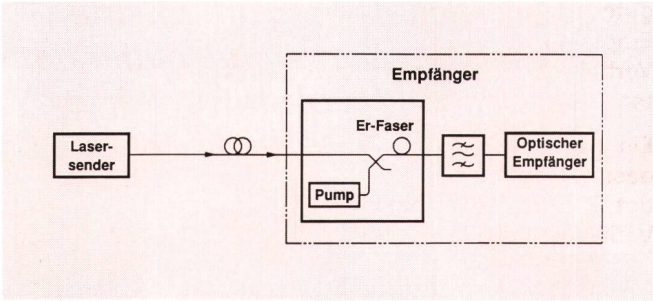


Fig. 27 Pumparten optischer Vorverstärker

von mehr als 10 dBm (> 10 mW) zu verstärken, ohne dabei das Nutzsignal merklich zu verzerren. Bei erbiumdotierten Faserverstärkern entsteht auch dann kein störendes Übersprechen in den Nachbarkanal, wenn die optische Ausgangsleistung im Bereich der Sättigungsgrenze liegt. Der Grund liegt darin, dass der Verstärkungsvorgang mit der Lebensdauer τ von 10 ms der angeregten Ionen gekoppelt ist. In dieser verhältnismässig langen Zeit bildet sich ein grosser Ionenvorrat (z. B. $2 \cdot 10^{14}$ Ionen bei 16 mW und 50 MHz). Über einen mittleren Zeitraum betrachtet, verhindert dieser Vorrat eine Verstärkungsänderung, die von einer viel geringeren Zahl angeregter Ionen des Nutzsignals (z. B. $2 \cdot 10^9$) herrührt.

Zum Vermeiden von Verzerrungen und Übersprechen genügt es, darauf zu achten, dass die Modulationsfrequenz einige Zehnerpotenzen höher liegt als der Term $2\pi\tau$. Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass mit einem erbiumdotierten Faserverstärker praktisch keine nichtlinearen Verzerrungen entstehen, wenn die Modulationsfrequenz oberhalb von einigen hundert kHz liegt. Wird beispielsweise ein Fernsehverteilsystem angenommen, so liegen die tiefsten Modulationsfrequenzen bei 50 MHz. Damit ist gewährleistet, dass hier praktisch keine nichtlinearen Verzerrungen auch bei stark gesättigtem Verstärker auftreten [2, 12, 21, 22, 23].

Diese Überlegungen zeigen, dass die verhältnismässig hohe optische Ausgangsleistung eines Faserverstärkers sehr geeignet für eine analoge, mehrkanalige Fernsehübertragung ist. Das Nutzsignal kann in wesentlich mehr Pfade aufgeteilt werden und kann damit mehrere Empfänger speisen. Das erklärt auch, warum im Teilnehmerbereich die ersten Versuchssysteme vor allem in Fernsehverteilnetzen zu finden sind.

Die Aufteilung der Lichtleistung in mehrere Pfade ist auch in digitalen Netzen ein Grunderfordernis, z. B. in den *passiven optischen Netzen* (*P*assive *O*ptical *N*etwork PON). So kann der Faserverstärker auch dort zur Kompensation der Aufteilverluste eingesetzt werden. Er lässt sich verhältnismässig einfach in beliebige Netzkonfigurationen wie Stern-, Multistern-, Bus- und Ring-Strukturen einfügen [26, 27].

Für die Zukunft sind auch analoge und digitale Übertragungen kombiniert auf einer Faser denkbar, wie *Figur 26* zeigt. Analoge und digitale Signale werden auf dieselbe Glasfaser geleitet und in optischen Verstärkern verstärkt. Auf der Gegenseite werden sie wieder getrennt und den Tausenden von Teilnehmern zugeleitet. Hier wird ein wesentlicher Vorteil des optischen Verstärkers sichtbar: Er verarbeitet gleichzeitig beliebige Signale mit unterschiedlichen Frequenzen, Bitraten und Modulationsarten und bildet in Verbindung mit der Glasfaserstrecke einen breitbandigen, *transparenten* Lichtkanal.

