Integrierte Optiken in der Nachrichtentechnik:

Flink wie das Licht

Die optische Nachrichtentechnik wächst aus dem Laborstadium heraus und breitet sich in der Betriebstechnik aus. In den Laboratorien arbeitet man schon an der Integration einzelner Komponenten, der sogenannten „Integrierten Optik", deren Bausteine Lichtsender, Lichtempfänger, Lichtwellenleiter und Modulatoren sind.

In der konventionellen Nachrichtentechnik werden bekanntlich elektromagnetische Schwingungen (Wellen) zur Übertragung von Informationen benutzt, die in einem Frequenzbereich von 1 kHz bis zu einigen GHz liegen, entsprechend einem Wellenlängenbereich von einigen Kilometern bis zu 1 cm. Diesen hochfrequenten Schwingungen werden die zu übertragenden niederfrequenten Signale überlagert. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer analogen Amplitudenmodulation (*Bild 1*).

Bei der digitalen Amplitudenmodulation ist die Übertragungsrate (gemessen in Bit/s) nun ganz entscheidend von der benutzten Trägerfrequenz abhängig. Man erkennt in Bild 1, daß die angegebene Impulsfolge nicht wesentlich erhöht werden darf, da sonst die Impulslänge in der Größenordnung der Wellenlänge der Trägerfrequenz liegt, wodurch die Impulsinformation teilweise oder ganz verlorengeht. Als Ergebnis dieser Überlegung kann man also festhalten, daß die Informationsrate, die man übertragen kann, mit steigender Trägerfrequenz (kleiner werdender Wellenlänge) zunimmt.

Die höchsten Trägerfrequenzen, die zur Zeit benutzt werden, liegen im GHz-Bereich (10^9 Hz). Überträgt man diese Überlegungen auf Träger im Bereich mit Wellenlängen von 1 µm, die mit

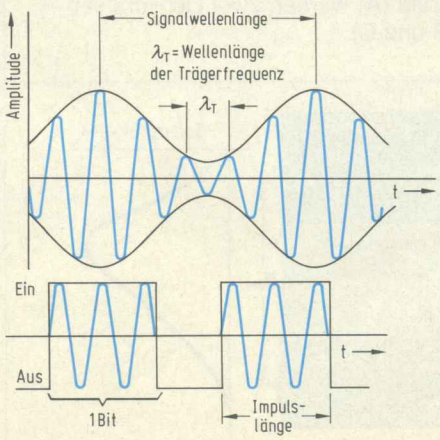
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(λ = Wellenlänge, c = Lichtgeschwindigkeit, f = Frequenz) einer Frequenz von $3 \cdot 10^{14}$ Hz entsprechen, so erhält man eine mögliche Übertragungsrate, die 300 000mal größer ist als die im GHz-Bereich.

Dieses hervorstechende Merkmal der optischen Nachrichtentechnik konnte aber erst durch die Entwicklung von Oszillatoren, die entsprechend hohe Frequenzen liefern, ausgenutzt werden. Oszillatoren für die optische Nachrichtentechnik sind z. B. Laser, die Licht in einem Wellenlängenbereich von 0,8 µm (rot) bis 2 µm (nahes Infrarot) aussenden.

Optische Datenübertragung per Glasfaser

Das bisher am weitesten entwickelte und beschriebene Verfahren [1] der optischen Datenübertragung ist das der Übertragung von Signalen über Glasfaserstrecken. Beispielsweise in einer Anlage zur Übertragung von Telefongesprächen wird das analog vorliegende Telefonsignal in einem A/D-Wandler in digitale Impulse umgesetzt (*Bild 2*). Diese Impulse steuern dann einen Halbleiterlaser an, der im Rhythmus der Impulse ein- und ausgeschaltet (moduliert) wird.



① **Amplitudenmodulation:** analog (oben) und digital (unten)

Über eine an den Laser angekoppelte Glasfaser gelangt das optische Signal dann zum Empfänger, wo dann die optische Information in eine elektrische umgewandelt wird. Anschließend wird dieses digitale Signal in einem D/A-Wandler wieder in das ursprüngliche analoge Telefonsignal umgesetzt.

