

Mit Terabit pro Sekunde durch photonische Netze

Stand und Aussichten der optischen Kommunikationstechnik

Helmut Zarschizky und Alexander Richter

Mit Glasfasertechnologie lassen sich enorme Datenmengen übertragen – mittlerweile sind Übertragungskapazitäten von mehr als 1 Terabit pro Sekunde über eine Distanz von 4000 km möglich. Doch Rauschen und nichtlineare Effekte beeinträchtigen die Signale erheblich. Deshalb ist es nur durch Kombination optischer Kompensatoren und elektronischer Signalrekonstruktion gelungen, die Reichweite faseroptischer Nachrichtenübertragungssysteme deutlich über 1000 Kilometer auszudehnen. Um zukünftig Telekommunikation und Internet-Datenverkehr über ein einheitliches Netz durchführen zu können, gilt es, die derzeit noch starr verschalteten photonischen Kommunikationsnetze so zu gestalten, dass sie auf schwankenden Bedarf flexibel reagieren können – möglichst mithilfe rein optischer Netzelemente.

In den letzten zwanzig Jahren ist die Geschwindigkeit der Datenübertragung über faseroptische Verbindungen ganz erheblich gestiegen: Waren es Mitte der achtziger Jahre noch 155 Megabit pro Sekunde und Mitte der neunziger 2,5 Gigabit pro Sekunde, so beträgt sie derzeit 10 Gb/s, doch die Vorbereitungen für 40 Gb/s laufen bereits. Die Signale dienen der Telekommunikation – hauptsächlich dem Telefonieren – und dem Datenverkehr z. B. über das Internet. In den USA und einigen asiatischen Regionen übersteigt der Anteil der reinen Datenübertragung in den Kommunikationsnetzen mittlerweile den des Telefonverkehrs.

Lange Zeit liefen Daten- und Sprachdienste auf getrennten Kommunikationsnetzen. Doch man möchte Telefonate, Videokonferenzen, Bilder und Texte etc. zuverlässig und möglichst ohne Zeitverzögerung über ein vereinheitlichtes Netz übertragen und so die Vielfalt der Netze reduzieren. Hierfür gilt es, die Netzwerke durch neue Technik und Verfahren für die Übertragung von Daten und Sprache gleichermaßen tauglich zu machen.

Mitte der neunziger Jahre konnte die Übertragungsgeschwindigkeit mit dem Kapazitätsbedarf nicht mehr Schritt halten. Weil es zu teuer war, die Kapazitäten über das Verlegen zusätzlicher Faserstrecken zu erhöhen, etablierte sich das Wellenlängen-Multiplexverfahren DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex). DWDM gestattet es, gleichzeitig viele Lichtwellenlängen über eine gemeinsame Glasfaser

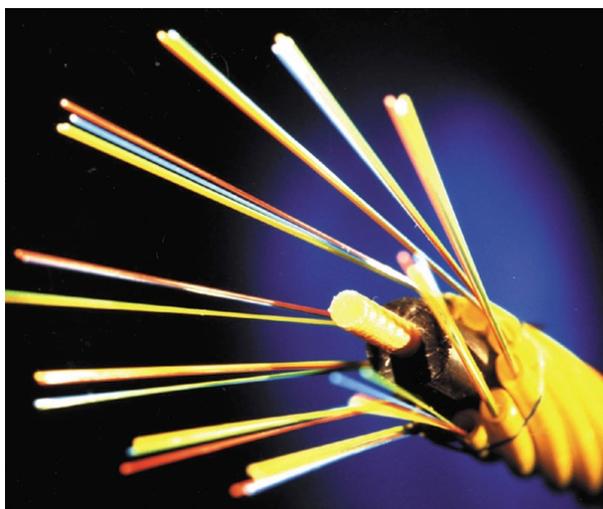


Abb 1: Die Glasfaser ermöglicht es, riesige Datenmengen zu übertragen – vor allem dank so genannter Multiplextechniken, die viele Datenkanäle auf einer Faser vereinigen. (Foto: Siemens)

zu übertragen, und brachte einen Sprung in der Kapazität, der durch alleinige Bitratenerhöhung – mangels schneller Elektronik und Optoelektronik – unmöglich gewesen wäre.

Modernste Übertragungstrecken arbeiten heute mit Datenraten von 10 Gb/s pro Kanal und können bis zu 160 Lichtwellenlängenkanäle in einer Glasfaser übertragen. Da man nicht nur Einzelfasern, sondern Bündel mit bis zu 72 Fasern verlegt, ist eine maximale Kapazität von $72 \times 160 \times 10$ Gb/s für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen möglich. Das entspricht 115,2 Terabit pro Sekunde! Eine solche Übertragungskapazität im Weitverkehrsnetz zu realisieren, würde den wachsenden Bedarf auf lange Zeit decken und zudem zahlreiche neue Anwendungen ermöglichen. Ein guter Ausgangspunkt dafür ist die Tatsache, dass sich Glasfasern als wesentlicher Bestandteil photonischer Netze inzwischen in allen Ebenen der Netzhierarchie finden (Abb. 2). Ihre besonderen Vorteile sind die sehr geringen Übertragungsverluste und die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen.

In diesem Artikel geben wir Einsichten in die derzeitige Leistungsfähigkeit photonischer Kommunikationsnetze. Ausgangspunkt ist die Technik der Glasfaserübertragung in „einfachen“ Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im Weitverkehrsbereich und der dafür erforderliche Aufwand an Optik, Opto-Elektronik und Elektronik. Über die zukünftige Gewichtung der Partnerschaft von Photonik und Elektronik wird dabei seit

Dr. Helmut Zarschizky, Siemens AG, CT SM SD, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München;
Dr. Alexander Richter, Siemens AG, ICN CP SE T2, Hofmannstraße 51, 81359 München

vielen Jahren diskutiert. Teilweise uferte dies in extreme Szenarien aus, bei denen z. B. rein optische Schalterlösungen (Kennzeichen O-O-O) gegenüber den heutigen optoelektronischen Systemen (Kennzeichen: O-E-O) als überlegene und unmittelbar bevorstehende Alternativen ins Feld geführt wurden. Doch dazu ist anzumerken, dass es solchen „All optical“-Lösungen grundsätzlich noch an „Intelligenz“ und „Merkfähigkeit“ mangelt, d. h. es fehlen optische Speicher und digital-optische Signalverarbeitung.

Anschließend wird es um den Übergang vom heute eher quasi-statisch verschaltetem zum dynamisch rekonfigurierbaren Netz gehen. Ursprünglich sind die

Abb. 2: Kommunikationsnetze sind hierarchisch organisiert (vgl. Tabelle), beginnend bei lokalen Netzsegmenten (LAN) bis hin zum Weitverkehrsnetz (WAN). Mehrfarbige Verbindungen kennzeichnen die parallele Übertragung mehrerer Lichtwellenlängen über eine Faser (DWDM), rote Verbindungen sind Glasfasern mit Einzelkanalbelegung (Time Division Multiplexing, TDM).

