

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 92 (2001)

Heft: 25

Artikel: Wavelength Division Multiplexing : WDM

Autor: Weingartner, Hanspeter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855801>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wavelength Division Multiplexing: WDM

Die moderne Kommunikationstechnik ist einer steten Evolution unterworfen: Neue Applikationen, Änderungen im Benutzerverhalten oder etwa die Neuverteilung von Datenbankinhalten, die heute aus Sicherheitsüberlegungen vermehrt auf geografisch weit auseinander liegenden Server gespiegelt werden, haben zur Folge, dass sie sich ständig weiterentwickelt. Dabei spielen viele Variablen wie verfügbare Transporttechnologien, zu überbrückende Distanzen oder die Verfügbarkeit von Applikationen eine grosse Rolle. In diesem Zusammenhang werden im vorliegenden Beitrag Verfahren zur schnellen Datenübermittlung über grössere Distanzen vorgestellt.

Heute kann man mit gutem Gewissen behaupten, dass sich die Informationstechnologie in Handel und Gesellschaft etabliert hat: Information ist eine Ware geworden.

Die allgemeine Akzeptanz der Informationstechnologie und die Erwartungen an die ununterbrochene Verfügbarkeit von Informationen fordern vor allem von Netzwerken, die geografisch weit auseinanderliegende Standorte verbinden, Höchstleistungen bezüglich Ausfallsicherheit und Bandbreite. In einem weit

Hanspeter Weingartner

gehend deregulierten Telekommunikationsumfeld haben diese hohen Anforderungen an Datenverbindungen den Einsatz von privaten Glasfaserkabeln zuerst sinnvoll und heute notwendig gemacht.

Datenverkehr nimmt stark zu

Alle grossen Internet- oder Application-Service-Provider vermerken weltweit eine Verdoppelung des Bandbreitenbedarfs alle sechs bis neun Monate. Der Internetdatenverkehr steigt zurzeit jährlich um etwa 300%, wobei der Anteil des traditionellen Sprachverkehrs mit sinkender Tendenz noch gerade 13% des gesamten Datenverkehrsaufkommens ausmacht.

Während das Datenaufkommen stetig wächst, wird das Übertragen von Daten immer komplexer. Daten, die über einen

Backbone übertragen werden, können – wie Sprache oder Faxmeldungen – «Circuit Based», «Packet Based» (wie für das Internet Protokoll IP) oder – wie bei ATM¹ oder Frame Relay² «Cell Based» sein (Begriffe siehe Kasten). Viele Service Provider möchten sich von den üblichen «Time Division Multiplexing»-Systemen (TDM-Systemen) verabschieden. Diese Systeme wurden für die Übertragung von Sprachdaten optimiert. Ihr Einsatz ist teuer und ineffizient geworden.

Bei der Evaluation von neuen, modernen Hochleistungs-Multiplexern liegt die stärkste Gewichtung bei einem günstigeren Systemunterhalt, einer (noch) höheren Bitrate bei der Datenübertragung und einem günstigeren Preis-Leistungs-Verhältnis bei der Beschaffung dieser Systeme. Diese Gewichtung entspricht den primären Bedürfnissen alter und neuer Anwender. Einer der wichtigsten Gründe ist das vermehrte Einführen von privaten unternehmensweiten Hochleistungsverbindungen, auf die später im Anwendungsbeispiel noch genauer eingegangen wird.

Time Division Multiplexing

Time Division Multiplexing (TDM) wurde ursprünglich entwickelt, um die Übertragung von Sprachdaten über ein einzelnes Medium zu maximieren. Bevor solche TDM-Systeme eingesetzt wurden, benötigte jeder einzelne Telefonanruf

seine eigene physikalische Verbindung. Dies war eine enorm teure und unflexible Lösung. Mit der Einführung der TDM-Technologie konnte nun mehr als ein Telefonanruf über die selbe physikalische Verbindung geführt werden.

Wie man sich TDM vorstellen muss

Das Konzept des Time Division Multiplexing kann am einfachsten anhand der Funktionsweise einer Schnellstrasse erklärt werden, die zwei Städte miteinander verbindet. Dabei wird mit einem automatischen Mechanismus wie bei einer Autobahnzahlstelle sichergestellt, dass alle zwei Sekunden ein Auto auf die Reise geschickt wird. Dabei spielt es keine Rolle, wie viele Autos auf wie vielen Zubringern die Schnellstrasse benutzen möchten. Führen jedoch alle Zubringer zusammen mehr als ein Auto pro zwei Sekunden zur Schnellstrasse, kommt es zum Stau auf den Zubringern.

