Optische Schalter im 160-Gigabit-Netzwerk

Autor(en): **Rohde, Harald / Lehmann, Gottfried / Schairer, Wolfgang**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **96 (2005)**

Heft 7

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857785

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Optische Schalter im 160-Gigabit-Netzwerk

Wenn die Elektronik zu langsam ist

Die Datenraten in der Telekommunikation steigen unaufhörlich: 160 Gbit/s auf einer Wellenlänge in der optischen Faser ist der nächste Schritt. Doch die heutige Elektronik ist zu langsam, um solche Datenraten zu verarbeiten. Deshalb koppeln optische Schalter und UND-Tore einzelne Kanäle aus.

Optische Datenübertragung im freien Raum wird seit vielen Jahrhunderten benutzt, sei es, indem durch Winken Signale vermittelt werden, die Position von Flaggen oder Zeigern Buchstaben übermittelt oder ein Schiff mit einer Lampe Morsezeichen sendet.

Die Idee, Licht in einem festen Medium, also zum Beispiel Glas, zu übertragen und dabei die verlustlose Totalreflektion an Brechungsindexgrenzen zur Weiterleitung zu verwenden, ist seit 1966 bekannt. Praktische Bedeutung erlangte diese Idee aber erst in den 70er-Jahren, als man in der Lage war, extrem reines Glas herzustellen. Das heutzutage in Glasfasern verwendete Material ist bei

Harald Rohde, Gottfried Lehmann, Wolfgang Schairer

bestimmten Wellenlängen so transparent, dass ein Fenster von 30 km Dicke mehr Licht durchliesse als eine normale Sonnenbrille. Aus diesem Material lassen sich Lichtwellenleiter herstellen, deren optische Eigenschaften – im Gegensatz zur Freiraumkommunikation – unabhängig von den Umgebungsbedingungen, wie dem Wetter, sind.

Heutzutage wird ein Grossteil der globalen Weitverkehrskommunikation über optische Glasfasernetze geführt. Die globalen Netze haben dabei eine enorme Entwicklung durchlaufen, seit in den 80er-Jahren die ersten Glasfasern verlegt wurden. Seit den Anfängen hat sich die Datenrate pro Wellenlänge von anfänglich 155 Mbit/s über 622 Mbit/s, 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s auf heute 40 Gbit/s um einen Faktor 64 erhöht. Zusätzlich zu den höheren Datenraten wurden weitere Wellenlängen auf die Glasfasern gegeben. Aus der Kombination von hohen Datenraten pro Wellenlänge und einer Vielzahl von Wellenlängen resultieren die heute kommerziell erhältlichen optischen Kommunikationssysteme, die Datenraten von bis zu 1,6 Tbit/s über eine einzige Glasfaser erlauben.

Evolution der optischen Netze

Auch die Netzarchitektur entwickelt sich weiter: In den ersten Netzen wurden relativ kurze Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit – aus heutiger Sicht – geringen Datenraten von 155 Mbit/s verlegt. Die Daten auf den Glasfaserkabeln – damals hauptsächlich Sprachdaten – wurden an jedem Endpunkt einer Glasfaser in elektrische Signale umgewandelt und per Patchkabel zum Terminal der nächsten Glasfasersektion gesendet, wo sie dann wieder als Lichtpulse auf die weitere Strecke geschickt wurden, wie in Bild 1a dargestellt.

Mit zunehmendem Abstand zwischen den Endpunkten entstand der Bedarf, dazwischen einen Teil der Daten auszukoppeln und neue Daten einzukoppeln, um beispielsweise eine Stadt an das Datennetz anzubinden, die nicht genug Datenverkehr erzeugt, um eine Faser voll auszulasten. Diese Anbindung wird realisiert, indem aus dem optischen Signal auf der Glasfaser eine oder mehrere Wellenlängen ausgekoppelt werden, die die Daten für die bestimmte Stadt enthalten. Von der Stadt gesendete Daten werden auf das Licht der frei gewordenen Wellenlänge moduliert und wieder in die Glasfaser eingekoppelt. Alle anderen Wellenlängen werden unverändert zum Zielort weitergeleitet, ohne dass sie in ein elektronisches Signal umgewandelt werden[1] (Bild 1b). Die Auskopplung nur eines Teiles der auf einer Faser übertragenen Daten und das Hinzufügen neuer Daten auf der freigewordenen Kapazität wird als «Add-Drop Multiplexen» bezeichnet.

Es gibt zwei grundlegende Trends in optischen Kommunikationsnetzen: die Übertragungskapazität der Kommunika-