Mit einer solchen Anordnung lassen sich heute rund tausend Telefongespräche über mehrere Kilometer durch eine dünne Glasfaser übertragen. Für eine konventionelle Übertragungsstrecke würde man armdicke Kupferkabel benötigen, in denen zudem auch noch die zu übertragenden Informationen durch äußere elektrische und magnetische Felder gestört werden können. Neben der Kompaktheit und Kleinheit zeigt sich also als weiterer Vorteil die Störunempfindlichkeit solcher Systeme.

Der in Bild 2 skizzierte Aufbau besteht aus einzelnen Komponenten, wie Laser, Glasfaser, Detektor und elektronischen Schaltungen, die zu einer Einheit zusammengebaut sind. Will man Signale über große Distanzen übertragen, so muß, bedingt durch die Dämpfung der Glasfaser, eine Relaisstation aus Komponenten aufgebaut werden. In ihr wird das optische Signal in elektrische Impulse umgewandelt, verstärkt und neu geformt, um dann das mit einem Laser zu modulieren und das optische Signal wieder in eine Glasfaser einzuspeisen.

Optik und Elektronik auf einem Chip

Der Grundgedanke integrierter Systeme besteht nun darin, Sende-, Relais-, Verarbeitungs- und Empfangsstationen nicht aus diskreten optischen und elektronischen Komponenten aufzubauen, sondern alle Komponenten, ähnlich wie bei integrierten Halbleiterschaltungen, in einer Einheit unterzubringen. Die einzelnen optischen Bauteile werden dazu in Planartechnik auf ebene Substrate (GaAs oder $LiNbO_3$) aufgebracht und zu Funktionseinheiten zusammengeschaltet. Die Funktionseinheiten sind untereinander mit Lichtwellenleitern verbunden, die in diesem Fall die Aufgabe der Leiterbahnen übernehmen, wie sie in elektrischen Schaltungen benötigt werden.

Um die Eigenschaften solcher optischen Systeme besser verstehen zu können, soll im folgenden näher auf die Funktionsweise dieser integrierbaren Bauteile eingegangen werden.

Für das Verständnis von integrierten optischen Systemen sind einige Grundprinzipien des Brechungsgesetzes von fundamentaler Bedeutung.

Wellenausbreitung nach Gesetzen der Optik

Eine wichtige Eigenschaft optischer Materialien wird durch den Brechungsindex (n) beschrieben. Er besagt, um wievielmal langsamer (oder schneller) eine Lichtwelle sich beim Übergang vom Medium 1 zum Medium 2 fortpflanzt (*Bild 3*).

$$\frac{C_1}{n_1} = \frac{C_2}{n_2}$$

Erfolgt die Einstrahlung der Lichtwelle schräg auf die Grenzschicht (*Bild 4*), so spaltet sich der Lichtstrahl A in zwei Lichtstrahlen B und C auf, die sich in unterschiedlichen Richtungen fortpflanzen. Die Richtungswinkel Φ_1 und Φ_2 ergeben sich aus dem Brechungsgesetz gemäß

$$n_1 \cdot \sin \Phi_1 = n_2 \cdot \sin \Phi_2$$

Vergrößert man nun den Winkel Φ_1, unter dem die Lichtwelle auf die Grenzschicht n_1/n_2 eingestrahlt wird, so tritt ab einem genau definierten Grenzwinkel Φ_T der Lichtstrahl C nicht mehr aus dem Medium 1 in das Medium 2 über, sondern wird nur noch in Richtung des Strahles B reflektiert (Bild 4).