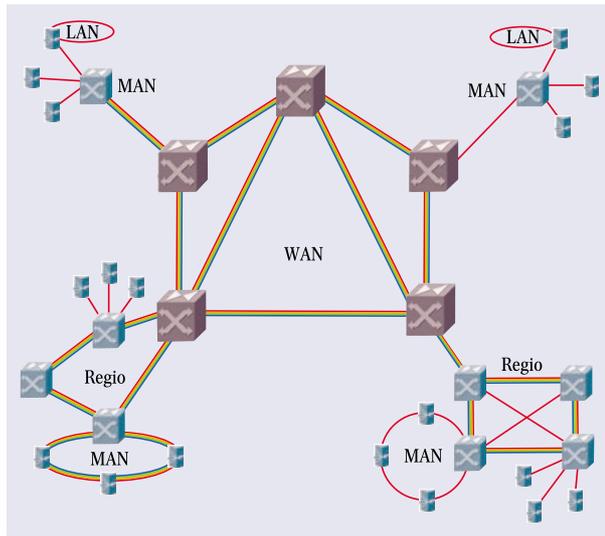


Tabelle: Netzhierarchie

Netzebene	Distanz in km	Datenrate pro Kanal in Gb/s	Kanalzahl	Transportmethode
WAN (Wide Area Network)	> 500	2,5–10	16–160	SDH & DWDM
Regio (Regional Network)	100–500	2,5–10	16–32	SDH & DWDM
MAN (Metropolitan Area Network)	20–100	1–2,5	8–16	SDH, Packet (& WDM)
LAN (Local Area Network)	< 10	0,01–1	1	Packet

SDH (Synchronous Digital Hierarchy): zeitgetaktetes Senden und Vermitteln, verbindungsorientiert
 Packet: Ungetaktetes Senden und Vermitteln von Datenpaketen variabler Länge, verbindungslos

Netze für die Übertragung von Sprachdiensten ausgelegt worden, d. h. für langfristige und andauernde Verbindungen zwischen Vermittlungsstellen mit garantierter Verfügbarkeit. Seit einigen Jahren steigt aber, getrieben durch das Internet, der Anteil am paketorientierten Datenverkehr immer stärker an. Dadurch werden neue Technologien notwendig, die das Transportnetz deutlich agiler machen. Dies bedeutet zunächst das befristete Zuschalten von „Standleitungen“ und in Zukunft gegebenenfalls das „verbindungslose“ Verschalten für IP-Datenpakete, gegebenenfalls zusammengefasst in langen Paketbündeln („Bursts“).

Technik der Glasfaserübertragung

Optische Kommunikation über Glasfaser findet vorzugsweise bei Lichtwellenlängen um 1550 nm (Infra-

rot) statt. Dies entspricht etwa einer Trägerfrequenz von 200 THz. Derart hohe Trägerfrequenzen gestatten – im Vergleich zu den heute in der Kommunikation gebräuchlichen Funkwellen – prinzipiell sehr hohe Modulationsraten. Die Möglichkeiten sind dabei „nach oben offen“, wenn man einmal das heute maximal erreichbare elektronische Zusammenfassen unterschiedlicher Datenströme mit 80 Gb/s oder die photonische Variante des Zeitmultiplexens mit 160 Gb/s als Anhaltspunkt betrachtet.

Der lichterzeugende Sendeooszillator der Wahl für die photonische Kommunikationstechnik ist die Laserdiode, der Empfänger die Photodiode. Jahrzehntelange Komponentenentwicklung auf dem Gebiet der optoelektronischen Halbleiter hat effiziente und leistungsstarke Laserdioden (mehrere mW) mit sehr genau einstellbaren und stabilen Emissionswellenlängen hervorgebracht. Diese sind für Datenraten bis 2,5 Gb/s direkt über den Treiberstrom modulierbar, ab 10 Gb/s empfiehlt sich kontinuierlicher Betrieb mit nachgeschaltetem optischen Modulator. Schnelle Photodioden bis 40 Gb/s sind kommerziell schon länger verfügbar, an Empfängern bis 80 Gb/s wird derzeit gearbeitet.

Laserdioden sind für das gesamte Wellenlängenrastrer des C- und L-Bandes des Kommunikationswellenlängenfensters um 1550 nm der Glasfaser verfügbar (C-Band: 1525–1565 nm, L-Band: 1565–1605 nm). Die Kanalabstände betragen derzeit minimal 50 GHz, was einer Wellenlängendifferenz von 0,4 nm in dem vorliegenden Wellenlängenbereich entspricht. Eine solche Menge von hochselektierten Laser-Chips zu erzeugen und diese mit Toleranzen unter 1 µm optisch und mechanisch aufzubauen und für den Feldeinsatz tauglich zu machen hat selbstverständlich einen hohen Preis. Kostendämpfend wären abstimmbar Laserdioden, die einen Großteil des C- oder L-Bandes abdecken können, sie sind deshalb Gegenstand der aktuellen Komponentenentwicklung.

Die photonische Basis für die optische Kommunikation ist also der optoelektronische Sender (intern oder extern modulierte Laserdiode), die Monomode-Glasfaser und der Empfänger (Photodiode, ggf. mit Vorverstärker). Die maximale Streckenlänge für Datenraten von 10 Gb/s liegt im Bereich von etwa 100 km und ist im Wesentlichen durch die Faserdämpfung begrenzt. Mit beeindruckend niedrigen Dämpfungswerten von 0,2 dB/km hat das optische Signal nach 80 km dennoch 16 dB (Dezibel) an Leistung eingebüßt, was eine etwa 40-fache Abschwächung bedeutet. Eine entsprechende Verstärkung ist z. B. durch Erbium-dotierte Faserverstärker (Erbium doped Fibre Amplifier, EDFA) möglich. EDFAs bestehen aus einer optisch mit Hochleistungslaserdioden extern gepumpten Faser (typische Pumpwellenlängen: 980, 1490 nm), die alle durch sie hindurchlaufenden Lichtsignale der verschiedenen Wellenlängenkanäle durch stimulierte Emission simultan verstärkt.

