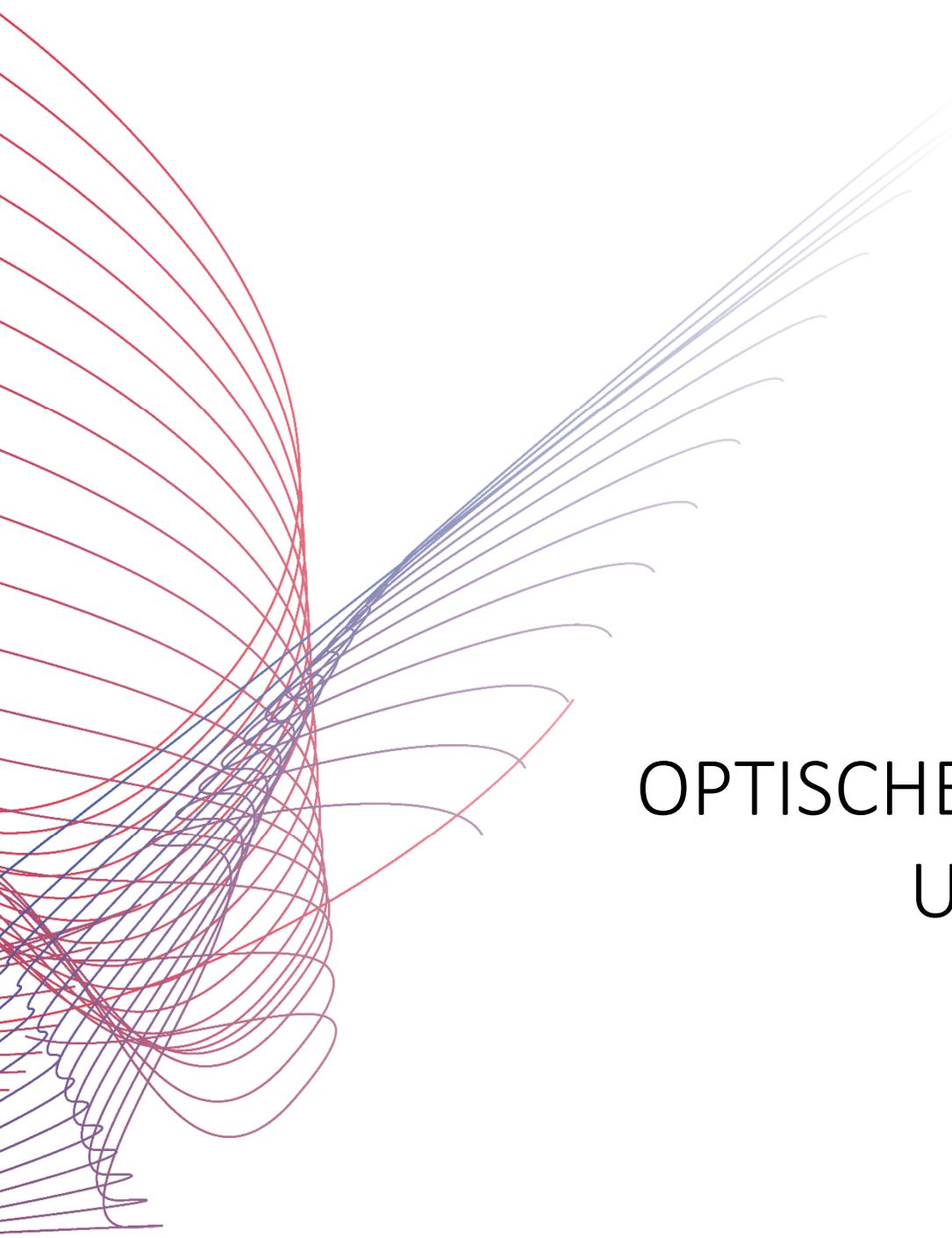




TECH pedia



OPTISCHE SYSTEME UND NETZE

MICHAL LUCKI

Titel der Arbeit: Optische Systeme und Netze
Author: Michal Lucki
Übersetzt (von): Radoslav Vargic
Veröffentlicht (von): České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktadresse: Technicka 2, Prague 6, Czech Republic
Tel.: +420 224352084
Drucken: (nur elektronisch)
Anzahl der Seiten: 44
Ausgabe: 1. Ausgabe, 2017
ISBN 978-80-01-06258-6

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung (Mitteilung) trägt allein der Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

ERLÄUTERUNG



Definition(en)



Interessantheit (Interessantes)



Bemerkung



Beispiel



Zusammenfassung



Vorteile



Nachteile

ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Lehrmaterial beschreibt optische Netze – optische Zugangsnetze, die FTTx-Technologie, aktive und passive optische Netze und optische Systeme mit Wellenlängenmultiplex: DWDM und CWDM. Sie führt grundlegende Parameter und Arbeitsweisen der optischen Netze, einschließlich der Problematik der Systemwartung (OTDR, Spleißen) und Signalrückgewinnung (EDFA, SOA, Raman-Verstärker, Dispersionskompensation) an.

ZIELE

Die Studenten werden lernen, verschiedene Typen der Implementation von optischen Netzen zu unterscheiden und auszuwerten bzw. festzustellen, ob ein optisches Netz die grundlegenden Standardkriterien erfüllt. Vermittelt werden auch Kenntnisse zur Planung der optischen Systeme, volloptischen Signalrückgewinnung und Wartung optischer Netze.

LITERATUR

- [1] L. Bohac, M. Lucki, Optické komunikační systémy, Skriptum von ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04484-1.
- [2] G. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [3] M. Sivalingam, Krishna and S. Subramaniam, Optical WDM Networks: Principles and Practice. Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [4] B. Woodward, Bill, E. Husson, Fiber Optics Installer and Technician Guide. Alameda, CA, USA: Sybex, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [5] F. Lam, Cedric, Passive Optical Networks: Principles and Practice. Burlington, MA, USA: Academic Press, 2007. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [6] N. Dutta, Q. Wang, Semiconductor Optical Amplifiers. Singapore, SGP: World Scientific & Imperial College Press, 2006. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [7] I. Kaminov, T. Li, A. Willner, Optical Fiber Telecommunications VB, Systems and Networks, Elsevier, 2008, ISBN 978-0-12-374172-1.
- [8] M. Skop, M. Petrasek, J. Petrasek und P. Bocek, Synchronní digitální hierarchie SDH a WDM, ČTU, Prag, 2001. ISBN 80-01-02284-6.

- [9] M. Yasin, S. Harun, H. Arof, Recent Progress in Optical Fiber Research, Intech, Rijeka, 2012, ISBN 978-953-307-823-6.
- [10] R. Freeman, Fiber Optic Systems for Telecommunications, Wiley series in telecommunications and signal procesing, 2002, ISBN 0-471-41477-8.
- [11] M. John Senior, Optical Communications Principles and Practise. Prentice Hall, 1992, ISBN 0-13-635426-2.
- [12] Saeckinger, Eduard. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.

Inhaltsverzeichnis

1	Gültige Empfehlungen von ITU-T für optische Übertragungssysteme	7
1.1	Empfehlungen von ITU und IEEE für PON-Netze.....	7
1.2	Empfehlungen für PON mit Reichweitenerhöhung	9
2	Systeme mit Wellenlängenmultiplex - CWDM und DWDM	10
2.1	Idee des Wellenlängenmultiplexes.....	10
2.2	Raster von CWDM und DWDM.....	11
3	Typen von optischen Netzen, ihre Architektur und grundlegende Parameter (OTH, FTTx).....	12
3.1	FTTx-Architektur	12
3.2	Zugangsnetze.....	14
3.3	Optische Transporthierarchie	16
4	Spleißen von Lichtwellenleitern und Installation von optischen Anschlüssen.....	17
4.1	Ziel.....	17
4.2	Verfahren.....	19
5	Testen der optischen Anschlüsse mit OTDR-Reflektometer	23
5.1	OTDR-Reflektometer	23
6	Signalrückgewinnung im optischen Netz mittels EDFA-Leitungsverstärkern	26
6.1	EDFA-Verstärker	26
7	Optische Halbleiterverstärker (SOA) und Raman-Verstärker	29
7.1	Optische Halbleiterverstärker	29
7.2	Raman-Verstärker	31
8	Dispersionskompensatoren für Lichtwellenleiterstrecken.....	33
8.1	Dispersion in Lichtwellenleitern	33
8.2	Dispersionskompensation.....	36
8.3	PMD – Polarisationsmodendispersion	39
9	Konvergenz und Upgrade von optischen Netzen	40
9.1	Konvergenz und Upgrade von optischen Netzen	40
10	Schlussfolgerung.....	44

1 Gültige Empfehlungen von ITU-T für optische Übertragungssysteme

1.1 Empfehlungen von ITU und IEEE für PON-Netze



Die **ITU** (Internationale Fernmeldeunion, engl. *International Telecommunication Union*) ist eine internationale Union für Telekommunikation, welche Empfehlungen für passive optische Netze (**PON**, engl. *Passive Optical Network*) einschließlich PON mit einer Reichweitenerhöhung veröffentlicht. Man kann viele Varianten dieses Systems gemäß Dämpfungsklasse, Reichweite, verwendeten Wellenlängen und Übertragungsraten des Netzes unterscheiden.



Ein passives optisches Netz (**PON**, engl. *Passive Optical Network*) ist ein Schwerpunkt der in diesem Lehrmaterial beschriebenen Netze. Es handelt sich um ein Multipunkt-Netz, das gemäß der Funktion seiner Elemente für die Entnahme von optischen Signalen klassifiziert werden kann. PON verwendet passive Elemente (neben aktiven Lasern oder weiteren Quellen der optischen Strahlung), wobei die Leistung mit der Entfernung von der Quelle des optischen Signals stufenweise sinkt.