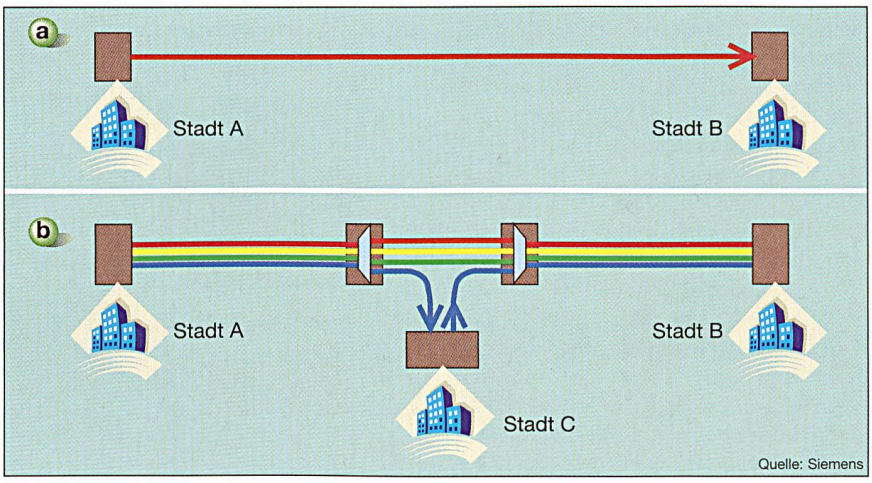


Bild 1 Auskoppeln von optischen Kanälen

Bild 1a: Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei Städten. Bild 1b: Stadt C wird der Verbindung von Stadt A nach Stadt B zugefügt. Drei der vier Datenkanäle (Lichtwellenlängen) von A nach B werden direkt übertragen, die vierte Wellenlänge wird in Stadt C ausgekoppelt. Der Datenverkehr von C nach B wird auf die freie Wellenlänge gegeben.

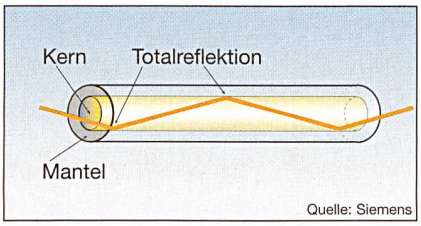


Bild 2 Lichtwellenleitung
Ein Lichtstrahl wird in einer Glasfaser geleitet, indem er an den Kern-Mantel-Grenzflächen immer wieder zurück in den Kern reflektiert wird.

tionsnetze steigt und folgt einer Art Mooreschem Gesetz, und die Netze entwickeln sich in Richtung optisch transparentes Netz, in dem optische Verbindungen über viele Streckenabschnitte und Städte laufen, ohne dass diese unterwegs eine Optisch-Elektronisch-Optische Konversion (OEO) erfahren.

Informationen in optischen Netzen übertragen

Ein optisches Kommunikationssystem lässt sich – wie jedes andere Kommunikationssystem – in einen Sender, in das Übertragungsmedium und in einen Empfänger aufteilen. Der Sender setzt die Daten in eine Form um, in der sie im Medium übertragen werden können. Ein alltägliches Beispiel: Der Sprachapparat eines Menschen setzt die Information, die der Mensch vermitteln möchte, in Schallwellen um. Die Schallwellen werden durch Druckschwankungen durch das Medium Luft übertragen und schliesslich von einem an die Art der Information und an das Medium angepassten Empfänger, dem Ohr, aufgenommen.

In einem optischen Übertragungssystem liegen die Informationen in Form von analogen oder digitalen elektrischen Signalen vor, wobei in diesem Artikel nur die Übertragung von digitalen Signalen betrachtet wird. Ein Sender wandelt die elektrischen Daten in optische Signale um, indem eine oder mehrere Eigenschaften eines optischen Feldes beeinflusst werden: die Amplitude, die Phase oder die Polarisation. Heutzutage hat die Amplitudenmodulation die grösste Verbreitung gefunden; im einfachsten Fall wird Licht eingeschaltet, wenn eine logische Eins gesendet werden soll, und ausgeschaltet, wenn eine logische Null gesendet werden soll. Im Allgemeinen werden für hochbitratige optische Übertragungssysteme Diodenlaser verwendet, die entweder sehr schnell ein- und ausgeschaltet werden oder die permanent Licht aussenden, das von einem externen Lichtmodulator moduliert wird.

Das Licht, das die Information trägt, wird in Glasfasern weitergeleitet. Eine Glasfaser zur Datenübertragung besteht im einfachsten Fall aus einem Kern mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern, der von einem Mantel mit geringerem Brechungsindex umhüllt wird. Ein in den Glasfaserkern eingebrachter Lichtstrahl erfährt an den Grenzflächen zwischen Kern und Mantel auf Grund des geringen Reflektionswinkels eine verlustlose Totalreflektion (Bild 2).

Da in heutigen Glasfasern das Licht extrem wenig abgeschwächt wird, betragen die mit einer einzigen Faser erreichbaren Strecken etwa 100 km, die Verluste werden durch optische Verstärker kompensiert. Ein optischer Verstärker arbeitet analog zu einem Laser mit einem aktiven Medium, in dem sich Atome im angeregten Zustand befinden, die durch ein vorbeikommendes Photon stimuliert werden können, ihr angeregtes Elektron wieder in den Grundzustand fallen zu lassen und dabei ein zum anregenden Photon identisches Photon auszusenden (Stimulierte Emission). Durch diesen Prozess wird das einfallende Licht verstärkt, und es kann in eine weitere Glasfasersektion geschickt werden. Als aktives Verstärkermedium wird normalerweise eine Glasfaser verwendet, die mit geringen Mengen Erbium dotiert ist. Ein solcher Verstärker wird als Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA) bezeichnet. Das zur Anregung der Erbium-Atome notwendige Pumplicht wird von Laserdioden geliefert.

Am Ende einer Übertragungsstrecke erzeugen Photodioden einen zur Lichtintensität proportionalen Strom. Eine Taktrückgewinnungseinheit regeneriert aus diesem Strom den Datentakt, der bestimmt, zu welchen Zeitpunkten das empfangene Signal abgetastet wird. Zu den Abtastzeitpunkten bestimmt ein Entscheiderschaltkreis, ob der Strom ober- oder unterhalb eines Schwellwertes liegt, und gibt entweder eine logische Eins oder Null aus.

