

DATA COM

Das Management-Magazin für Daten- und Telekommunikation

2 Januar 2001
18. Jahrgang
DM 19,-

Der kritische Kern:

Die Glasfaser als Mittelpunkt der Daten-Übertragung

Sonderdruck

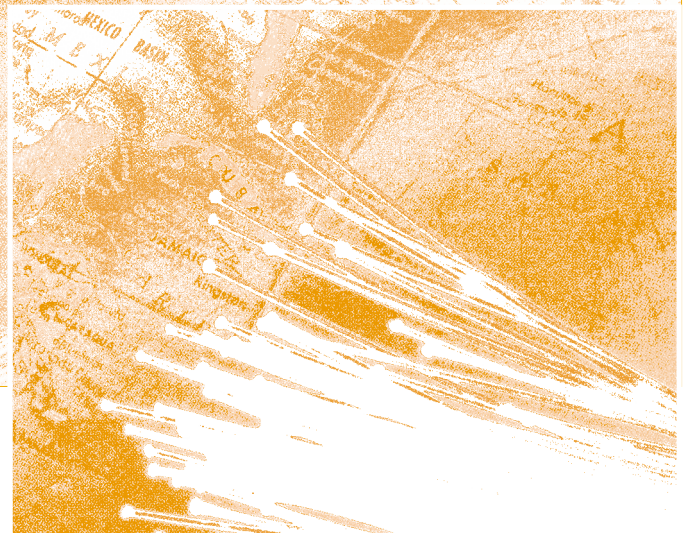
FiberCore
Jena



Der kritische Kern

DIE GLASFASER ALS MITTELPUNKT DER DATEN-ÜBERTRAGUNG

Im Jahr 1870 entdeckte der britische Physiker John Tyndall, daß sich Licht in einem gekrümmten Strahlenweg ausbreitet. 1955 gelang es dem Forscher Kapany, Licht durch eine gebogene Glasfaser zu schicken. Aber erst elf Jahre später wurde es möglich, eine Glasfaser für die Übertragung binärcodierter Signale zu nutzen. Damit war der Grundstein für die optische Informationsübermittlung gelegt. Getrieben durch einen ständig steigenden Bedarf an Bandbreite ist die Glasfaser inzwischen zum dominierenden Übertragungsmedium in großen Teilen der Daten-netze geworden.



Heute werden zwischen Rechenzentren und einzelnen Arbeitsbereichen digitale Informationen nur noch über Lichtwellenleiter (LWL) -Kabel übertragen. Dabei dient der größte Teil eines LWL-Kabels mit seinen verschiedenen Kunststoffen, Füllungen und Armierungen zum Schutz der Fasern vor äußeren Einflüssen. Die eigentliche Qualität der Signalübertragung wird durch die Glasfaser selbst bestimmt. Was im Sinne einer Glasfaser unter Übertragungsqualität zu verstehen ist, soll im folgenden näher betrachtet werden. In modernen Daten-netzen (LAN) findet man drei Arten von Fasern:

- Mehrmoden-Gradientenindexfasern mit einem Kerndurchmesser von 50 µm,
- Mehrmoden-Gradientenindexfasern mit einem Kerndurchmesser von 62,5 µm und
- Einmoden-Stufenindexfasern.

Die Mehrmoden-Stufenindexfasern, die in der Anfangszeit der LWL-Verkabelung verwendet worden sind, haben heute nur noch geringe Bedeutung. Ihre Übertragungs-

technischen Eigenschaften sind so schlecht, daß ein Ersatz dieser LWL-Kabel unumgänglich ist.

■ Mehrmoden-Fasern

Die Übertragung von Lichtwellen in Mehrmodenfasern, die auch als Multimode (MM)-Fasern bezeichnet werden, wird durch das Prinzip der Totalreflexion ermöglicht. Als Voraussetzung dazu bestehen die Lichtwellenleiter aus einem Kern mit einer höheren Brechzahl und einem Mantel mit geringerer Brechzahl. Ein Lichtstrahl, der so in eine Faser eingekoppelt wird, daß er nicht zu weit von der Glasfaserachse abweicht (Akzeptanzwinkel), wird an der Kernwand ständig totalreflektiert und durchläuft auf diese Weise den Lichtwellenleiter.

