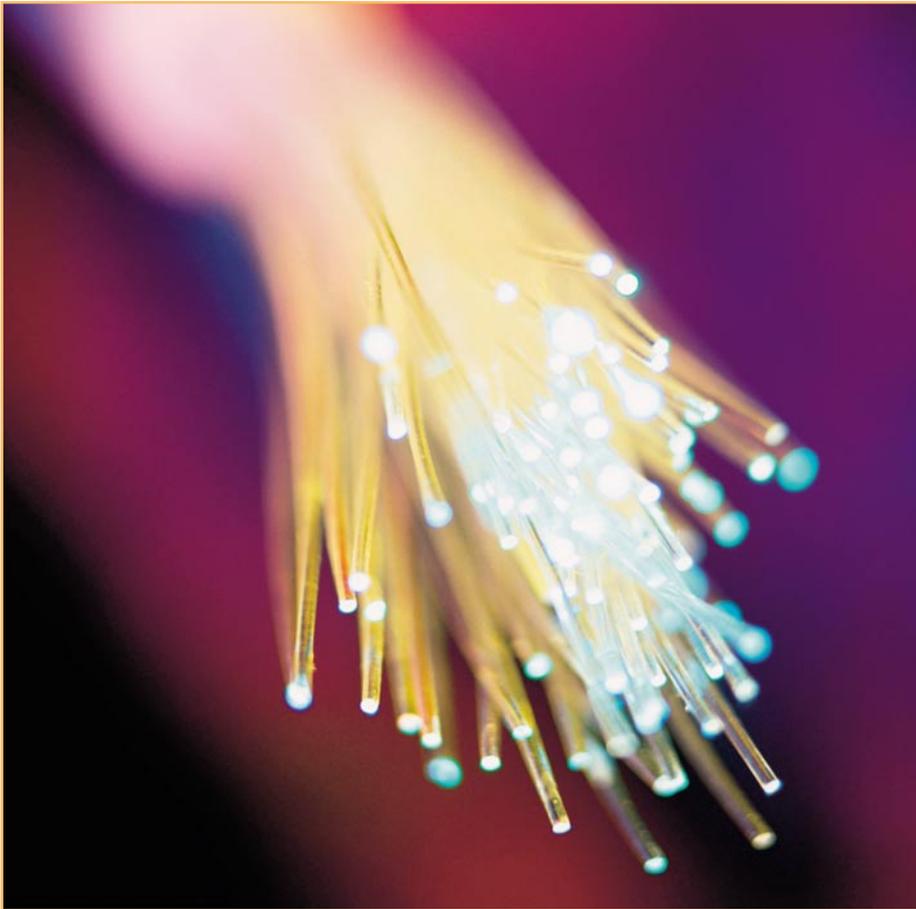


Optische Übertragungstechnik

Teil 2



Lichtwellenleiter sind dämpfungsarme, breitbandige und langzeitstabile Transportmedien für Daten – hervorragend, aber nicht ideal. In der Praxis treten nicht zu vernachlässigende Effekte auf, deren physikalischen Hintergrund man verstehen muss, um die Grenzen eines optischen Übertragungssystems abschätzen zu können. Wir zeigen, welche Dispersionsarten es gibt, welche physikalischen Mechanismen der Erzeugung, dem Aufnehmen und dem Verstärken von Licht zugrunde liegen und wie die entsprechenden Bauteile prinzipiell funktionieren.

Kennwerte von Lichtwellenleitern

Dämpfung

Die Dämpfung einer Glasfaser ist stark frequenzabhängig (Abbildung 14). Es ergeben sich minimale Dämpfungswerte im so genannten „Fenster“ um eine Wellenlänge 1550 nm (3. optisches Fenster), die maximale Übertragungskapazität liegt bei 1300 nm (2. optisches Fenster).

Die Dämpfung in einer Glasfaser hat drei Ursachen: Streuung, Absorption und Biegeverluste. Bei ortsunabhängigen Eigenschaften der Glasfaser ist die Dämpfung proportional zur Länge. Gute Glasfasern erreichen bis zu 0,5 dB/km, d. h. erst

nach 6 km ist die Lichtleistung auf die Hälfte abgefallen.

Besser als durch einen Vergleich der Dämpfungen eines klassischen Koaxialkabels und einer hochwertigen Monomode-Glasfaser kann man deren Vorteile kaum demonstrieren (Abbildung 15). Unter Schräglage versteht man die Dämpfungsunterschiede zwischen dem oberen und unteren Ende des Übertragungsfrequenzbereichs.

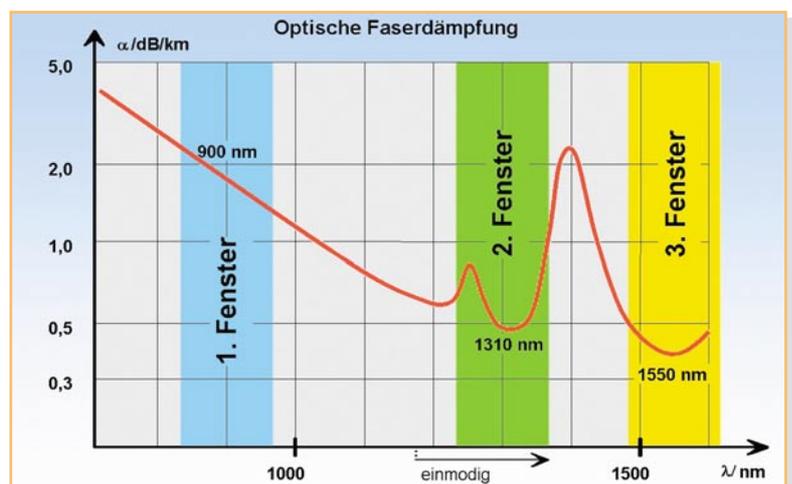
Streuung

Streuung (auch Rayleigh Scattering genannt) beruht auf mikroskopisch kleinen Unregelmäßigkeiten in der Glasstruktur, die den Brechungsindex lokal verändern. Kleine Anteile des Lichtstroms werden daran in viele Richtungen gestreut und fehlen dann in Ausbreitungsrichtung. Die Streuverluste haben den größten Anteil an der gesamten Dämpfung.