Übertragung von 160 Gbit/s auf einer Wellenlänge

Die bisher verwendeten Datenraten pro Wellenlänge waren zunächst 155 MBit/s, darauf folgten 622 Mbit/s, 2,5 Gbit/s, 10 Git/s und aktuell 40 Gbit/s. Aus dieser Zahlenfolge ergibt sich der nächste Schritt in der Kanaldatenrate: 160 Gbit/s. Doch wie will man die heutigen Grenzen überwinden? Denn kommerziell erhältliche Komponenten zum Bau eines Senders oder Empfängers gibt es nur bis 40 Gbit/s. Komponenten für Bitraten von bis zu 85 Gbit/s befinden sich im Prototypenstadium, sind aber noch nicht erhältlich. Und selbst diese Komponenten müssten um einen Faktor Zwei beschleunigt werden, damit sie Datenraten von 160 Gbit/s verarbeiten könnten.

Aus der Nichtverfügbarkeit von elektronischen Komponenten bei 160 GHz folgt zwingend, dass zur Übertragung von 160 Gbit/s auf einer Wellenlänge auf optische Datenverarbeitung zurückgegriffen werden muss. Dazu sind optische UND-Gatter und optische Schalter notwendig, die Schaltfrequenzen bis in den Terahertz-Bereich erwarten lassen.

Ein Sender mit einer Datenrate von 160 Gbit/s auf einer Wellenlänge ist vergleichsweise einfach zu realisieren: Eine Anzahl von optischen Signalen mit geringerer Datenrate, beispielsweise 16 Signale mit je 10 Gbit/s oder 4 Signale mit je 40 Gbit/s, werden zu einem 160-Gbit/s-Signal vereint. Die Signale bei der Grunddatenrate müssen hierbei extrem kurze Lichtpulse zur Kodierung der Information benutzen, damit die Pulse der einzelnen Signale sich hinterher zu einem

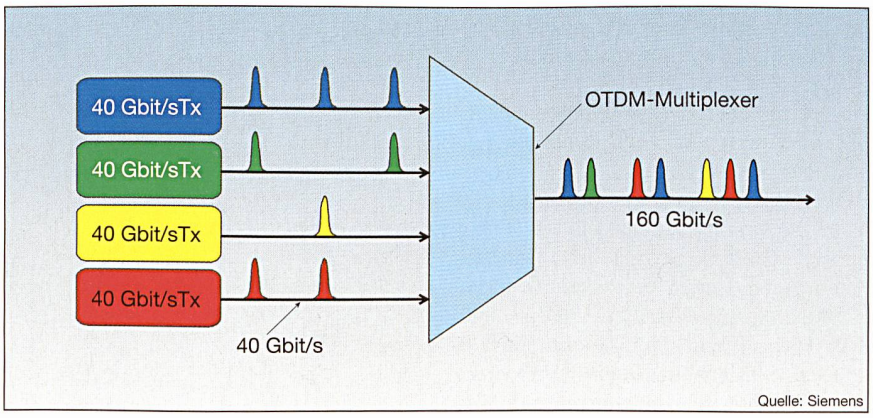


Bild 3 Optischer Multiplexer
In einem optischen Multiplexer werden mehrere optische Datenströme niedriger Bitrate zu einem einzigen Datenstrom hoher Bitrate verschachtelt. Die verschiedenen Farben der Datenströme markieren hier nur die Herkunft der jeweiligen Bits; alle optischen Signale haben die gleiche Wellenlänge.

einzigen Signal zusammenmischen lassen, ohne dass sich die Pulse überlappen. Bei einer Datenrate von 160 Gbit/s beträgt die Zeit zum Übertragen eines einzigen Bits 6,25 ps[2]. Die Lichtpulse zur Übertragung von 160 Gbit/s sind üblicherweise 2...3 ps lang. Die einzelnen Grundsignale werden derart gegeneinander verzögert, dass die Lichtpulse des Signals jeweils in den dafür vorgesehen Zeitschlitz fallen.

Diese Art des Zusammenstellens eines hochbitratigen Signals aus mehreren niederbitratigen Signalen wird optisches Multiplexen genannt. Im vorliegenden Fall werden optische Signale im Zeitbereich gemultiplext, daher heisst das Verfahren Optical Time Domain Multiplex (OTDM).

Da auch die Herstellung von solch kurzen Pulsen auf elektrischem Wege nur extrem schwierig zu erreichen ist, bedient man sich spezieller Laser, so genannter modengekoppelter Laser. Diese erzeugen direkt auf optischem Weg die gewünschten kurzen Pulse mit einer Wiederholrate von beispielsweise 10 oder 40 GHz. In einem nachfolgenden Modulator werden die Daten herkömmlich auf den Pulsstrom aufmoduliert.

Bei der Übertragung von optischen Signalen durch eine Glasfaser treten verschiedene Verzerrungen auf. Bei hohen Datenraten dominiert die Verzerrung durch die Dispersion der Glasfaser. Der Brechungsindex (und damit verbunden auch die Lichtgeschwindigkeit) in Glas ist von der Wellenlänge abhängig; dieser Effekt führt auch zur Farbaufspaltung des Lichts in einem Prisma. Die zur optischen Datenübertragung benutzen Pulse besetzen ein gewisses Wellenlängenband, das umso breiter ist, je kürzer die Pulse werden. Werden die Pulse durch ein Medium mit wellenlängenabhängigem Brechungsindex übertragen, erfahren die verschiedenen Frequenzanteile des Pulses verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Am Empfänger kommen die Pulse verzerrt an.

