

Rekordjagd im Glasfasernetz

Wegen der höheren Übertragungsrates hat die Glasfaser das Kupferkabel in Datennetzen inzwischen weitgehend verdrängt. Durch Multiplex-Verfahren lässt sich die Rate noch weiter steigern.

Schneller, höher, weiter, so lautet das Motto von Leistungssportlern. Schneller, günstiger und vor allem (band-)breiter wünschen sich die Surfer ihr Internet. Doch im Alltag gerät so mancher Wellenritt zu einer quälend langsamen Schleichpartie. Die in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegenen Übertragungsgeschwindigkeiten im Internet werden durch die ebenso



Abb. 1: Die Datenrate von Glasfasern wird durch so genannte Multiplex-Verfahren erhöht. Mithilfe dieser Techniken lassen sich in einer einzigen Glasfaser auf 80 Kanälen gleichzeitig jeweils 40 Gbit/s transportieren – insgesamt also 3,2 Tbit/s. Das entspricht rund 3,2 Mio. Highspeed-Internetverbindungen oder 41 Mio. Telefonanrufen. (Quelle: Siemens)

steigende Zahl der Nutzer und vor allem der Datenmengen, die über das Internet ausgetauscht werden, zunichte gemacht. Neue Anwendungen zur Datenübertragung, wie pfiffig sie auch immer sein mögen, haben daher vor allem eines gemeinsam: Sie vergrößern die Bandbreite.

Das heute gängige Verfahren ist der optische Datentransfer per Glasfaser (Abb. 1). Bisher kommt die Optik allerdings nur optoelektronisch gekoppelt zum Zuge – d. h. nur die Übertragung erfolgt per Glasfaser, die Vermittlung hingegen elektronisch. Aber schon diese Variante hat die Übertragungsraten seit dem ersten Einsatz von Glasfasern in den 1970er-Jahren dramatisch gesteigert. Heute bilden

Glasfasern die Lebensadern für nahezu alle Weitverkehrsnetze (*wide area networks*, WAN). Sie zeichnen sich durch hohe Bandbreite, geringe Dämpfung und relativ gute Resistenz gegen Störungen aus (z. B. durch elektromagnetische Felder). Kupferkabel können da nicht mithalten. Beim Aufbau der Glasfaser sind vor allem der Faserkern und die Umhüllung zu unterscheiden, deren verschiedene Materialien für den zur Totalreflexion nötigen Unterschied beim Brechungsindex sorgen. Der Mantel besteht aus einem Glas oder einem Kunststoff mit geringerem Brechungsindex als der Kern (Abb. 2).

Das Prinzip

Jede optische Datenübertragung beginnt in der Regel mit der Umwandlung eines elektrischen in ein optisches Signal. Es ist im Wesentlichen eine Hell-Dunkel-Folge, die das ursprüngliche Signal repräsentiert. Als Lichtquelle kommen dafür meist Infrarotlaser zum Einsatz. Zwei physikalische Prozesse machen der Übertragung des in die Glasfaser eingekoppelten Lichtsignals jedoch das Leben schwer.

Beim ersten handelt es sich um nichtlineare Dämpfung in Form von Streuung (Raman- bzw. Brillouin-Streuung) und Absorption: Verunreinigungen, Materialfehler oder auch eingedrungenes Wasser können das Signal bis zur Unkenntlichkeit abschwächen. Natürlich lassen sich Absorptionsverluste dadurch ausgleichen, dass man zwischen durch das Signal ausliest, verstärkt und wieder neu einspielt. Doch damit macht man den Geschwindigkeitsvorteil wieder zunichte. Besser ist es, das Signal optisch aufzufrischen, indem man es dotierte Faserstücke durchlaufen lässt, die von außen durch Laser optisch gepumpt werden und somit als zusätzliches Lasermedium wirken. Da die Dämpfung wellenlängenabhängig ist, nutzt man zur Übertragung die so genannten optischen Fenster im Infraroten bei 850, 1300 und 1550 nm. Dort ist die Dämpfung niedriger als in anderen Wellenlängenbereichen. Typische Dämpfungswerte liegen bei ca. 3 dB/km für 850 nm Wellenlänge.