Bei Mehrmodenfasern werden sehr viele diskrete Lichtwellen (Moden) zur Signalübertragung benutzt. Die Moden werden in unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln in die Glasfaser eingekoppelt und daher unterschiedlich häufig an der Grenzschicht (Kern/Mantel) reflektiert. Strahlen, die durch häufige Reflexionen einen längeren Weg

zurücklegen, werden als Strahlen hoher Moden bezeichnet, und Strahlen, die sehr nah an der Faserachse geführt werden, werden Strahlen niedriger Moden genannt.

Die Bezeichnung Gradientenindexfaser deutet darauf hin, daß die Brechzahl vom Kern Richtung Mantel in kleinen Stufen geringer wird. Die Faser besteht also eigentlich aus mehreren Schichten mit verschiedenen Brechzahlen, die sich parabolisch um den Kern anordnen. Aber warum wird solch ein Aufwand betrieben? Wie schon beschrieben, besteht ein Signal aus mehreren Lichtstrahlen (Moden). Moden, die in der Nähe der Faserachse laufen, legen einen deutlichen kürzeren Weg zurück als Moden, die sehr häufig zwischen Kern und Mantel reflektiert werden. Dies führt dazu, daß die einzelnen Strahlen zu unterschiedlichen Zeitpunkten beim Empfänger ankommen.

Ergebnis dieser Zeitverschiebung ist ein in die Breite gezogenes Empfangssignal.

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „**Intermodaler Dispersion**“. Aufgrund dieses Effektes muß der Abstand zweier aufeinanderfolgender Signale (Bitfolge) deutlich vergrößert werden, um dem Empfänger das Auseinanderhalten der Impulse zu ermöglichen. Je größer die Intermodale Dispersion ist, desto größer muß der Abstand sein und desto geringer ist die Anzahl der Bits, die man pro Sekunde übertragen kann.

Mit der Gradientenindexfaser hat man einen Weg gefunden, die Intermodale Dispersion zu begrenzen und so die Übertragungsbandbreite zu erhöhen. Man nutzt dabei den Effekt, daß Moden in einem Medium mit niedriger Brechzahl schneller laufen als Moden in einem Medium mit höherer Brechzahl. Die Moden in der Nähe der Faserachse werden also langsamer transportiert als die Moden in der Nähe des Mantels. Damit wird der längere Weg eines Lichtstrahls durch die höhere Geschwindigkeit

kompensiert. Das Ergebnis ist ein Empfangssignal, das deutlich steilere Flanken besitzt. Damit wird es möglich, die Bitfolge und somit die Übertragungsbandbreite signifikant zu erhöhen.

Herstellungs-Prozess

Die Herstellung einer Gradientenindexfaser ist sehr aufwendig. Die wenigen Glasfaserhersteller, die es weltweit gibt, verwenden dazu auch unterschiedliche Verfahren. Am Beispiel des deutschen Herstellers FiberCore Jena soll der hohe Produktionsaufwand für diesen Fasertyp verdeutlicht werden:

FiberCore Jena verwendet zur Herstellung einer Glasfaser das MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition)-Verfahren. Dabei wird als Ausgangsmaterial u.a. eine Quarzglasröhre, die sogenannte Substratröhre, benutzt. Das Glas dieser Röhre bildet den späteren Mantel der Faser. Das Substratrohr wird gereinigt, in eine Drehbank mit einer speziellen Vorrichtung luftdicht eingespannt und bei ständiger Drehung über einer Flamme erhitzt.

In die Röhre wird ein Silizium- und Germanium-haltiges Gas eingeleitet. In Verbindung mit Sauerstoff bildet sich aus dem Gas der sogenannte Glasruß, der sich an der inneren Wand des Substratrohres ablagert. Aufgrund der zugeführten Wärme wird der Glasruß in der Röhre zu Quarzglas geschmolzen. Die Zusammensetzung des zugeführten Gases bestimmt den späteren Brechungsindex. Bei einer Gradientenindexfaser muß dieser Vorgang für jede Schicht, die einen veränderten Brechungsindex besitzt, mit einem veränderten Gasgemisch wiederholt werden.

