

Optische Übertragungstechnik

Teil 3

Die Beschreibung der wichtigsten Komponenten eines optischen Übertragungssystems wird fortgesetzt: Universalbaustein SELFOC-Element, Koppler, Beugungsgitter usw. Warum können LWL so immens hohe Datenmengen übertragen? Welche nichtlinearen Verzerrungen produzieren optische Verstärker? Welche Gefahren gehen von der Laser-Strahlung aus, welche Schutzvorschriften gibt es und wie schlägt sich dies in den Laser-Klassen und -Grenzwerten nieder? Antworten auf diese Fragen gibt Teil 3.

Optischer Universalbaustein „SELFOC“

Der Begriff SELFOC ist abgeleitet von „SELf FOCusing“ und ist der Handelsname der japanischen Nippon Sheet Glasses Co. (NSG) für Glasfaserstäbchen mit einem parabolischen Brechzahlverlauf in radialer Richtung $n(r)$. Im Prinzip hat man es also mit kurzen Abschnitten einer Gradientenfaser mit 1 bis 2 mm Durchmesser und wenigen Millimetern Länge zu tun, die wegen ihrer fokussierenden Eigenschaften auch als GRIN-Linsen (GRIN: GRAdient INdex) bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich damit grundlegend von konventionellen Linsen mit konstantem Brechungs-

index im gesamten Linsenmaterial, bei denen eine Änderung der Richtung der Lichtstrahlung nur an der Oberfläche auftritt,

also dort, wo es zu einem abrupten Wechsel der Brechzahl (z. B. von Luft zu Glas) kommt. Durch sorgfältige Formgebung und

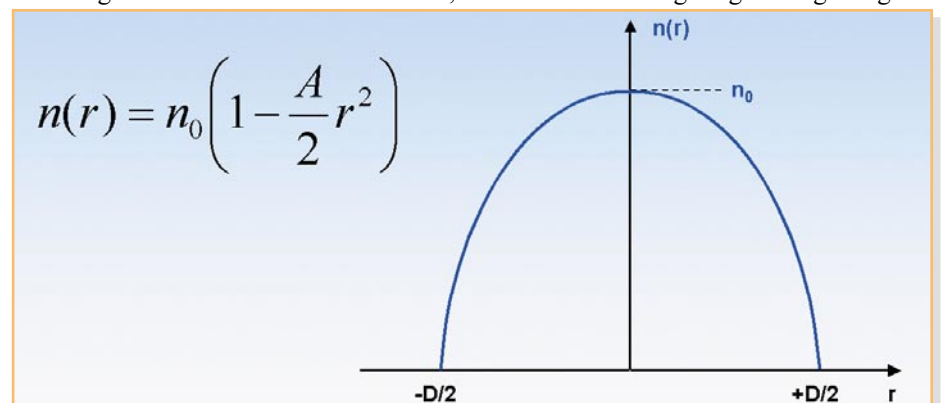


Bild 1: Brechzahlverlauf einer SELFOC-Linse

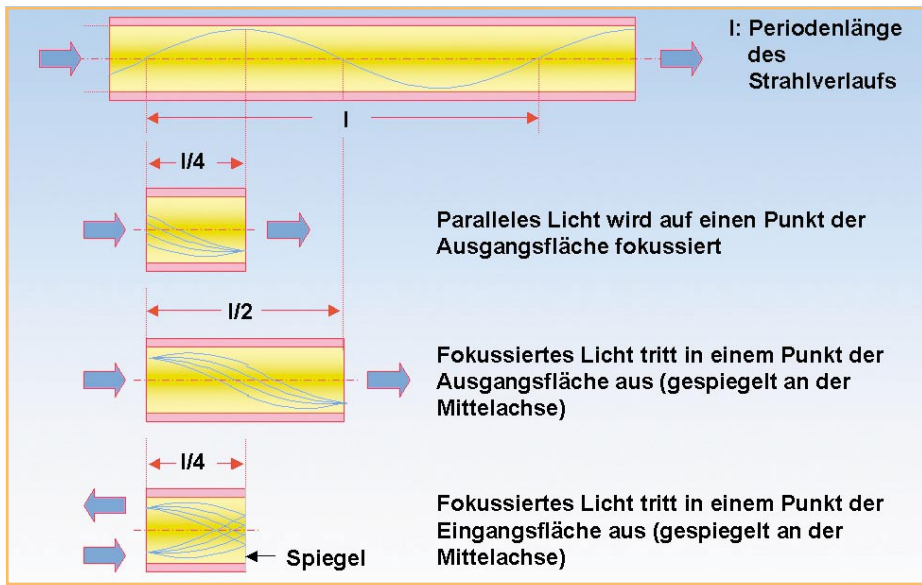


Bild 2: Verlauf des Lichtstrahls in einer SELFOC-Linse

Exaktheit der Linsenoberfläche werden die Strahlen in einem Brennpunkt zusammengeführt und formen die Abbildung. GRIN-Linsen erfüllen die gleiche Aufgabe mit kontinuierlichem, genau kontrolliertem Verlauf der Brechzahl im Material. Sie werden eingesetzt für Lichteinkopplungen

- Laserdiode → Glasfaser
- Glasfaser → Detektordiode
- Glasfaser → Glasfaser

und zum

- Verengen (Fokussieren) oder
- Aufweiten (Defokussieren, Kollimieren)

eines Strahls.