Grundlegende Empfehlungen für aktuelle PON – Vergleich der Empfehlungen von IEEE und ITU-T.

Empfehlung	10GEPON, IEEE 802.3av (2009)	EPON, IEEE 802.3ah (2004)	GPON, ITU- T G.984 (2003)	XG-PON, ITU-T G.987 (2010)
Varianten der Übertragungsraten	10G/10G symmetrisch oder asymmetrisch	1G/1G symmetrisch	1,25G/1,25G symmetrisch, 2,5G/1,25G asymmetrisch, 2,5G/2,5G symmetrisch	10G/2,5G asymmetrisch
Übertragungsrate auf Bitübertragungsschicht	10,3125 Gbit/s, 1,25 Gbit/s	1,25 Gbit/s	1,24416 Gbit/s, 2,48832 Gbit/s	9,95328 Gbit/s, 2,48832 Gbit/s
Dämpfungsklassen	PR10, PRX10, PR20, PRX20, PR30, PRX30	PX10, PX20	Klasse A, B, B+, C	Klasse Nominal 1, 2, Klasse Extended 1, 2
Wellenlängen [nm]	Downstream (Richtung zum Benutzer) 1575-1580 Upstream (Richtung vom Benutzer) 1260-1280 oder 1260- 1360	Downstream 1480-1500 Upstream 1260-1360	Downstream 1480-1500 Upstream ursprünglich 1260-1360, neu 1290- 1330	Downstream 1575-1580 Upstream 1260-1260
Physische Reichweite [km]	≤10, ≤20	≤10, ≤20	≤20	≤20 (künftig ≤40)
Max. Teilungsverhältnis	1:16, 1:32 (künftig 1:64, 1:128)	1:16, 1:32	1:64 (proprietär 1:128)	1:256

1.2 Empfehlungen für PON mit Reichweitenerhöhung

Zur Reichweitenerhöhung können passive optische Netze in gewissen Fällen optische Verstärker verwenden, ohne dass eine umfangreiche aktive Infrastruktur aufgebaut werden muss.

Empfehlungen für GPON mit Reichweitenerhöhung, zugelassene Verstärker

Klasse von GPON	Optisches Verteilnetz [dB]	Zulässige Dämpfung vom Lieferanten zum Endbenutzer [dB]	Max. physische Reichweite (Bitübertragungsschicht) [km]
Klasse B+	13-28	13-28	40
Klasse C	15-30	15-30	40
Klasse C+	17-32	17-32	60

2 Systeme mit Wellenlängenmultiplex - CWDM und DWDM

2.1 Idee des Wellenlängenmultiplexes

Die Lösung zur Steigerung der Übertragungsrate und Informationskapazität eines optischen Systems besteht in der gleichzeitigen Übertragung einer Information auf vielen Kanälen (auf unterschiedlichen Wellenlängen). Netze einer größeren Reichweite mit einer Übertragungskapazität von einigen zehn Tbit/s arbeiten auf Hunderten Kanälen; jeder Kanal kann einige zehn Gbit/s übertragen.

i

Das dichte Wellenlängenmultiplex (**DWDM**, engl. *Dense Wavelength Division Multiplexing*) erfordert einen Einsatz von Schmalbandquellen der optischen Strahlung, wie zum Beispiel DFB-Laser (engl. *Distributed Feedback Laser*). Überdies soll die ausgestrahlte Wellenlänge stabil sein (es ist allgemein bekannt, dass Laser temperatureinstellbar sind). Für diese Zwecke wird empfohlen, gekühlte DFB-Laser einzusetzen, die bei einer konstanten Temperatur im Bereich von 20 bis 30°C arbeiten.

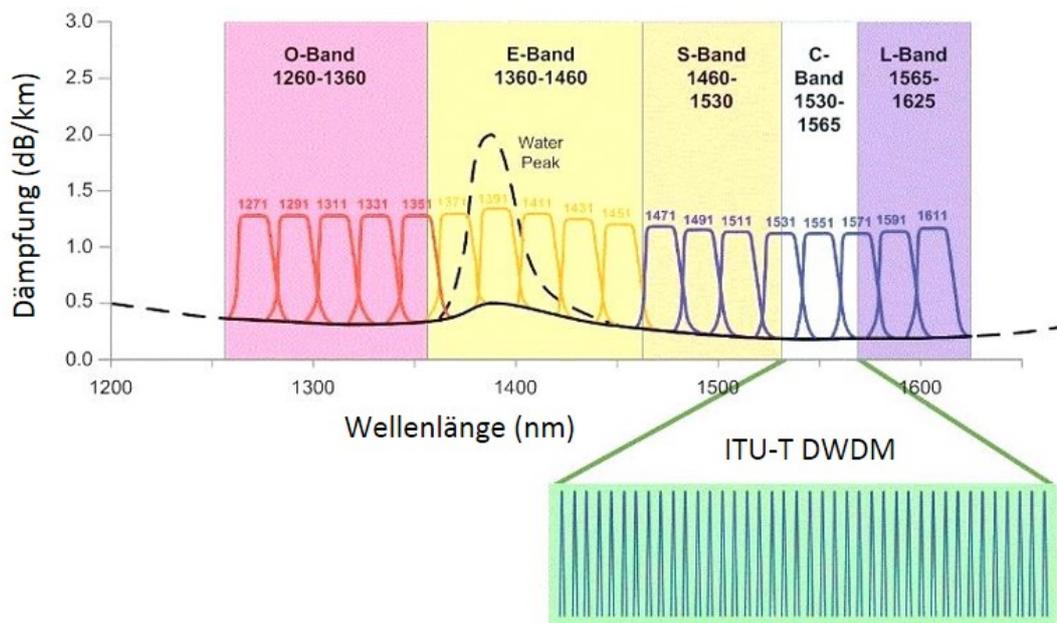
i

Metropolitan Area Networks (MAN) verwenden eine viel niedrigere Übertragungsrate. Das grobe Wellenlängenmultiplex (**CWDM**, engl. *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) nutzt 4 bis 16 Kanäle mit einem großen Abstand von 20 nm aus, das ermöglicht die Verwendung von Lasern mit einem breiteren Wellenlängenspektrum, z. B. Fabry-Pérot-Laser (FP) oder nicht gekühlte DFB-Laser. Eine solche Lösung ist weniger aufwendig.

2.2 Raster von CWDM und DWDM

Raster (Abstand der Kanäle) bei CWDM- und DWDM-Systemen

Technologie	CWDM	DWDM – regionale Netze	DWDM – Netze mit einer großen Reichweite
Anzahl von Kanälen (Wellenlängen)	4-16	32-80	80-160
Bänder	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Abstand der Kanäle	20 nm und mehr (2500 GHz und mehr)	0,8 nm, 100 GHz	0,4 nm und weniger – 0,2 nm oder 0,1 nm (50 GHz oder weniger)
Übertragungskapazität pro Kanal	1,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Kapazität der Faser	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	Einige zehn Tbit/s
Typ des Lasers	Nicht gekühlte DFB oder FP	Gekühlte DFB	Gekühlte DFB
Reichweite	50-80 km	100 km	1000 km
Preis	Niedriger	Höher	Am höchsten



Arbeitswellenlängen von CWDM und DWDM – Beispiele.

3 Typen von optischen Netzen, ihre Architektur und grundlegende Parameter (OTH, FTTx)

3.1 FTTx-Architektur

Beim Netzausbau durch Glasfaserkabel werden verschiedene Ausbaustufen (**FTTx**) abhängig vom Ort des Glasfasernetzabschlusses unterschieden. Bei FTTO und FTTH handelt es sich um volloptische Lösungen. FTTE_x, FTTC_{ab}, FTTC und FTTB stellen eine hybride Lösung dar, die Optik und metallische oder drahtlose Infrastruktur kombinieren.

Hybride Lösungen

Allgemeine Voraussetzungen:

- Lichtwellenleiter können mit symmetrischen Paaren im Fall von ADSL2+, VDSL2 kombiniert werden.
- Lichtwellenleiter können mit Koaxialkabeln im Fall von Kabelfernsehen (CATV, engl. *Cable TV*) kombiniert werden.
- Ein Signal von einem optischen Netz kann in ein drahtloses Netz verbunden werden.
- **FTTE_x** (engl. *Fibre to the Exchange*) – Lichtwellenleiter enden in einer lokalen Telefonanlage und ein DSLAM-Multiplexer bringt Signale in die bestehende metallische Infrastruktur des digitalen Teilnehmeranschlusses (**xDSL**, engl. *Digital Subscriber Line*). FTTE_x ist eine der gebräuchlichen Lösungen, aber es muss betont werden, dass es sich nicht um eine volloptische (zukunftsweisende) Lösung handelt.
- **FTTC_{ab}** (engl. *Fibre to the Cabinet*) – Lichtwellenleiter enden in einem Außen-Splitter.
- **FTTC** (engl. *Fibre to the Curb*) – Lichtwellenleiter werden zu einer Gruppe von Gebäuden geführt.
- **FTTB** (engl. *Fibre to the Building*) – Lichtwellenleiter werden zu den einzelnen Gebäuden geführt, wo sie in den Gebäuden z. B. in Telefonkästen enden oder wo das Signal mittels drahtloser Technologie weiter verbreitet werden kann.

Volloptische Lösungen

- **FTTO** (engl. *Fibre to the Office*) – Lichtwellenleiter enden im Büro eines wichtigen Kunden mit Anforderungen an hohe Übertragungskapazität.

- **FTTH** (engl. *Fibre to the Home*) – Lichtwellenleiter enden in einer konkreten Benutzersteckdose.