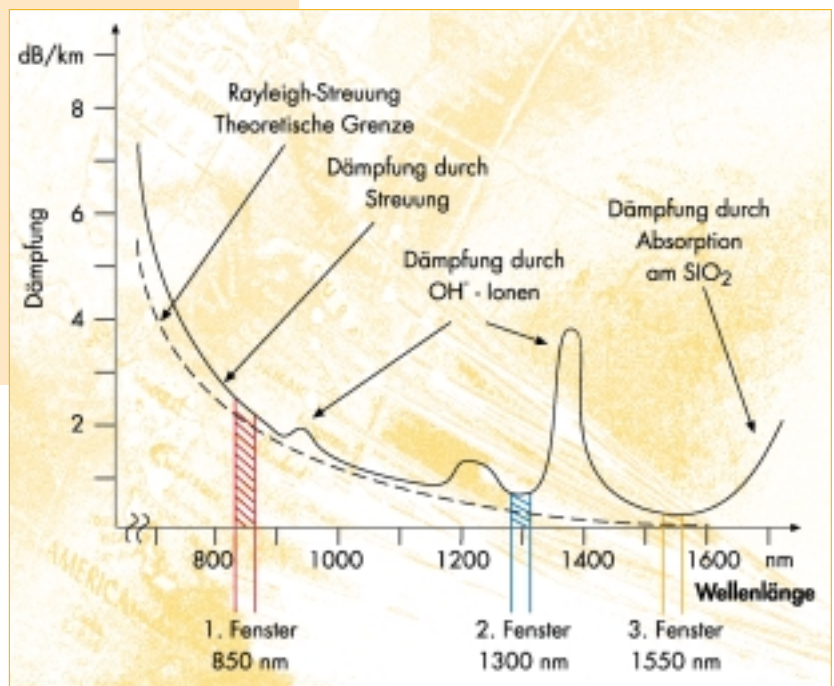
Für die Qualität der Faser ist es sehr wichtig, daß im ge-

Bild 1. Dämpfungs-Parameter als k.o.-Kriterien des Lichtwellenleiters: optische Fenster sowie markante Dämpfungs-Kenngrößen im Überblick

samtan Produktionsablauf die Zusammensetzung des Gasgemischs kontinuierlich überwacht wird, denn durch kleinste Schwankungen wird die Brechzahl merkbar verändert. Haben sich alle Schichten gebildet, wird das Rohr durch starke Erhitzung kollabiert. Es bildet sich die Sekundär-Preform, aus der später die Faser gezogen wird.

Das Ziehen der Faser geschieht in haushohen Ziehtürmen, in der die Preform sehr stark erhitzt wird. Zuerst löst sich ein Glaspfen, der einen Glasfaden hinter sich herzieht. Auf dem Weg nach unten erkaltet die Faser und wird nach Aufbringen einer 60 µm dicken Acrylschicht, dem **Primär-Coating**, auf Spulen aufgewickelt. Auch hier findet eine ständige Überwachung der Qualität statt. Das Erstaunliche ist, daß zum einen die Faser nicht mehr aufhört zu fließen und daß zum anderen das Schichtenverhältnis in der Preform exakt der in der Faser entspricht. Aufgrund der vielen Schichten im Faserkern ist eine Gradientenindexfaser im Herstellungsprozeß die mit Abstand teuerste Faser.

Mehrmoden-Gradientenindexfasern werden mit den Durchmessern 62,5/125 µm



und 50/125 µm produziert. Die erste Zahl gibt den Durchmesser des Kerns mit seinen vielen Schichten an. Die zweite Zahl ist der Durchmesser der Faser inklusive Mantel. Tatsache ist, daß die 50 µm der 62,5 µm Faser in allen technischen Belangen deutlich überlegen ist, da sich in dem kleineren optischen Kern weit weniger Moden ausbreiten können und somit deutlich bessere Übertragungswerte erzielbar sind. Dies wird besonders deutlich in der Längendiskussion bei Gigabit Ethernet und 10 Gigabit Ethernet. Daß immer noch 62,5 µm Fasern verwendet werden, kann u.a. daran liegen, daß ein Mischen der Fasertypen innerhalb einer physikalischen Verbindung nicht stattfinden sollte.