Als Gegenmassnahme werden Elemente mit genau umgekehrter Dispersion in den Übertragungsweg eingefügt, so genannte Dispersionskompensationsmodule.

Die Dispersionstoleranz einer optischen Übertragungsstrecke, das heisst der Dispersionswert, bei dem ein System gerade noch Daten überträgt, nimmt quadratisch mit der Datenrate ab. Ein System mit 40 Gbit/s Übertragungsrate pro Wellenlänge ist also 16-mal empfindlicher gegenüber Dispersion als ein System mit 10 Gbit/s; bei einem 160-Gbit/s-System beträgt der Faktor zum 10-Gbit/s-System schon 256. Aus diesen Überlegungen ergibt sich, dass die Dispersionskompensation bei Systemen mit 160 Gbit/s einen kritischen Punkt darstellt.

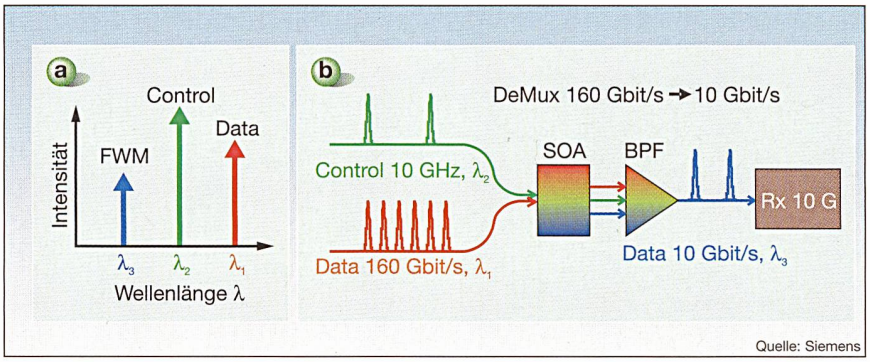


Bild 4 Optisches UND-Gatter

Bild 4a: In einem geeigneten Medium erzeugen zwei Wellenlängen eine dritte durch Vierwellenmischung
Bild 4b: Schematische Anordnung eines optischen UND-Gatters auf der Basis von Vierwellenmischung

Ultraschnelle optische UND-Gatter

Ein Empfänger für Datenraten von 160 Gbit/s muss optische Schalter verwenden, um die ineinander verschachtelten Datenströme zu separieren (zu demultiplexen), da die aktuelle Elektronik zu langsam für diese Aufgabe ist. Gesucht ist ein optisches Bauteil, das sich durch einen optischen Kontrollpuls transparent schalten lässt, oder – allgemeiner ausgedrückt – ein optisches Bauteil, an dessen Ausgang nur dann Licht erscheint, wenn an Eingang 1 UND an Eingang 2 Licht ist. Die Vier-Wellen-Mischung (Four Wave Mixing, FWM) kann für solch ein UND-Gatter genutzt werden – mit heutiger Technologie.

Vier-Wellen-Mischung bezeichnet einen Prozess, in dem in einem nichtlinearen optischen Medium drei Photonen miteinander wechselwirken und ein viertes Photon entstehen lassen. Stammen zwei Photonen von einer Lichtquelle mit der Frequenz f_1 und ein Drittes von einer weiteren Lichtquelle mit der Frequenz f_2, so wird ein Photon der Frequenz $f_3=2*f_1-f_2$ erzeugt[3]. Anders ausgedrückt entstehen bei der Frequenz f_3 nur dann Photonen, wenn sowohl Photonen bei f_1 und bei f_2 vorhanden sind. Ein optisches UND-Gatter wird demnach realisiert, indem Licht der Frequenzen f_1 und f_2 in ein geeignetes Medium eingestrahlt wird und am Ausgang dieses Mediums mittels eines geeigneten Bandpassfilters (BPF) nur die Frequenz f_3 durchgelassen wird. Die schematische Anordnung der Frequenzen/Wellenlängen ist in Bild 4a dargestellt.

In dem weiter unten dargestellten Feldversuch wurde als nichtlineares Element ein optischer Halbleiterverstärker eingesetzt (Semiconductor Optical Amplifier, SOA). Ein SOA ist ähnlich wie eine Laserdiode aufgebaut; der Unterschied besteht in der fehlenden Verspiegelung der Endflächen des aktiven Halbleitermediums, in dem die optische Verstärkung stattfindet.