Absorption

Absorption wird durch unerwünschte Materialanteile im Glas hervorgerufen. Daran wird durch Molekularresonanz Lichtenergie in Wärme umgewandelt. Besonders Absorption durch Wasser (OH-Ionen) dominiert in den meisten Fasern. Sie erzeugt Dämpfungsspitzen bei 1250 und 1390 nm. Moderne Glasfasern haben wegen ihrer hohen Materialreinheit kaum mehr erkennbare Absorptionsspitzen. Jedoch beginnen die SiO₂-Moleküle von Glas selbst ab ca. 1700 nm zu absorbieren.

Bild 14:
Die frequenzabhängige Dämpfung einer Glasfaser



Leiter-Typ	Frequenzbereich	Dämpfung	Schräglage
Koaxialkabel	0,005-1 GHz	1-14 dB/100 m	13 dB
Single-Mode LWL	192.999-193.001 GHz (1550 nm)	0,05 dB/100 m	0 dB

Bild 15: Vergleich der Dämpfung eines klassischen Koaxialkabels mit der einer hochwertigen Monomode-Glasfaser

Apertur (NA) beschreiben den maximal möglichen Winkel, unter dem Licht auf die Stirnfläche des Glasfaserkerns eingestrahlt werden darf, ohne dass die Bedingung für Totalreflexion an der Grenzfläche Kern-Mantel gemäß dem Gesetz von Snellius verletzt wird (Abbildung 17). φ_A und NA hängen von den Brechzahlen von Kern und Mantel gemäß der folgenden Beziehung ab:

$$NA = \sin \varphi_A = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$$

Für $n_K = 1,5$ und $n_M = 1,48$ ergeben sich der Akzeptanzwinkel zu 14° und die numerische Apertur zu 0,24. In der Literatur wird gelegentlich auch der doppelte Wert von φ_A als Akzeptanzwinkel bezeichnet.

Lichteinkopplung

Für eine möglichst vollständige Einkopplung des Lichtes einer Lichtquelle in die Glasfaser ist die Einhaltung des Akzeptanzwinkels erforderlich. Die Einkopplungsverluste einer LED-Lichtquelle sind ziemlich hoch, da diese auch relativ viele flach austretende Strahlen abgibt. Bei Laserdioden ist wegen ihres hohen Anteils an

Biegung

Biegung im Mikrobereich (micro bending), z. B. Schwankungen des Kerndurchmessers, raue Grenzen zwischen Kern und Mantel usw., wird entweder schon bei der Herstellung oder durch mechanische Einwirkungen auf die Glasfaser (Verdrehungen, Druck, Zug) verursacht. Biegeradien im cm-Bereich (macro bending) sind für Störungen des Lichttransports an der Grenze Kern-Mantel verantwortlich, weil sie hier die Bedingungen für eine Totalreflexion aufheben oder eine Modenwandlung bewirken können. Biegungen mit Radien über 10 cm führen in der Regel zu keinen Effekten.

Im Teil 1 dieser dreiteiligen Folge wurde gesagt, dass Monomodefasern keine Modendispersion kennen, weil sich in dem extrem dünnen lichtleitenden Kern nur eine Schwingungsmode ausbilden kann. Allerdings tritt noch die chromatische Dispersion auf. Sie besteht aus zwei Anteilen, welche die Übertragungsgeschwindigkeit vermindern – Materialdispersion und Wellenleiterdispersion. Bei der Materialdispersion ist der Brechungsindex des Lichtleiters wellenlängenabhängig, bei der Wellenleiterdispersion ist es die Ausbreitungskonstante. Beide Effekte liegen in der gleichen Größenordnung und lassen sich durch geeignete

Maßnahmen bei der Herstellung der Glasfaser und durch die Wahl einer geeigneten Übertragungsfrequenz fast kompensieren.

In einer typischen Single-Mode-Faser ($n = 1,46$, Kernradius $0,5 \mu\text{m}$) hat die chromatische Dispersion für reines Quarzglas bei 1280 nm eine Nullstelle. Durch Dotieren des Glasfasermaterials lässt sich die Nullstelle auf die Wellenlänge des Dämpfungsminimums im 2. optischen Fenster bei 1310 nm verschieben. Damit sind hohe Bandbreiten mit großen Faserlängen vereint (Abbildung 16).