Wie kann man nun aber eine Multimode-Faser qualitativ bewerten? Deren optische Qualität wird im wesentlichen durch drei Parameter bestimmt: die Dämpfung, das Bandbreitenlängenprodukt und seit kurzem auch durch eine garantierte Übertragungslänge für Gigabit Ethernet.

Dämpfung

Unter optischer Dämpfung versteht man einen Lichtverlust. Am Ausgang eines Lichtwellenleiters erscheint weniger Lichtenergie als am Eingang eingekoppelt wurde. Die Dämpfung wird wie bei elektrischen Leitern in Dezibel (dB) angegeben. Da die Dämpfung von der Länge des Lichtleiters abhängt, ist es üblich, diese auf 1 km Faserlänge zu beziehen (dB/km). Die Dämpfungswerte einer Glasfaser werden im wesentlichen durch Lichtstreuung und -absorption beeinflusst.

Die **Lichtstreuung**, auch **Rayleigh-Streuung** genannt, verursacht eine allseitige und ungleichmäßige Ablenkung der Lichtstrahlen. Diese Ablenkung wird durch ungeordnete, mikrokristalline Bereiche hervorgerufen, die in der amorphen Grundmasse des Quarzglas eingelagert sind. Die Zahl und die Intensität dieser mikrokristallinen Bereiche in einer Glasfaser hängen zum einen von der Art und der Qualität des Grundstoffs, zum anderen aber auch von den Bedingungen

bei der Abkühlung der Glas-schmelze ab.

Bei der **Lichtabsorption** wird zwischen der Grundabsorption und der Absorption durch Verunreinigungen unterschieden. Die Grundabsorption kann durch die Faserhersteller nicht beeinflusst werden. Die Absorption durch Verunreinigungen wird hervorgerufen durch OH⁻ und Schwermetall-Ionen (z. B. Eisen-, Chrom-, Kupfer- und Cobalt-Ionen). Um diese Einflüsse soweit wie möglich zu verringern, sind die Faserhersteller gezwungen, Verunreinigungen in der Glas-schmelze zu vermeiden. Durch die Reduzierung der Metall-Ionen-Konzentration auf 10⁻⁹ werden die für eine moderne Glasfaser notwendigen Dämpfungswerte erreicht. Durch die Herstellung von möglichst wasserfreiem Glas (OH⁻ Ionen-Konzentration von 10⁻⁶ bis 10⁻⁵) können die Faserhersteller besonders die Dämpfungsmaxima der Oberwellen senken.

Aus den gesamten Einflüssen resultieren drei nutzbare Wellenlängenbereiche, auch **optische Fenster** genannt, in denen eine ausreichend geringe Dämpfung für die Nutzung in Datennetzwerken vorhanden ist:

1. Fenster: 850 nm
2. Fenster: 1.300 nm
3. Fenster: 1.550 nm.

Typische Dämpfungswerte für das erste optische Fenster liegen bei einer 50/125µm Faser zwischen 2,4 und 2,8 dB/km. Im zweiten optischen Fenster liegt die Dämpfung bei diesem Fasertyp zwischen 0,6 und 1,0 dB/km. Eine vergleichbare 62,5/125 µm Faser weist in beiden Fenstern etwas höhere Dämpfungswerte auf. Das dritte optische Fenster ist nur von den nachfolgend be-

schriebenen Einmodenfasern nutzbar.

Zu beachten ist, daß für die qualitative Beurteilung einer Multimode-Faser die Dämpfung deutlich an Bedeutung verloren hat. War die Dämpfung noch vor wenigen Jahren der bestimmende Parameter für die maximal zu erreichende Länge, so ist es heute aufgrund der hohen Übertragungsfrequenzen das Bandbreitenlängenprodukt.