Zusätzlich zur Faserdämpfung macht sich über die sehr langen Übertragungsstrecken die chromatische Dispersion des Fasermaterials bemerkbar. Die zeitlich extrem kurzen Lichtpulse eines hochratigen Signals von etwa 10 Gb/s korrespondieren mit einer gewissen spektralen Breite, die – auch bei augenscheinlich geringer Dispersion – zu einer Pulsverbreiterung des zeitlichen Signals führt. Gegensteuern kann man mit optischen Elementen gegenläufiger Dispersion (Abb. 3). Dabei handelt es sich typischerweise um entsprechend

gezüchtete Faserstücke. Leider sind diese „Stücke“ nicht besonders kurz: Um die Dispersion zu kompensieren benötigt man bei einer 80 km langen Übertragungsstrecke ca. 20 km Kompensationsfaser, welche zudem noch etwa doppelt so hohe Dämpfung besitzt, wie die eigentliche Übertragungsfaser! Hochwertige Faserverstärkermodule sind daher so aufgebaut, dass die dispersionskompensierende Faser (DCU, Dispersion Compensating Unit) zwischen zwei einzelne Faserverstärker geschaltet ist (siehe Abb. 3, unterer Teil). Natürlich möchte man die DCUs gerne als kompaktere und verlustärmere optische Bauelemente realisieren, woran seit kurzem intensiv geforscht wird.

Dämpfung und chromatische Dispersion sind lineare Fasereffekte, die hohe Signaldatenraten behindern. Dazu kommt ein weiterer, lange Zeit weitgehend vernachlässigbarer linearer Effekt, die Polarisationsmodendispersion (PMD), welche die unterschiedlich schnelle Ausbreitung der zwei Hauptpolarisationsrichtungen in der Faser beschreibt. Begünstigt durch hohe Pulsspitzenleistungen und gegebenenfalls viele Wellenlängen im Faserkern (mit etwa 10 μm Durchmesser) gesellen sich nichtlineare Effekte wie stimulierte Raman- und Brillouin-Streuung oder Vierwellenwechselwirkung sowie Selbst- und Kreuzphasenmodulation

hinzu. Eine ausführliche Erläuterung all dieser Effekte würde den Umfang dieses Artikels sprengen. Die wichtigsten Auswirkungen der Effekte sind im Kasten „Nichtlineare Effekte bei der Glasfaserübertragung“ skizziert. Zu diesem Thema existiert eine umfangreiche Literatur (siehe z. B. [1] und [2]).

Grundsätzlich wird die Reichweite von faseroptischen Übertragungssystemen durch zwei Grenzen bestimmt: die Grenze für zu niedrige optische Kanalleistung (Rauschgrenze) und die Grenze durch zu hohe optische Leistung (Grenze durch nichtlineare Effekte). Die nichtlinearen Effekte und ein von den Faserverstärkern durch verstärkte spontane Emission erzeugter Rauschanteil im optischen Signal (beschrieben durch das optische Signal-zu-Rausch-Verhältnis) erfordern letztlich einen drastischen Eingriff in die Signale. Dies geschieht in den sogenannten 3R-Regeneratoren (3R: Re-amplification, Re-shaping, Re-timing).

Üblicherweise benötigt man dazu bei Übertragungsstrecken mit Wellenlängenmultiplex zunächst eine spektrale Zerlegung des Faserlichtes in seine einzelnen Signalwellenlängen (Demultiplex), eine optoelektronische Wandlung Licht-zu-Strom, eine elektronische Signalaufbereitung (reshaping, retiming), anschließende Wandlung Strom-Licht mit einer Laserdiode passender

Nichtlineare Effekte bei der Glasfaserübertragung

In den Einmodenfasern für photonische Kommunikationsnetzen spielen nichtlineare Effekte eine besondere Rolle. Ursachen sind die hohe Ausgangsleistung (5 bis 10 mW) der verwendeten Laser, die Nutzung optischer Verstärker (EDFA, 40-fache Verstärkung) und die vielen gleichzeitig vorliegenden Wellenlängenkanäle in einer Glasfaser (z. B. 32).

In der Faseroptik führt die Kombination von Lichtwellenführung in einem sehr kleinem Kernbereich (etwa 10 μm Durchmesser) und einer sehr niedrigen Dämpfung zu hohen Intensitäten über lange Strecken hinweg. So beträgt etwa die Gesamtleistungsdichte, die von 80 Wellenlängenkanälen mit jeweils 3 mW Leistung in der effektiven Fläche von 80 μm^2 erzeugt wird, umgerechnet 3 kW/mm^2 .

Obwohl der nichtlineare Brechungsindex und die Gewinnkoeffizienten von Raman- und Brillouin-Streuung in Quarzglas um mehrere Größenordnungen kleiner sind als in den gewöhnlich in der nichtlinearen Optik eingesetzten Materialien, sind aufgrund der sehr hohen Intensitäten nichtlineare Effekte von grundlegender Bedeutung für die Auslegung optischer Übertragungssysteme.

Die bedeutsamen, nicht-resonanten nichtlinearen

Wechselwirkungen des Lichtfeldes mit der Glasfaser sind:

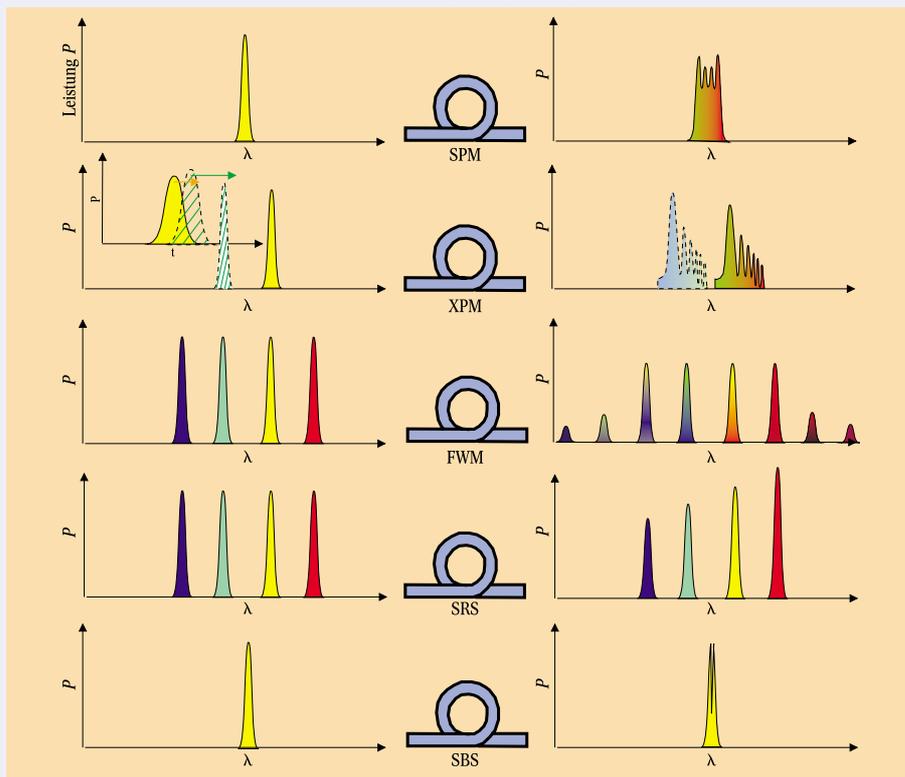
- ▶ Selbstphasenmodulation (SPM): Spektrale Verbreiterung / „Chirp“,
- ▶ Kreuzphasenmodulation (XPM): Kanalkopplung / „Chirp“,
- ▶ Vierwellenwechselwirkung (FWM): Generierung von Wellenlängen, Kanalübersprechen,
- ▶ Stimulierte Raman-Streuung (SRS): Verkippung der Kanalleistung, Kanalübersprechen,

- ▶ Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS): Verlust der Trägerfrequenz, Übermodulation.