Akzeptanzwinkel und numerische Apertur

Akzeptanzwinkel (φ_A) und numerische

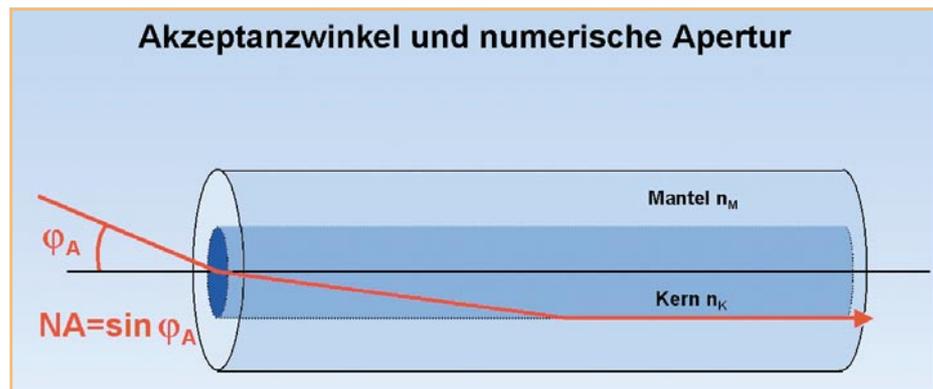


Bild 17: Akzeptanzwinkel und numerische Apertur

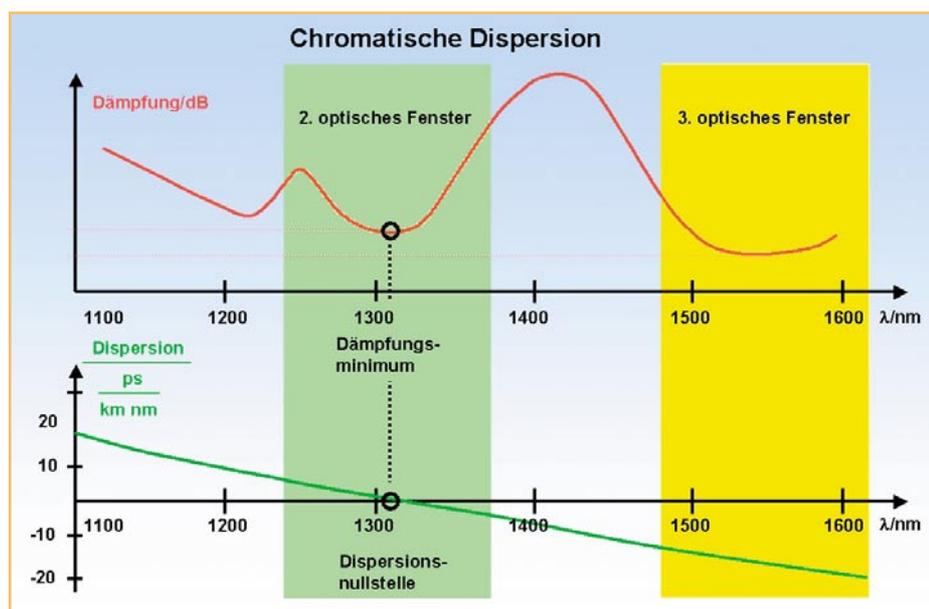


Bild 16: Chromatische Dispersion

parallelem Licht ein erheblich höherer Koppelwirkungsgrad zu erzielen (vergl. Abstrahlcharakteristiken). Mit zusätzlichen fokussierenden optischen Elementen bzw. durch eine spezielle Formung des Faserendes lässt sich der Koppelwirkungsgrad weiter erhöhen (Abbildung 18). Auf jeden Fall kann eine sauber angekoppelte Laserdioden ein Vielfaches an Leistung im Vergleich zur LED in die Glasfaser injizieren.

Prinzipielle Möglichkeiten zur Verbesserung der Einkopplung sind

- Selfoc-Elemente (Selfoc: self-focusing), Zylinderlinsen (querliegende Glasfasern) oder Faskugeln zwischen Strahler und Glasfaserstirnfläche,
- konische Formung (Taperung) oder
- kugeliges Aufschmelzen des Lichtwellenleitereingangs.

Das Einkoppeln von Laserlicht in den Kern eines Einmoden-Lichtwellenleiters muss hoch präzise erfolgen. Beim Positio-

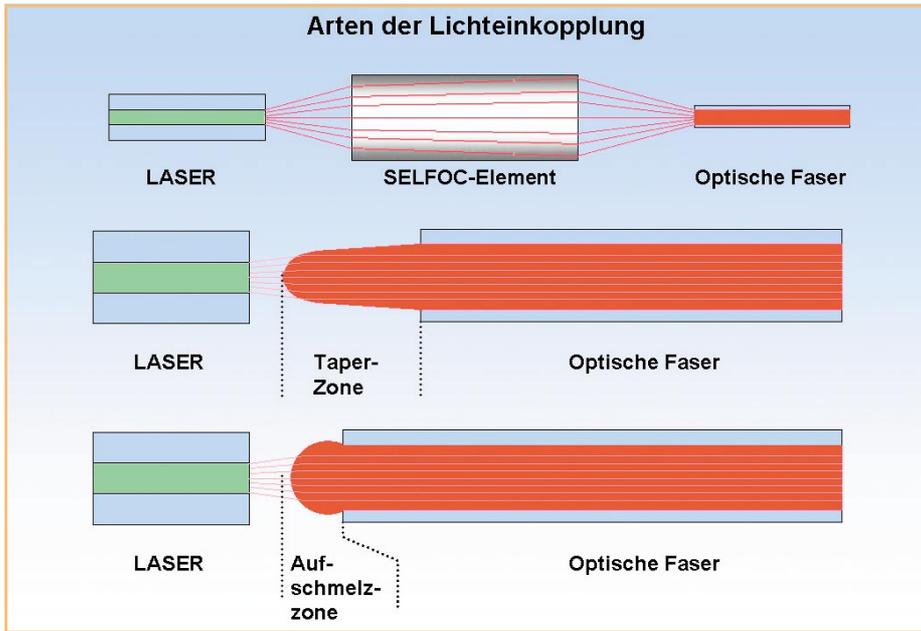


Bild 18: Durch eine spezielle Formung des Faserendes lässt sich der Koppelwirkungsgrad weiter erhöhen.

nieren und im Betrieb sind Genauigkeiten im Submikrometerbereich einzuhalten. Ein Beispiel für den speziellen Einsatz mit Laserdioden ist der Koppler F-1015LD der Firma Newport mit Diodenlaserobjektiv (12 mm Brennweite, Abbildung 19).

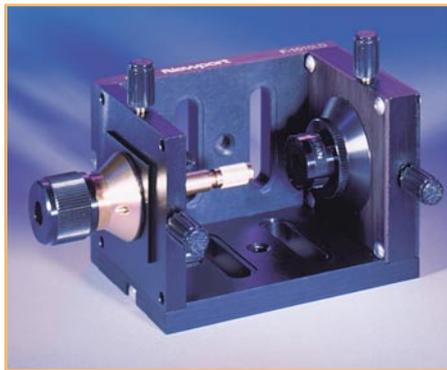


Bild 19: Der Koppler F-1015LD von Newport mit Diodenlaserobjektiv

Laser-Typen

Wie in Teil 1 bereits dargelegt, hat ideales Laser-Licht zwei Eigenschaften, die in der Praxis jedoch nie perfekt gegeben sind:

- spektrale Reinheit (nur eine Frequenz = monochromatisches Licht)
- Kohärenz (stets gleiche Phasenlage)

Das Laserprinzip beruht bekanntlich darauf, dass Schwingungen mit Wellenlängen, die in einer ganzzahligen Vielzahl in den Resonator „passen“, sich gegenseitig aufbauen, alle anderen dagegen schwächen oder auslöschen.