Die Brechzahl ist in der Mittelachse des Stäbchens am größten und fällt zu den Rändern hin ab (Abbildung 1). Die Wurzel aus der Konstante A bezeichnet man als Gradientenkonstante. Sie spielt in den beschreibenden Formeln des SELFOC-Elements eine zentrale Rolle. Wir wollen uns dem SELFOC-Element eher anschaulich nähern.

Betrachtet man einen Lichtstrahl in einer Gradientenfaser, stellt man fest, dass sein Verlauf innerhalb von Abschnitten der Länge l periodisch ist (l : pitch). Das Grundelement der SELFOC-Technik ist genau eine viertel Wellenlänge ($l/4$) der Ausbreitungswelle in der Gradient-Index-Faser (Abbildung 2) lang.

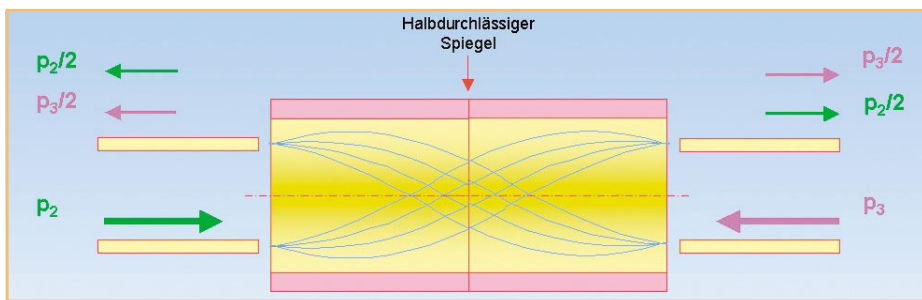


Bild 3: Zusammenführen von zwei Lichtströmen mit SELFOC-Linse

Ein $l/4$ langes SELFOC-Stäbchen fokussiert paralleles Licht am Eingang in

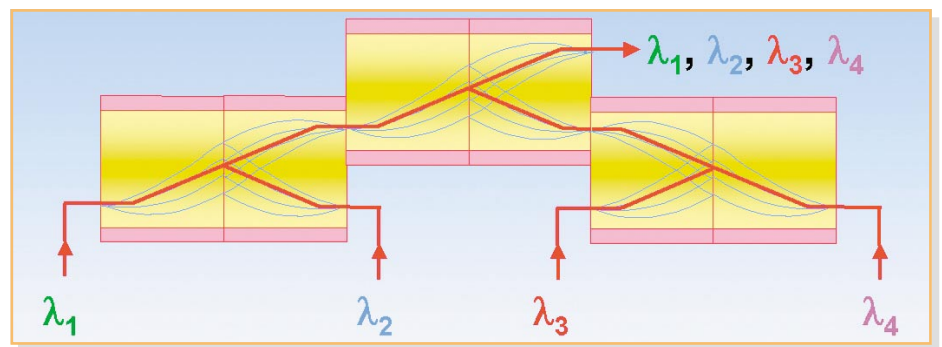


Bild 4: Multiplexer für 4 Wellenlängen mit SELFOC-Elementen

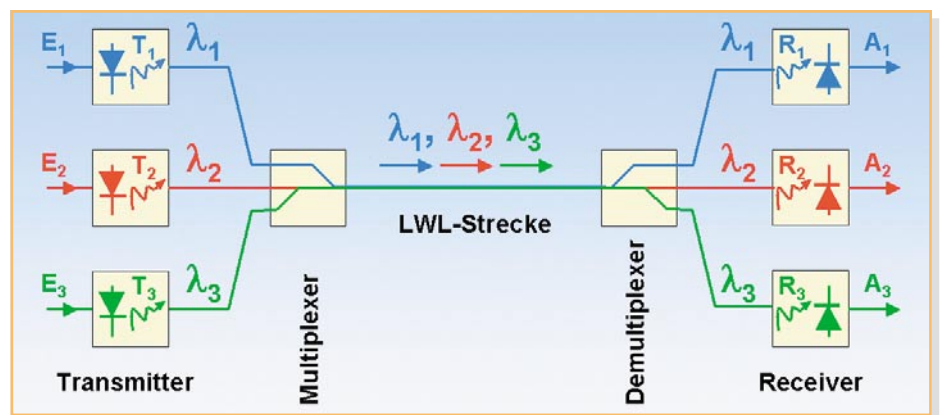


Bild 5: Prinzip des Wellenlängenmultiplexers (WDM)

einen Punkt auf der Austrittsfläche. Ein $l/2$ langes Stäbchen (kann auch aus zwei verlustlos aneinander gesetzten $l/4$ -Stäbchen gebildet werden) entlässt fokussiertes Licht am Eingang spiegelverkehrt zur Mittelachse wieder als fokussiertes Licht. Verspiegelt man nun die Austrittsfläche eines $l/4$ langen Grundelements, tritt fokussiertes Licht, wiederum an der Mittelachse gespiegelt, diesmal aber an der Eintrittsfläche aus. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich die nachfolgend beschriebenen Elemente verstehen.

Multiplexen und Demultiplexen

Ein einfaches passives Element zur Einkopplung der Lichtströme aus zwei Lichtwellenleitern in einen dritten (und vierten) entsteht, wenn an den Berührungsflächen zweier $l/4$ -SELFOC-Grundelemente eine halb durchlässige Verspiegelung aufgebracht wird (Abbildung 3).