Die durch das elektrische Feld E im Glas verursachte Polarisation P wird durch die nichtlinearen Effekte infolge von Elektronenhüllendeformationen (SPM, XPM,

FWM) und Molekülschwingungen (SRS, SBS) beeinflusst.

Die Effekte auf die resultierenden Lichtsignale sind in der Abbildung über ihrem Wellenlängenspektrum dargestellt. Die Bandbreite der Einzelkanäle ist im Vergleich zum Abstand der Wellenlängenkanäle stark verbreitert dargestellt.



Wellenlänge (dies bedeutet gleichzeitig reamplification) und ein erneutes Multiplexen aller regenerierten Wellenlängensignale in die weiterführende Faser. Dies ist ein enormer Aufwand und wandlerfreie „all optical“, also optisch transparente, 3R-Regeneratoren sind deshalb seit Jahren Gegenstand der Forschung und Entwicklung.

Ein beeinträchtigt Signal führt auf der Empfangsseite zu Detektionsfehlern der übertragenen Bitmuster,

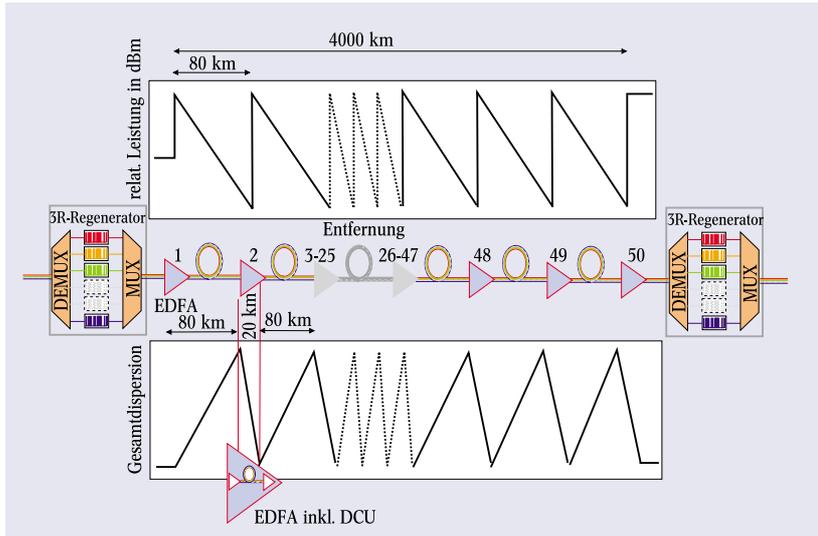


Abb. 3: In einer ca. 4000 km langen optischen Kommunikationsleitung (Mitte) für eine 10 Gb/s schnelle Datenübertragung überbrücken fünfzig Faser-Verstärker-Einheiten (nur tw. eingezeichnet) die Distanz zwischen zwei optoelektronischen 3R-Regeneratoren. Oben ist der Verlauf der optischen Signalleistung und unten der stark vereinfachte Verlauf der chromatischen Dispersion der Strecke zu sehen.

die als Bit-Error-Rates (BER: Anzahl der „falschen“ zur Anzahl der übertragenen Bits) spezifiziert werden. Die Ansprüche an eine akzeptable BER sind bei den riesigen Datenmengen entsprechend hoch und sie soll bei höchstens $BER = 10^{-15}$ liegen, d. h. ein Bitfehler pro Billiarde übertragener Bits ist erlaubt. Hier lassen sich schnelle mathematische Algorithmen nutzen und durch fehlerkorrigierende Maßnahmen und zusätzlich übertragene Redundanzinformation Bitfehler auf der Empfangsseite herausrechnen. Derartige „Forward Error

Correction“ (FEC) kann die nutzbare Entfernung einer Faser Verbindung (inklusive EDFAs und DCUs) deutlich vergrößern, indem sie z. B. eine BER empfangsseitig rechnerisch von 10^{-6} wieder auf 10^{-15} korrigiert. Andererseits verringert sich eventuell die effektive Datenrate, wenn die Bit-Übertragungsrate von z. B. 10 Gb/s unverändert bleibt. Die FEC benötigt einen Teil der vorhandenen Übertragungskapazität, der bei 7 bis 30 Prozent liegt.

Die Demultiplexer bzw. Multiplexer zur spektralen Zerlegung bzw. Kombination der Wellenlängenkanäle einer Glasfaser sind rein optisch arbeitende Bauteile und bilden ein schönes Exempel für den Einsatz sowohl miniatur-optischer als auch integriert-optischer Lösungen. Eine einfache und kompakte miniatur-optische Möglichkeit für einen Wellenlängen(de)multiplexer ist die Kaskadierung von optischen Bandfiltern in Form von einzelnen Dünnschichtfiltern. Dabei trifft ein wohlkollimierter Lichtstrahl nach Austritt aus der Glasfaser unter geeignetem Winkel auf einen mit vielen Dünnschichtlagen beschichteten, transparenten Träger. Vielfachreflexionen innerhalb der unterschiedlich stark brechenden Dünnschichtlagen führen zu konstruktiver Interferenz und letztlich zur Transmission der gewünschten Wellenlänge durch den Filter. Alle anderen Wellenlängen werden vom Filter reflektiert.

Abbildung 4 zeigt, wie sich ein (De)Multiplexer aus mehreren Dünnschicht-Bandfiltern realisieren lässt. Dabei ergeben sich jedoch einige Beschränkungen. Das ist zum einen die schwierige Justierung und die handhabbare Größe des Bauteils sowie besonders die Kanalinhomogenität auf Grund der kleinen, aber dennoch vorhandenen Reflexionsdämpfung der Einzelfilter. Diese kann bei bis zu 0,1 dB liegen und führt zu Leistungsunterschieden für die einzelnen Wellenlängenkanäle. Nach zehn Filterpassagen ist so nur noch etwa 80 % der ursprünglichen Lichtleistung eines in den (De)Multiplexer eingetretenen Kanals vorhanden.