Beim **FP-Laser** (FP: Fabry-Perot) ist der Resonator homogen gestaltet. Es können nur die Wellenlängen „lasern“, die

nach einem vollen Durchlauf durch den Resonator am Ausgangsort mit der gleichen Phasenlage ankommen. Da dies für eine Vielzahl von Wellenlängen der Fall ist, wird sofort ersichtlich, dass im Spektrum ebenso eine Vielzahl von Frequenzen bzw. Wellenlängen auftaucht (Abbildung 20).

Der Resonator eines **DFB-Lasers** (Distributed Feedback) ist periodisch strukturiert (z. B. in der Brechzahl). Die Resonanzbedingung ist nur für die Frequenzen erfüllt, deren Wellenlänge in der richtigen Beziehung zu den Abmessungen der Strukturabschnitte steht.

Damit ist die Vielzahl der Wellenlängen, für die diese Bedingung erfüllt ist, kleiner als beim FP-Laser. Der DFB-Laser hat also eine höhere spektrale Reinheit als der FP-Laser. Lediglich seine Empfindlichkeit gegenüber rückgestreutem Licht (optical feedback) ist größer. Dieses verursacht eine rauschähnliche Störung (spurious noise), die sich aber durch Einbrin-

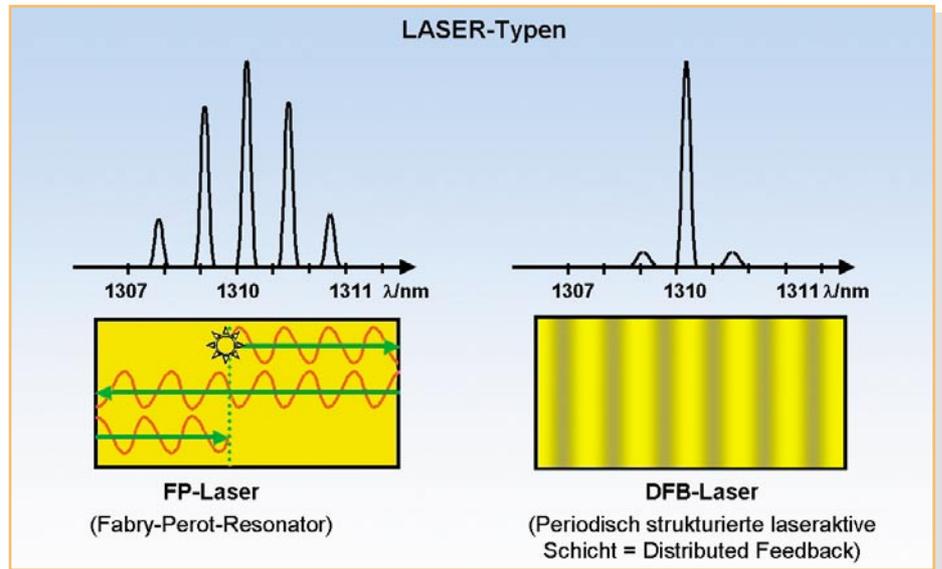


Bild 20: Vergleich von FP-Laser und DFB-Laser

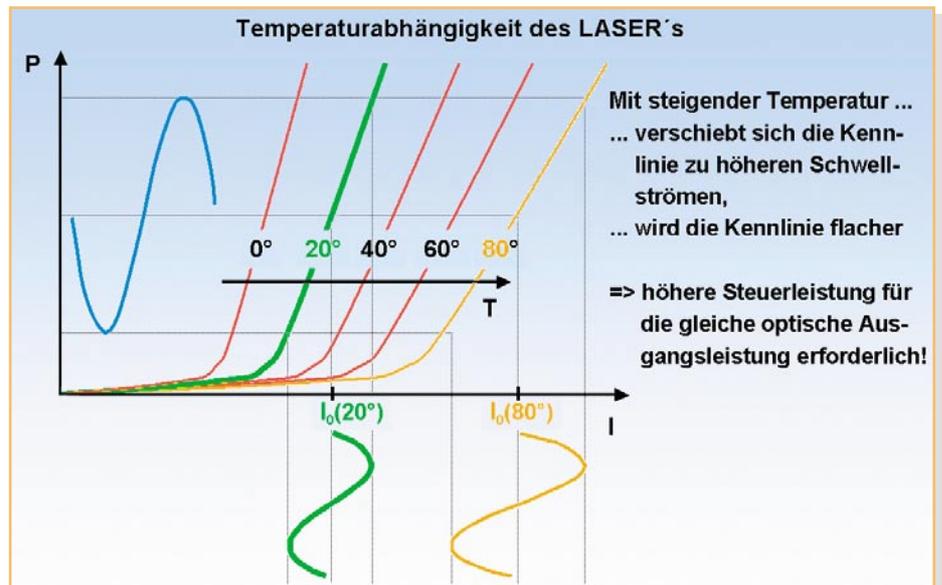


Bild 21: Temperaturabhängigkeit des Lasers

gen eines „Isolators“ zwischen Glasfaser-Eingang und Laser-Ausgang weitgehend unterdrücken lässt.