3.2 Zugangsnetze

OAN - *Optical Access Network* – optisches Zugangsnetz

- Simplexübertragung mit einem Raummultiplex (**SDM**, engl. *Space Division Multiplexing*), für jede Übertragungsrichtung wird ein Übertragungsweg verwendet.
- Duplexübertragung mit Wellenlängenmultiplex (**WDM**, engl. *Wavelength Division Multiplexing*), Signale werden mit einer Faser übertragen, eine Übertragungsrichtung liegt im Wellenlängenbereich von 1310 nm, die umgekehrte Übertragungsrichtung im Wellenlängenbereich von 1550 nm.
- Duplexübertragung mit Frequenzmultiplex (**FDM**, engl. *Frequency Division Multiplexing*), Signale werden über eine Faser übertragen, die beiden Übertragungsrichtungen liegen in der Umgebung einer Wellenlänge und sind voneinander mittels Frequenzabstands getrennt.
 - Short Haul (kurze Reichweite) – max. Dämpfung 16,5 dB CWDM, min. Dämpfung 5 dB, Reichweite 30 – 50 km für P2P.
 - Long Haul (lange Reichweite) – max. Dämpfung 25,5 dB CWDM, min. Dämpfung 14 dB, Reichweite 50 – 80 km für P2P.
 - Typischer Umfang der Dämpfung eines CWDM-Netzes beträgt 3,5 bis 7,5 dB. Ein EDFA-Verstärker kann die Reichweite des Netzes erhöhen.

Aktive optische Netze

AON - *Active Optical Network*, aktives optisches Netz. Es ermöglicht den Einsatz von aktiven Netzelementen, wie z. B. Verstärker.



Es gibt auch PON mit Reichweitenerhöhung (**REPON**, engl. *Reach Extended PON*), in denen EDFA-Verstärker (Erbium-dotierter Faserverstärker, engl. *Erbium Doped Fibre Amplifier*) verwendet werden können; trotzdem wird ein solches Netz „passiv“ genannt.

Passive optische Netze



Passive optische Netze (**PON**, engl. *Passive Optical Network*) sind Multipunkt-Netze, die gemäß der Funktion ihrer Elemente für die Entnahme von optischen Signalen klassifiziert werden können. Es kann sich um Splitter oder *Arrayed Waveguide Grating* (**AWG**) – Matrix mit geordneten Gittern und Wellenleitern – handeln. Bei WDM-Systemen kann ein Signal mittels eines optischen Filters mit Hilfe von sogenannten Add-Drop-Multiplexern (hinzufügen/entnehmen) geteilt werden.

- **BPON** - *Broadband PON* – Geschwindigkeit von 622,04 Mbit/s, dafür verwendet man zwei Fasern für beide Übertragungsrichtungen oder eine Faser, in dem die Upload- im WDM-Band von 1260-1360 nm und Downloadrichtung im WDM-Band 1480-1500 nm ist. Das Band von 1539-1565 nm ist für 16 + 16 DWDM-Kanäle mit dem Abstand von 0,8 nm und das Band von 1550-1560 nm für Videoübertragung bestimmt.
- **GPON** - *Gigabit PON* – Empfehlung von ITU-T G.984 – Nenn-Übertragungsrate von 1,244 und 2,488 Gbit/s (max. 128 angeschlossene Endbenutzer).
- **EPON** - *Ethernet PON* – Optische Verbindung P2MP (Punkt-zu-Mehrpunkt, engl. Point-to-Multipoint). Die Übertragungsrate von 1,25 Gbit/s entspricht der Rate des Standards 1000BASE-PX. Für Upstream (Richtung vom Benutzer zum Dienstleister) wird eine Wellenlänge von 1310 nm und für Downstream (Richtung vom Dienstleister zum Benutzer) die Wellenlänge von 1490 nm verwendet. Typ 1 – max. Reichweite des Netzes beträgt 10 km. Typ 2 – max. Reichweite beträgt 20 km.

3.3 Optische Transporthierarchie



OTH – *Optical Transport Hierarchy* – optische Transporthierarchie. Die Signale der optischen Hierarchie sind in der Literatur als **OTM** (*optisches Transport-Modul*, engl. *Optical Transport Module*) bekannt. Die einfachste Variante (sogenannte Nullstufe) nimmt die Übertragung ohne Wellenlängenmultiplex an. Das optische Transport-Modul wird als OTM-n.m gekennzeichnet, wobei n die Anzahl von Kanälen (Wellenlängen) und m der Typ des Signals sind. Man kann verschiedene grundlegende Übertragungsraten multiplizieren; potentielle Kombinationen können OTM-n.1 2 3 (d. h. 2,5; 10; 40 Gbit/s) einschließen.

Optische Transporthierarchie OTH – Transport-Module ohne Wellenlängenmultiplex

Stufe der Hierarchie	Übertragungsrate [Mbit/s]	kann STM-N übertragen
OTM-0.1	2488,32	STM-16
OTM-0.2	9953,28	STM-64
OTM-0.3	39813,12	STM-256



STM ist ein synchrones Transport-Modul, engl. *Synchronous Transport Module* - eine grundlegende Übertragungseinheit in der Hierarchie **SDH** (synchrone digitale Hierarchie, engl. *Synchronous Digital Hierarchy*), wobei n die Multiplikation der grundlegenden Einheit der Übertragungskapazität bedeutet.

Optische Transport-Module mit Wellenlängenmultiplex

Stufe der Hierarchie	Übertragungsrate [Mbit/s]	kann übertragen
OTM-n.1	n x 2488,32	n x STM-16
OTM-n.2	n x 9953,28	n x STM-64
OTM-n.3	n x 39813,12	n x STM-256

4 Spleißen von Lichtwellenleitern und Installation von optischen Anschlüssen

4.1 Ziel

Das Ziel des Spleißens der Lichtwellenleiter ist eine permanente Verbindung von zwei Abschnitten der Leiter.



Optische Steckverbinder stellen eine flexiblere Lösung dar, trotzdem ermöglicht optisches Spleißen, niedrigere Verluste zu erzielen. Spleißen scheint als eine geeignete Variante in Fällen, in denen nicht angenommen wird, dass die Fasern künftig getrennt werden. Spleißen findet seine Anwendung bei der Reparatur von Fasern, bei denen ein Abschnitt einer beschädigten Faser ausgetauscht werden muss.

Eventuelle Reparaturen von Fasern sind auch der Grund für das Vorhalten einer gewissen Reserve beim Aufbau des Netzes – die Reserve kann für den Ersatz verwendet werden. Überdies werden Lichtwellenleiter bei der Vorbereitung des Spleißens immer verkürzt.



Optisches Spleißgerät – Typ Fujikura 18s.

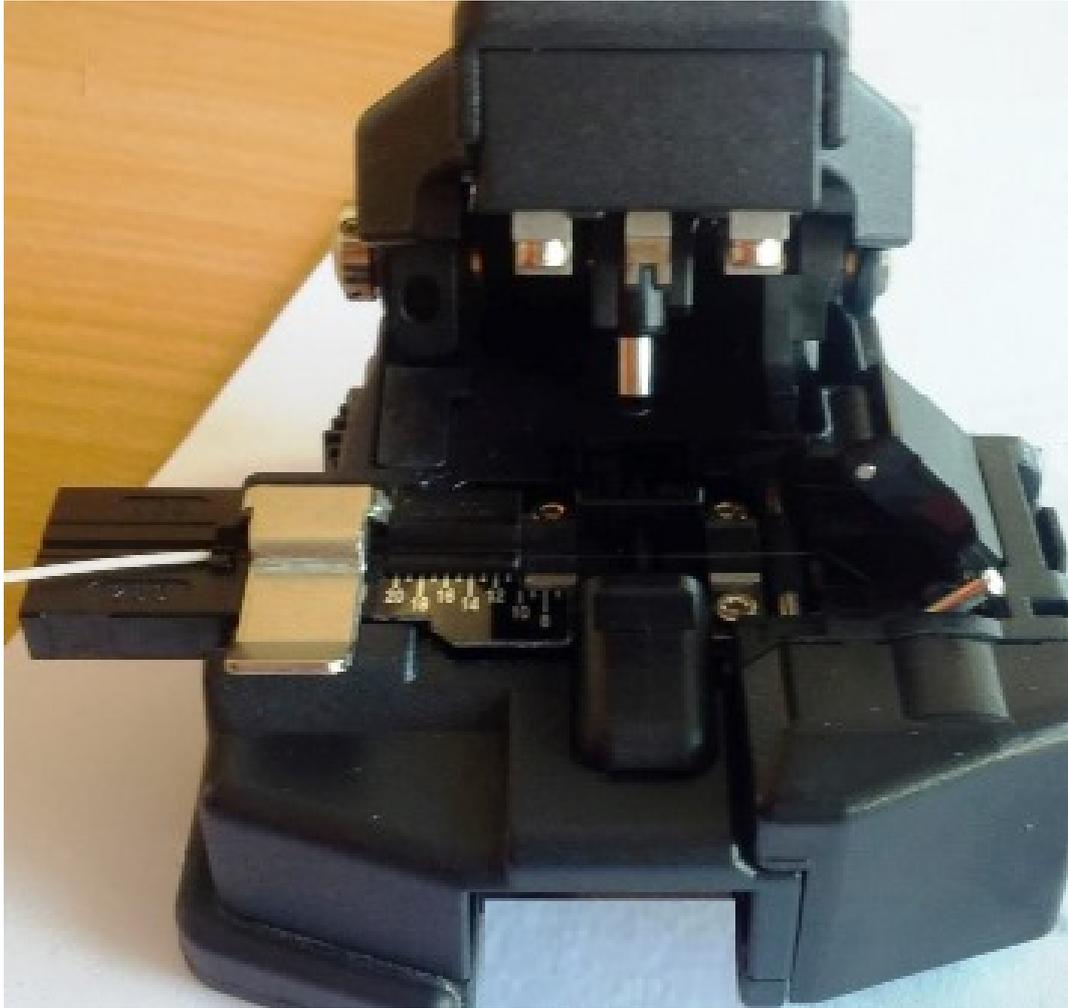


Ausstattung zum Spleißen von Lichtwellenleitern:

- Lichtwellenleiter zum Spleißen;
 - spezielle Zange zum Entfernen des Außenschutzmantels der Fasern;
 - Fasertrenngerät zum senkrechten Schneiden der Fasern;
 - optisches Spleißgerät zur Einstellung der Position der Fasern und zum Spleißen;
 - Isopropylalkohol zur Beseitigung des verbleibenden Kitts unter dem primären Schutz der Fasern.
-

4.2 Verfahren

- Man kann zwei Fasern bei einer Länge von mindestens 100 mm spleißen.
- Mittels einer speziellen Zange soll der primäre und sekundäre Schutz der Faser in der Länge von ungefähr 50 mm beseitigt werden. Dabei sollen Kern und Mantel belassen werden, die für die Führung des optischen Strahls erforderlich sind.
 - Mit einem Putztuch mit Isopropylalkohol soll der verbleibende Kitt beseitigt werden.
- Eine so vorbereitete Faser soll mit einem speziellen Fasertrenngerät mit dem Ziel eines flachen und senkrechten Schnitts der Faser geschnitten werden.
- Die Faser wird in einer speziellen Fuge im Fasertrenngerät platziert. Das Ende der Faser soll bis zum Ende der Fuge reichen, so dass die gespannte Faser geschnitten wird, ansonsten wird sie nur gebogen.
- Die Faser wird mit einer speziellen Klemme arretiert.
 - Danach soll der Mechanismus im unteren Teil des Fasertrenngerätes entriegelt werden; der Stift stößt gegen die Faser und schneidet sie. Man darf keine große Kraft anwenden - einen guten Schnitt erzielt man durch das Spannen und genaue Anordnen der Faser in der Fuge.

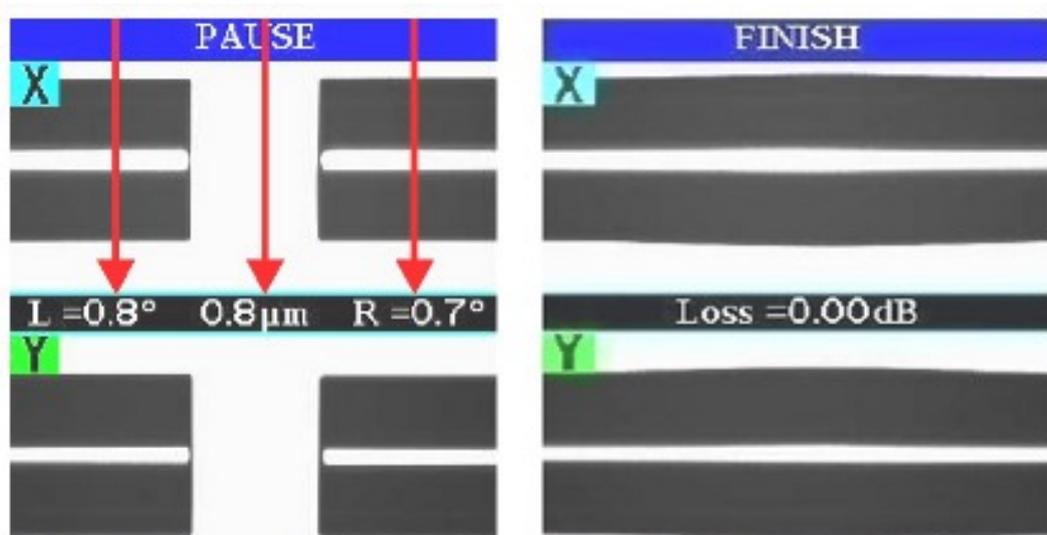


Fasertrenngerät mit einer zum Schneiden vorbereiteten Faser.

- Nach dem Schneiden werden die Fasern gespleißt.
- Die Enden der beiden Fasern werden in spezielle v-Fugen des Spleißgerätes platziert.
 - Bemerkung: Schutzschichten der Faser dürfen die Arretierungsklemmen, gegebenenfalls die markierten Felder der Fuge nicht überschreiten, sonst wird die Einstellung der Position der Fasern mit einem Fehler der Winkeleinstellung kompliziert und führt zu einer schlecht durchgeführten Spleißnaht. Die Enden der Fasern sollen so nah wie möglich an der Spleißelektrode sein, sie dürfen die Elektrode aber nicht überschreiten. Wird die Position der Fasern richtig vorbereitet, werden Arretierungsklemmen und Deckel des Spleißgerätes geschlossen.
- Das Spleißgerät wird mit Betätigen der Taste „Set“ eingeschaltet. Danach passt es die Position der Fasern automatisch an und stellt ihre Achsen und die Entfernung der Frontflächen ein.



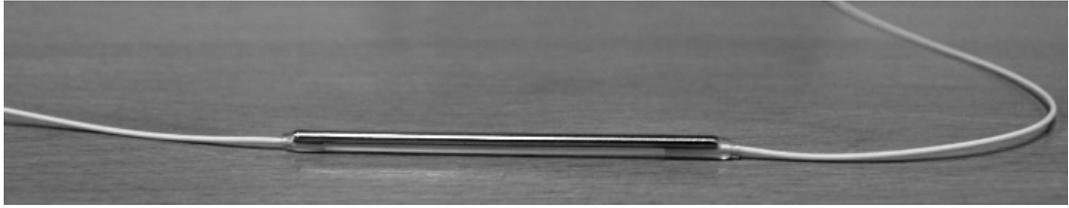
Spleißgerät mit Lichtwellenleitern, die so nah wie möglich zu den Spleißelektroden angeordnet sind und von Federklemmen in Position gehalten werden.



Automatische Einstellung der Fasern vom Spleißgerät und gespleißte Fasern.



Falls die Einstellung der Position der Fasern oder ihr Schnitt falsch ist, zeigt das Spleißgerät eine Warnung an und fordert Sie mit einem Ton zum wiederholten Schneiden der Fasern oder zur einer manuellen Anpassung der Eingangsposition der Fasern auf. Falls die Fasern ausreichend gut eingestellt wurden, können sie mit einem wiederholten Betätigen der Taste „Set“ gespleißt werden. Es liegt Spannung an den Elektroden an, womit die Lichtwellenleiter gespleißt werden.



Optische Spleißnaht mit Schutzschicht.

5 Testen der optischen Anschlüsse mit OTDR-Reflektometer

5.1 OTDR-Reflektometer

Ein optischer Reflektometer (**OTDR**, optischer Zeitbereichsreflektometer, engl. *Optical Time-Domain Reflectometer*) ist ein Messgerät, das zum Testen der optischen Kommunikationssysteme verwendet wird. Die Aufzeichnung der Intensität einer zurück gestrahlten Rayleigh-Streuung der Strahlungsquelle (üblicherweise Laser) im Zeitbereich ermöglicht eine Einschätzung der Entfernung, in der die Strahlung reflektiert wurde, und zwar unter der Annahme eines bekannten Brechungsindex des Materials der Faser.

+

Dadurch kann man die Dämpfung in verschiedenen Entfernungen vom Anfang der Faser einschätzen, z. B. Dämpfung der Spleißnähte und optischen Steckverbinder. Der Hauptgrund des Einsatzes eines Reflektometers ist die Lokalisierung von Stellen, die potentielle Quellen einer erhöhten Dämpfung im Kommunikationssystem darstellen.



OTDR-Reflektometer (Optical Time Domain Reflectometer).

i

Für die Messung soll ein Ende der Faser an den Reflektometer angeschlossen werden. Man kann eine Entfernung von einigen zehn Kilometern messen, auf der

der Reflektometer imstande ist, eine große Anzahl von Steckverbindern und Spleißnähten auf der ganzen Strecke aufzuzeichnen.

- Ein OTDR-Reflektometer kann auf Pulse der Wellenlänge von 1550 nm oder 1310 nm konfiguriert werden und die Länge der Pulse kann im Bereich von 10 ns bis 10 μ s gewählt werden.
- Man muss immer zwischen Reichweite (Länge der Strecke) und Genauigkeit (Auflösung) der Messung wählen, und zwar durch Wahl der Länge der Testpulse.
- Kürzere Pulse ermöglichen eine bessere Auflösung der Messung, aber die Messung ist nur in kürzeren Entfernungen möglich.
- Für eine gegebene Anwendung gibt es immer eine optimale Länge des Pulses - man sollte die beste Auflösung für die gegebene Entfernung erzielen.
- Es gibt auch Fasern (und Steckverbinder), für die keine adäquate Qualität der Messung erreicht werden kann.



Eine einfache Lösung dieses Problems besteht im Anschluss des Reflektometers auf dem entgegengesetzten Ende der Strecke, um die Ergebnisse in größeren Entfernungen vom Anfang der Strecke richtig anzuzeigen.