Das Prinzip von Abbildung 3 führt bei

geeigneter serieller Anordnung der SELFOC-Elemente zu Multiplexern (Mux) und Demultiplexern (Demux). Unter einem Multiplexer versteht man eine Einrichtung, die von mehreren Quellen gelieferte Lichtströme möglichst verlustarm zusammenfasst und zur Weiterleitung auf eine gemeinsame Glasfaser einkoppelt. Am Ausgang dieser Transportfaser zerlegt ein Demultiplexer den ankommenden Lichtstrom wieder in seine eingangsseitigen Bestand-

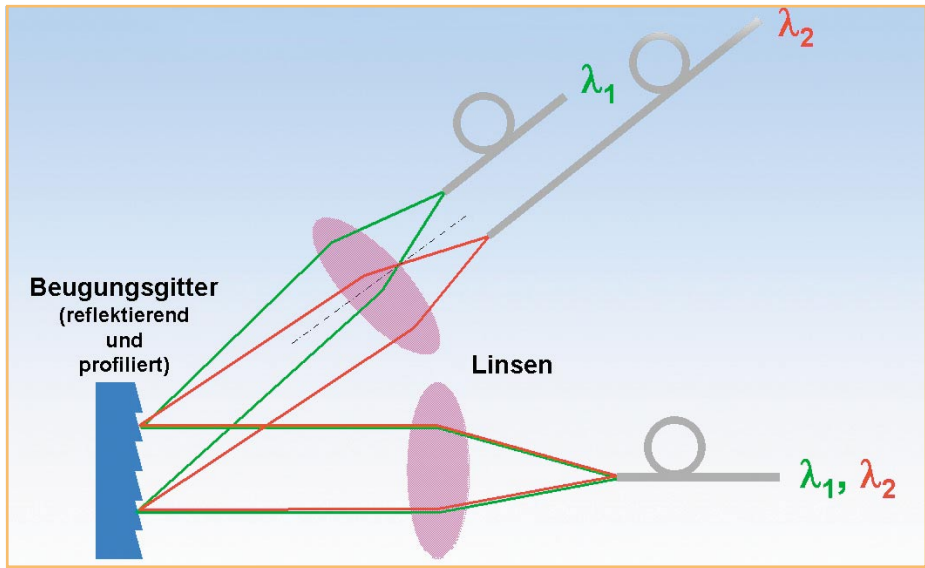


Bild 7: Prinzipdarstellung eines Gitter(de)multiplexers

der elektromagnetischen Felder im Bereich einer Koppelzone bei geringem Abstand der Glasfaserkerne. Dabei wird ein Teil der optischen Energie an die Nachbarfaser abgegeben, der Rest läuft weiter. Technisch wird die Koppelzone meist realisiert, indem man zwei (oder mehr) Fasern leicht verdreht und den Berührungsbereich erhitzt. Unter leichtem Zug (stretching) verjüngen sich die Fasern und verschmelzen mehr oder weniger stark (Vereinigungsbereich, fused sector). Die Länge dieses Abschnitts und das Stretch-Maß bestimmen den Koppelfaktor (Abbildung 9). Das kann anschaulich dadurch erklärt werden, dass der Faserdurchmesser vom Beginn der Er-

sorbierend oder reflektierend wirken und im Ergebnis das einfallende Lichtspektrum richtungsabhängig in seine Bestandteile auffächern. Die Beugung eines monochromatischen Lichtstrahls (enthält nur eine Frequenz) demonstriert Abbildung 6. Die Gesetzmäßigkeiten zwischen Gitterlinienabstand d , Wellenlänge μ , Einfallswinkel α und den möglichen Reflexionswinkeln stellt die Gittergleichung her. Wertet man sie für $\mu/d = 0,4$ und Einfallswinkel $\alpha = 45^\circ$ aus, entsteht Abbildung 6. Für die angenommenen Zahlenwerte sind nicht mehr als die vier gezeigten reflektierten Strahlen möglich. Meist wird nur der Strahl 1. Ordnung ($m=1$) verwendet. Verändert sich die Wellenlänge des einfallenden Strahls, verändert sich auch der Ausfallwinkel dieses Strahls.

Die prinzipielle Funktionsweise eines Gitterdemultiplexers zeigt Abbildung 7, eine der möglichen praktischen Realisierungen Abbildung 8. Beide Anordnungen sind reziprok, d. h. sie können sowohl Licht in seine Wellenlängenbestandteile zerlegen (Demux) als auch diese zusammenführen (Mux).