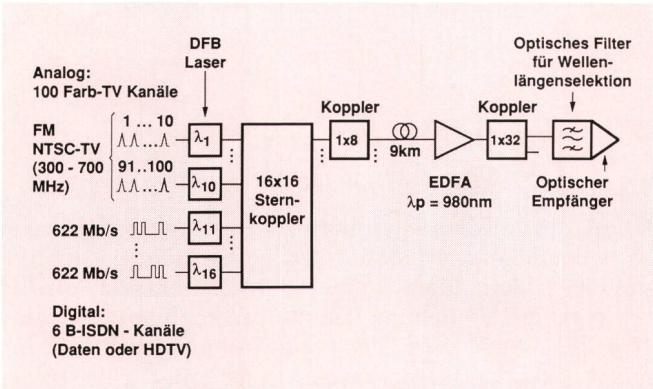


Fig. 26 Gemischtes, analog-digitales Netz (hypothetisch)
Analog: 300 Farbfernsehkanäle, frequenzmoduliert (FM)
Digital: Bitrate 622 Mb/s (~ 7000 Telefonkanäle), pulscodemoduliert (PCM)
HDTV Hochauflösendes Fernsehen
DFB Distributed Feedback
EDFA Erbium Doped Fibre Applifier

73 Vorverstärker (Pre-Amplifier)

In der Konfiguration als optischer Vorverstärker *(Fig. 27)* ist der Faserverstärker dem optoelektronischen Empfänger vorgeschaltet. Diese Empfangsart verbessert spürbar die Empfindlichkeit optischer Systeme.

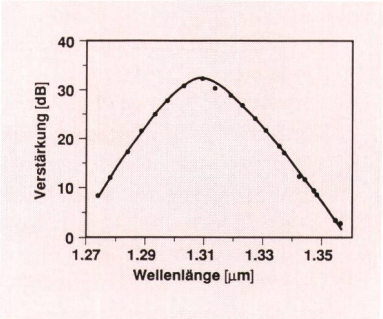
Das Ausgangssignal des Vorverstärkers besteht aus dem verstärkten Signal und der verstärkten Spontanemission ASE. Ist nun das Eingangssignal relativ klein, wird der Leistungsanteil der verstärkten Spontanemission verhältnismässig gross ausfallen, da er über das ganze Fluoreszenzspektrum auftritt, während das Nutzsignal nur eine schmale Spektrallinie aufweist. Ein schmalbandiges optisches Filter verhindert, dass diese verstärkte Spontanemission die Fotodiode sättigt. (Bei den vorangehenden Einsatzarten verhindert die Faserdämpfung der Strecke eine Sättigung der Fotodiode.)

Bei mehrkanaligen Fernsehverteilsystemen ist es üblich, dass der Empfangspegel mindestens -5 dBm (~ 320 µW) beträgt, damit das Träger-zu-Rausch-Verhältnis CNR (*C*arrier to *N*oise *R*atio) gross genug bleibt, um eine

gute Bildqualität zu gewährleisten. Tiefere optische Empfangspegel haben eine Verschlechterung dieses Verhältnisses zur Folge, das mit keinem – auch sehr guten – optischen Verstärker verbessert werden kann.

Ein Nachteil der Vorverstärkerkonfiguration liegt darin, dass *jeder* Empfänger einen optischen Verstärker benötigt. Dies hat eine Kostensteigerung zur Folge, die diese Variante für Fernsehverteilsysteme unattraktiv macht.

Fig. 28 *1,3 µm-Faserverstärker: Verstärkung in Funktion der Wellenlänge*
Pumpquelle: Titan-Saphir-Laser, 925 mW, λ = 1017 nm



8 Faserverstärker für den Lichtwellenbereich bei 1,3 µm

Heute arbeiten die meisten faseroptischen Systeme im Lichtwellenbereich bei 1310 nm. Wie erwähnt, sind leider die erbiumdotierten Faserverstärker nicht in diesem zweiten Lichtfenster verwendbar. Deshalb besteht ein grosses Interesse an der Faserverstärkerentwicklung in diesem Bereich. Neuste Untersuchungen mit anderen Materialien als Erbium haben gezeigt, dass auch Faserverstärker bei 1,3 µm herstellbar sind und gute Resultate liefern. Die zwei aussichtsreichsten Kandidaten beruhen auf Zirkoniumfluorid-Glasfasern, die mit Praseodym (Pr) und/oder Neodym (Nd) und Ytterbium (Yb) dotiert sind. Ihr Name, *ZBLAN-Fasern,* wird aus den Anfangsbuchstaben ihrer Komponenten gebildet: ZrF_4-BaF_2-LaF_3-ALF_3-NaF. *Figur 28* zeigt den erzielten Verstärkungsfaktor in Funktion der Wellenlänge. In diesem Beispiel diente ein Titan-Saphir-Laser mit einer Leistung von 925 mW bei der Wellenlänge λ = 1017 nm als Pumpquelle. Es ist damit zu rechnen, dass in absehbarer Zeit auch für das zweite Lichtfenster rauscharme, lineare Faserverstärker mit hoher Verstärkung auf dem Markt zur Verfügung stehen werden [28, 29, 30].