Ultraschnelle optische Schalter

Ein UND-Gatter wie das oben beschriebene kann dazu verwendet werden, aus dem 160 Gbit/s einen Datenkanal der Grunddatenrate zu extrahieren, die anderen Kanäle der Grunddatenrate gehen dabei aber verloren. In einem Datennetz

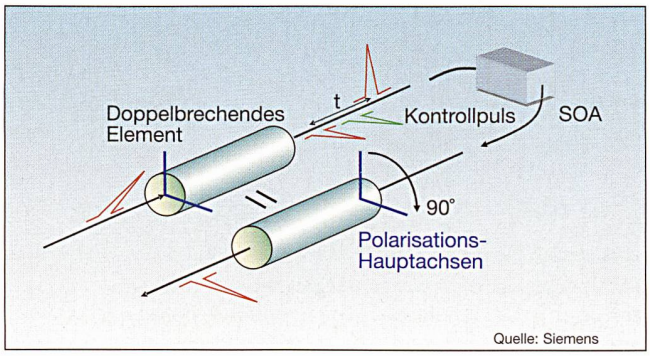


Bild 5 Schematische Anordnung der Elemente eines GT-UNI

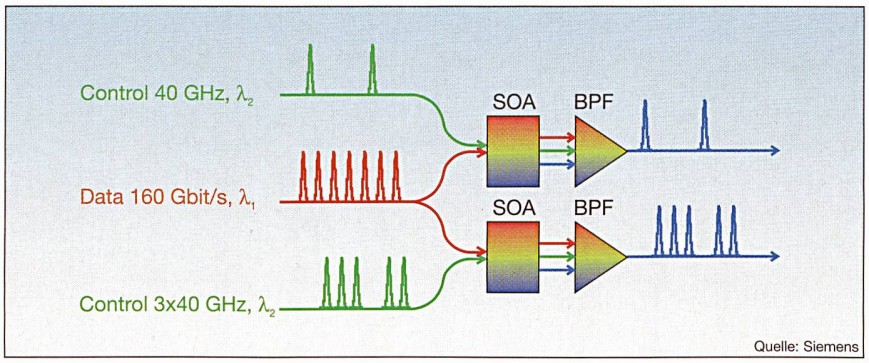


Bild 6 Optischer Schalter mit Vierwellenmischung
Ein ultraschneller optischer Schalter kann auf der Basis von Vierwellenmischung realisiert werden

kommen an einem Netzknoten Datenkanäle aus unterschiedlichen Richtungen an, und die Grunddatenkanäle eines 160-Gbit/s-Kanals können unterschiedliche Ziele haben. Daher ist es notwendig, an einem Netzknotenpunkt einzelne Kanäle zu extrahieren und in einen anderen 160-Gbit/s-Kanal einzufügen. Gesucht wird daher eine Anordnung, die aus dem 160-Gbit/s-Datenstrom einen oder mehrere Kanäle der Grunddatenrate extrahiert, die anderen aber nahezu unangetastet lässt. Möchte man in den frei werdenden Zeitschlitz neue Information einfügen, so muss der extrahierte Kanal im 160-Gbit/s-Kanal möglichst gut unterdrückt werden, denn eine mangelhafte Unterdrückung führt zu Interferenz und so zu Störungen in der neu eingefügten Information.

Gain Transparent Ultrafast Nonlinear Interferometer (GT-UNI)

Eine solche Anordnung ist beispielsweise das Gain Transparent Ultra fast Nonlinear Interferometer (GT-UNI). Darin wird ausgenutzt, dass sich in einem SOA kurzzeitig der Brechungsindex ändert, wenn er von einem Lichtpuls hoher Leistung, im Folgenden Kontrollpuls genannt, durchstrahlt wird. Diese Änderung im Brechungsindex führt zu einer relativen Änderung der Phase bei zwei Lichtpulsen, die vor und nach dem Kontrollpuls den SOA passieren. Mit Hilfe eines Kunstgriffs kann so die Polarisation von einzelnen Pulsen geändert werden, Polarisationsfilter trennen dann die geänderte von der ursprünglichen Polarisation.

Der oben genannte Kunstgriff besteht darin, einen Datenpuls zunächst in zwei Subpulse aufzuspalten, und zwischen die beiden Subpulse einen Kontrollpuls einzufügen, wenn eine Polarisationsänderung gewünscht ist. Das Prinzip ist in Bild 5 dargestellt. Durch ein doppelbrechendes Element wird jeder Puls in zwei Subpulse aufgespaltet, die zeitlich etwa 5 ps separiert sind. Zwischen diese Subpulse kann ein Kontrollpuls von der Dauer 1 bis 2 ps eingefügt werden. Geschieht dies, erfährt der nachfolgende Subpuls eine Phasenänderung relativ zum Ersten. Die beiden Subpulse werden dann wieder durch dasselbe doppelbrechende Element geschickt, diesmal mit vertauschten Rollen. Das heisst, der Teil des Lichts, der vorher die höhere Geschwindigkeit im Element hatte, hat nun die kleinere. Dadurch treffen die beiden Subpulse zeitlich wieder zusammen und werden vereinigt. Hatte vorher der zweite Subpuls eine Phasenänderung durch den Kontrollpuls erfahren, hat der wiedervereinigte Puls eine andere Polarisation als im Fall ohne Kontrollpuls.

Wird das Licht nun durch einen Polarisationsfilter geschickt, so kann entweder die eine oder die andere Polarisation durchgelassen werden. Indem das Licht aufgeteilt und auf zwei verschiedene Filter geleitet wird, erhält man je einen Datenstrom mit und ohne Kontrollpulse. Wird die Folge der Kontrollpulse richtig gewählt, kann so jeder beliebige Grunddatenkanal vom Gesamtdatenstrom getrennt werden. Die darin frei werdenden Lücken können mit neuer Information aufgefüllt werden.