Koppler. Sie haben einen Eingang und n Ausgänge. Der am häufigsten anzutreffende Typ ist der bikonische Schmelz-

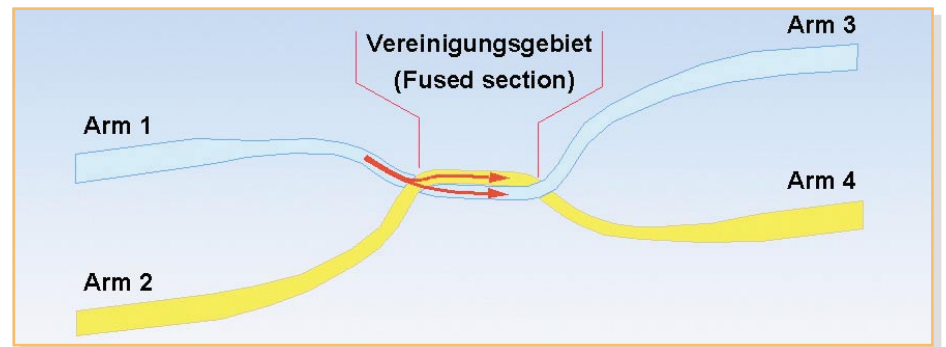


Bild 9: Arbeitsweise des Schmelzkopplers

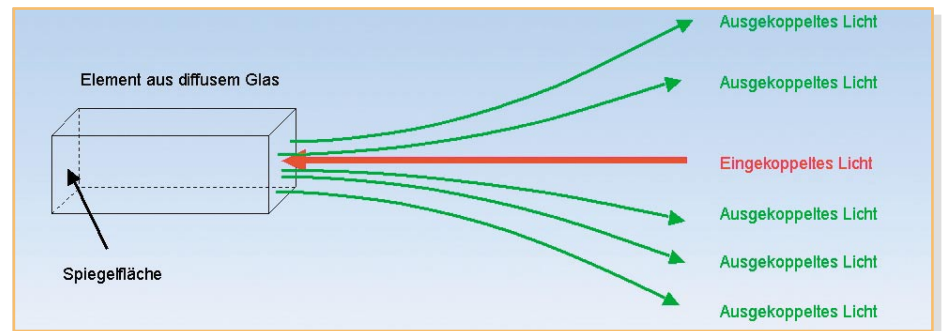


Bild 10: Arbeitsweise des Sternkopplers

Optische Koppler

Zum Aufteilen oder Zusammenführen von Lichtströmen auf Glasfasern dienen

koppler (Bi-Taper oder evanescent field coupler). Er beruht auf dem Übergreifen

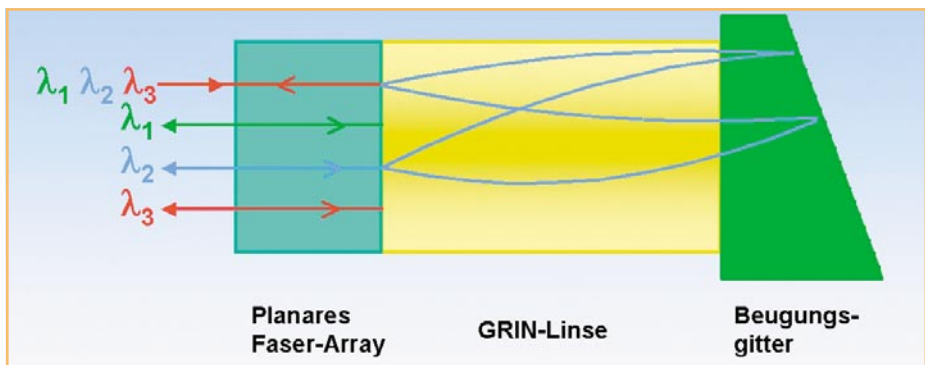


Bild 8: Praktische Ausführung eines Wellenlängen(de)multiplexers

hitzungszone bis zu ihrem Zentrum konisch abnimmt. Dadurch werden die einlaufenden Strahlen immer steiler, bis für einen Teil der Strahlen die Bedingung der Totalreflexion nicht mehr eingehalten wird und ihr Übertreten in den benachbarten Lichtwellenleiter stattfindet.

Wenn in Arm 1 eingespeist wird, ist Arm 2 leistungslos. Die Leistung verteilt sich in einem bestimmten Verhältnis auf die Ausgänge 2 und 3. Bei gleichen Anteilen (50 % pro Ausgang) liegt ein 3-dB-Koppler vor.

Bei einem Koppler mit mehr als zwei Ausgängen spricht man auch von einem Sternkoppler. Er kann in der Art eines

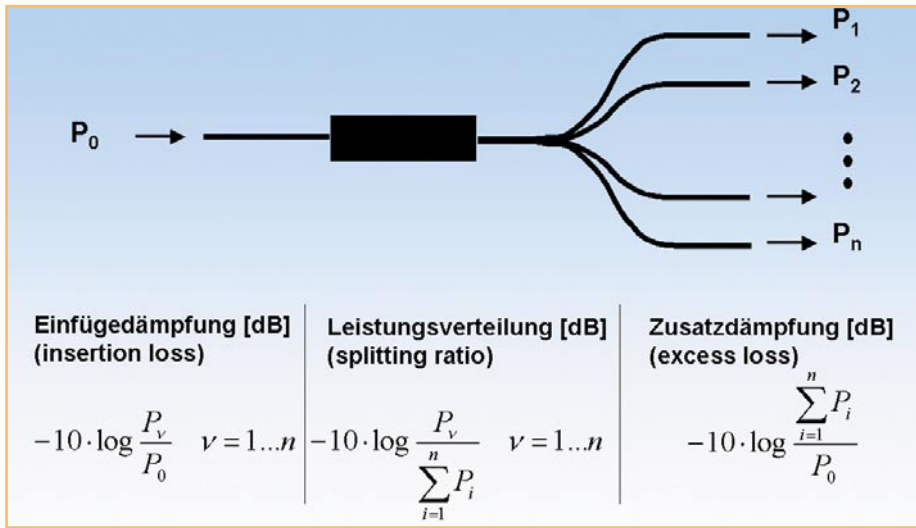


Bild 11: Kennwerte für Koppler

Schmelzkopplers aufgebaut sein oder wie in Abbildung 10 dargestellt. Dabei wird das zu verteilende Licht aus der Einkopplern in ein Element aus diffusum Glas eingestrahlt und von der verspiegelten Rückfläche in die Auskopplern reflektiert.