Die „Integrierte Optik“ hat bei planaren (De)Multiplexerbausteinen insbesondere im Materialsystem „Glas-auf-Silizium“ (SiO_2/Si) seit Anfang der 90er-Jahre beachtliche Fortschritte gemacht. Bei der integrierten Optik handelt es sich um eine Wellenleitertechnik, bei der – wie bei der Glasfaser – Licht in den Kernen von sehr dünnen (wenige Mikrometer Querabmessun-

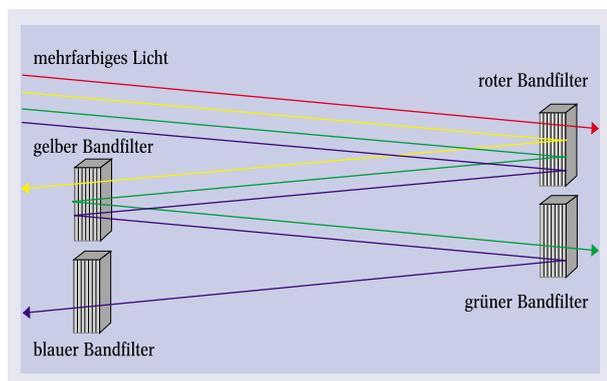


Abb. 4: Mit einem optischen Aufbau aus mehreren Dünnschicht-Bandfiltern lässt sich mehrfarbiges Licht spektral in eine – allerdings beschränkte – Anzahl von Wellenlängenkanäle zerlegen bzw. wieder zusammensetzen und so ein Multiplexer bzw. Demultiplexer realisieren. (aus [3])

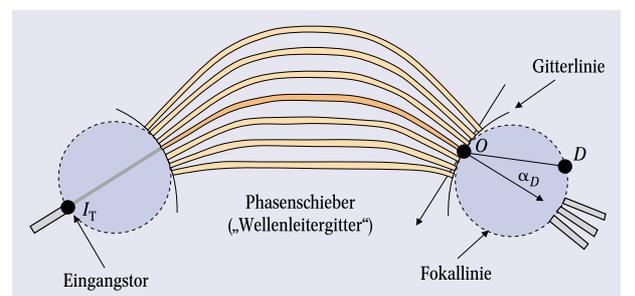


Abb. 5: In einem optischen Phased Array (auch „AWG“) liegt am Eingangstor (I_T) des planar-optischen (De)Multiplexerbausteins die Glasfaser an, deren Wellenlängenkanäle getrennt werden sollen. Von I_T divergiert das optische Mehrkanalsignal zum Phasenschieber, der aus N Einzelwellenleitern besteht. Diese N Wellenleiter führen jeweils alle Wellenlängen zur Gitterlinie. Im Vergleich zu „normalen Beugungsgittern“ lässt sich der Beugungswinkel für die einzelnen Wellenlängen zusätzlich durch die Phasenlage steuern. Diese münden am Ende des anschließenden „Freistrahlsbereichs“ in den entsprechenden Ausgangskanälen des AWGs. (aus [4])

gen), aber recht langen (viele Millimeter bis Zentimeter) Lichtwellenleitern mithilfe der Totalreflexion geführt wird. Kern- und Mantelmaterial weisen also Unterschiede in ihren Brechungsindizes auf. Im Materialsystem SiO_2/Si beträgt der Unterschied Δn etwa 1 %. SiO_2/Si -Technik ist vorteilhaft wegen ihrer geringen Materialdämpfung und der guten Ankoppeleigenschaft an die Glasfaser, auch wenn das Lichtfeld der Faser aus einem runden Kern austritt und in den üblicherweise rechteckigen Kern planarer Wellenleiter eingekoppelt werden muss (Feldanpassung). Nachteilig bei dieser Glas-Technik sind die recht großen Krümmungsradien (einige Millimeter), welche die Wellenleiter aufgrund der geringen Brechungsindexdifferenz zwischen Kern und Mantelmaterial nicht unterschreiten dürfen. Dies macht die integrierte optischen Schaltungen (englisch: Planar Waveguide Circuits, PLCs) recht groß.

Ein Beispiel für integrierte Optik ist der erwähnte (De)Multiplexer. Er wird sehr erfolgreich als planares optisches Phasentransmissionsgitter (früher als Phased Array, PHASAR, neuerdings auch als Arrayed Waveguide Grating, AWG, bezeichnet) realisiert, das mit den wellenleiterbasierten Technologien der integrierten Optik sehr gut harmonisiert. Abbildung 5 zeigt die schematische Darstellung eines optischen Phased Arrays. Während bei einem „normalen“ Beugungsgitter die Beugungswinkel für die einzelnen Lichtwellenlängen durch die jeweilige Wellenlänge λ und die Gitterkonstante g bestimmt sind, ist beim Phased Array eine zusätzliche Steuerung durch die Phasenlage des Lichtes an der Gitterlinie gegeben. Die einzelnen Phasenverschiebungen sind durch die Länge der jeweiligen Wellenleiter des Phasenschiebers bestimmt. Die Gestalt der Gitterlinie kann dabei gekrümmt sein, um einen sehr hohen Beugungswirkungsgrad zu ermöglichen („Blaze-Effekt“).

AWG-basierte (De)Multiplexer sind inzwischen sehr ausgeklügelte integriert optische Schaltungen. AWGs mit Spitzenwerten von 400 Wellenlängenkanälen mit Wellenlängendifferenzen von 0,4 nm ließen sich bereits herstellen, die Schaltungsverluste liegen unter 5 dB (30 % Lichtausbeute), und das Kanalnebensprechen ist kleiner als -35 dB (0,03 %) [5].

Damit wären die wichtigen Eigenschaften und Bauelemente einer optischen Mehrkanal-Punkt-zu-Punkt-Verbindung von Weitverkehrsnetzen skizziert und im Einzelfall näher beschrieben. Bei Verwendung abstimmbarer Komponenten, wie Laserdioden und Filtern, bieten sich Möglichkeiten zur Kostensenkung. Rein optische arbeitende 3R-Regeneratoren wären attraktive Alternativen zu den derzeit existierenden aufwändigen optisch/elektronischen Lösungen.

Abb. 7:

Im miniaturisierten 1x4-Schalter sind alle Faserenden mit Kollimatoren verbunden, die das Licht auf wenige mm aufweiten – eine Divergenz der Freistrahlen wird so praktisch vernachlässigbar. Das Licht der Eingangsfaser besitzt hier sechs Einzelwellenlängen, die nach Reflexion an dem hocheffizienten Beugungsgitter unter verschiedenen Winkeln auf eine Zylinderlinse gelenkt werden. Diese parallelisiert die Strahlengänge und lenkt das Licht auf eine Einheit aus Mikrospiegelarray und Spezialreflektor. Je nach Stellung der einzelnen Mikrospiegel trifft das Licht auf eine von vier unterschiedlich geneigten Sektionen des Reflektors und durchläuft vertikal versetzt wieder die Linse. Da die Lichtwege in dieser Anordnung alle exakt gleich sind, ist das Licht auf dem Rückweg zum Reflexionsgitter wieder vollständig kollimiert. Je nach vertikaler Position der Strahlen treten sie über die Kollimatoren in die Ausgangsfasern 1 bis 4 ein.