9 Auswirkungen optischer Verstärker auf künftige Telekommunikationsnetze

Die in letzter Zeit durchgeführten Versuche haben die vielen positiven Eigenschaften der erbiumdotierten Faserverstärker bestätigt. So wurde in einem Versuchsaufbau eine Datenrate von 2,5 GBit/s (entspricht 30 000 Telefonkanälen) praktisch fehlerfrei über eine Strecke von mehr als 500 km mit sieben kaskadierten Faserverstärkern übertragen [22, 24].

In einem anderen Laborversuch wurde mit Hilfe von erbiumdotierten Faserverstärkern und mehreren Stufen optisch passiver Koppler die Verteilung von 40 Fernsehkanälen an mehr als 65 000 Teilnehmer vorgeführt [23].

Diese erstaunlichen Ergebnisse zeigen den praktischen Nutzen und den starken Einfluss, den optische Verstärker auf künftige Telekommunikationssysteme ausüben werden. Fachleute sind der Meinung, dass Faserverstärker die optische Kommunikation in einem gewissen Sinn revolutionieren werden. So werden sie als Kabelverstärker in Transozeankabeln, in terrestrischen Fern- und Regionalnetzen, in Fernsehverteilnetzen und in Teilnehmeranschlussnetzen schon in nächster Zeit eingesetzt.

In all diesen Anwendungen bringt die neue Möglichkeit, mehr optische Leistung in mehrere Pfade aufzuteilen oder über eine grössere Distanz zu übertragen, Einsparungen bei der Glasfaser und bei den Verteilstationen, die letztlich zu kostengünstigeren Netzstrukturen führen werden. Optische Verstärker werden daher schon sehr bald als leistungsstarke Systemkomponenten in modernen Telekommunikationsnetzen anzutreffen sein.

Bibliographie

[1] *Nakagawa K.* et al. Trunk and Distribution Network Application of Erbium-Doped Fiber Amplifier. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[2] *Walker G. R.* et al. Erbium-Doped Fiber Amplifier Cascade for Multichannel Coherent Optical Transmission. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[3] *Miniscalco W. J.* Erbium-Doped Glasses for Fiber Amplifiers at 1500 nm. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[4] *Ainslie B. J.* A Review of the Fabrication and Properties of Erbium-Doped Fibers for Optical Amplifiers. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[5] *Giles C. R.* et al. Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifers. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[6] *Shimizu M.* et al. Compact and Highly Efficient Fiber Amplifier Modules Pumped by 0.98-µm Laser Diode. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[7] *Fujiwara M.* et al. Studies on Semiconductor Optical Amplifiers for One Capacity Expansion in Photonic Space-Divison Switching Systems. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.

[8] *O'Mahony M. J.* Semiconductor Laser Optical Amplifier for Use in Future Fiber Systems. Journal of Lightwave Technology Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 4, April 88.

[9] *Boudreau R.* et al. High Gain (21 dB) Packed Semiconductor Optical Amplifiers. Electronics Letters, Vol. 27, No. 20, 26th Sept. 91.

[10] *Ludwig R.* et al. Properties of Two-Section Traveling Wave Amplifiers. ECOC'90-Paper, p. 239.

[11] Bellcore-Scipt. Fiber Amplifiers for Video Transport in the Loop. Fiber Optics, Jan. 91

[12] *Saifi M. A.* et al. Optical Fiber Amplifiers for Broadband Optical Network Applications. Fiber Optics, Jan. 91.