Technische Kennwerte optischer Koppler sind Einfügedämpfung, Leistungsverteilung und Zusatzdämpfung. Abbildung 11 beschreibt diese Größen.

Es gibt noch eine große Vielzahl optoelektronischer Bauelemente wie Schalter, Zirkulatoren, Richtkoppler, Modulatoren u. v. m., deren Beschreibung jedoch den Rahmen dieser Reihe sprengen würde. Viele praktische Ausführungen beruhen auf den Fortschritten der integrierten Optik und der Mikromechanik und haben äußerlich kaum mehr etwas gemein mit den Lösungen aus der Anfangszeit der optischen Übertragungstechnik.

Hohe Trägerfrequenz – hohe Übertragungsrate

Warum haben Lichtwellenleiter eine

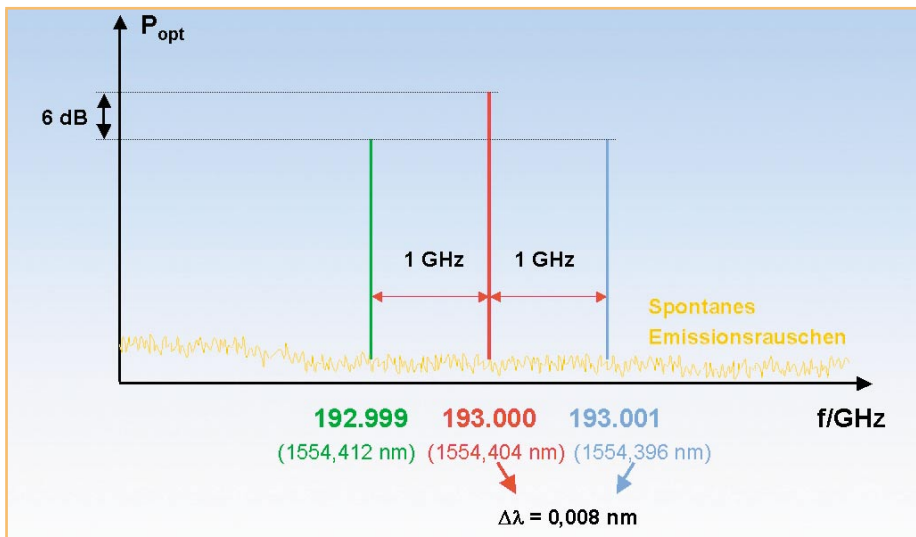


Bild 12: Optisches Modulationsspektrum

derart hohe Übertragungskapazität? Diese Frage lässt sich relativ leicht beantworten,

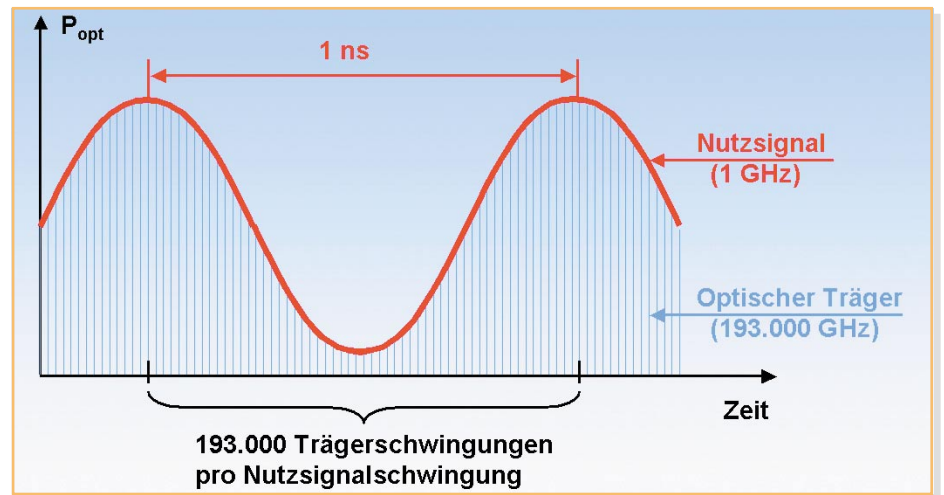


Bild 13: Intensitätsmoduliertes Signal

wenn man sich die Grundprinzipien der Intensitätsmodulation vor Augen führt. Bei der Intensitätsmodulation entstehen wie bei jeder Amplitudenmodulation zwei Seitenbänder, ein oberes in Regellage ober-

halb des Trägers, ein unteres in Kehrlage unterhalb des Trägers gelegen. Der Abstand zum Träger entspricht der Modulationsfrequenz. Durch die hohe Trägerfrequenz „verschmelzen“ Träger und Seitenbänder für Spektrumanalysatoren wegen deren endlicher Messbandbreite, können also in der Praxis nicht beobachtet werden. Abbildung 12 veranschaulicht dies am Beispiel eines Trägers von 193.000 GHz, der mit einem Nutzsignal von 1 GHz moduliert wird. Im Zeitbereich betrachtet, sieht man, dass 193.000 Schwingungen des Trägers auf eine Schwingung des Nutzsignals „passen“ (Abbildung 13). Die Hüllkurve des modulierten Trägers, die ja Träger der Information ist, kann also noch erheblich feiner verformt werden oder, anders gesagt, viel mehr Informationen abbilden, als in diesem Beispiel angenommen wurde.