Da alle Autos mit der genau gleichen Geschwindigkeit transportiert werden, bewegen sich die Autos im Zwei-Sekun-

Begriffserläuterungen

Circuit Based

Verbindungsorientierte Kommunikation, braucht eine physikalische Verbindung zwischen den beiden Teilnehmern. Verbindungsorientiert bedeutet, dass der Weg zum Ziel bereits vor dem Versenden von Daten aufgebaut worden ist.

Packet Based

Informationen werden bei Bedarf verpackt, adressiert und verschickt. Diese Pakete werden am Zielort ausgepackt und weiterverarbeitet. Bei dieser nicht verbindungsorientierten Technologie werden diese Pakete wie bei Paketverteilzentren der Post verteilt.

Cell Based

Weiterentwicklung des «Paket Based»-Prinzips. Dieses Verfahren arbeitet verbindungsorientiert und bietet unter anderem Dienste wie etwa garantierte Bandbreite an. Es wird für schnelle Sprach- und Multimedia-Anwendungen eingesetzt.

dentakt – ohne Stau- und Unfallgefahr. Als einzige Bedingung muss dabei erfüllt sein, dass auf beiden Seiten die gleiche Anzahl Zu- bzw. Wegbringer existiert.

Die Funktionsweise von TDM

Bei der TDM-Technologie wird das Übertragungsmedium – im oben erwähnten Beispiel die Schnellstrasse – in zeitliche Abschnitte unterteilt. Alle Kanäle (die Zubringer der Schnellstrasse im Beispiel) teilen sich dasselbe physikalische Medium (Kupferkabel, Glasfaser) und werden scheinbar als virtuelle Kanäle übertragen. Logisch erfolgt die Übertragung jedoch zeitlich aufgeteilt. Dabei wechseln sich alle Kanäle ab, wobei zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort, nur das Signal eines einzigen Kanals vorhanden ist. Die Aufteilung der gesamten Übertragungskapazität des Mediums in Zeitfenster bedeutet, dass jeder Kanal nur zu genau festgelegten Zeitpunkten seine Daten übertragen darf.

Dafür müssen alle Kanäle zeitlich synchronisiert werden. Es herrscht ein strenges Regime (Taktung), durch das die einzelnen Kanäle voneinander getrennt werden, denn Synchronisationsfehler können zu Übertragungsfehlern führen; im schlechtesten Fall bekommt man Zugriff auf die Daten eines anderen, fremden Kanals.

Einschränkungen bei TDM

Da die maximale Übertragungsrate des physikalischen Mediums konstant bleibt, wird die Bandbreite eines Kanals umso kleiner, je mehr Kanäle existieren. Ein weiteres Problem ist die Komplexität der benötigten Technik für die zeitliche Taktung, die Abtastung, die Zerhackung und das Zusammensetzen der zerhackten Signale. Man benötigt dafür eine sehr genaue Zeitbasis oder aber einen sehr genauen zentralen Muttertakt im Netz.

Bei TDM-Systemen kann die zentrale Funktionalität der zeitlichen Taktung nur mittels aufwändiger Elektronik und komplizierter Firmware realisiert werden. Diese Funktion ist heute auf optischer Basis nicht realisierbar. Bei WDM-Systemen ist dies nicht nötig.

Die heutigen Systeme

Die heutigen Systeme sind überwiegend TDM-Systeme, angefangen bei ISDN³, über LAN-Netze⁴ (zum Teil ohne konstante Zeitfenster, sondern auf Paket-Basis (Packet Based) mit wahlfreiem Zugriff CSMA/CD⁵), Weitverkehrs-Telefonnetze bzw. Weitverkehrs-Datenetze, ATM, SDH⁶, Frame Relay usw. Das klassische analoge Telefon oder verschiedene

HF-Verfahren, bei denen ein Frequenz-Multiplexing zum Einsatz kommt, bilden dabei die Ausnahmen.