■ Bandbreitenlängenprodukt

Wie schon beschrieben hängt die Übertragungskapazität einer Faser von der Fähigkeit ab, möglichst viele Impulse pro Sekunde übertragen zu können. Diese Übertragungskapazität kann in eine entsprechende Bandbreite umgerechnet werden. Das heißt wenn ein Lichtwellenleiter eine hohe Impulsfolgefrequenz zuläßt, besitzt er damit eine hohe verfügbare Bandbreite. Je länger aber ein Impuls durch eine Faser läuft, desto mehr wird er „verbreitert“ und desto größeren Abstand müssen die Impulse haben. Deswegen wird bei der maximal möglichen Übertragungsfrequenz die Länge als Produkt integriert. Die Bezeichnung des Parameters ist Bandbreitenlängenprodukt mit der Einheit MHz*km.

Das Bandbreitenlängenprodukt ist einer der wichtigsten Kennwerte einer Faser. Besonders bei modernen Hochgeschwindigkeits-Netzwerken hat dieser Parameter deutlich an Bedeutung gewonnen. Das Bandbreitenlängenprodukt wird von den Faserherstellern jeweils für die beiden relevanten optischen Fenster angegeben. Da die Herstellung einer Gradientenindexfaser sehr komplex ist, entstehen Fasern unterschiedlicher Qualität. Typische Werte sind:

- 600 / 1.200 MHz*km bei 850 nm / 1.300 nm
- 400 / 800 MHz*km bei 850 nm / 1.300 nm
- 500 / 500 MHz *km bei 850 nm / 1.300 nm
- 200 / 400 MHz*km bei 850 nm / 1.300 nm

Auch höhere Werte sind nach Rückfrage beim Hersteller durchaus realistisch.

Eine Faser mit 1.200 MHz*km verkraftet also im zweiten optischen Fenster eine Übertragungsfrequenz von 1.200 MHz bei einem Kilometer Faserlänge. Ist die Glasfaser nur 500 m lang, so kann eine Impulsfrequenz von 2.400 MHz übertragen werden. Fasern der unteren Qualitätsstufe (200 / 400 MHz*km) werden in der Regel für Patchkabel und Pigtaills genutzt. Aufgrund der kurzen Länge (kleiner 10 m) ist die nutzbare Bandbreite ausreichend groß (größer 20.000 bzw. 40.000 MHz).

Bei Datennetzen ab einer bestimmten Größenordnung ist es immer sinnvoll, Fasern mit dem größten Bandbreitenlängenprodukt vorzusehen. Leider gelingen Fasern der höchsten Qualität nur bei ca. zehn Prozent der Chargen. Entsprechend hoch sind die Preise und die Lieferzeiten. Aber auch die besten derzeit verfügbaren Gradientenindexfasern können bei den neuen Übertragungsprotokollen an ihre Grenzen geraten. Auf dieses Thema kommen wir noch einmal zu sprechen.

■ Garantierte Gigabit-Länge

Messungen haben gezeigt, daß ein hohes Bandbreitenlängenprodukt nicht zwingend gleichzusetzen ist mit einer großen Gigabit-Distanz. Die Ursache hierfür liegt u.a. darin, daß in

diesem Frequenzbereich keine LEDs mehr eingesetzt werden, sondern Laser-Dioden:

- Fabry Perot Laser bei 1.300 nm, u.a. im LX-GBIC und
- VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) bei 850 nm, u.a. im SX-GBIC.

Die Laser-Dioden leuchten nicht mehr den gesamten Kern aus, sondern im wesentlichen nur noch das Kernzentrum (Restricted Mode Launch). Sind die Kerne der Fasern nicht von hoher Qualität, kommt es zu Laufzeitunterschieden bei den Moden niedriger Ordnung und damit zur Dispersion und Längenbeschränkung. Da Moden höherer Ordnung kaum vorhanden sind, ist bei Gradientenindexfasern jetzt das Zentrum des Kerns in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt. Die Faserhersteller haben auf die neuen Anforderungen sehr schnell reagiert und bieten kernoptimierte Fasern mit garantierten Gigabitlängen von bis zu 2.000 m an. Auch diesen Parameter muß man bei der Qualitätsbewertung einer Glasfaser zukünftig berücksichtigen.