Zum Vergleich: Die relative Bandbreite eines einzelnen TV-Kanals (8 MHz Band-

breite) am oberen Ende des TV-Bandes (860 MHz) beträgt ca. 1 %, die relative Bandbreite des gesamten terrestrischen Frequenzbereichs (ca. 1 GHz) auf dem LWL bei 1550 nm (193.000 GHz) nur ca. 0,5 %.

Glasfaserverbindungen

Die dauerhafte oder lösbare Verbindung von zwei Glasfasern ist in optischen Übertragungssystemen unvermeidlich. Lötstellen und elektrische Steckverbindungen entsprechen in der LWL-Technik Spleißen und optischen Steckverbindungen. Die äußerst dünnen Licht führenden Faserkerne (bei Monomodefasern typ. 8 µm Durchmesser) erfordern äußerste Präzision beim Ausrichten der Faserstirnflächen und die Vermeidung jeglicher Verunreinigungen.

Spleißen

Ein Spleiß ist eine untrennbare Verbindung zweier Glasfaserenden. Sie kann durch Kleben oder Verschmelzen im Licht-

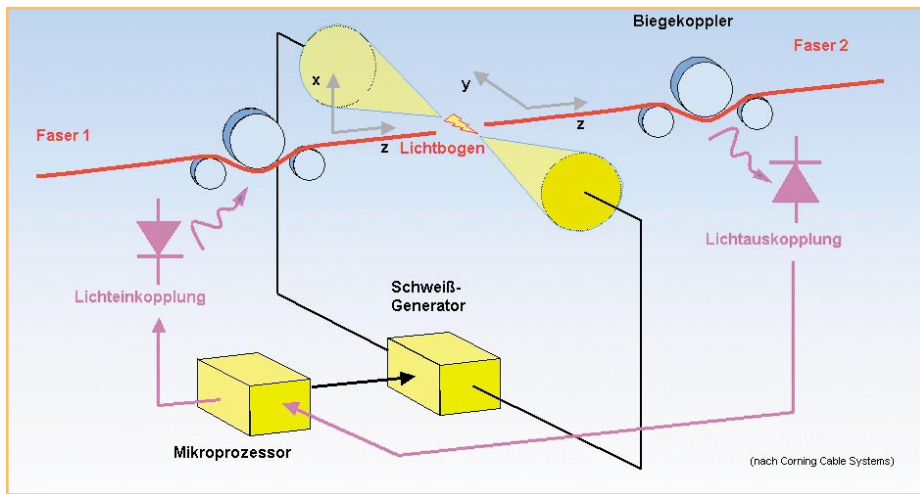


Bild 14: Prinzipschema eines Spleißgeräts

bogen oder mit einer Gasflamme hergestellt werden. Die Arbeitsschritte sind prinzipiell die gleichen.

Nachfolgend wird das Spleißen durch Verschmelzen als präziseste und langzeitstabilste Form der festen Verbindung beschrieben:

1. Entfernen der Kunststoffummantelung (Coating), bis die nackte Faser, bestehend aus Kern und Mantel, übrig bleibt.
2. Erzeugen glatter Bruchflächen an den zu verbindenden Faserenden.
3. Exaktes paralleles Ausrichten der Stirnflächen (Zentrierung der Faserachsen).
4. Annäherung der Stirnflächen auf ca. 10 % des Faserdurchmessers (ca. 1 μm).
5. Einschalten des Lichtbogens und weiteres Annähern der Faserenden. Nach wenigen Sekunden sind die Faserenden weißglühend und verschmelzen. Der Spleiß ist fertig.
6. Analyse des Spleißes.
7. Mechanischer Schutz des Spleißes durch Einlegen in eine mechanische Form und Vergießen.

Um die erforderliche Präzision beim Justieren der Fasern einzuhalten, gibt es halb-

oder vollautomatische Spleißgeräte (Abbildung 14). Die Faserenden werden – meist auf einem Display beobachtbar – in den drei Koordinaten x, y und z ausgerichtet. Der Schweißstromgenerator löst den Lichtbogen aus. Er wird von einem Mikroprozessor so gesteuert, dass der Lichtfluss durch den Spleiß optimal ist. Die Durchlichtmessung (LID™: Local Light Injection and Detection, Corning Cable Systems) ermöglicht die hochpräzise Kern-zu-Kern-Positionierung der Fasern und die Steuerung der Schweißzeit.