Die ganze Energie des Strahles A geht also in den Strahl B über, so daß die Grenzfläche n_1/n_2 für Strahlen, die unter einem Winkel Φ_T eingestrahlt werden, die Wirkung eines Spiegels hat. In diesem Zusammenhang spricht man dann auch von Totalreflexionen, wobei Φ_T der Totalreflexionswinkel ist, für den folgender Ausdruck gilt:

$$\sin \Phi_T = \frac{n_1}{n_2}$$

Ein planarer Wellenleiter setzt sich nun aus zwei Grenzschichten zusammen, zwischen denen die Lichtstrahlen hin und her reflektiert werden und dabei Zick-Zack-Bahnen zurücklegen, was zu einer Weiterleitung der Lichtwellen führt.

Betrachtet man den Übergang n_1/n_2, an dem die Totalreflexion stattfindet, etwas genauer (*Bild 5*), so stellt man fest, daß der einfallende Lichtstrahl A etwas in das Medium 2 eintritt und dann erst in das Medium 1 zurückreflektiert wird.

Die Eindringtiefe X_L ist allerdings sehr klein (in der Größenordnung der Lichtwellenlänge) und hängt stark von dem Einstrahlwinkel Φ ab.

Infolge der für die weiteren Betrachtungen sehr wesentlichen Eindringtiefe X der Oberflächenwellen erhält man einen Versatz der beiden Strahlen A und B in Ausbreitungsrichtung von

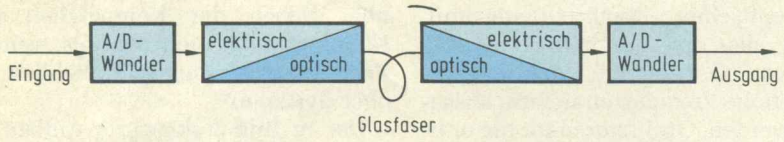
$$Z_L = \tan \Phi \cdot X_L$$

und eine effektive Dicke des Wellenleiters von

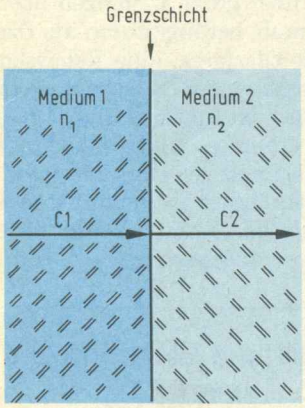
$$h_{eff} = h + X_L + X_S$$

Was ist Monomode und Multimode?

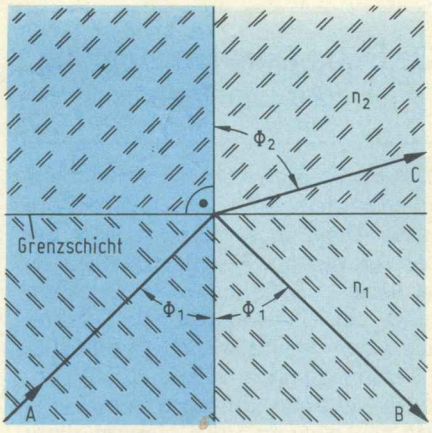
Neben der von der Strahlenoptik vorgegebenen Bedingung, daß ein Lichtstrahl sich nur dann in einem Wellenleiter ausbreiten kann, wenn er unter einem Winkel in den Wellenleiter eingekoppelt wird, der größer ist als



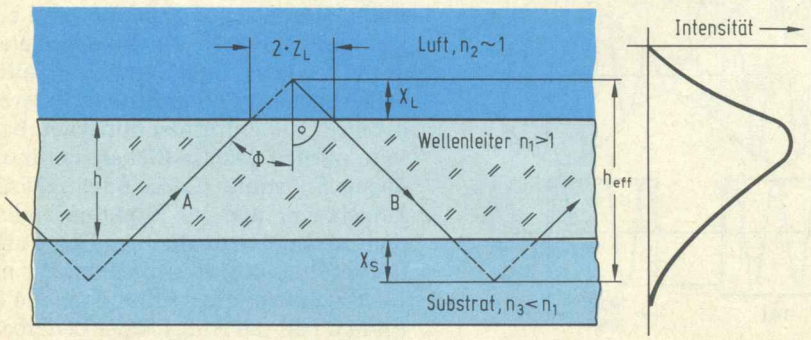
② **Komponenten der optischen Übertragungsstrecke:** Wandler und Lichtwellenleiter