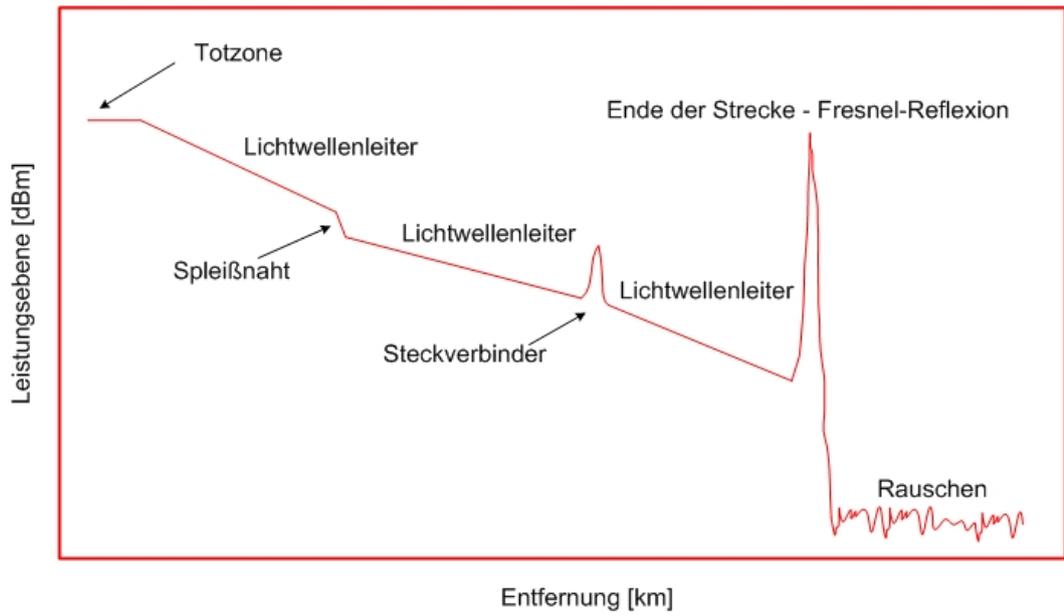
Interpretation der gemessenen Daten

Die vom Reflektometer gemessenen Ergebnisse sind auf dem folgenden Bild angezeigt.

- OTDR identifiziert die einzelnen Netzelemente, Steckverbinder und Spleißnähte, die eine unterschiedliche Dämpfung haben.
- Ein kurzer und starker Rückgang der Leistung indiziert eine optische Spleißnaht.
- Eine Leistungsspitze stellt einen Steckverbinder dar; auf der rechten Seite der Spitze kann man einen erheblichen Rückgang der Leistung sehen.

Der Grund dafür ist ein besserer Fluss der Strahlung im Fall der Spleißnähte. Das lokale Maximum der Strahlungsintensität bei Steckverbindern ist eine Folge der erhöhten Rückstrahlung von der Front des Steckverbinders.

Die Leistungsspitze stellt tatsächlich eine Ungenauigkeit der Messung dar, die von der Annahme stammt, dass Rückverluste sich zur Dämpfung proportional verhalten. In Wirklichkeit bezieht sich die Dämpfung des Steckverbinders nicht auf die Höhe dieser Leistungsspitze (die von Reflexion, nicht von Rayleigh-Streuung verursacht wurde), sondern auf das Sinken der Leistung. Diese wird von der Stelle gleich vor der Spitze (die in den Steckverbinder eingehende Leistung) bis zu der Stelle gerechnet, auf der ein starker Rückgang der Leistung endet (die in die nächste Faser eingehende Leistung).



Dämpfung, vom OTDR-Reflektometer gemessen.



Steckverbinder und Spleißnähte, in OTDR angezeigt.

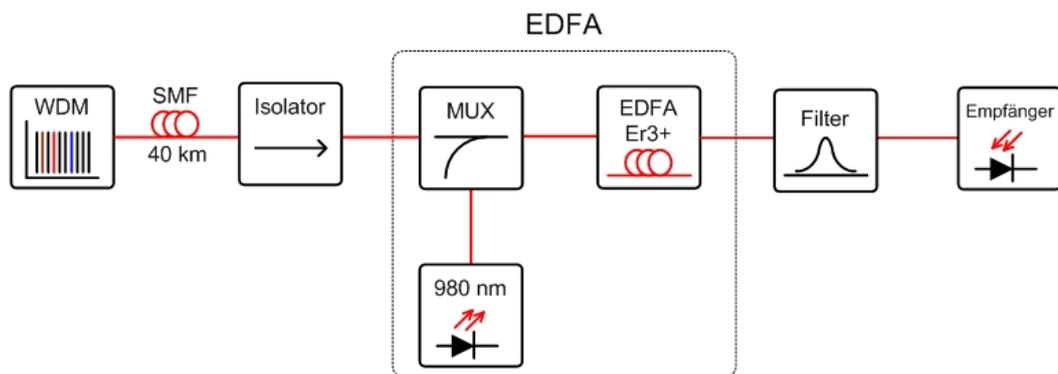
6 Signalrückgewinnung im optischen Netz mittels EDFA-Leitungsverstärkern

6.1 EDFA-Verstärker

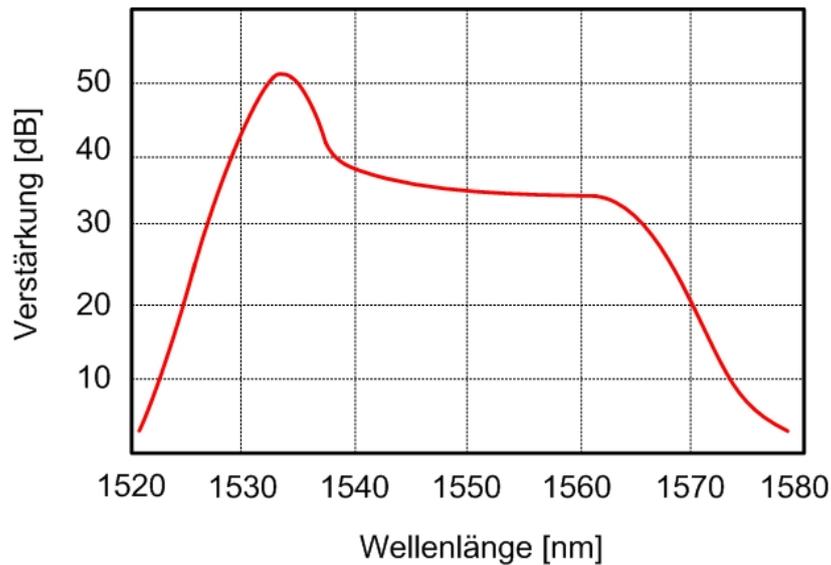
Dotierte Fasern werden häufig als optische Verstärker in optischen Netzen eingesetzt. Erbium ist ein Dotierstoff, der für diese Zwecke verwendet wird, es handelt sich dann um Erbium-dotierte Faserverstärker (**EDFA**, engl. *Erbium Doped Fibre Amplifier*). EDFA-Verstärker sind gebräuchliche Verstärker unter den dotierten Faserverstärkern. Sie nutzen Pumpen in der Form einer Laserdiode aus, die in der Wellenlänge von 980 nm arbeitet. Diese Wellenlänge wird mit dem Signal multiplext, das die Information im Lichtwellenleiter überträgt. Das optische Pumpen regt Ionen der Dotierstoffe entlang der dotierten Faser an.

$E = m \cdot c^2$

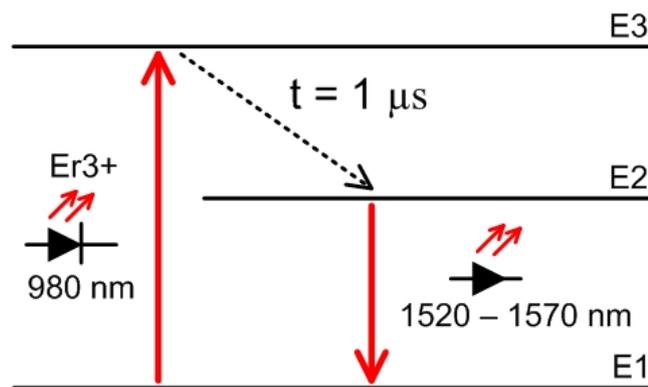
Die angeregten Erbiumionen gehen sehr schnell in ein niedrigeres energetisches Niveau über. Es handelt sich um einen strahlungslosen Übergang. Danach folgt eine langsamere Relaxation zum grundlegenden energetischen Niveau durch Ausstrahlung eines Quants der optischen Strahlung. Die relativen Zeiten dieser Übergänge sind entscheidend für das Erzielen der Besetzungsinversion (im Zustand der Besetzungsinversion befinden sich die meisten Ionen in einem angeregten Zustand). Dies bedingt die Mehrheit der stimulierten Strahlungsemission über der spontanen Emission. Praktisch bedeutet das einen großen Abstand des Signals vom Rauschen und eine höhere Fähigkeit der effektiven Verstärkung.



Ein als Leitungsverstärker arbeitender EDFA.



Bereich der Arbeitswellenlängen und Verstärkung von EDFA.



Schema des Energiebandes von EDFA.

Für einen Test – Verstärkung durch einen EDFA-Verstärker – sind die folgenden Elemente und Anlagen erforderlich: ein DFB-Laser (engl. *Distributed Feedback Laser*) für das Erstellen des Signal-Modells auf 1550 nm, ein Laser für optisches Pumpen auf einer Wellenlänge von 980 nm, ein Multiplexer, eine EDFA-Faser und ein Spektrumanalysator. Die DFB-Quelle wird mit dem optischen Pumpen mittels des Multiplexers multiplext und das kombinierte Signal wird durch die EDFA-Faser übertragen, wo es verstärkt wird.

Vorteile:



- Breites Arbeitsband (Band C+L – 1530 nm bis 1680 nm).
- Hohe Verstärkung von 20 bis 50 dB (der Arbeitspunkt des Verstärkers wird heutzutage so eingestellt, dass die Verstärkung die Werte von 20 dB wegen einer Verhinderung von nichtlinearen Ereignissen nicht überschreitet, die bei einer hohen optischen Leistung entsteht. Zum Beispiel bei Vier-Wellen-

Mischung **FWM** (engl. *Four Wave Mixing*), die optische Netze mit hohen Geschwindigkeiten betrifft.