Photonische Kommunikationsnetze

Auch zukünftige Kommunikationsnetze werden die Vorteile von Optik und Elektronik gemeinsam nutzen. Da diese gleichberechtigt vertreten sind, spricht man auch von hybriden Netzwerken. Die Elektronik dient in diesen Netzen vorwiegend der Aufbereitung, dem elektronischen Verschalten (Routing), der Regeneration und dem Empfang der Daten. Die Daten werden optisch mit Hilfe der DWDM-Technologie transportiert. Kostenintensiv ist und bleibt die optisch-elektrische (O-E-O) Konversion der Daten in den Netzübergabepunkten. In Zukunft werden aber Technologien in den Netzwerken eingesetzt werden, die es gestatten, die Anzahl der optisch-elektronischen Konversionen drastisch zu reduzieren. Die Einführung von optischer Vermittlungstechnik für DWDM-Kanäle wird es ermöglichen, Daten ohne elektronische Konvertierung zu verteilen. Hierzu werden der „Optische Add/Drop

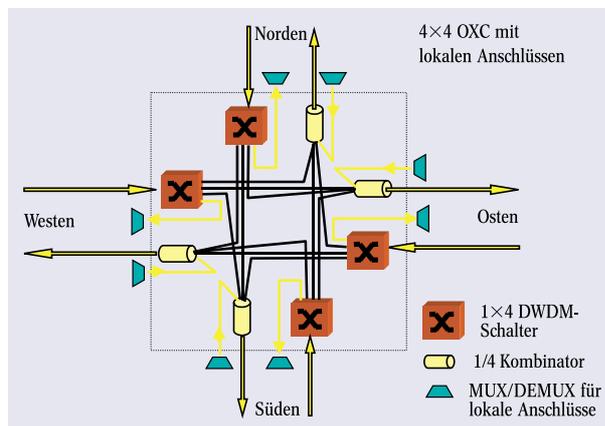
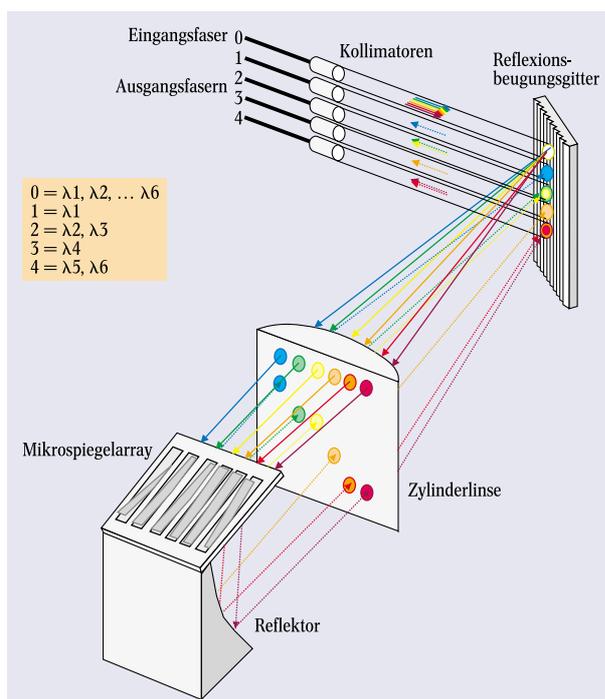


Abb. 6:

Ein optischer Crossconnect (OXC) mit 4x4-Ports, der zwei bidirektionale DWDM-Strecken (Osten-Westen und Norden-Süden) verschalten kann und Add-Drop-Möglichkeiten für lokale Anschlüsse besitzt. Die roten Blöcke sind 1x4-DWDM-Schalter. Diese legen einen optischen Eingang auf vier verschiedene Ausgänge und verteilen dabei die Wellenlängen des Eingangskanals beliebig auf diese vier Ausgänge.



Multiplexer“ (OADM) und der „Optische Cross-connect“ (OXC) eingesetzt werden. Ein OADM dient zum (rekonfigurierbaren) Aus- bzw. Einkoppeln von einzelnen DWDM-Kanälen aus bzw. in eine DWDM-Strecke. Ein OXC dient zur Vermittlung von einzelnen DWDM Kanälen oder Kanalgruppen zwischen Fasern unterschiedlicher Netzsegmente (Abb. 6).

Mit der Einführung der optischen Netzelemente OADM und OXC wird die optische Schicht des Netzwerkes dynamisch. Punkt-zu-Punkt-Verbindungen sind dann nicht mehr starr und eindeutig, sondern Merkmale wie Kanalzahlen und Streckenlängen lassen sich variieren. Da die Standzeiten der optischen Verbindungen deutlich größer als Sekunden sind, spricht man hier von verbindungsgeschalteten Netzen (engl. „circuit switching“).

Auf einen Aspekt soll an dieser Stelle besonders hingewiesen werden: Aus ökonomischen Gründen (Kosten der Sende- und Empfangsgeräte) ist die Übertragung von Signalen mit einer Datenrate von kleiner 2,5 Gb/s über eine einzelne Wellenlänge im Netzwerk nicht sinnvoll. Netzbetreiber sind daher bemüht, die vorhandenen DWDM Kanäle in ihrem Netz bis zu ihrer maximalen Kapazität (2,5, 10 oder künftig 40 Gb/s)

„aufzufüllen“. Dieser Vorgang – im Englischen recht anschaulich als „grooming“ (pflegen) bezeichnet – ist heute und in naher Zukunft nur elektronisch zu verwirklichen. In den Netzelementen der Kommunikationsnetze werden somit auch weiterhin elektronische Vermittlungseinheiten neben den optischen Netzelementen zu finden sein.

Im Folgenden werden zwei optische Lösungen für den 1×4-Schalter vorgestellt. Die erste Lösung basiert auf einer „Freistrahloptik“ mit miniaturisierten Bauelementen aus Beugungsgitter, Linse und einem Spezialreflektor. Die Ein- und Ausgänge sind hierbei durch ein fünfadriges Faserbündchen realisiert. Wie Abbildung 7 illustriert, können dabei die Wellenlängenkanäle den Ausgängen einzeln oder in Kombination zugeordnet werden. Die Schaltzeiten liegen dabei unter 10 ms.