③ **Verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten:** Übergang zwischen zwei optischen Medien



④ **Strahlenleiter:** Aus einem Lichtstrahl (A) werden zwei Lichtstrahlen (B und C)



⑤ **Im planaren Lichtwellenleiter:** Strahlengang und Intensitätsverteilung

der Totalreflexionswinkel Φ_T, gibt es noch eine weitere wellenoptische Bedingung, die erfüllt werden muß. Nach dieser wellenoptischen Voraussetzung sind nur solche Lichtstrahlen ausbreitungsfähig, deren Phasenflächen (z. B. Wellenberge) nach zweimaliger Reflexion über die Punkte A und B wieder übereinstimmen (*Bild 6*), was einer konstruktiven Interferenz gleichkommt. Diese Voraussetzung kann aber nur von einer ganz bestimmten Anzahl von Winkeleinstrahlungen erfüllt werden.

Andere Lichtstrahlen, die mit einem größeren oder kleineren Einstrahlwinkel in den Wellenleiter eingespeist werden, löschen sich demzufolge durch destruktive Interferenzen aus.

Die Winkeleinstellungen, die zu einer Weiterleitung der Lichtstrahlen führen, werden auch als Lichtleitermoden bezeichnet.

Die Anzahl der Ausbreitungsmoden hängt in erster Linie von dem Verhältnis des Wellenleiterdurchmessers zur Lichtwellenlänge ab. Für dicke Wellenleiter ($h \cong 100 \cdot \lambda$) erhält man mehrere Hundert mögliche Ausbreitungsmoden, so daß man auch von Multimode-Lichtleitern spricht. Sehr dünne Wellenleiter ($h \cong \lambda$) ermöglichen hingegen nur eine Ausbreitungsform, wobei man diese Leiter als Monomode-Lichtleiter bezeichnet.

Halbleiterlaser im Lichtleiter eingebaut

Als Lichtsender für integrierte optische Systeme kommen in erster Linie Halbleiterlaser in Frage, da sie mehrere vorteilhafte Eigenschaften in sich vereinbaren [7]. Die wichtigsten Eigenschaften sind dabei:

- Die spektrale Breite ($\Delta \lambda$),
- die Modulierbarkeit,
- die Integrierbarkeit
- und geringe Kosten.

Ein Halbleiterlaser besteht aus mehreren unterschiedlich dotierten Galliumarsenidschichten, die entweder n-leitend oder p-leitend sind. Legt man nun an den äußeren Schichten ein elektrisches Feld an, so kommt es bei Überschreitung einer bestimmten elektrischen Feldstärke in der n-leitenden „aktiven Zone" infolge von Elektronen/Loch-Rekombinationen [4] zur stimulierten Emission von Lichtquanten.

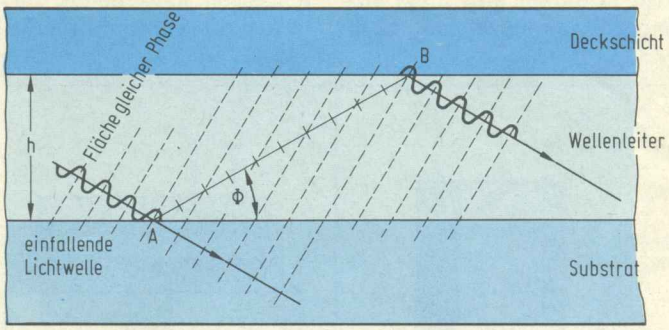
Baut man nun diese aktive Zone in Form eines Wellenleiters auf (*Bild 7*), der durch Stufenprofile (Gitter) begrenzt ist, so bildet sich durch diese vorgegebene Geometrie eine stehende Welle aus. Der Wellenlängenbereich (spektrale Breite) des Lichtes, das über das zweite Stufenprofil ausgekoppelt wird, läßt sich durch die Geometrie des Stufenprofils einengen, da nur ganz definierte Lichtwellenlängen in der Lage sind, zwischen den wie Spiegel wirkenden Gittern eine stehende Welle aufzubauen.