Optische Ausgangsleistung und Temperatur

Ein wesentliches, unerwünschtes Laser-Merkmal ist die starke Temperaturabhängigkeit seiner Ausgangsleistung (Abbildung 21). Der Zusammenhang zwischen optischer Ausgangsleistung und steuern dem Signalstrom ist durch eine Kennlinienschar gegeben, deren Scharparameter die Temperatur des Laser-Bausteins ist. Mit steigender Temperatur verschiebt sich die Kennlinie zu höheren Schwellströmen und wird flacher. Damit wird eine höhere Steuerleistung für die gleiche optische Ausgangsleistung erforderlich. Dieser Effekt kann durch eine Temperaturregelung des Laserhalbleiters auf einen konstanten Wert vermieden werden (Abbildung 22). Die Konstanz der optischen Ausgangsleistung wird durch einen speziellen Leistungsregelkreis weiter erhöht. Tiefpässe (TP) in beiden Regelkreisen verhindern das Nachregeln auf kurzfristige Änderungen der Steuergrößen. Die Ansteuerung des Lasers muss stets im linearen Teil der Kennlinie erfolgen. Links vom Kennlinienknick tritt

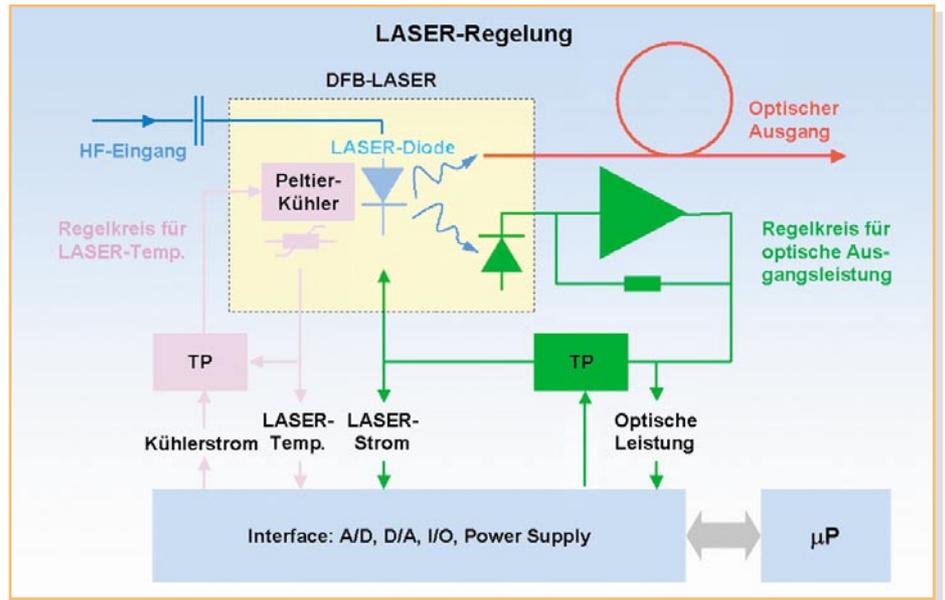


Bild 22: Temperaturregelung des Laserhalbleiters

es teilweise reflektiert und dabei in der Polarisationsrichtung mehr oder weniger gedreht. Das reflektierte Licht bestrahlt jetzt gemeinsam mit aus anderen Ursachen aus der Glasfaser herausleuchtendem Licht den Analyzer von rechts. Er lässt wieder die gleiche Schwingungsebene zum Pola-

Bauelement!). Damit versperrt der 1. Polarisator wegen der insgesamt 90°-Phasenverschiebung ($2 \times 45^\circ$) den Eintritt in den Laser. So werden Störungen der Laser-Oszillation und die damit verbundenen rauschähnlichen Folgen vermieden.

Optische Empfänger

Energieniveaus der Elektronen im Halbleiterkristall

Elektronen im Kristallgitter eines Halbleiters können nicht jede beliebige Energie annehmen. Wegen der Wechselwirkung der Gitteratome gibt es für deren Elektronen bestimmte „erlaubte“ und „verbotene“ Energieniveaus (Bänder). Für die qualitative Erklärung der Lichtemission und der optischen Verstärkung genügen einige Grundkenntnisse des Bändermodells.

Das Energieniveau eines Elektrons hängt von seinem Abstand zum Atom ab. Gemäß dem Bohr'schen Atommodell können sich die Elektronen nur auf diskreten Bahnen um den Kern herum aufhalten. Es gibt drei Energiebereiche: das Valenzband, die verbotene Zone und das Leitungsband (Abbil-

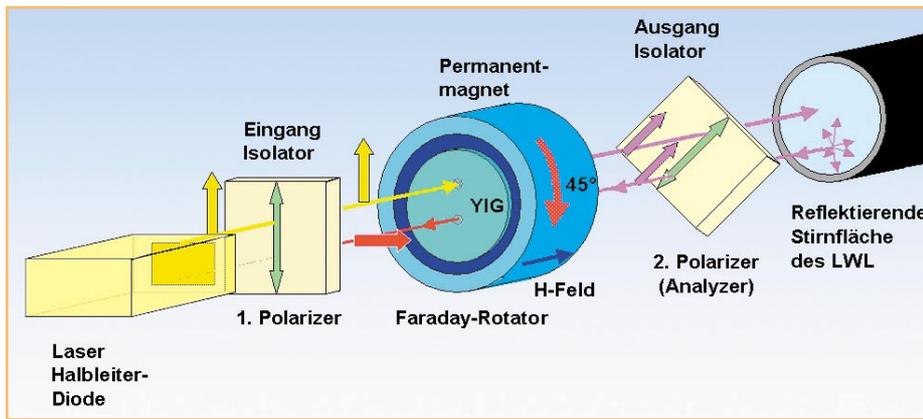


Bild 23: Funktion eines Isolators

so genanntes „Clipping“ auf. Das Ausgangssignal wird in diesem Bereich gestaucht, was einer starken Verzerrung entspricht.