- Konstruktion – Faser und optisches Pumpen.
 - Ziemlich geringe Verstärkung für transparente optische Netze mittels Wellenlängenmultiplexes (**WDM**, engl. *Wavelength Division Multiplexing*).
 - Niedriger Preis.
 - Anwendung als Leitungsverstärker.
-

Nachteile:

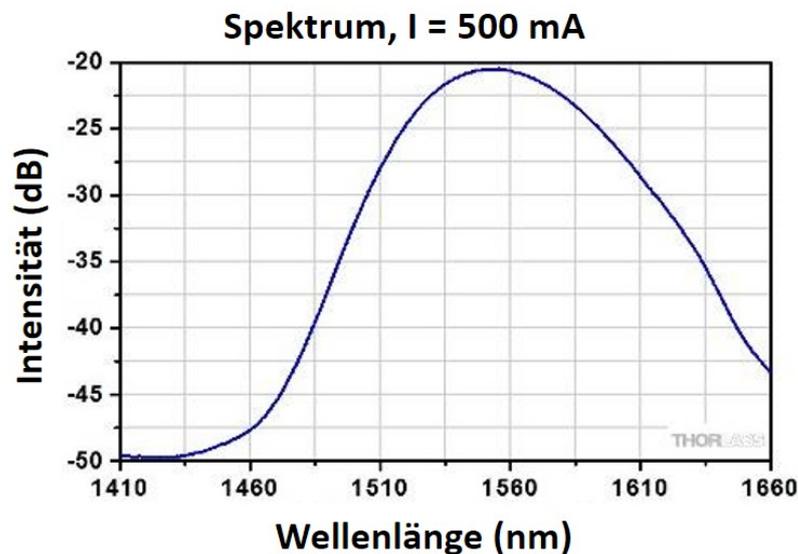


- Erhebliche verstärkte spontane Emission (**ASE**, engl. *Amplified Spontaneous Emission*).
 - Er kann nicht als Leistungsverstärker verwendet werden (da am Anfang der Strecke große Eingangsleistungen ankommen), wegen der fehlenden Leistungsaufnahme (Verstärkungssättigung).
 - Er kann nicht als Vorverstärker wegen eines erheblichen Rauschens verwendet werden, das von ihm generiert wird (spezielle Filter müssen eingesetzt werden).
-

7 Optische Halbleiterverstärker (SOA) und Raman-Verstärker

7.1 Optische Halbleiterverstärker

Ein optischer Halbleiterverstärker (SOA, engl. *semiconductor optical amplifier*) verwendet ein Halbleitermaterial als Verstärkungsmedium, das elektrisches Pumpen erfordert. Ein SOA-Verstärker kann in Laserdioden mit einem Resonator verglichen werden, dessen Frontwände zum Unterschied von Lasern mit einer Antireflexschicht bedeckt sind. Das Signal wird mit einer stimulierten Emission der Strahlung in der elektrisch angeregten aktiven Schicht verstärkt.

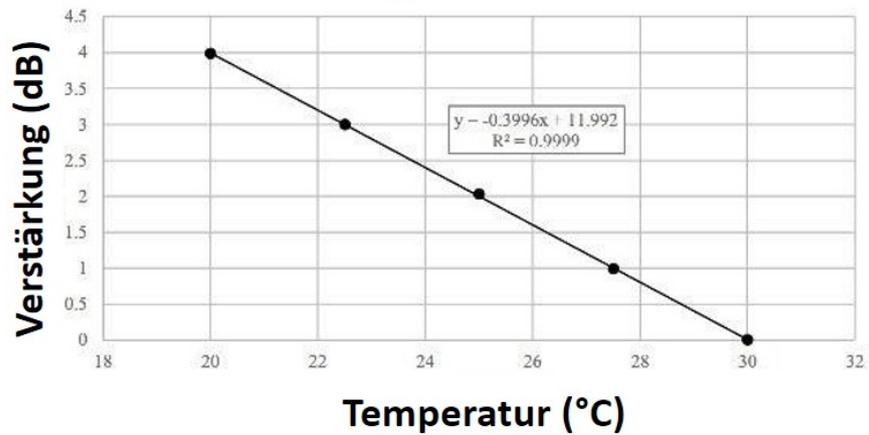


Spektrale Charakteristik eines SOA-Verstärkers.



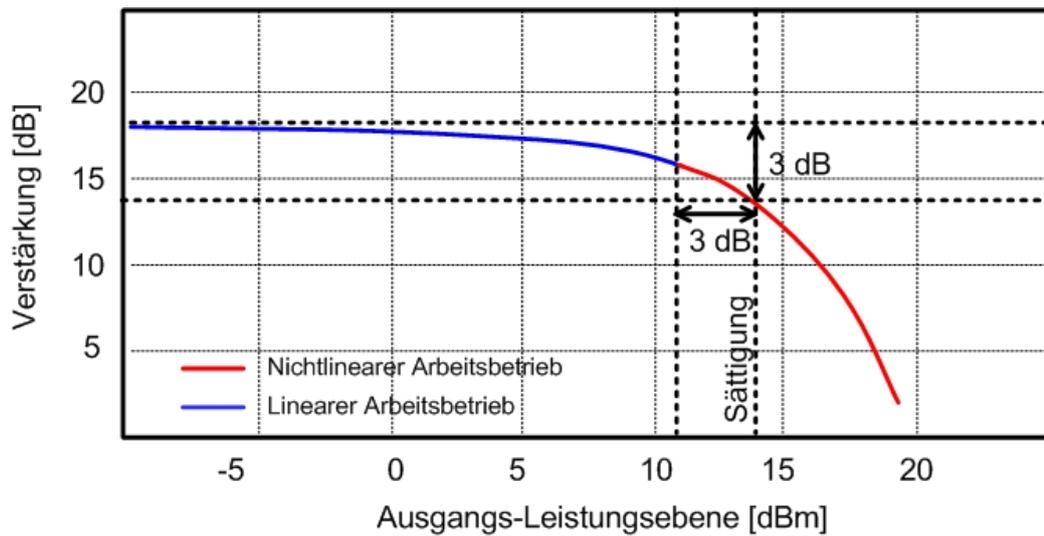
Die Temperatur des SOA-Chips hat einen starken linearen Einfluss auf die Verstärkung des Mediums. Zum Zweck der Stabilisierung der Verstärkung ist eine konstante Temperatur sicherzustellen. Bei niedrigeren Temperaturen kann eine maximale Verstärkung erzielt werden.

Temperaturabhängigkeit der Verstärkung eines SOA-Verstärkers



Temperaturabhängigkeit der Verstärkung eines SOA-Verstärkers.

Man unterscheidet zwei Arbeitsbetriebe der SOA-Verstärker: linearen und nichtlinearen. Ihre Definition ist für eine Anwendung wichtig – in den meisten Fällen ist die Arbeit in einem nichtlinearen Betrieb nicht optimal.



Linearer und nichtlinearer Arbeitsbetrieb der SOA.

7.2 Raman-Verstärker

Die Raman-Verstärkung ist ein Ergebnis der stimulierten Raman-Streuung (**SRS**, engl. *Stimulated Raman Scattering*).



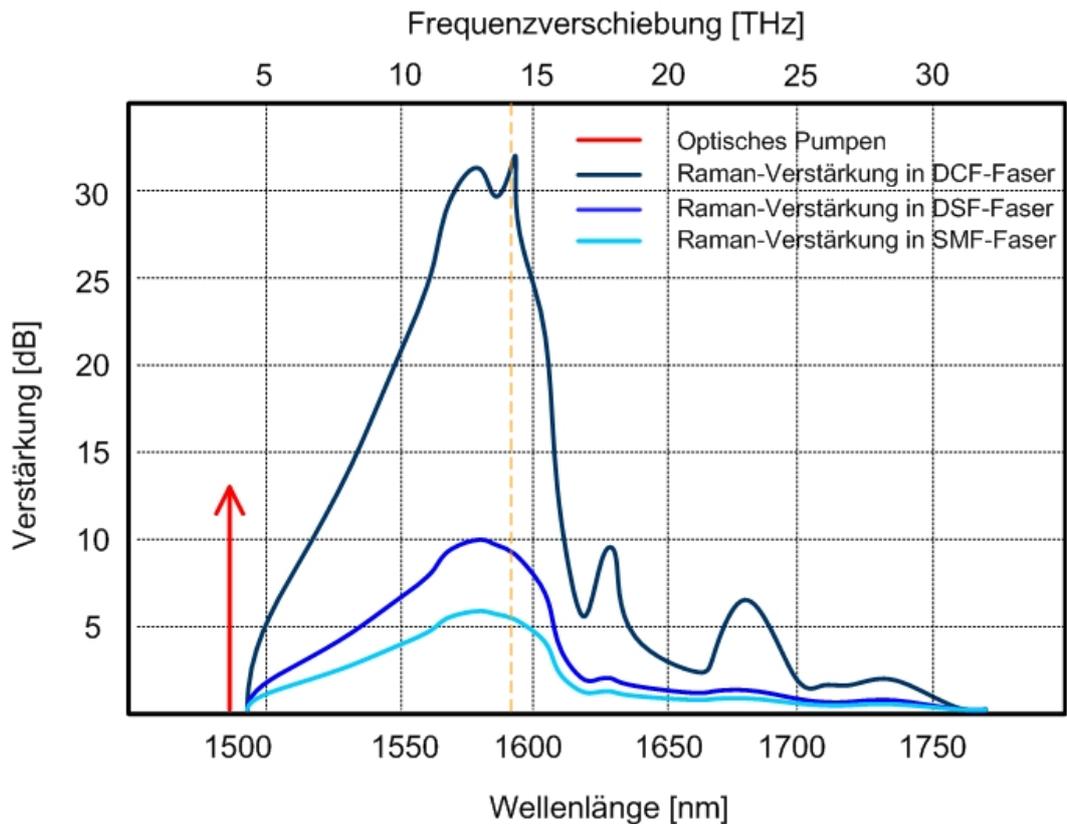
Ein Photon einer längeren Wellenlänge verursacht eine unelastische Streuung des Photons einer kürzeren Wellenlänge des Pumpens im Lichtwellenleiter. Dadurch wird die Entstehung eines Photons der Wellenlänge verursacht, die ungefähr um 100 nm gegenüber der ursprünglichen Wellenlänge verschoben wird (dies gilt für die meisten standardmäßigen Telekommunikationsfasern).