Heute werden mit TDM-Technologien Datenraten bis zu 2,5 Gbit/s (OC-48)⁷ übertragen, zunehmend auch mit bis zu 10 Gbit/s (OC-192). Modernste Netze bewältigen mittlerweile sogar Datenraten von 40 Gbit/s (OC-768).

Da bei steigenden Bitraten aus physikalischen Gründen eine immer höhere Lichtleistung verwendet werden muss, die aber immer weniger effizient durch die Glasfasern übertragen wird, stösst diese Technologie an ihre physikalischen Grenzen. Dieser Effekt ist als chromatische Dispersion bekannt: Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen breitet sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in einer Glasfaser aus. Da eine optische Lichtquelle niemals Licht nur einer einzigen Wellenlänge ausstrahlt, ergeben sich unerwünschte Laufzeitunterschiede. Diese Laufzeitunterschiede führen zu einem ungenauen Signal am jeweiligen Faser-Ende. In herkömmlichen TDM-Systemen arbeiten vielfach Standard-Fabry-Perot-Laser (FP-Laser), die eine spektrale Breite bis zu 7 nm aufweisen. Da die spektrale Breite von Lasern in WDM-Systemen (Distributed-Fedback-Laser, DFB-Laser) weniger als 0,1 nm aufweisen können, sind solche unerwünschten Effekte weit weniger ausgeprägt. Diese Laser sind jedoch wegen ihrer aufwändig konstruierten Stabilisierung teurer. Zudem wird stärkeres Licht durch unvermeidbare Verunreinigungen des Glaskerns auch stärker reflektiert (wie etwa der Nebeneffekt beim Autofahren).

Wavelength Division Multiplexing

Ein völlig anderer Ansatz der Datenübertragung über optische Medien ist das Wavelength Division Multiplexing (WDM). Dieses weist ankommen Signalen eine eigene, spezifische Wellenlänge in einem bestimmten Frequenzband zu.

Das Konzept ist dem Verbreiten von Signalen verschiedener Radiostationen ähnlich, die auf verschiedenen Wellenlängen ihre Programme senden: Jeder Kanal wird auf einer eigenen Frequenz übertragen, die mittels eines Abstimmgeräts im Empfänger selektiert werden kann. Man kann sich das Verfahren aber auch so vorstellen, dass in der WDM-Technologie jedem Kanal eine andere Lichtfarbe zugeordnet ist, die dann in der Glasfaser übertragen wird. Verschiedene Kanäle werden so wie in einem «Regen-

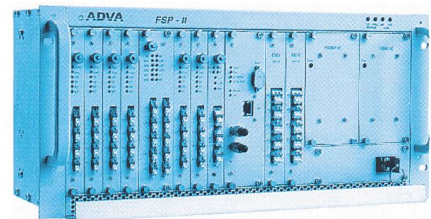
bogen» übertragen. Dies funktioniert, weil sich die einzelnen Farben gegenseitig nicht beeinflussen oder gar vermischen.

Die WDM-Technologie wird auch als SDM-Technik bezeichnet (Space Division Multiplexing). Space bedeutet hier, dass der «physikalische Raum» des Übertragungsmediums Glas räumlich aufgeteilt und die Fähigkeit des Glases, verschiedene Farben zu übertragen, genutzt wird.

Dense Wavelength Division Multiplexing

Bei praktisch allen WDM-Systemen wird als Grundwellenlänge die Wellenlänge des optischen Fensters bei 1550 nm verwendet. Genau genommen bewegt sich der Bereich zwischen 1558,98 nm und 1531,9 nm. Dieser Bereich beinhaltet natürlich weit mehr als nur eine Farbe oder eben einen Kanal.

Bei einem System, das bis zu vier Kanäle übertragen kann, spricht man noch von einem WDM-System, bei solchen mit mehr als vier Kanälen von Dense Wavelength Division Multiplexing – oder kurz: DWDM. «Dense» bedeutet dabei eine dichte Kanalbündelung. Im Labor



DWDM-Multiplexer FPS II von Adva Optical Networking, München

unterstützen moderne DWDM-Systeme heute bis zu 128 Kanäle auf einer Glasfaser. Dies bedeutet, dass mit DWDM-Systemen sehr viele optische Kanäle oder sehr viele verschiedene Farben gleichzeitig übertragen werden können.