Ein solcher Aufbau, bei dem sich nur für bestimmte Lichtwellenlängen (Frequenzen) Resonanzbedingungen ergeben, läßt sich mit einem elektrischen Schwingkreis vergleichen, so daß man hierbei auch von einem optischen Resonator spricht.

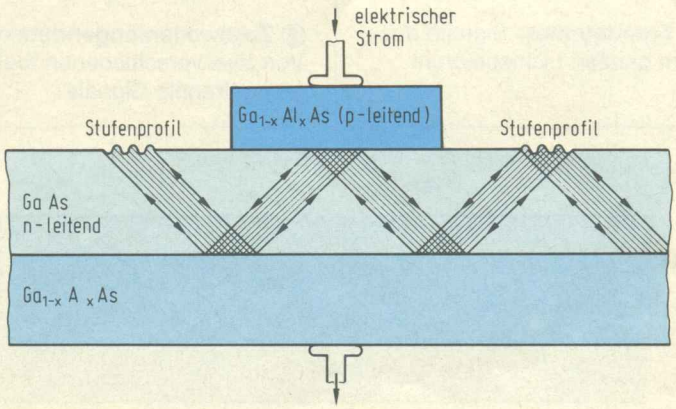
Selektive Lichtempfänger: Wie man sie aufbaut

Als integrierbare Detektoren sind die Halbleiterdetektoren von großer Bedeutung. Sie bestehen ebenfalls aus mehreren Schichten unterschiedlicher Dotierung. Die gebräuchlichste Form von Halbleiterdetektoren ist die PIN-Diode (*Bild 8*). Sie besteht aus zwei hochdotierten n- bzw. p-Schichten, die von einem schwachdotierten Gebiet getrennt sind. Tritt nun Lichtstrahlung auf die n-Schicht, so werden durch die Absorption (Aufnahme) der Lichtenergie Elektronen-Loch-Paare gebildet, die zu einem elektrischen Strom führen [6]. Dieser Strom ist über mehrere Zehnerpotenzen proportional zu der einfallenden Lichtintensität.

Eine interessante Variante dieser Halbleiterdetektoren ist der Zweiwellenlängendetektor [5], der unterschiedliche Lichtwellenlängen voneinander getrennt detektieren kann (*Bild 9*). Dieser Lichtempfänger besteht aus Indium-Gallium-Arsenid-Phosphid-Schichten mit unterschiedlicher atomarer Zusammensetzung, die zu unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten führen. Die erste Schicht ist dabei für kurzwelligere (energiereiche) Strahlung empfindlich, während die hintere Schicht die langwelligere (energieärmere) Strahlung empfängt, die von der ersten Schicht durchgelassen wird.



⑥ **Ausbreitungsfähige Mode:** ein möglicher Strahlengang



⑦ **Laser im planaren Lichtleiter:** Stufenprofile bestimmen die Wellenlänge

Die unterschiedlichen optischen Signale (λ_1, λ_2), die simultan vorliegen, werden elektrisch getrennt herausgeführt und können dann weiterverarbeitet werden.

Mit einer solchen Diode lassen sich dann zwei unterschiedliche Informationen gleichzeitig in einem Wellenleiter übertragen. Über den einen Kanal (λ_1) könnten z. B. Telefongespräche übertragen werden, während der andere Kanal (λ_2) für das Kabelfernsehen benutzt wird.

Optische Filter trennen die Wellenbereiche

Filter haben die Aufgabe, unterschiedliche Spektralkomponenten voneinander zu trennen. Befinden sich in einem Wellenleiter nun zwei unterschiedliche Signal-Komponenten mit den Wellenlängen λ_1 und λ_2, die getrennt weiterverarbeitet werden sollen, ohne sie vorher in elektrische Signale (Zweiwellenlängendetektor) umzuwandeln, so müssen sie mit einer entsprechenden optischen Anordnung getrennt werden.