Wie schon erwähnt, hat ein **Isolator** die Aufgabe, aus der Glasfaser rückgestreutes Licht vom Laser fern zu halten (Abbildung 23). Funktionsweise: Ein Polarisator am Eingang lässt nur die Laser-Strahlung einer Polarisationsrichtung zu einem Faraday-Rotator durch. Dieser besteht aus einem YIG-Kern (Yttrium-Iron-Garnet) im Feld eines ringförmigen Permanentmagneten. Beim Durchlaufen des Faraday-Rotators erfährt das Licht eine Drehung der Polarisationssebene um 45° . Ein zweiter, um 45° gegen den ersten verdrehten Polarisator (Analyzer) lässt das Licht aus dem Polarisator ungehindert zur Stirnfläche des Lichtwellenleiters durch. Hier wird

risator-Ausgang durch. Dieser dreht wiederum um 45° in die gleiche Richtung wie beim Eingangssignal (nicht-reziprokes

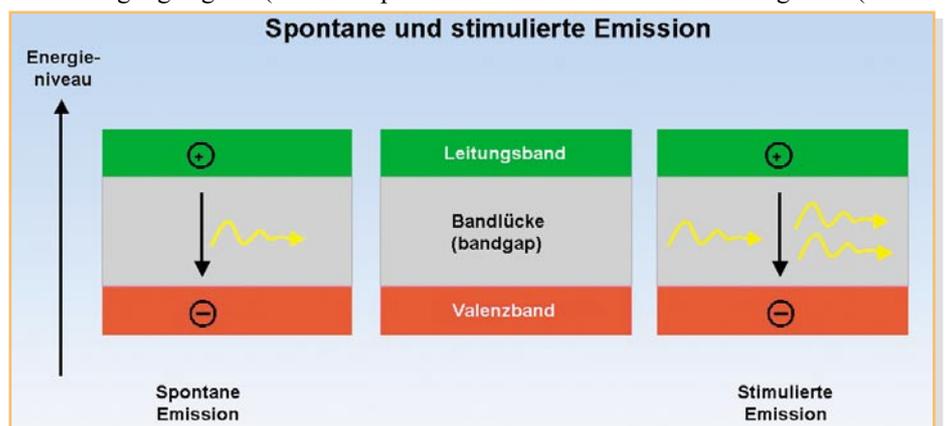


Bild 24: Das Energieniveau eines Elektrons

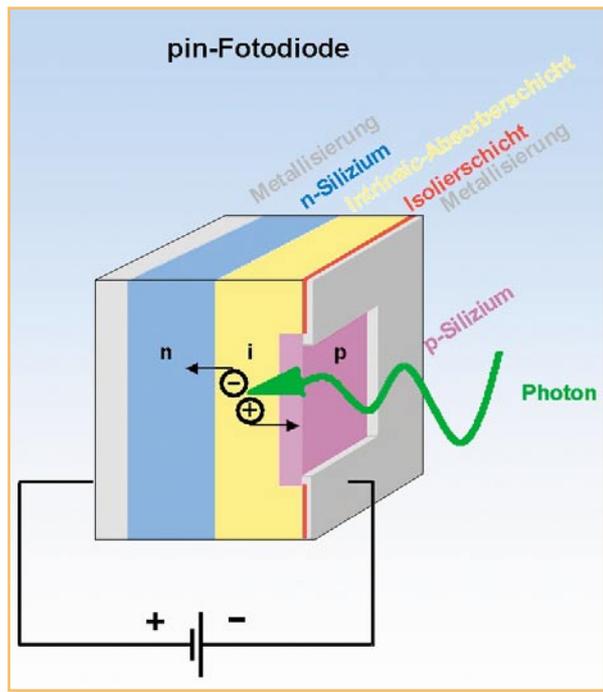


Bild 25: Der Schichtenaufbau einer pin-Fotodiode

dung 24). Die verbotene Zone als Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband wird auch Bandgap (Bandlücke) genannt. Im Leitungsband haben die Elektronen die höchste Energie, im Valenzband die niedrigste. Wie der Name andeutet, tragen nur die Elektronen im Leitungsband zur Stromleitung bei. Im neutralen Zustand ist das Valenzband stets voll mit Elektronen gefüllt. Durch ausreichende Energiezufuhr (bei Silizium ca. 1 eV) von außen (z. B. Bestrahlung mit Licht, elektrisches Feld, thermisch) kann ein Elektron aus dem Valenzband über die Bandlücke in das Leitungsband „angehoben“ werden. Dabei hinterlässt es eine Fehlstelle (auch Loch oder Defektelektron genannt) im Valenzband. Diesen stark mit der Temperatur zunehmenden Effekt bezeichnet man als Eigenleitung. Im Gegensatz dazu steht die Störstellenleitung, die durch das Einbringen von Fremdatomen (Dotierung) in den Halbleiter entsteht. Wenn ein derart angehobenes Elektron aus dem Leitungsband wieder ins Valenzband zurückfällt, füllt es das von ihm hinterlassene Loch unter Abgabe eines Lichtquants auf (Rekombination). Dessen Frequenz ergibt sich aus der Energiedifferenz gemäß Plancks Gleichung zu $f = \Delta E/h$ (h : Planck'sches Wirkungsquantum $6,62 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$). Das Zurückfallen auf ein niedrigeres Energieniveau kann ohne äußeres Zutun geschehen (spontane Emission) oder aufgrund von Anregung durch einen Lichtquant (stimulierte Emission). Diese Mechanismen liegen allen Wandlungen von Strom in Licht und umgekehrt zugrunde. Wir werden sie auch später bei der Beschreibung der optischen Verstärkung heranziehen.

Am Ausgang einer Glasfaserstrecke ist das modulierte Licht wieder in ein elektri-

ches Signal zurückzuwandeln. Die dazu erforderlichen Licht-Strom-Wandler müssen sehr empfindlich und rauscharm sein. Durchgesetzt haben sich die pin-Fotodiode und die Avalanche-Diode (avalanche = Lawine). Beide beruhen auf dem inneren Fotoeffekt, der im Grenzbereich eines Übergangs von p- auf n-leitendes Halbleitermaterial auftritt.

pin-Fotodiode

Der Schichtenaufbau besteht aus einem n-leitenden Substrat (Träger), einer eigenleitenden (i: intrinsic) Schicht und einer dünnen p-leitenden Schicht (Abbildung 25). Sie ist unter Aussparung eines Fensters metallisiert, durch das Licht einfallen und durch die p-dotierte Schicht bis in den intrinsischen Bereich gelangen kann. Die Diode ist in Sperrrichtung vorgespannt. Jedes Licht-Photon erzeugt nun idealer-

weise ein Ladungsträgerpaar, wobei sich das Elektron in Richtung des Pluspols der Spannungsquelle und das Defektelektron (Loch) zum negativen Pol bewegt. Dadurch entstehen elektrische Impulse, die im Mittel der einfallenden Lichtleistung proportional sind. Reines Silizium oder Germanium als Halbleitermaterial weisen spezifische Nachteile auf. Silizium ist wegen seiner mit der Wellenlänge zunehmenden Transparenz nur im Bereich kleiner Wellenlängen ($<1100 \text{ nm}$) zu verwenden, Germanium eignet sich zwar für größere Wellenlängen, ist wegen des relativ hohen Sperrstroms (Dunkelstrom) aber unempfindlicher. Einen Kompromiss bieten komplexe Halbleitermaterialien wie InGaAsP.