Das zweite grundsätzliche Problem tritt überall da auf, wo Licht ein Medium durchquert: Dispersion (in der optischen Datenübertragung zur Unterscheidung von anderen Dispersionsformen auch Material-

dispersion genannt), also die Aufächerung eines Lichtstrahls in Teilstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Bei Prismen und Regenbogen ist das hübsch anzusehen, in Lichtleitern aber lästig, denn hier führt die Dispersion dazu, dass die kurzwelligeren Anteile den langwelligeren davon laufen und dadurch das Signal verwischen. Selbst bei Laserstrahlen, die zwar so gut wie monochromatisch sind, ist Dispersion unvermeidlich. Denn auch sie haben eine gewisse Wellenlängenbreite.

Zur Materialdispersion kommt in geometrisch begrenzten Medien wie Glasfasern (im Gegensatz zu unbegrenzten Medien wie Luft) noch die so genannte Modendispersion hinzu. Licht kann sich in Glasfasern in verschiedenen stabilen Lichtwellenformen, den so genannten Moden, ausbreiten. Neben Monomodefasern, in denen sich nur eine einzige Mode ausbreiten kann, gibt es Multimodefasern mit vielen hundert Moden, die sich u. a. durch Feldverteilung und Ausbreitungsgeschwindigkeit unterscheiden. Die Modendispersion entsteht nun, weil bei hinreichend großem Kernglasquerschnitt das Licht nicht parallel zur Kernachse läuft, sondern zwischen Kernglas und Mantelglas in einer Art Zickzackkurs hin und her reflektiert wird (Abb. 2). Da die Lichtgeschwindigkeit in einem Festkörper bei den üblichen Bedingungen eine Konstante ist, kommt Licht, das im Zickzack läuft, später am anderen Ende des Lichtwellenleiters an als Licht, das entlang der optischen Achse verläuft. Solche Laufzeitunterschiede, die sich mithilfe einer Zeitangabe pro Län-

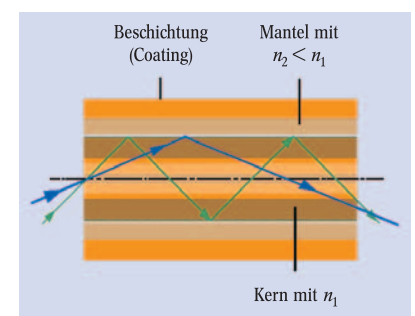


Abb. 2: Im Gegensatz zu geometrisch nicht begrenzten Medien breitet sich Licht in Glasfasern in verschiedenen so genannten Moden aus. Durch unterschiedliche Weglängen der Moden in der Glasfaser entsteht ein Laufzeitunterschied, der neben der üblichen materialbedingten Dispersion die Übertragungsrate zusätzlich begrenzt. n_1 ist der Brechungsindex des Glasfaserkerns, n_2 der des Mantels. (Quelle: Siemens)

geneinheit quantifizieren lassen (z. B. 50 ns/km), reduzieren die Datenrate erheblich. (Für den Beispielwert beträgt die maximale Datenrate nur 20 MHz über 1 km.)

Verringern lässt sich die Modendispersion durch konstruktive Maßnahmen, beispielsweise durch andere Kern-Mantel-Profile wie bei der Gradientenindex-Profilfaser (mit parabelförmigem radialen Brechungsindexprofil, sodass das Licht im Randbereich schneller läuft) oder durch Monomodefasern, bei denen es im Gegensatz zu Multimodefasern nur eine ausbreitungsfähige Mode gibt. So werden typische Laufzeitunterschiede von unter 1 ns/km (Gradientenfaser) und 0,1 ns/km (Monomodefaser) erreicht. Das entspricht Übertragungsraten von einigen Gigabit pro Sekunde und Faser.

Wie lässt sich die Übertragungsraten steigern?