FWM-Schalter

Auch das oben beschriebene UND-Gatter, das auf dem Prinzip der Vierwellenmischung beruht, kann durch Parallelisierung zweier oder mehrerer solcher Anordnungen zu einem ultraschnellen optischen Schalter erweitert werden, wie in Bild 6 dargestellt ist. Das 160-Gbit/s-Signal wird hierzu auf mehrere Pfade aufgespaltet, von dem jeder zu einem solchen Schalter führt. Durch eine geeignete Wahl der Kontrollpuls-Sequenz lassen sich so wahlfrei die gewünschten Kanäle der Grunddatenrate aus dem 160-Gbit/s-Signal extrahieren und in die entsprechende Richtung weiterschicken. Eines der Probleme bei dieser Anordnung ist, dass der Vierwellenmischprozess eine recht kleine Effizienz hat. Das heisst, dass das Signal nach dem Schalter verstärkt werden muss, was die Möglichkeit einer weiteren Übertragung deutlich einschränkt, da das Signal-zu-Rausch-Verhältnis signifikant abnimmt.

Semiconductor Optical Amplifier Mach Zehnder Interferometer (SOA-MZI)

Eine dritte Möglichkeit, einen ultraschnellen optischen Schalter zu realisieren, zeigt Bild 7. Es handelt sich um ein so genanntes Mach-Zehnder-Interferometer (MZI), bei dem in beiden Armen ein SOA integriert ist. Wie schon bei den anderen beiden Schaltern dienen die SOAs als nichtlineare Elemente, in denen Kontrollpulse mit den Datenpulsen wechselwirken.

In einem Mach-Zehnder-Interferometer wird das ankommende Licht in zwei Teile aufgeteilt, die dann zwei verschiedene Wege zurücklegen, bevor die Pfade sich wieder treffen. Eine Realisierung eines MZI in Freistrahloptik mit halbdurchlässigen Spiegeln ist in Bild 8 gezeigt. In einem ersten halbdurchlässigen Spiegel wird das Licht aufgeteilt, zwei

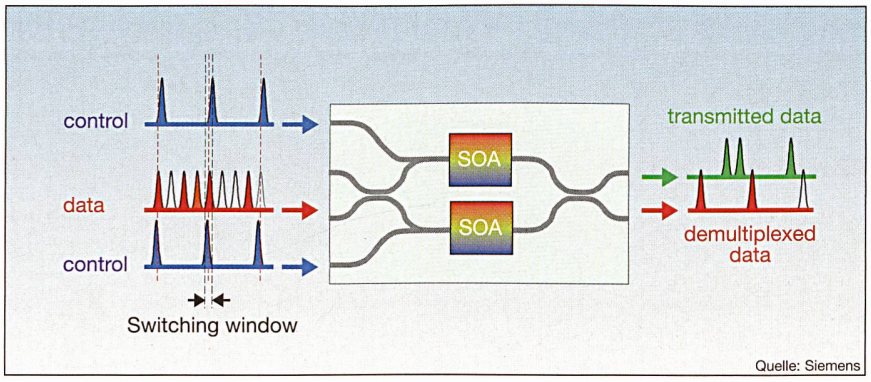


Bild 7 Funktionsweise eines optischen Schalters
Darstellung der Funktionsweise eines SOA-MZI. Die Kontrollpuls-Sequenzen sind um etwa 5 ps gegeneinander versetzt und schalten zwischen den Ausgängen hin und her.

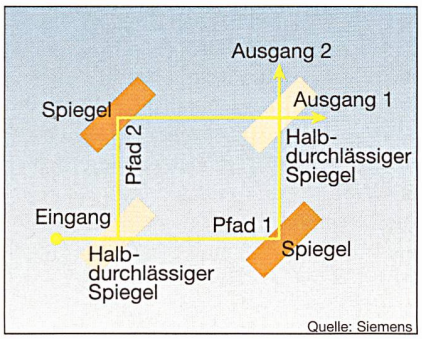


Bild 8 Mach-Zehner-Interferometer

Schematische Darstellung eines Mach-Zehnder-Interferometers für Freistrahloptik zur Illustration der Funktionsweise

normale Spiegel dienen der Strahlumlenkung und an einem zweiten halbdurchlässigen Spiegel wird das Licht wieder vereinigt. Je nach Länge der Wege, auch unter Berücksichtigung des Brechungsindex der halbdurchlässigen Spiegel und des Phasensprunges bei der Reflexion, bekommt man durch Interferenz unterschiedliche Helligkeiten an den beiden Ausgängen des MZI. Bei entsprechender Justage kann ein Ausgang komplett dunkel sein (destruktive Interferenz), während der andere Ausgang maximale Intensität aufweist (konstruktive Interferenz).

Arbeitet man nicht mit Freistrahloptik, sondern mit Lichtwellenleitern, so übernehmen die Rolle der halbdurchlässigen Spiegel zwei 3dB-Koppler, wie in Bild 7 gezeigt.