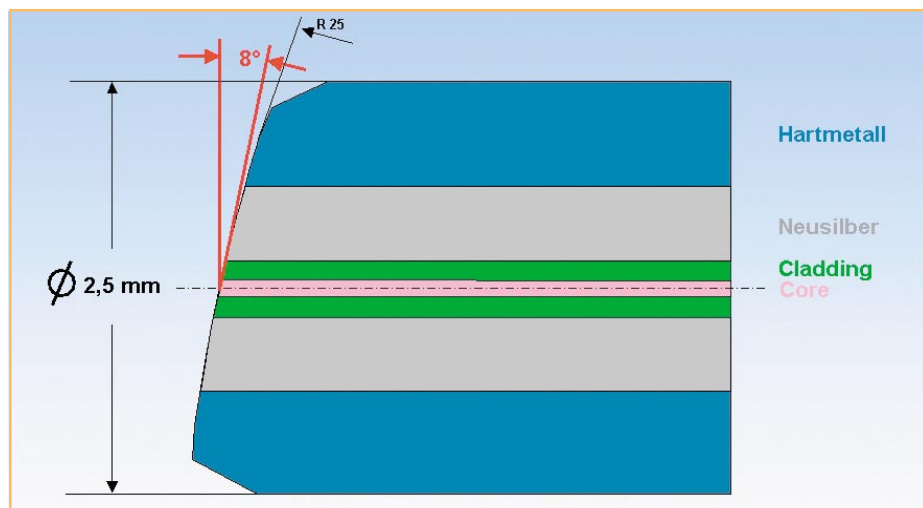


Bild 15: Die Parameter einer Steckerstirnfläche für eine reflexionsdämpfende „physical contact“-Verbindung

Optische Steckverbindungen

Ein optischer Übergang in einer Steckverbindung ist im Wesentlichen durch zwei Parameter gekennzeichnet:

1. Einfügedämpfung. Sie wird durch präzise Ausrichtung der gekoppelten LWL-Kerne gering gehalten. Sie liegt im Bereich weniger Zehntel dB. Wegen der geringen Dämpfungswerte moderner Single-Mode-Glasfasern verkürzt sich die nutzbare Feldlänge dennoch durch jede Steckverbindung um viele hundert Meter.
2. Reflexionsdämpfung. Reflexionen treten immer auf, sobald Licht aus einer Glasfaser austritt oder in diese eingestrahlt wird. Ursache sind Rauigkeiten der Stirnfläche im μm -Bereich. Zur Vermeidung von Reflexionen schleift man die Faser-Stirnflächen schräg-konvex an. Dadurch werden die reflektierten Lichtanteile in den Mantel gebrochen.

Abbildung 15 zeigt die Parameter einer Steckerstirnfläche für eine reflexionsdämpfende „physical contact“-Verbindung. Damit sind Einfügedämpfungen $I_L \sim 0,1\text{dB}$ (I_L : Insertion Loss) und Reflexionsdämpfungen $R_L > 70\text{dB}$ (R_L : Reflection Loss) erreichbar.

Um die Montage der Stecker auf die Glasfaser im Feld zu vermeiden, weil hier



Bild 16: Stecker mit einem „LWL-Schwänzchen“

die erzielbare Genauigkeit geringer ist als bei der werkseitigen Fertigung, gibt es Stecker mit einem „LWL-Schwänzchen“ (pigtail), welches dann mit dem langen Lichtwellenleiter verschweißt wird (Abbildung 16).

Gefahren der Laser-Strahlung

Ein in das Auge fallender Laserstrahl wird durch die Linse des Auges extrem stark gebündelt ($10^5 - 10^6$), wodurch auf der Netzhaut sehr hohe Leistungsdichten entstehen. In den pigmentierten Strukturen unter der Netzhaut wird die Laser-Strahlung absorbiert und dabei in Wärme umgewandelt. Diese bewirkt im Auge irreversible Gewebeeränderungen, insbesondere in der sensorischen Netzhaut. Die daraus resultierende Störung des Sehvermögens

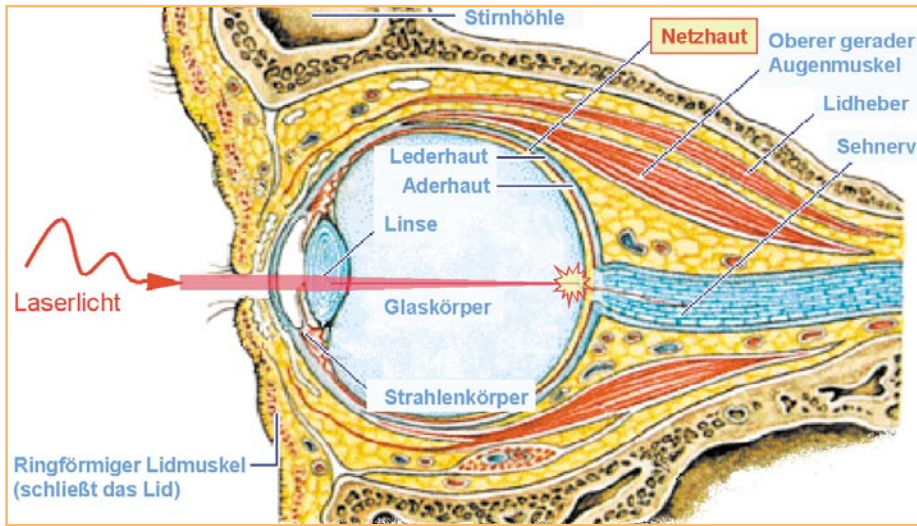


Bild 17: Schädigung des Sehnervs durch Laserlicht

gleichem. Es ergibt sich, dass für diese Konstellation bei 1310 nm Wellenlänge die am Faserende (Stecker) austretende Leistung $< 1,6 \text{ mW}$ sein muss, um das Auge nicht zu gefährden. Für 10 mW Lichtleistung sind bei 1310 nm mindestens 35 cm Abstand einzuhalten. Im Bereich von 1550 nm sind dagegen Leistungen bis 100 mW unbedenklich, weil das Auge in diesem Wellenlängenbereich erheblich unempfindlicher ist (Abbildung 19).