Rekordverdächtig sind einige Gigabit pro Sekunde allerdings noch nicht. Daher greift man zu so genannten Multiplexverfahren, also zur gleichzeitigen oder zeitlich versetzten Übertragung mehrerer Signale. Neben dem teuren Parallelverlegen von Glasfasern samt Sendern, Verstärkern und Empfängern etc. (Raummultiplex) gibt es intelligentere Multiplexverfahren, z. B. das Zeitmultiplex-Verfahren (*time division multiplex*, TDM), das mit höheren Taktraten arbeitet, und das Wellenlängenmultiplex-Verfahren (*wavelength division multiplex*, WDM), bei dem Daten parallel auf mehreren Wellenlängenkanälen übertragen werden.

TDM in der elektronischen Ebene (ETDM) war lange Zeit die Standardtechnik zur Datensteigerung und hat zu Übertragungsraten von 10 Gbit/s geführt; 40 Gbit/s stehen kurz vor der Einführung. Bandbreiten jenseits davon sind aus heutiger Sicht elektronisch jedoch nicht realisierbar, optisch dagegen schon. Bei TDM in der optischen Ebene (OTDM) werden kurze optische Pulse entsprechend der Kanalzahl aufgeteilt, getrennt moduliert und mithilfe präziser optischer Verzögerungselemente und schneller optischer Schalter ineinander verschachtelt. Wissenschaftlern des Heinrich-Hertz-Instituts in Berlin gelang es vor kurzem weltweit erstmals, mithilfe des OTDM-Verfahrens ein 160 Gbit/s-Signal (das entspricht etwa 32 Mio. einseitigen

E-Mails oder 2,5 Mio. ISDN-Gesprächen) über eine verlegte Standard-Glasfaser der Deutschen Telekom zu jagen.

WDM hingegen zieht seine Attraktivität aus der Tatsache, dass sich einzelne Wellenlängen – sprich unterschiedliche Farben – kaum beeinflussen und sich dadurch die Gesamtübertragungsrate um ein Vielfaches steigern lässt, ohne für die einzelnen Kanäle höhere Bitraten erforderlich zu machen. Eine Spezialform des WDM mit besonders dicht liegenden Wellenlängen (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM) ist deswegen zur Schlüsseltechnologie in optischen Netzen geworden. Auf die Grundwellenlänge des optischen Fensters bei 1550 nm moduliert DWDM in einer Monomodefaser (keine Dispersion!) in gängigen Systemen bis zu 64 Wellenlängen auf (im Labor waren es auch schon über 190) und erzielt dadurch Datenraten bis in den Terabit-Bereich. Um Interferenzen zu vermeiden, liegen zwischen den einzelnen Kanälen Abstände von 0,8 bis 1,6 nm. Wesentliche Voraussetzung für den Erfolg von DWDM war die Entwicklung sehr schmalbandiger Laserdioden sowie einer Kopplertechnik mit geringen Kanalabständen.

Rein optisch wäre noch besser

Die erzielten oder prognostizierten gigantischen Datenraten dürfen allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass sie sich immer auf Punkt-zu-Punkt-Verbindungen beziehen, der Geschwindigkeitsrausch also spätestens an den bislang noch elektronischen Vermittlungsstellen endet. Ein richtiges photonisches Netz (*All Optical Networks*, AON) braucht auch optische Vermittlungspunkte (*Optical Cross-Connects*, OXC). Sowohl für WDM als auch für OTDM-Systeme wird in den Labors heftig an der rein optischen Vermittlung geforscht. Alle Ansätze arbeiten dabei mit Mikrospeiegeln, die zwischen Ein- und Ausgängen vermitteln. Da durch Netzwerkknoten jedoch überwiegend Transitverkehr läuft, ist eine Neuausrichtung der Spiegel nur selten nötig – die Vermittlungsstelle kann deshalb die gleiche Datenrate wie die Verbindungsstrecke bewältigen.

CHRISTINE WEBER UND
ULRICH KILIAN