Dabei wird nunmehr ein Effekt aus der Wellenoptik herangezogen, nach dem eine stufenförmige Störung im Wellenleiter Lichtwellen unterschiedlicher Frequenzen in unterschiedlichen Richtungen reflektiert (*Bild 10*); ein ähnlicher Aufbau wurde schon im Zusammenhang mit den Halbleiterlasern besprochen. Die Lichtwellen, die von den Störungen reflektiert werden, verstärken sich oder löschen sich durch Interferenz aus. Unter welchen Winkeln eine Verstärkung bzw. Weiterleitung der Lichtwellen auftritt, hängt von der Geometrie und von der Lichtwellenlänge ab. Durch die Geometrie der Stufenform läßt sich also eine bestimmte Wellenlänge (λ_1) über das Stufenprofil weiterleiten, während eine andere Wellenlänge (λ_2) in sich zurückreflektiert oder ausgekoppelt wird.

Modulation im Lichtleiter verändert die Ausbreitungsrichtung

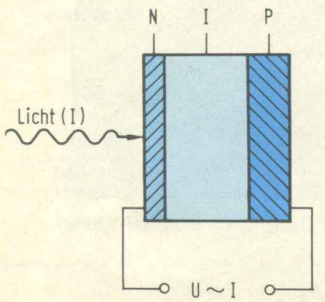
Wie schon angedeutet wurde, läßt sich die Lichtwelle, die übertragen und verarbeitet werden soll, schon im Sender mit der gewünschten digitalen Information modulieren. Das geschieht, indem der Strom durch die Laserdiode im Rhythmus der digitalen Information ein- und ausgeschaltet wird. Neben dieser digitalen Amplitudenmodulation gibt es noch weitere Modulationsverfahren für Lichtwellen. Man kann eine kontinuierlich vorliegende Lichtwelle hinsichtlich ihrer Polarisation, Frequenz, Phase, Ausbreitungsrichtung und Amplitude (Intensität) modulieren.

Für integrierte optische Systeme sind die beiden letztgenannten Modulationsarten von größter Bedeutung, so daß an dieser Stelle nur auf diese beiden Möglichkeiten eingegangen werden soll.

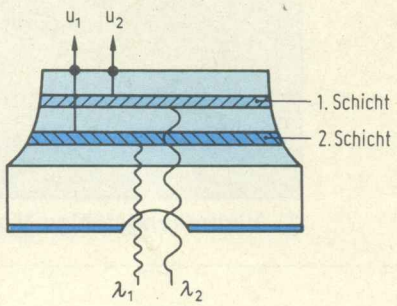
Der akustooptische Modulator ist ein Modulator, der die Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle variiert. Die Lichtablenkung erfolgt dabei durch Beugung an periodischen Brechungsindexschwankungen, die über den Lichtwellenleiter laufen. Die Brechungsindexvariationen entstehen durch Ultraschallwellen, die dem Wellenleiter durch periodische Verdichtungen und Verdünnungen des Mediums räumliche Strukturen aufprägen (*Bild 11*).

Strahlt man nun eine Lichtwelle durch diese räumlich modulierte Struktur von Brechungsindexänderungen unter einem bestimmten Winkel ein, so wird die Lichtwelle an diesen Strukturen in genau definierten Richtungen abgelenkt. Schaltet man die Ultraschallquelle wieder ab, so pflanzt sich die Welle in die ursprüngliche geradlinige Richtung weiter fort.

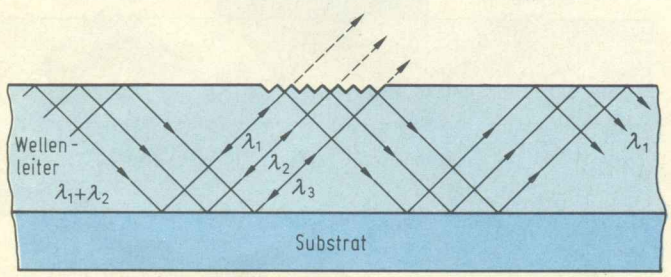
Der Abstrahlwinkel Φ_B ist nun von der Frequenz der Ultraschallquelle, dem Einstrahlwinkel und der Lichtwellenlänge abhängig. Mit einer solchen Anordnung kann man die Lichtwellen nicht nur mit einer gewünschten digitalen Information modulieren, sondern auch umschalten und in unterschiedlichen Schaltkreisen weiterverarbeiten. Da der Abstrahlwinkel von der Lichtwellenlänge abhängt, sind auch variable optische Filter denkbar, die sich mit der Ultraschallfrequenz durchstimmen lassen.