Um eine Gefährdung des Auges auszu-

hängt von der Lage des getroffenen Netzhautbereichs ab. An der Stelle schärfsten Sehens (dort wo die Augennachse die Netzhaut durchstößt) können bereits relativ geringe optische Leistungen erhebliche Sehstörungen verursachen (Abbildung 17).

Die Schädigung ist weiterhin von der Einfallsdauer und der Wellenlänge des Laserstrahls abhängig (Absorptionskurve von H_2O). Die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung an einem Lasergerät (Laser-Klassen) sind daher stark von der Frequenz abhängig und beruhen auf einer Einwirkungsdauer $> 1000 \text{ s}$ (Abbildung 18). Detailliertere Informationen gibt z. B. das Bundesamt für Strahlenschutz unter: <http://www.bfs.de/uv/laser/schutz.html>.

Wenn Laser-Licht aus einer Glasfaser austritt, weitet sich der Strahl mit zunehmendem Abstand zum Faserende auf. Dadurch sinkt die Strahlintensität (Lichtleistung/Fläche). Der ungünstigste Abstand zwischen Faserende und Auge beträgt 13 cm . Kleinere Abstände können vom Auge nicht mehr fokussiert werden.

Bei den meist verwendeten Monomode-

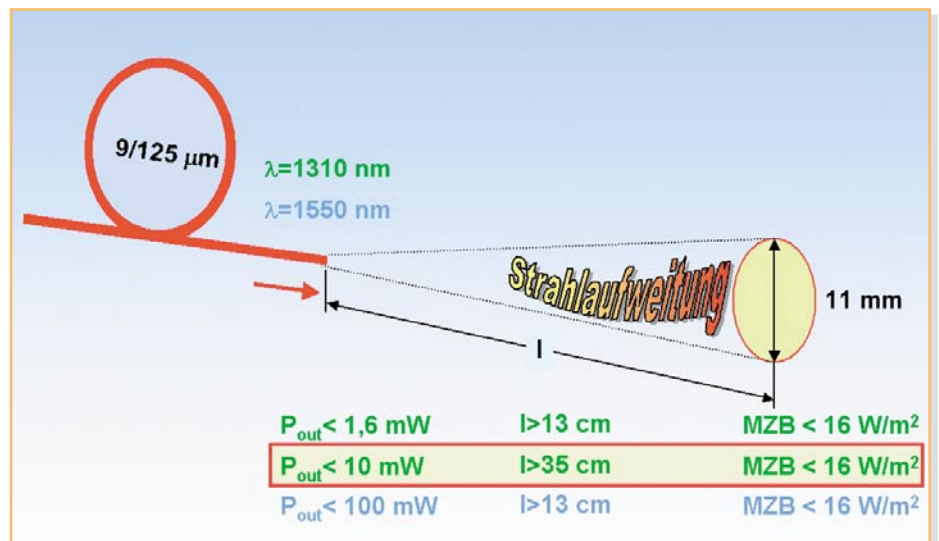


Bild 19: Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz

fasern mit 9 mm Core und 125 mm Coating ($9\mu/125\mu$) weitet sich der Strahl in 13 cm Entfernung auf ca. 11 mm Durchmesser auf. Damit lässt sich die Leistungsdichte berechnen und mit den MZB-Werten ver-

schließen, sind folgende Punkte zu beachten:

- Ein Austreten der Laser-Strahlung aus dem Lichtwellenleiter ist nach Möglichkeit zu vermeiden.
- Vor dem Einschalten des Laser-Senders ist der korrekte Aufbau der LWL-Verbindung zu prüfen.
- Sicherheitsabstand vom Auge zum Faserende von $> 35 \text{ cm}$ einhalten.
- Bei Laser-Sendern mit Schlüsselschalter nach Benutzung Schlüssel abziehen.
- Versuche, bei denen die Gefahr der MZB-Überschreitung besteht, im Laser-Sicherheitsraum durchführen.
- Die aushängenden Betriebsanweisungen und Kennzeichnungen sind zu beachten.

Verbotswidriges Handeln kann zum Verlust der gesetzlichen Unfallversicherung und der Lohnfortzahlung führen. **ELV**

Bild 18: Laser-Klassen und Grenzwerte

	$\lambda=1300 \text{ nm}$	$\lambda=1550 \text{ nm}$	Einstufung
Klasse 1 *)	$600 \mu\text{W}$	$800 \mu\text{W}$	Ungefährlich
Klasse 2 *)	Strahlung liegt nur im sichtbaren Spektralbereich		
Klasse 3A *)	3 mW und 16 W/m^2	4 mW und 1000 W/m^2	Ungefährlich ohne Strahlverkleinerung
Klasse 3B *)	500 mW	500 mW	Gefährlich für Augen
Klasse 4	keine Grenzwerte		Sehr gefährlich für Augen und Haut
MZB *)	16 W/m^2	1000 W/m^2	Maximal zulässige Bestrahlung des Auges

*) Zeitbasis 1000 s