[13] *Laming R. I.* et al. Pump Excited-State Absorption in Erbium-Doped Fibers. Optics Letters, Vol. 13, Dec. 88.
[14] *Laming R. I.* et al. Erbium-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. SPIE-Paper, Boston.
[15] *Petermann K.* Laser Diode Modulation and Noise. Kluwer Academic Publisher, Boston 1991.
[16] *Cheo P. K.* Fiber Optics & Optoelectronics. Prentice Hall, New York 1990.
[17] *Jeunhomme L. B.* Single-Mode Fiber Optics. Marcel Dekker, New York and Basel 1990.
[18] *France P. W.* Optical Fiber Lasers & Amplifiers. Blackie, Glasgow and London.
[19] BT&D-Application Note and Data Sheets. Erbium-Doped Fiber Amplifier EFA3000. Semiconductor Optical Amplifier SOA 1100.
[20] *Grau G.* et al. Optische Nachrichtentechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag 1991.
[21] *Hall D. W.* Rare-Earth Doped Fiber-Optic Amplifiers. Short Course Notes CLEO'91, Baltimore.
[22] *Becker P. C.*Erbium-Doped Fiber Makes Promising Amplifiers. Laser Focus World, Oct. 90.
[23] *Hall D. W.* Optical Amplifier will Boost Capacity and Distance. Laser Focus World, Jan. 92.
[24] *Giles C. R.* System and Application of Optical Amplifiers. OFC'92-Paper, Tutorial Session.
[25] *Pedersen B.* et al. Power Requirement for Erbium-Doped Fiber Amplifiers Pumped at 800, 980 and 1480 nm. p. 35. OFC'92-Paper.
[26] *Menendez R. C.* Economics of Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Broadcast Overlay in PON Networks. Bellcore-Script. Morristown NJ.
[27] *Lin C.* et al. Optical-Fiber Amplifiers Make Broadband Fiber Networks Practical. Laser Focus World, Feb. 91.
[28] *Obro M.* et al. Highly Improved Fiber Amplifier for Operation Around 1300 nm. Electronics Letters, Vol. 27, No. 5. 28th Feb. 91.
[29] *Ohishi Y.* et al. A High Gain, High Output Saturation Power Pr3-Doped Fluoride Amplifier Operating at 1.3 μm. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 8, Aug. 91.
[30] *Ohishi Y.* et al. Gain Characteristics of Prt3-Yb3 Co-doped Fluoride Fiber for 1.3 μm Amplification. IEEE Transaction Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 11, Nov. 91.

Zusammenfassung

Optische Verstärker in der Telekommunikation

Optische Verstärker sind neue Systemkomponenten, die der faseroptischen Übertragungstechnik interessante, zusätzliche Impulse verleihen, da sie in der Lage sind, das Licht direkt zu verstärken. Ihre positiven Eigenschaften wie hohe Verstärkung und geringes Rauschen helfen mit, dass optische Verstärker schon bald in modernen Telekommunikationssystemen anzutreffen sein werden. In einer Übersicht werden die gebräuchlichen optischen Verstärker vorgestellt und die darin angewendeten Verstärkungsvorgänge und deren Eigenschaften beschrieben. Anschliessend werden die Anwendungsgebiete, die Einsatzmöglichkeiten und die neusten Entwicklungstendenzen optischer Verstärker in der Telekommunikation aufgezeichnet.

Résumé

Amplificateurs optiques dans les télécommunications

Les amplificateurs optiques constituent de nouveaux composants de systèmes donnant de nouvelles impulsions intéressantes à la technique de transmission par fibres optiques, vu qu'ils sont en mesure d'amplifier directement la lumière. Leurs propriétés positives et leur haut degré d'amplification sous faible bruit font que les amplificateurs optiques seront bientôt présents dans les systèmes de télécommunication modernes. Après un aperçu général, des amplificateurs usuels, les processus d'amplification et les caractéristiques des appareils sont présentés. Pour terminer, l'auteur examine les domaines d'application, les possibilités d'utilisation et les dernières tendance du développement des amplificateurs optiques dans les télécommunications.

Riassunto

Amplificatori ottici nelle telecomunicazioni

Gli amplificatori ottici sono nuovi componenti sistemici che conferiscono alla tecnica di trasmissione in fibra ottica impulsi supplementari di grande importanza, poiché sono in grado di amplificare direttamente la luce. Grazie alle caratteristiche positive quali l'elevato fattore di amplificazione e il basso fattore di rumore, gli amplificatori ottici faranno presto la loro apparizione nei sistemi di telecomunicazione moderni. L'autore presenta brevemente gli amplificatori ottici più comuni, i processi di amplificazione applicati e le loro caratteristiche. Descrive quindi i campi d'applicazione, le possibilità d'impiego e illustra in che direzione va lo sviluppo degli amplificatori ottici nelle telecomunicazioni.

Summary

Optical Amplifiers in Telecommunications

Optical amplifiers are new components rendering interesting further impetus to signal transmission because of their capability to amplify light in a direct way. Their positive properties, such as high gain and low noise, bear a share to the rapid spread of optical amplifiers into telecommunications systems. In an overview, the current optical amplifiers are presented and the applied principles of amplification explained, including their properties. The fields of application, the possibilities for use and the latest development trends of optical amplifiers in telecommunications are shown.