Die zweite Lösung beruht auf einer planar-optischen Wellenleiterschaltung, die das im letzten Abschnitt vorgestellte Arrayed Waveguide Grating (AWG) als (De)Multiplexer nutzt (Abb. 8). In der integriert-optischen Lösung werden die im letzten Kapitel beschriebenen AWG in Kombination mit planar-optischen Schalterlösungen benutzt, wobei die Lichtpfade durch Wellenleiterstrukturen zu realisieren sind. Das Schaltprinzip basiert auf der Variation des Brechungsindex der Lichtwellenleiter durch die Heizelemente im Bereich von etwa 10 ms, was zumindest für heutige Anwendungen schnell genug ist. Allerdings muss der Wärmefluss sehr lokalisiert sein, um benachbarte Wellenleiterstrukturen – insbesondere die AWGs – nicht zu stören. Die Größe der PLC-Struktur in Abbildung 8 ist durch die zulässigen Krümmungsradien der Lichtwellenleiter bestimmt (etwa 6 mm), diese dürfen sich allerdings kreuzen, wenn der Schnittwinkel groß genug ist. Insgesamt sind die Lichtwege infolge der erforderlichen großen Krümmungsradien ziemlich lang.

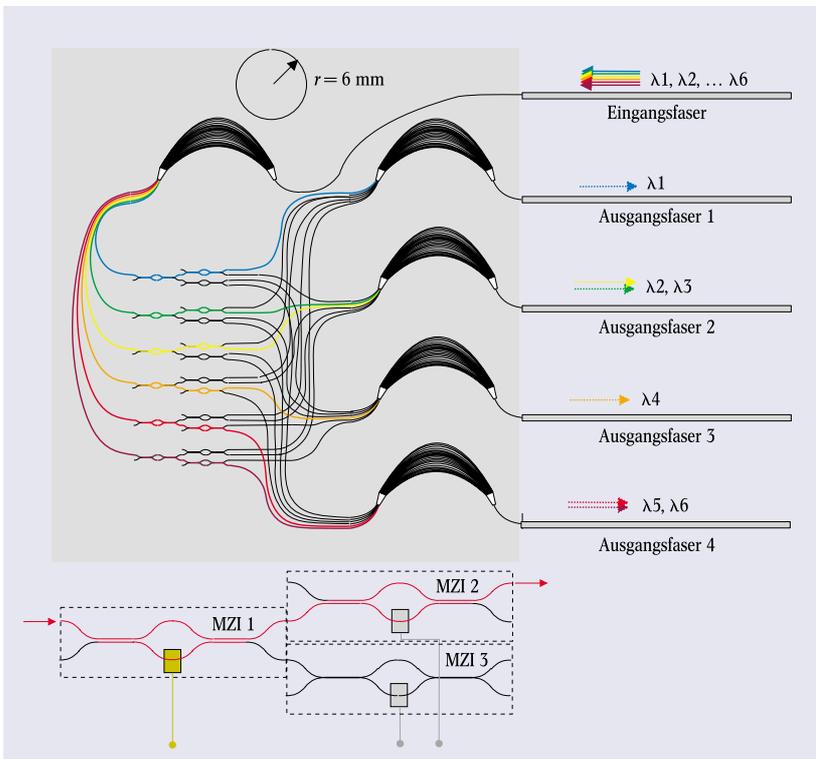


Abb. 8: In einem wellenleiterbasierten (PLC-Technik) optischen 1×4-Schalter wird das Licht der Eingangsfaser (sechs Wellenlängen) an den Eingangswellenleiter der planar-optischen Schaltung angekopplert und läuft durch den Demultiplexer (AWG, links oben). Die separierten Lichtwellen werden zu einem Feld aus 1×4-Schaltern in Form kaskadierter Mach-Zehnder Interferometer (MZI) geführt, die sich thermooptisch steuern lassen (unten): Das in den oberen Interferometerarm eintretende Licht spaltet sich im ersten Richtkopplerbereich (parallele Wellenleiterstücke) auf beide Interferometerarme auf, läuft durch die nachfolgenden Bögen der Struktur und

erreicht den zweiten Richtkoppler. Wird der Phasengang im MZI nicht beeinflusst (Heizelement aus), so „pendelt“ das Licht im zweiten Richtkoppler vollständig in den unteren Interferometerarm und tritt aus dem unteren Schalterport aus. Wird durch lokale Aufheizung (erstes Heizelement ein) die Phasenlage des Lichtes um eine halbe Wellenlänge verzögert, so schwingt das Licht in den oberen Interferometerarm zurück und erreicht den oberen Ausgangsport. Von den so angesteuerten Ausgangsports des 1×4-Schalterarrays gelangen die einzelnen Lichtwellen zu den Multiplexern (AWGs) für die vier Ausgänge des DWDM-Schalters.

Zukünftige Entwicklungen

In den nächsten sechs bis acht Jahren werden Technologien verfügbar sein, um die Übertragungsnetze noch besser an den verbindunglosen, paketorientierten IP-Verkehr anzupassen. Heute werden IP-Pakete in elektronischen IP-Routern vermittelt. Um diese Router an das optische Netzwerk anzuschließen, müssen die Daten elektrooptisch gewandelt werden. Doch diese Wandlungen sind sehr teuer. Um die Zahl dieser Wandlungen zu reduzieren, könnte die IP-Paketvermittlung in zukünftigen Netzwerken in die optische Schicht der Netzwerke wandern. Dafür ist jedoch erforderlich, die Schaltzeiten der optischen Netzelemente drastisch zu verkürzen. In paketverschaltenden Netzen liegen diese im Bereich von Mikro- bis Nanosekunden. Weltweit konzentriert sich die Forschung und Entwicklung auf die Suche sowohl nach physikalischen Technologien für diese schnellen optischen Schalter als auch nach Architekturen für komplette Netzelemente.

In paketverschaltenden Netzen werden Datenpakete unterschiedlicher Länge am Rand des Netzes elektrisch verwaltet und dann optisch im Netz transportiert und vermittelt. Da heute und in absehbarer Zukunft eine optische Speicherung der Pakete nicht möglich sein wird, werden erste paketverschaltende Netze mit sehr langen Paketbündeln (Bursts) arbeiten. In diesen Bursts lassen sich viele IP-Pakete für eine bestimmte Netzadresse zuerst elektrisch vereinigen und dann optisch durch das Netz routen.