■ Einmoden-Fasern

Die Einmodenfaser (Single-mode/SM-Faser) besteht aus einem Kern mit einheitlicher Brechzahl und einem Mantel mit niedrigerer Brechzahl. Der Aufbau der Faser ist damit deutlicher trivaler als bei der Mehrmoden-Gradientenindexfaser. Daraus resultiert auch der günstige Preis. Bei Singlemode-Fasern beträgt der Kerndurchmesser ca. 9 µm. Dies hat zur Folge, daß ab einer bestimmten Wellenlänge nur noch ein Lichtstrahl, der sogenannte Grundmode, übertragen wird. Die Grenzwellenlänge, ab der Moden zweiter Ordnung

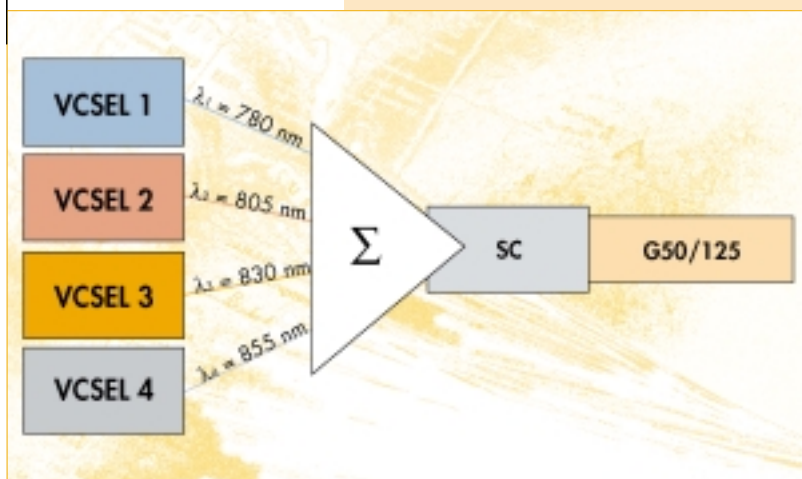


Bild 2. Einsatz von VCSEL-Technologie (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) im „Zusammenspiel“ mit SC-Stecker und G50/125 μm Multimode LWL-Kabel

nicht mehr geführt werden und somit die Faser tatsächlich als Singlemode-Faser arbeitet, wird als Cut Off Wavelength bezeichnet. Typische Werte für diese Grenzwellenlänge liegen bei 1.100 und 1.300 nm. Deshalb können Einmoden-Stufenindexfasern auch nur im zweiten oder dritten optischen Fenster betrieben werden. Die Dämpfung einer Singlemode-Faser liegt im zweiten optischen Fenster zwischen 0,35 und 0,4 dB und bei 1.550 nm (drittes optisches Fenster) zwischen 0,22 und 0,3 dB.

Wie bereits beschrieben, wird im Gegensatz zur Multimode-Faser bei der Singlemode-Faser nur ein Mode übertragen. Damit ist das Problem der Signalverzerrung durch unterschiedliche Laufzeiten verschiedener Moden nicht mehr vorhanden. Dies ist auch der Grund, warum für diese Fasern kein Bandbreitenlängenprodukt angegeben wird. Die maximalen Übertragungsstrecken sind somit nur noch von der Dämpfung abhängig und können deutlich über hundert Kilometer liegen. Singlemode-Fasern werden vorwiegend im WAN eingesetzt. Aber durch die steigenden Bandbreiten im LAN gewinnt dieser Fasertyp auch hier immer mehr an Bedeutung. Bezüglich des Preises muß folgendes berücksichtigt werden: Die SM-Fasern sind bei gleicher Verfügbarkeit günstiger als die MM-

Fasern. Für beide Arten Fasern kann die gleiche Steckertechnik verwendet werden. Und auch bei der Konfektionierung gibt es keine großen preislichen Unterschiede. Was den Betrieb eines Netzwerkes über SM-Fasern heute aber noch teuer macht, sind die aktiven Komponenten. Sowohl die Sendedioden als auch die Genauigkeit bei der Fertigung der aktiven Komponenten treiben den Preis in die Höhe.