Die verschiedenen Wellenlängen werden durch ausgewählte und speziell abgestimmte Laser-Module erzeugt, welche eine bestimmte – bezüglich Langzeitverhalten und Temperatur äusserst stabile – schmalbandige Farbe generieren. Empfangen werden solche Signale mittels sogenannter PIN-Dioden⁸, die ein sehr breites Farbenspektrum erfassen können. Deshalb müssen die verschiedenen Wellenlängen, bevor diese den Empfängerdioden zugeführt werden, optisch voneinander getrennt werden. Dieser Vorgang erfolgt ausschliesslich mit passiven Elementen. Der Abstand zwischen den einzelnen Kanälen beträgt 0,8 nm oder

1,6 nm, was einem Frequenzabstand von bis zu 200 GHz (bei 1,6 nm Wellenlängendifferenz) entspricht.

Um ein Signal in eine WDM-Faser einkoppeln zu können, muss dieses zuerst auf die entsprechende Kanalwellenlänge umgesetzt werden, was in speziellen Interface-Modulen erfolgt. Liegt das Signal schon in einer optischen Form vor, muss es in einem ersten Schritt in eine elektrische Form zurückgewandelt werden, um danach wieder von der elektrischen in die gewünschte optische Wellenlänge transformiert zu werden. Das Zusammenführen der einzelnen Kanäle erfolgt danach in einem passiv arbeitenden optischen Multiplexer.

Die heute erhältlichen Interface-Module unterstützen alle gängigen Schnittstellen wie etwa ATM, SDH oder Ethernet bis hin zu Gigabit-Ethernet und höher. Somit können alle heute in Betrieb stehenden, optisch oder elektrisch arbeitenden Systeme ihre Signale transparent über DWDM-Systeme übertragen. Sogar Fiber Channel und Escon-Systeme (IBM-Peripherie-Interface) lassen sich über sehr weite Entfernungen realisieren.

Mittels DWDM-Technologie können auf einer Singlemode-Glasfaser bis zu 128 unterschiedliche Kanäle protokolltransparent übertragen werden. Protokolltransparent deshalb, weil alle WDM-Systeme auf dem Layer 1 (Physical Layer) nach dem OSI/ISO-Referenzmodell arbeiten.

DWDM-Systeme können sowohl als Punkt-zu-Punkt-Verbindung wie auch in Ringstrukturen oder in vermaschten Netzwerken eingesetzt werden. Zunehmend werden flexible Ringstrukturen im MAN-Bereich⁹ und private Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert.

Bei flexiblen Ringstrukturen werden optische Doppelringe mit zwei Fasern aufgebaut. DWDM-Systeme können daher heute voll redundant ausgelegt werden: Bei einem allfälligen Faserbruch ist dann sofort eine Ersatzfaser vorhanden, auf welche im Millisekundenbereich automatisch umgeschaltet werden kann. Diese Redundanz kann auch bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert werden.

Anwendungsbeispiel

Heute werden auf einem Ethernet-LAN bereits mit 1 Gbit/s – in nächster Zukunft sogar mit 10 Gbit/s – gearbeitet. Dies erfordert auch von den MAN- und WAN-Verbindungen¹⁰ immer höhere Bandbreiten, vor allem dann, wenn über diese Verbindungen sicherheitsrelevante Netzwerkfunktionen realisiert werden

sollen. Als Beispiel sei an dieser Stelle eine Serverfarm erwähnt, deren Verfügbarkeit mittels Cluster Services optimiert wurde. Um die einzelnen Server aus Sicherheitsgründen geografisch zu trennen, braucht es schnelle Verbindungen zwischen diesen Standorten. Vielfach stehen aber keine zusätzlichen Glasfaserstrecken zwischen einzelnen Standorten zur Verfügung; der Bau solcher privater Verbindungen ist nur mit sehr hohen Kosten realisierbar. Der Einsatz der WDM-Technologie ist in einem solchen Fall wirtschaftlich sehr interessant und technisch um ein Vielfaches flexibler als der Neubau weiterer Glasverbindungen oder der weitere Ausbau herkömmlicher Verbindungen über Kupferleitungen.