Als Empfindlichkeit S (S : sensitivity) einer Fotodiode wird das Verhältnis des Fotostroms I_{pin} zur ihn auslösenden Lichtleistung P definiert.

$$S_{pin} = \frac{I_{pin}}{P}$$

Typische Werte für die Empfindlichkeit sind $0,5 \text{ A/W}$. Eine eingestrahelte Lichtleistung von z. B. $2 \mu\text{W}$ hat dann einen Strom von $1 \mu\text{A}$ zur Folge, der an einem Arbeitswiderstand von $10 \text{ k}\Omega$ eine Spannung von 10 mV abfallen lässt.

Avalanche-Fotodioden

Avalanche-Fotodioden (APD: Avalanche Photo Diode) sind im Prinzip einer normalen pin-Fotodiode sehr ähnlich. (Abbildung 26). Auch sie werden in Sperrrichtung betrieben, allerdings mit sehr hohen Spannungen kurz vor dem Durchbruch des pn-Übergangs. Dadurch entsteht in diesem Bereich ein starkes elektrisches Feld. Darin werden die durch Lichteinfall erzeugten Ladungsträger so stark beschleunigt, dass sie durch Stoßionisation wiederum neue erzeugen, usw. Dieser Lawinen-

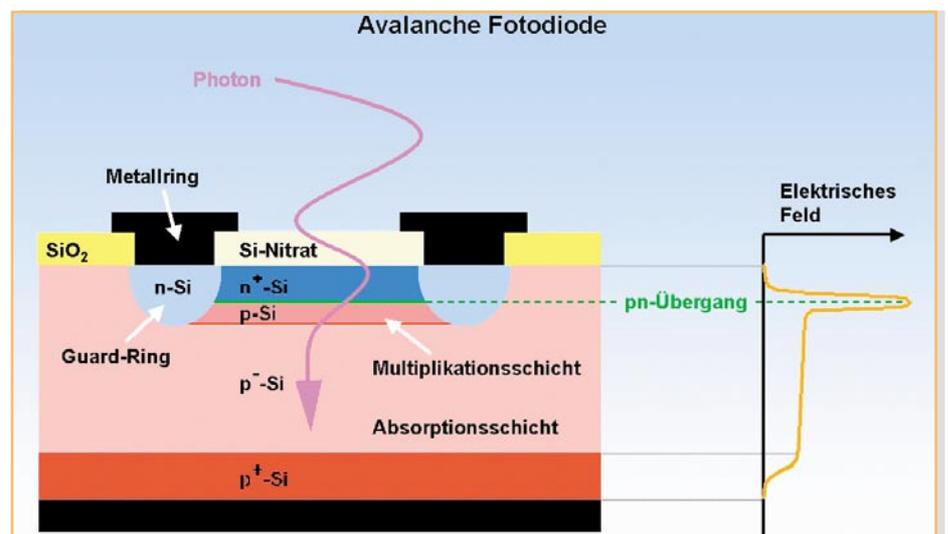


Bild 26: Avalanche-Fotodioden (APD: Avalanche Photo Diode)

Bild 27: Ein EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

effekt hat der Diode den Namen gegeben. Deshalb setzt ein einzelnes Photon eine Vielzahl elektrischer Ladungsträger frei. Der Multiplikationsfaktor M einer Avalanche-Fotodiode kann Werte von mehreren Hundert annehmen.

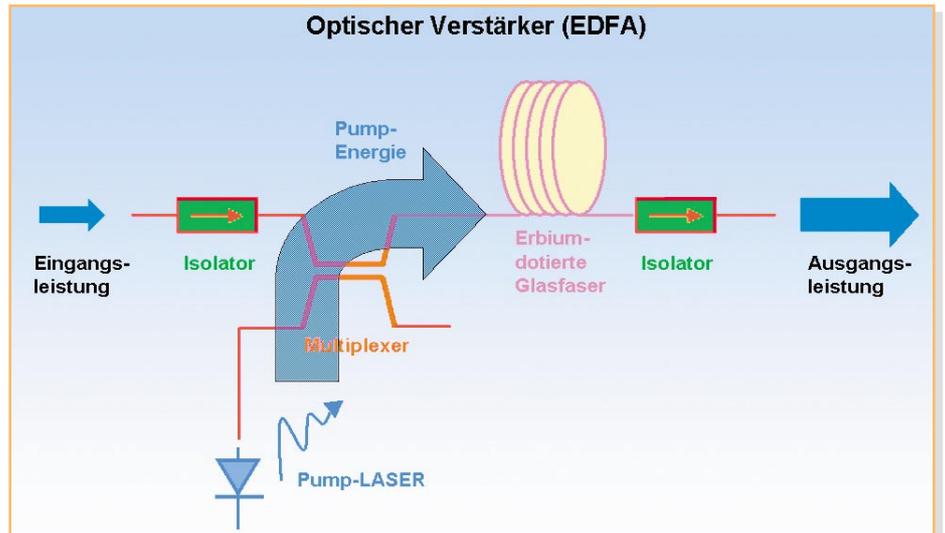
Dagegen beträgt der Quantenwirkungsgrad einer pin-Diode nur bis zu 90 %, d. h. nur 90 von 100 einfallenden Photonen erzeugen tatsächlich ein Ladungsträgerpaar. Je größer der Multiplikationsfaktor ist, desto langsamer wird die APD. Das hat damit zu tun, dass mehr Zeit zum Aufbauen der Ladungsträgerlawine erforderlich ist. Der Multiplikationsfaktor ist proportional zur angelegten Spannung in Sperrichtung. Deshalb ist diese hoch konstant zu halten.