■ Ausblick in die Zukunft

Die weitere Entwicklung der Glasfasern wird beeinflusst durch die Anforderung, immer höhere Bandbreiten über ausreichend große Strecken übertragen zu können. Beispielgebend hierfür sind die Standardisierungs-Bemühungen für 10 Gigabit Ethernet. Ein großes Problem der Standardisierung ist es, eine akzeptable Übertragungsart für die breite Basis der Multimode-Fasern zu definieren.

Große Chancen hat zur Zeit ein Multiplexverfahren im ersten optischen Fenster (CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplex). Bei diesem Verfahren wird der Datenstrom auf vier Wellenlängen (zwischen 780 nm und 860 nm) aufgeteilt, wodurch über jede Wellenlänge 2,5 Gbit/s zzgl. Kodierung übertragen werden. Als Sender setzt man vier parallele VCSELs ein, die gemeinsam über einen SC-

Stecker nach außen geführt werden. Die entsprechende Gigabit Ethernet-Bezeichnung lautet hier 10GBASE-SX4 850 CWDM. Hersteller haben inzwischen schon aktive und funktionsfähige Bauelemente präsentiert. Ab dem 2. Quartal 2001 soll eine Serienproduktion möglich sein.

Mit Multimode-Fasern, die im ersten optischen Fenster (850 nm) ein Bandbreitenlängenprodukt von mindestens 500 MHz*km besitzen, sollen Strecken bis 300 m realisierbar sein. Glasfaserhersteller bemühen sich zur Zeit MM-Fasern zu entwickeln, die bei 850 nm bis zu 2.200 MHz*km übertragen können. Damit sollen Längen bis zu 550 m möglich werden. Die meisten der heute installierten Netzwerke verfügen aber über deutlich schlechtere Fasern (s.o) und werden daher Schwierigkeiten haben, überhaupt die 300 m zu erreichen.

In der Diskussion ist auch noch eine MM-Übertragung im zweiten optischen Fenster (1.310 nm). Auch bei diesem Vorschlag soll der Datenstrom gemultiplext werden (WWDM: Wide Wavelength Division Multiplex). Nachteil dieser Möglichkeit sind die rund viermal höheren Kosten für die aktiven Elemente bei vergleichbar zu erreichenden Längen. Zudem benötigen die Dioden 50 Prozent mehr Leistung. Dieser Vorschlag hat beim letzten IEEE-Treffen deutlich weniger

Zustimmung gefunden als der 10GBASE-SX4 850 CWDM Vorschlag. Längen über 550 m werden nach heutigem Stand nur noch mit Singlemode-Fasern realisierbar sein.

■ Konsequenzen für die Planung

Der Trend, im LAN günstige optoelektronische Bauelemente nutzen zu wollen, führt dazu, daß Übertragungen bei 850 nm deutlich an Gewicht gewinnen. Dies muß bei der Auswahl einer MM-Faser berücksichtigt werden. Mit den heute verfügbaren, hochwertigen Fasern werden aber trotz allem nur bis zu 300 m für 10GE-Verbindungen realisierbar sein.

Unter Berücksichtigung eines Investitionszeitraums im passiven Bereich von zehn Jahren ist es daher durchaus überlegenswert, auch SM-Fasern im Primär- und Sekundärbereich vorzusehen. Dabei ist es nicht erforderlich, separate LWL-Kabel zu verlegen, sondern man sollte über sogenannte Hybridkabel nachdenken. Dies sind LWL-Kabel, die sowohl über SM-Fasern als auch über MM-Fasern verfügen. Durch die MM-Fasern ist man zum einen in der Lage, die günstige aktive Technik von heute und morgen noch zu nutzen. Zum anderen ist man durch die SM-Fasern relativ sicher, auch die Technik von übermorgen über die gleiche Infrastruktur betreiben zu können. Dies bekommt besonders dann Gewicht, wenn man berücksichtigt, daß die LWL-Infrastruktur eines LANs zwei bis drei Geräte-Generationen überstehen sollte.

Uwe von Thienen,
Geschäftsführer der Planungs- und Beratungsgesellschaft dvt Consulting (61389 Schmittlen),
E-Mail: von.Thienen@dvt-consulting.de