Singlemode-Fasern, Übertragungskapazität

Eine Standard-Singlemode-Faser hat ihr Dispersionsminimum (praktisch keine Spektralzerlegung des Lichts in Folge von Laufzeitunterschieden in der Faser) bei einer Wellenlänge von 1330 nm. Die geringste Dämpfung in der Faser entsteht jedoch bei einer Wellenlänge von 1550 nm. Bei modernen dispersionsgeschobenen Fasern wurde durch einen speziellen Aufbau der Glasfaser versucht, diese beiden Attribute zusammenzuführen. Da die überbrückbare Distanz (geringe Dämpfung) immer im Vordergrund steht, wurde versucht, eine möglichst geringe chromatische Dispersion in das 1550-nm-Fenster zu schieben. Dieses 1550-nm-Fenster einer solchen dispersionsgeschobenen Monomodefaser stellt eine Bandbreite von rund 25 000 GHz zur Verfügung. Dies entspricht einer Übertragungskapazität von $25 \cdot 10^{12}$ Bits pro Sekunde.

Das gesamte in Büchern dokumentierte Wissen der Menschheit entspricht etwa $500 \cdot 10^{12}$ Bits. Somit könnte mittels einer einzigen Glasfaser das gesamte dokumentierte Wissen der Menschheit

in ungefähr 20 Sekunden übertragen werden.

Ausblick

Herkömmliche Glasfaserübertragungen finden in den Bandbreiten von 1530 bis 1560 nm, teilweise auch von 1565 bis 1595 nm statt. Modernste Glasfasern können auch in den Bandbreiten von 1460 bis 1490 nm optimal arbeiten, was eine deutliche Steigerung der Anzahl möglicher Kanäle bedeutet. Diese Erweiterung des optischen Fensters würde künftig Datentransfers über bis zu 160 Kanälen bei 10 Gbit/s und Kanal ermöglichen. Die aktuelle Benchmark-Messung für DWDM-Übertragungen über Lichtwellenleiter liegt bei rund 800 Gbit/s, mit dem Einsatz modernster Glasfasern könnte diese Kapazität auf 1,6 Tbit/s verdoppelt werden.

Adresse des Autors

Hanspeter Weingartner, DDS Netcom AG, 8320 Fehraltorf, weingartner@dds.ch

¹ ATM: Asynchronous Transfer Mode

² Frame Relay: weiterentwickeltes X.25-Protokoll, heute Industrie-Standard. Garantierte Datenrate, arbeitet mit mehreren virtuellen Kanälen zwischen fest verbundenen Standorten. Typische Datenraten liegen zwischen 64 kBit/s und 1,554 MBit/s.

³ ISDN: Integrated Services Digital Network

⁴ LAN: Local Area Network

⁵ CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect, wurde vom Ethernet-Committee IEEE 802.3 normiert.

⁶ SDH: Synchron Digital Hierarchy. Stammt aus Europa. Ermöglicht weltweit einheitliche, byteweise Multiplex-Verfahren mit standardisierten Bitraten. SDH-Daten werden mittels den SDH-Signalen STM-[x] übertragen, wobei das [x] für das Vielfache der Datenrate 155 MBit/s steht. (US = OC-3, Europa = STM-1). STM steht für «Synchronous Transport Module».

⁷ OC-[x]: Optical Carrier level. Stammt aus den USA, ursprünglich von Sonet (Synchronous Optical Network von Bell Communication Research), wurde von der Ansi übernommen und zeigt die Übertragungsgeschwindigkeit in OC-[x]. OC-1 = 51,8 MBit/s; OC-2 = 103 MBit/s; OC-3 = 155 MBit/s; OC-12 = 622 MBit/s; OC-48 = 2,48 Gbit/s; OC-192 = 10 Gbit/s; OC-768 = 40 Gbit/s.

⁸ PIN-Diode: Positive Intrinsic Negative Diode. Optischer Empfänger (Detektor), der Lichtsignale in elektrische Signale umwandelt.

⁹ MAN: Metropolitan Area Network

¹⁰ WAN: Wide Area Network

Wavelength Division Multiplexing: WDM

La technique moderne des télécommunications est le théâtre d'une évolution constante: les nouvelles applications, les changements de comportement des utilisateurs ou la nouvelle répartition des contenus de bases de données qui, pour des raisons de sécurité, sont de plus en plus reproduits sur des serveurs lointains, font que le développement se poursuit sans relâche. Et de nombreuses variables jouent ici un rôle important, comme les technologies de transport à disposition, les distances à franchir et la disponibilité des applications. C'est sur cette toile de fond que l'article présente des procédés de transmission rapide des données à grande distance.