Dieses Ereignis kann für die Konstruktion eines optischen Verstärkers erfolgreich verwendet werden. Falls das Raman-Pumpen örtlich angeordnet wird, arbeitet ein solcher Verstärker als:

- konzentrierter Raman-Verstärker (**LRA**, engl. *Lumped Raman Amplifier*) mit Pumpen auf der gleichen Stelle.

Weil das SRS-Ereignis mit der Faserlänge steigt, ist es in einigen Anwendungen besser, das Pumpen auf dem entgegengesetzten Ende der Strecke anzuordnen:

- verteilter Raman-Verstärker (**DRA**, engl. *Distributed Raman Amplifier*) mit Pumpen am entfernten Ende.



Raman-Verstärkung in verschiedenen Typen der Lichtwellenleiter: Monomodefaser (SMF, engl. Single Mode Fibre), dispersionsverschobene Faser (DSF, engl. Dispersion Shifted Fibre) und dispersionskompensierende Faser (DCF, Dispersion Compensating Fibre).



Kommerziell erhältliche EDFA-, SOA- und Raman-Verstärker.



Das Raman-Ereignis, das zur Konstruktion von optischen Verstärkern verwendet wird, ist nicht immer erwünscht. In DWDM-Systemen ist SRS für das Entstehen von Nebensprechen unter den Übertragungskanälen verantwortlich. Ein nicht kontrolliertes Raman-Nebensprechen ist unerwünscht, weil die unelastische Streuung Energieänderungen verursacht, die in der Praxis Nebensprechen und Migrationen von Informationskanälen in verschiedenen Wellenlängen bedeuten können. Die Leistung in Kanälen auf kürzeren Wellenlängen wird in längere Wellenlängen übertragen (oder von höheren Frequenzen auf niedrigere Frequenzen) und verursacht dabei eine Verzerrung der Übertragung in den gegebenen Kanälen.

8 Dispersionskompensatoren für Lichtwellenleiterstrecken

8.1 Dispersion in Lichtwellenleitern



Die Dispersion verursacht eine Impulsverlängerung (oder Impulskompression im Fall der negativen Dispersion) im Zeitbereich. Das kann zu einer Intersymbolinterferenz führen. Nehmen wir an, dass zwei benachbarte Impulse eine logische Eins übertragen und die Lücke dazwischen eine logische Null darstellt. Falls die benachbarten logischen Einsen teilweise überlappen, wird der Dekodierer nicht imstande sein, das logische Symbol „0“ zu empfangen, das zwischen ihnen übertragen wurde.



Die Einheit der Dispersion ist ps/nm (Pikosekunde pro Nanometer), aber in der Faseroptik, wo die Faserlänge ein entscheidender Parameter ist, wird die Dispersion auf eine Längeneinheit bezogen (ps/nm/km). Die Dispersion von 1 ps/nm/km bedeutet, dass in der Entfernung von 1 km vom Referenzpunkt (oder vom Anfang der Strecke) eine Verzögerung von 1 ps bei der niedrigsten Frequenz gegenüber der höchsten Frequenz gemessen werden kann, unter der Annahme, dass die optische Quelle eine Strahlung der Breite von 1 nm hat.

Chromatische Dispersion

Eine chromatische Dispersion besteht aus zwei Komponenten: Material- und Wellenleiterdispersion.

Die *Materialdispersion (DMat)* entsteht durch eine Bandbreite der Strahlung einer Laserquelle, die ungleich null ist. Das ausgestrahlte Spektrum von Wellenlängen ist nicht unendlich schmal, in der Praxis gibt es kein „ideales monochromatisches“ Licht, das eine „unendlich schmale Frequenz“ beinhalten würde. Eine Laserstrahlung beinhaltet immer eine gewisse endliche Menge von Frequenzen. Jede Frequenz kann mit einer gewissen Phasenkonstante der Strahlung charakterisiert werden – für unterschiedliche Farben gibt es unterschiedliche Brechungsindexe. Jede Frequenz (genauer gesagt Information auf der gegebenen Frequenz) verbreitet sich mit einer unterschiedlichen Phasengeschwindigkeit und erreicht das Ende der Faser zu unterschiedlichen Zeiten.

- Es gibt die Materialdispersion in Monomode- und Multimodefasern.
- Die Materialdispersion kann sowohl positive als auch negative Werte haben.

Die *Wellenleiterdispersion (WD)*, engl. *waveguide dispersion*) wird mit einer Änderung der Feldverteilung der optischen Moden in einer gewissen Entfernung verursacht. Diese Änderung wird durch eine Änderung der Fasergeometrie veranlasst, die die Gruppengeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle als

Funktion der Wellenlänge (sogenannte Änderung des „Umschlags“ des Pulses) beeinflusst. Die Wellenleiterdispersion ist ein geeignetes Instrument zum Erreichen einer optimalen Faserdispersion. Die Dispersion kann mit einem geeigneten Entwurf der Fasergeometrie optimiert werden, die die Wellenleiterdispersion beeinflusst. Die Wellenleiterdispersion kann sich als Folge die Gesamtdispersion der Faser ändern.

- Die Wellenleiterdispersion ist immer negativ. Sie kann daher zur Kompensation der positiven Materialdispersion bei Wahl einer geeigneten Fasergeometrie verwendet werden, von der die Wellenleiterdispersion abhängt.



Die Lösung besteht im Einsatz von dispersionskompensierenden Fasern (**DCF**, engl. *Dispersion Compensating Fibre*) oder speziellen Fasergittern.

Modendispersion

Bei der Modendispersion (**MD**, engl. *modal dispersion*) verbreitet sich jede Mode der optischen Strahlung über eine unterschiedliche Trajektorie. Die kürzeste Strecke verläuft entlang der Symmetrieachse der Faser, die längste betrifft die Mode, die eine große Menge von Reflexionen auf der Schnittstelle des Kerns und des Mantels der Faser aufzeichnet. Mit steigendem Winkel des Flusses der Strahlung in der Faser (höhere numerische Apertur NA) steigt die Anzahl von Reflexionen während der Modenverbreitung und die optische Strecke verlängert sich. Die einzelnen Moden kommen am Ende der Faser zu unterschiedlichen Zeitpunkten an. Weil sie als Überlagerung (Summe) aller Komponenten erkannt werden, scheint der vom Detektor empfangene optische Puls länger zu sein.

- Die Modendispersion ist nur bei Multimodefasern messbar (bei Monomodefasern verbreitet sich nur eine Mode, falls die Faser auf den für sie bestimmten Wellenlängen arbeitet). Sie hat Werte bis von einigen ns/nm/km.



Die Modendispersion wird NICHT durch verschiedene Geschwindigkeiten der einzelnen Komponenten (Moden, Strahlen) verursacht. Es wird analytisch angenommen, dass sich alle Komponenten gleich schnell verbreiten, das betrifft Phasen und Gruppen. Eine unterschiedliche Geschwindigkeit wird nur bei der chromatischen Dispersion angenommen. Die Modendispersion ist daher keine Funktion der Wellenlänge.

Multimodefasern mit Gradientenindex

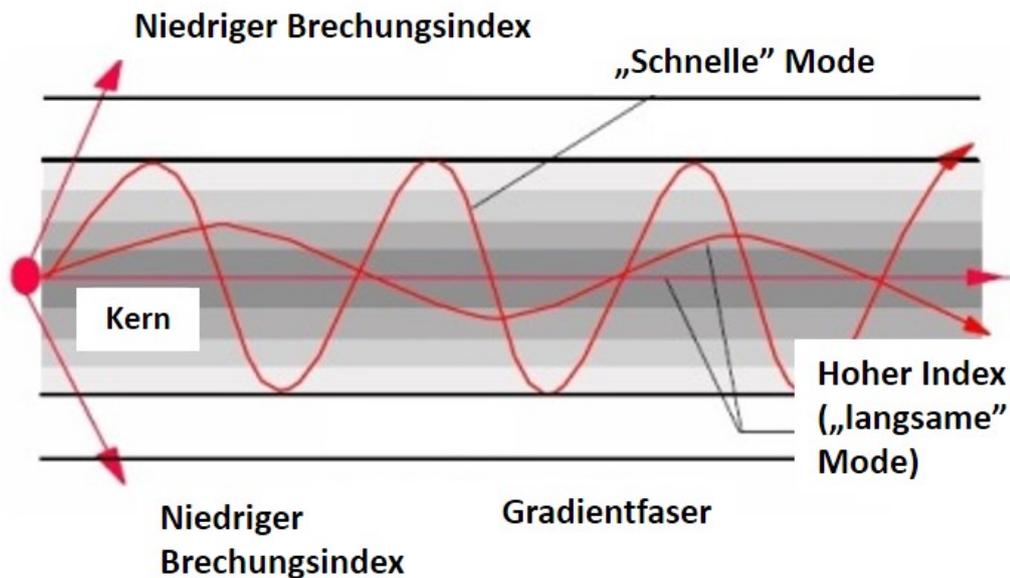


Ziel ist es: die sich durch die kürzeste optische Strecke verbreitenden Moden zu verzögern und die sich durch die längste optische Strecke verbreitenden Moden zu beschleunigen.