⑧ **Fotodetektor:** Signale aus dem ganzen Lichtspektrum



⑨ **Zweiwellenlängendetektor:** Von zwei verschiedenen Wellenlängen getrennte Signale



⑩ **Filtert Wellenlängen:** Die Geometrie des Stufenprofils bestimmten den Durchlaßbereich

Steuerbares Übersprechen erleichtert die Verteilung

Ein sehr wichtiges und vielseitiges Element zur Modulation ist der steuerbare Richtkoppler (*Bild 12*). Bringt man zwei Lichtwellenleiter auf einen sehr engen Raum zusammen, so daß der Abstand zwischen beiden in der

Größenordnung der Eindringtiefe X_L liegt, so wird von dem lichtführenden Wellenleiter 2 Licht in dem Wellenleiter 1 übertragen.

Die Übertragung kann sogar nach der Strecke 1_O vollständig vom Wellenleiter 2 zum Wellenleiter 1 erfolgen. Die Einkopplung erfolgt allerdings nur dann vollständig, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in beiden Leitern gleich ist. Legt man nun aber über Elektroden (Bild 12) eine Spannung an, so wird in dem Wellenleiter 2 ein elektrisches Feld produziert, das bei geeigneter Wahl des Wellenleitermaterials zu einer Brechungsindexänderung und damit zur Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit führt.

Bei entsprechender Dimensionierung der angelegten Spannung läßt sich dann das bereits im Wellenleiter 1 befindliche Licht nach der Strecke 1_O wieder in den Wellenleiter 2 überführen, so daß das Licht bei angelegter Spannung im Wellenleiter 2 verbleibt. Durch Ein- und Ausschalten der Spannung gelangt also das Licht einmal aus dem Wellenleiter 2 und einmal aus dem Wellenleiter 1, wodurch dieser Modulatortyp auch als Umschalter für optische Signale fungieren kann.

Umschalter, die nach diesem Prinzip funktionieren, lassen sich heute bereits zu einer 4 × 4-Schaltmatrix integrieren und mit Schaltfrequenzen bis zu 1 GHz betreiben.

Ein weiterer Schritt wäre der Übergang zu optisch bistabilen Bauelementen, Verstärkern und Oszillatoren, die man mit solchen Richtkopplern realisieren könnte, wenn man einen Teil des Lichtes, das aus dem Wellenleiter 1 austritt, über einen Detektor in ein elektrisches Signal umwandeln würde und dieses Signal dann nach einer Verstärkung den Elektroden zuführte.

Die Anwendung integrierter optischer Bausteine steckt noch in ihren Anfängen, da bisher nur Einzelkomponenten realisiert werden konnten. Der erste komplette Baustein, der wohl in naher Zukunft realisiert wird, ist der optische Drehsensor [8, 9]. Er besteht aus einem Ring-Interferometer mit Lichtsender, Lichtempfänger, Linsen, Strahlteiler, Lichtleiter und Phasenmodulator als Einzelkomponenten. Mit einem solchen Drehsensor, der als Ersatz für den bisherigen mechanischen Kreiselkompaß gedacht ist, lassen sich Drehbewegungen von kleiner als 2°/h sicher nachweisen.

Dipl.-Ing. Gerhard Wiegleb

Literatur

[1] *Wiegleb, G.*: Grundlagen der optischen Datenübertragung. FUNKSCHAU 1980, Heft 6, Seite 83.

[2] *Tamir, T.*: Integrated Optics, 2nd Ed. Springer Verlag, Berlin (1979).