Erst wenn optische Speicher und Technologien zur

(„digitalen“) optischen Verarbeitung von Daten verfügbar sind, können vollständig optische Netzwerke die hybriden (elektrisch-optischen) ablösen. Der Weg zu einem kompakten und multifunktionalen optischen Prozessor mit Dimensionen ähnlich denen eines elektronischen ICs durch die bisherige Integrierte Optik (mit Planar Waveguide Circuits, PLCs) ist auf Grund

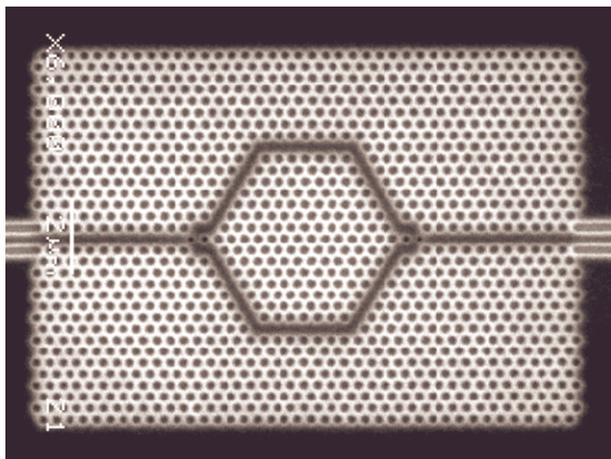


Abb. 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Mach-Zehnder-Interferometers auf Basis eines photonischen Kristalls. Das z. B. von links eintretende Licht wird in den beiden Y-Gabeln aufgeteilt bzw. vereinigt. Die Bildabmessungen betragen etwa $10\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$ (aus [6])

der Wellenführung über Totalreflexion und somit vorsichtig zu handhabender Lichtlenkung durch Krümmungen oder Knicke nicht gangbar.

Neuere Konzepte, die Ende der achtziger Jahre entwickelt wurden, basieren auf der Idee „optischer Bandlücken“ in so genannten photonischen Kristallen. Ähnlich wie bei einem elektrischen Halbleiter gibt es darin „Leitungs-“ sowie „Valenzbänder“ und „verbotene Zonen“ für die Photonen. Photonische Kristalle besitzen wohlgeordnete Strukturen mit Details im Bereich weniger hundert Nanometer und führen das Licht entlang „dotierter Bereiche“. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für eine derartige Struktur. Es handelt sich dabei um ein Mach-Zehnder-Interferometer, wobei im Vergleich zu der integriert optischen Lösung aus Abbildung 8 die Strahlteiler durch Y-Gabeln anstelle der Richtkoppler realisiert sind. Die wabenförmigen Gebiete bilden die verbotene Zone, das Licht läuft entlang der „lochfreien“ Struktur (Defektzone oder „Dotierung“). Im Vergleich zu der integriert optischen Lösung mit mehreren Millimetern Länge ist das hier gezeigte MZI tausendfach kürzer.

Nanotechnische Lösungen anderer Art sind optoelektronische Elemente mit „Quantenpunkten“ (Quantum Dots), die aktive photonische Komponenten effizienter und schneller machen sollen. Die Herstellung von Quantum Dots geschieht beispielsweise beim epitaktischen Wachstum von Optohalbleitern [7] oder durch Erzeugung freier Dots in chemischen Reaktoren [8]. Quantenpunkte sind dreidimensionale Gebiete von wenigen Nanometern Abmessungen und mit wenigen tausend Atomen pro „Dot“ in optisch aktiven Materialien. Diese ermöglichen z. B. das Anschwingen der Laseremission bei extrem kleinen Schwellenströmen, Direktmodulation bei Taktraten von 10 Gb/s und höher sowie stark reduzierte Temperaturempfindlichkeit.

Bislang hat die „Integrierte Optik“ noch nicht die

Entwicklung der siliziumbasierten Elektronik nachvollziehen können, welche durch eine über vierzig Jahre andauernde, immer höhere Integrationsdichte eine enorme Leistungsfähigkeit an Datendurchsatz und Speicherfähigkeit erlangt hat. Deshalb handelt es sich bei den meisten derzeit in der Kommunikationstechnik eingesetzten photonischen Bauelemente um diskrete oder hybrid integrierte Miniaturoptiken. Doch zukünftig könnte die Photonik neue Funktionalitäten der Kommunikationsnetze und Netzelemente ermöglichen und sowie durch mikro- und nanooptisch geprägte Komponenten die Basis etwa für künftige „Opto-Chips“ schaffen.

Danksagung

Die Autoren danken ihren Kollegen bei Siemens Corporate Technology und Information & Communication Networks für Anregungen und Kommentare zur Gestaltung dieses Artikels. Weiterer Dank gilt den Firmen Infineon Technologies und Optun für Unterstützung beim Thema „Integrierte Optik“ und Network Photonics beim Thema „freistrahloptische Schalter“.

Literatur

- [1] H. Renner et al., Einmodenfasern; in E. Voges, K. Petermann (Hrsg.), Optische Kommunikationstechnik, Springer, Heidelberg, S. 187 (2002)
- [2] H. G. Weber: Nichtlineare Optik und optische Signalverarbeitung; in E. Voges, K. Petermann (Hrsg.), Optische Kommunikationstechnik, Springer, Heidelberg, S. 555 (2002)
- [3] O. Krauss, DWDM und Optische Netze, Publicis, Erlangen (2002)
- [4] R. März, Planare optische Schaltungen; in E. Voges, K. Petermann (Hrsg.), Optische Kommunikationstechnik, Springer, Heidelberg, S. 461 (2002)
- [5] Y. Hida et al, Electron.Lett. **37**, 567 (2001)
- [6] R. Wilson, T. F. Krauss, eingereicht bei Appl. Phys. Lett.
- [7] M. Grundmann, D. Bimberg, Phys. Bl., Juni 1997, S. 517
- [8] J. D.Holmes et al., J. Am. Chem. Soc. **123**, 3743 (2001)

Die Autoren

Helmut Zarschizky studierte in Göttingen Physik und promovierte über digitale Bildauswertung von holographischen Rekonstruktionen. Von 1986 bis 1995 war er in der Forschungsabteilung Photonik der Siemens Corporate Technology in München tätig, dort arbeitete er vor allem an Design, Simulation und Herstellung integriert-optischer Schaltungen und diffraktiver Optiken für die optische Nachrichtentechnik. Seit 1996 beschäftigt er sich insbesondere mit Start-Up Firmen im High-Tech-Bereich. Dabei empfindet Zarschizky den Kontakt mit Entrepreneuren verschiedenster Nationen und Kulturen als besondere Bereicherung. **Alexander Richter** hat in Merseburg und Hannover Physik studiert und 1998 an der Humboldt-Universität Berlin mit einer Arbeit über zeitaufgelöste Halbleiternahfeldspektroskopie promoviert. Von 1995 bis 1998 war er Mitarbeiter am Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie Berlin. Seit 1999 arbeitet er für Siemens, Information & Communication Networks, auf dem



Gebiet der optischen Nachrichtentechnik, speziell der photonischen Nachrichtennetze.