Die Pfadlängen des SOA-MZI sind nun so eingestellt, dass ohne Kontrollpulse Licht nur aus einem der beiden Ausgänge des Interferometers kommt, in Bild 7 dem oberen der beiden Ausgänge. Wird nun ein Kontrollpuls in den oberen Kontrolleingang geschickt, bewirkt dieser eine Änderung des Brechungsindexes des oberen SOAs, die wiederum eine Phasenänderung bei den Pulsen im oberen Arm hervorruft. Dadurch ändert sich die Interferenz an den Ausgängen des MZI, es liegt nun auch Licht am anderen Ausgang an. Ist die durch den Kontrollpuls hervorgerufene Phasenänderung genau 180 Grad, so liegt ausschliesslich am anderen Ausgang Licht an, es wurde zwischen den Ausgängen umgeschaltet. Die Änderung des Brechungsindexes beruht auf einer Änderung in der Ladungsträgerdichte im SOA. Diese kehrt innerhalb weniger 10 ps wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurück, so dass wieder nur Licht am ersten Ausgang anliegt. Dieser Prozess ist aber zu langsam, um einen Schalter für 160 Gbit/s zu realisieren, bei dem der nächste Puls schon nach 6,25 ps ankommt und der Schalter dann schon wieder umgestellt sein muss. Daher sorgt man auf andere Weise dafür, dass der Schalter wieder umgelegt wird: 6 ps, nachdem der Kontrollpuls den oberen SOA passiert hat, wird ein weiterer Kontrollpuls in den unteren SOA geschickt. Dieser bewirkt auch hier eine Brechungsindex-Änderung. Bei entsprechendem Abgleich hat nun das Licht von beiden Pfaden wieder die gleiche relative Phase wie vor den Kontrollpulsen, das Licht liegt wieder nur an einem Ausgang an. Kurz gesagt: Ein Puls im oberen Arm schaltet den Schalter ein, ein Puls im unteren Arm wieder aus.

Optische Netzwerke bei 160 Gbit/s

Um die oben vorgestellten Technologien nicht nur im Labor, sondern auch unter realen Bedingungen zu testen, wurde ein Feldversuch durchgeführt. Dieser wurde von den drei Koorperationspartner des EU-geförderten Projektes Fashion, der Siemens, der British Telekom und der TU Eindhoven, gemeinsam ausgeführt. Dabei wurde ein 160-Gbit/s-Signal über bereits längere Zeit im Boden vergrabene Fasern zwischen den englischen Städten Ipswich und Newmarket übertragen (Bild 9). British Telecom stellte insgesamt 10 Fasern zwischen den beiden Orten zur Verfügung, von denen für das Netzwerkexperiment vier verwendet wurden. Der schematische Aufbau des Feldversuchs ist in Bild 10 gezeigt. Alle komplexen Aufbauten wie der OTDM-Sender, der optische Schalter und der Empfänger wurden im zentralen Telefonvermittlungsknoten von Ipswich aufgebaut. Bild 11 zeigt einen Teil des Aufbaus. In Newmarket befanden sich optische Verstärker und Module zur Dispersionskompensation. Die Fasern zwischen Ipswich und Newmarket sind so genannte Standard-Einmodenfasern (SSMF) mit einer Länge von je 68,85 km.

Im 160-Gbit/s-Sender wurden 16 Kanäle zu je 10 Gbit/s mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens zu einem 160-Gbit/s-Kanal vereinigt und dieser über die erste Faser nach Newmarket geschickt. Dort wurde das Signal verstärkt, die Dispersion der ersten Faser kompensiert, ein weiteres Mal verstärkt und über eine zweite Faser nach Ipswich zurückgeschickt. Auch hier wurde das Signal zunächst verstärkt; da nun aber das Signal verarbeitet werden sollte, war eine sehr genaue Dispersionskompensation notwendig. Um eine optimale Signalgüte zu gewährleisten, ist eine Anpassung der Kompensation auf ein Äquivalent von 50 m SSMF notwendig. Da derart feine

Bild 9 Geografische Lage von Ipswich und Newmarket, UK

Stückelungen von Dispersionskompensations-Modulen nicht erhältlich sind (die kleinste kommerziell erhältliche Stückelung entspricht 5 km SSMF), wurde die Dispersion beim Feldversuch tatsächlich durch zusätzliches Einfügen von SSMF

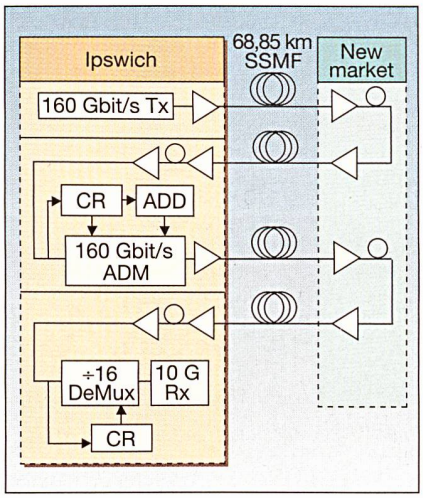


Bild 10 Erfolgreicher Feldversuch: 160 Gbit/s

Schema des Feldversuchs und örtliche Platzierung der Komponenten. Tx: Transmitter, CR: Clock Recovery (Taktrückgewinnung), ADD: zugefügter Kanal, ADM: Add Drop Multiplexer (GT-UNI). Rx: Empfänger.