[3] *Geckeler, S.*: Berechnungsverfahren für die Lichtausbreitung in Glasfasern. Siemens Forschungsberichte, Bd. 6 (1977), Nr. 3.

[4] *Yariv, A.*: Lichtleiteroptik. Spektrum der Wissenschaft 1979, Heft 3, Seite 10.

[5] *Tien, P. K.; Giordmaine, J. A.*: Building the integrated Optical Circuit. Optical Spectra 1981, Heft 6, Seite 55.

[6] *Mischel, P.*: Fotoelektrische Detektoren. FUNKSCHAU 1980, Heft 6, Seite 79.

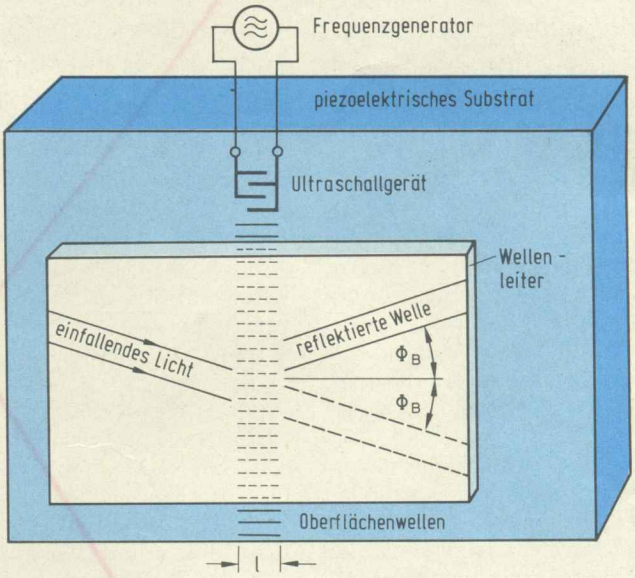
[7] *Clemen, C.; Späth, W.*: Fotoelektrische Senderelemente. FUNKSCHAU 1981, Heft 6, Seite 71.

[8] *Petermann, K.*: Eine neue Meßmethode für Drehbewegungen. FUNKSCHAU 1981, Heft 25/26, Seite 82.

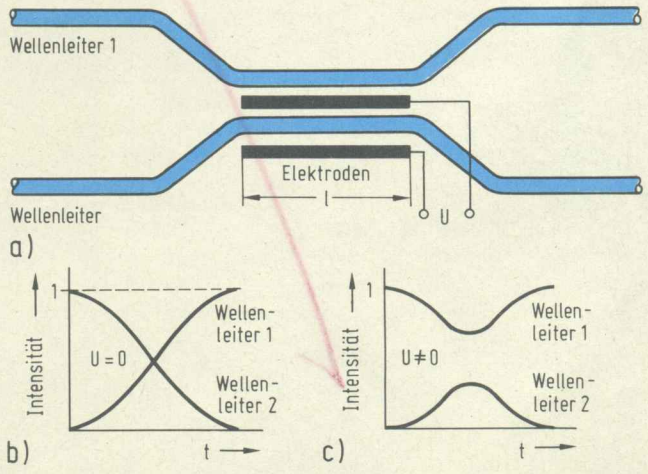
[9] *Klement, K.; Schiffner, G.*: Drehsensor in integrierter Optik gebaut. VDI-Nachrichten 1982, Nr. 5, Seite 10.

Stichworte zum Inhalt

Integrierte Optiken, Übertragungskapazität bei Lichtleitern, optische Übertragungseinrichtungen, optische Gesetze, planare Lichtleiter, Monomode, Multimode, Halbleiterlaser, Zweiwellenlängendetektor, optische Filter, optische Modulatoren, optische Richtkoppler.



⑪ **Optischer Modulator:** Ultraschallwellen verändern den Brechungsindex



⑫ **Steuerbarer Richtkoppler:** Durch ein elektrisches Feld läßt sich das Übersprechen verändern (a); ohne Spannung (b) und mit Spannung (c)