Der Lawineneffekt macht die APD zwar sehr empfindlich, andererseits aber auch stark nicht-linear. Für analoge optische Signale kommen deshalb heute nur pin-Dioden zum Einsatz.

$$S_{APD} = \frac{I_{APD}}{P} = M \frac{I_{pin}}{P} = M \cdot S_{pin}$$

Optische Verstärker

Wie jede Verstärkung ist auch die optische als Verhältnis einer Ausgangs- zu einer Eingangsgröße definiert. Damit das Signal am Ausgang des Verstärkers größer als an seinem Eingang ist, muss Energie von außen zugeführt werden. Diese wird beim optischen Verstärker als Pump-Energie bezeichnet. Am Beispiel eines EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) soll das Prinzip der optischen Verstärkung erläutert



werden. Im Wesentlichen besteht ein EDFA aus einer Erbium-dotierten Glasfaser, in der die Verstärkung stattfindet. Dazu werden die Erbium-Atome durch Fremdlicht (980 oder 1480 nm) auf ein höheres Energieniveau „gepumpt“, von dem aus sie dann, durch das Eingangslicht stimuliert, unter Lichtabgabe in den Grundzustand zurückfallen. Dabei wird mehr Lichtenergie frei, als in den Eingang des Verstärkers eingespeist wurde. In der Praxis findet man noch je einen Isolator an Eingang und Ausgang des EDFAs, um Rückstreuungen in den vorangehenden Glasfaserabschnitt und aus dem nachfolgenden zu unterdrücken. Die Pumpleistung wird mittels eines Multiplexers in die Glasfaser eingespeist (Abbildung 27).

Genau wie beim Laser spielt beim EDFA stimulierte Strahlung eine zentrale Rolle. Man kann den EDFA deshalb auch als „Laser ohne Spiegel“ betrachten.

Typische Werte eines EDFA:

- Länge der Erbium-dotierten Faser: 10–20 m
- Wellenlängenbereich: 1520–1570 nm

- Verstärkung: 0–50 dB
- Ausgangsleistung: 1–4000 mW
- Rauschzahl: 3,5–12 dB
- Welligkeit: 1–2 dB

An einer vereinfachten Darstellung der Energiezustände eines Erbium-Atoms wird deutlich, dass neben dem stimulierten „Nutzlicht“ auch spontan emittiertes „Störlicht“ entsteht. Deshalb findet man ASE-Störungen (amplified spontaneous emission) und remanente Pumpleistung im Ausgangssignal. Das verschlechtert das Signal-Rausch-Verhältnis.

Dies ist ein Ausdruck der alten nachrichtentechnischen Weisheit, nach der jede Verstärkung dem Nutzsignal Rauschen hinzufügt. Deshalb strebt man hochreine Glasfasermaterialien, hohe Sendeleistungen, optimale Einkopplung, möglichst wenige dämpfende Verbindungen und empfindliche Empfänger an. Damit lassen sich sehr lange, verstärkerfreie Glasfaserverbindungen zwischen Sender und Empfänger realisieren. Das ist für den Rauschanteil im Nutzsignal zwar optimal, aber nicht immer möglich. **ELV**

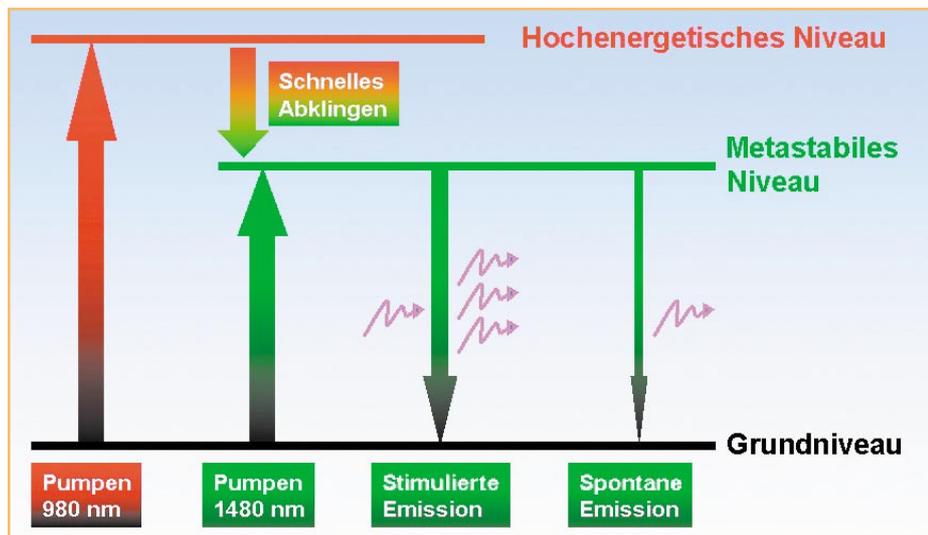


Bild 28: Energiezustände eines Erbium-Atoms

Literatur:

- Brückner, V.: Optische Nachrichtentechnik, Teubner, Wiesbaden, 2003
- Derickson, D. (Hrsg.): Fiber Optic Test and Measurement, Prentice-Hall, New Jersey, 1998
- Gerthsen, Chr., Kneser, H. O.: Physik, Springer, Berlin, 1971
- Glaser, W.: Lichtwellenleiter, VEB Verlag Technik, Berlin, 1990
- Hentschel, Chr.: Fiber Optics Handbook, Hewlett-Packard, FRG, 1989
- Möschwitzer, A., Lunze, K.: Halbleitertechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1977