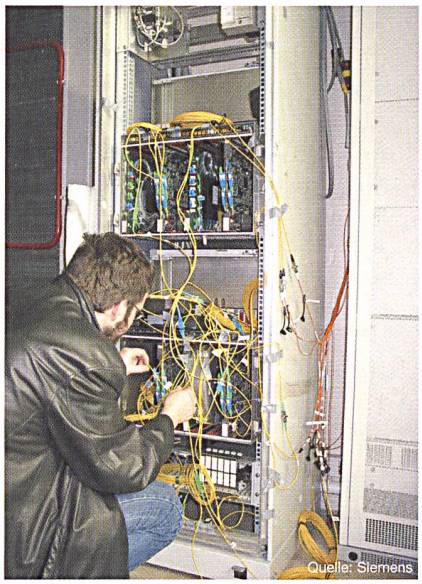


Bild 11 Autor Harald Rohde kontrolliert den Aufbau des Feldversuchs

zusätzlich zu den Dispersions-Kompensationsmodulen angepasst. Da die Dispersion einer Faser temperaturabhängig ist, und sich die Temperatur in den nichtklimatisierten Räumen um bis zu 20 °C pro Tag ändern kann, war eine gelegentliche Neuanpassung der Dispersionskompensation durch Anpassen der zusätzlich eingefügten SSMF notwendig, wenn sich die Signalgüte deutlich änderte.

Als Schalter kam beim Feldversuch ein GT-UNI zum Einsatz. Dieses separierte einen 10-Gbit/s-Kanal aus dem 160-Gbit/s-Signal, der dann mit einem konventionellen Empfänger empfangen wurde. Zur Überprüfung der Übertragungsqualität wurde die Bitfehlerrate des ausgekoppelten Signals bestimmt. An die frei gewordene Stelle dieses Kanals wurde ein neuer 10-Gbit/s-Kanal eingefügt. Der neue 160-Gbit/s-Datenstrom wurde über zwei weitere Fasern zwischen Ipswich und Newmarket geschickt, auch mit Zwischenverstärkung und Dispersionskompensation in Newmarket.

Wieder zurück, wurde das Signal nach erneuter Dispersions-Feinanpassung mit einem Demultiplexer auf FWM-Basis in seine Einzelkanäle zerlegt und diese auch mit einem konventionellen Empfänger ausgewertet und auf Bitfehler überprüft. Es zeigte sich, dass sowohl die Kanäle, die die gesamte Strecke zurückgelegt hatten, als auch der vom GT-UNI separierte und der nach dem GT-UNI hinzugefügte Kanal mit hervorragender Qualität empfangen werden konnten.

Dieses Ergebnis zeigt, dass optische Netzwerke mit 160-Gbit/s-Technologie prinzipiell realisierbar sind. Auch die nächsten notwendigen Schritte, die nun folgen müssen, damit diese Technologie kommerziell im Feld eingesetzt werden kann, hat der Feldversuch aufgezeigt: So sind weitere Verbesserungen wie eine automatische Anpassung der Dispersion und eine Integration der im Versuch verwendeten Laboraufbauten mit diskreten optischen Komponenten in integrierte optische Schaltkreise notwendig. Einige der Schlüsselkomponenten müssen noch eine deutliche Evolution durchlaufen, bevor sie kommerziell einsetzbar sind. Selbstverständlich müssen – und werden – die Preise für die zurzeit sehr teuren Komponenten sinken, wenn die Komponenten das Prototypenstadium verlassen haben und die Serienfertigung anläuft.

Aus technischer Sicht ist die Technologie zum Aufbau optischer Kommunikationsnetze mit Kanaldatenraten von 160 Gbit/s reif genug, um die Forschungslabore zu verlassen und in kommerzielle Systeme umgesetzt zu werden.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Harald Rohde** promovierte auf dem Gebiet der Quantenoptik und arbeitet seit 2001 bei der Siemens AG, München, im Forschungsbereich zur optischen Glasfaserkommunikation.
Siemens AG, D-81370 München,
Harald.Rohde@siemens.com

Dr. **Gottfried Lehmann** promovierte auf dem Gebiet der Ultraschalluntersuchung von Oberflächen und arbeitet seit 2001 bei der Siemens AG, München, im Forschungsbereich zur optischen Glasfaserkommunikation.
Siemens AG, D-81370 München,
Gottfried.Lehmann@siemens.com

Wolfgang Schairer, Dipl. Phys., arbeitete im Bereich der Terahertz-Strahlung und ist seit 2001 bei der Siemens AG, München, im Forschungsbereich zur optischen Glasfaserkommunikation.
Siemens AG, D-81370 München,
Wolfgang.Schairer@siemens.com

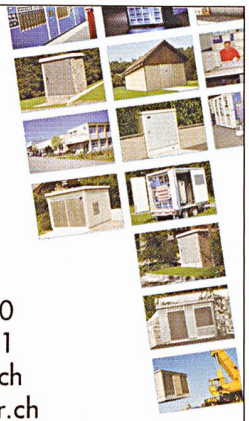
[1] Optisch-Elektronisch-Optische Konversion (OEO)
[2] ps = Picosekunde; eine Picosekunde = 10^{-12} s
[3] Die Wellenlänge λ und Frequenz f des Lichts haben die Beziehung $c=\lambda * f$, c=Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Des interrupteurs optiques pour le réseau 160 gigabits

Quand l'électronique devient trop lente

Les taux de données en télécommunication ne cessent d'augmenter – 160 Gbit/s sur une longueur d'onde de fibre optique, telle sera la prochaine étape. L'électronique actuelle est cependant trop lente pour traiter de tels débits. Aussi des interrupteurs et portes ET optiques servent à couper certains canaux.

Ihre Spezialisten für Kabelverteilkabinen



Kreuzmatte 11
Postfach
CH-6260 Reiden
Tel. 062 749 00 00
Fax 062 749 00 01
mail: admin@borner.ch
Internet: www.borner.ch

F. BORNER AG
Innovative Energietechnik