Bei den Multimodefasern mit Gradientenindex (**MM-GI**, engl. *Multi-mode Graded Index*) ist der Brechungsindex des Kerns nicht konstant, er sinkt stufenweise mit der Entfernung von der Kernmitte. Das optisch dichteste Material befindet sich in

der Kernmitte der Faser und der Schichten. Die Dichte nimmt vom Kern nach außen hin ab und damit sinkt auch der Brechungsindex. Auf vielen Schichten tritt Refraktion (Brechung) und Reflexion der Strahlung auf der Schnittstelle des Mantels und der Außenschicht des Kerns auf. Die Mode, die sich entlang der Symmetrieachse der Faser verbreitet, geht durch die kürzeste optische Strecke hindurch, aber ihre Geschwindigkeit ist wegen eines hohen Brechungsindex in der Kernmitte die langsamste. Im Gegenteil dazu werden die Moden beschleunigt, welche sich in längeren Trajektorien verbreiten, weil der Brechungsindex in der Nähe der Stellen häufiger Reflexionen niedriger ist.

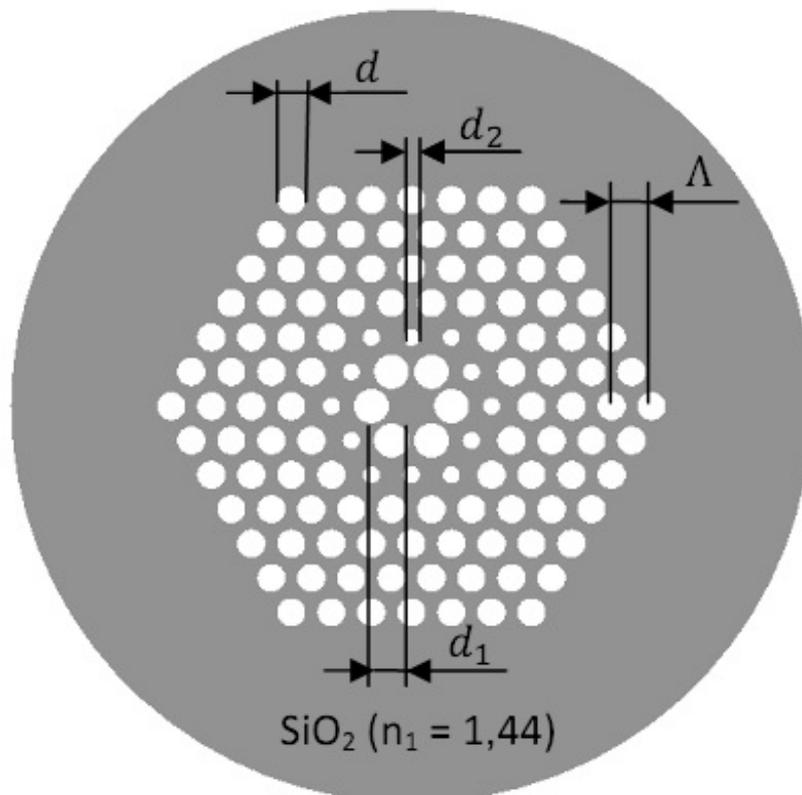


Modendispersion bei Multimodefasern mit Gradientenindex.

8.2 Dispersionskompensation

Dispersionskompensierende Fasern

Die dispersionskompensierenden Fasern (**DCF**, engl. *Dispersion Compensating Fibre*) sind mit einem niedrigen (negativen) Wert des Dispersionskoeffizienten ~ -100 ps/nm/km bis ~ -10000 ps/nm/km charakterisiert (es gibt viele wissenschaftliche Veröffentlichungen, die noch höhere theoretische Werte anführen). Die DCF-Fasern sind imstande, eine akkumulierte Dispersion zu kompensieren. Sie unterscheiden sich von standardmäßigen konventionellen SMF-Fasern in Geometrie und Materialzusammensetzung. Die fortgeschrittenen DCF-Fasern gehen von photonischen Mikrostrukturfasern aus, die in der Literatur als photonische Kristallfasern (**PCF**, engl. *Photonic Crystal Fibre*) bekannt sind.



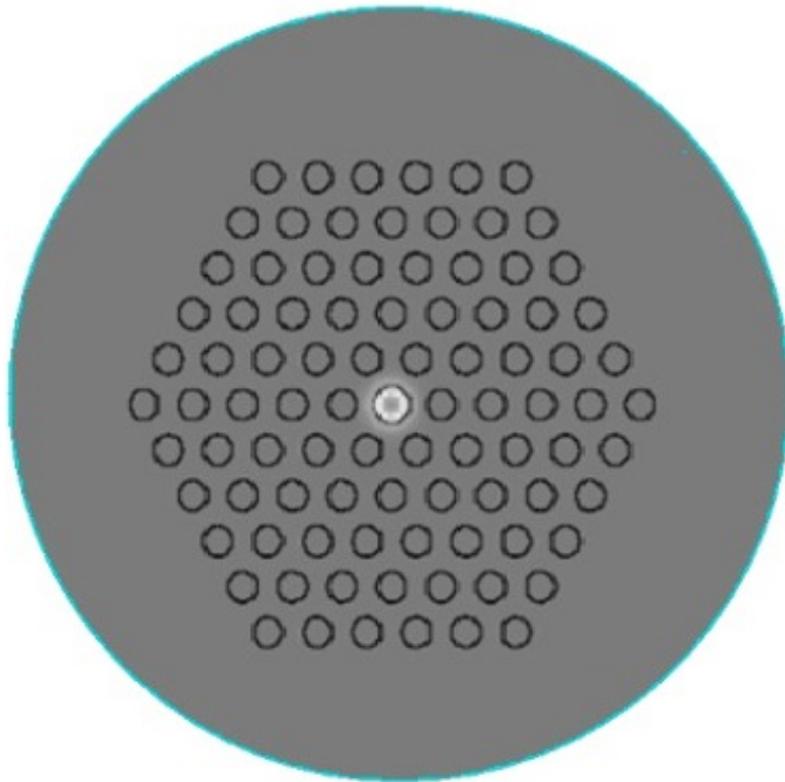
Beispiel des Entwurfes (Querschnitt) einer dispersionskompensierenden Faser und Verlauf ihrer Dispersion als Funktion der Wellenlänge.

Einige DCF-Fasern sind für die Arbeit in einer gewissen Wellenlänge bestimmt. Der Verlauf der Dispersion als Funktion der Wellenlänge ist parabolisch und hat eine Dispersionsminimum und zwei Wellenlängen, in denen die Dispersion null beträgt - engl. *zero dispersion wavelength (ZDW)*.



Die DCF-Fasern für DWDM-Systeme können Dispersion zugleich in allen Kanälen kompensieren. Breitbandige DCF-Fasern sind durch einen hohen negativen Wert des Dispersionskoeffizienten charakterisiert, der im ganzen Telekommunikationsübertragungsband zur Verfügung steht, in dem

Lichtwellenleiter transparent sind. Der Verlauf der Dispersion als Funktion der Wellenlänge der DCF-Faser kopiert die umgekehrte Neigung der standardmäßigen Fasern, deren Dispersion im breiten Spektrum der Wellenlängen kompensiert wird.



Dispersion in einer breitbandigen DCF-Faser.

Faser-Bragg-Gitter

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von *Faser-Bragg-Gittern* (**FBG**, engl. *fiber Bragg grating*) im Lichtwellenleiter entlang des Kerns (Vorsicht: es handelt sich nicht um eine Mikrostruktur-Bragg-Faser).

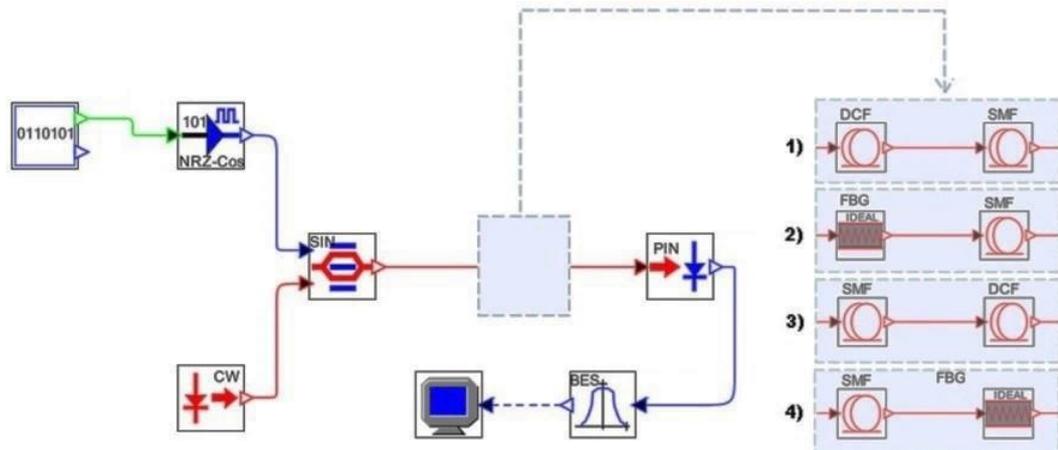
Nachteile



- Das Gitter arbeitet in einer gewissen Wellenlänge. Es kann (durch Änderung der Gitterperiode) eingestellt werden, aber für Anwendungen in DWDM-Systemen genügt ein Gitter für die Dispersionskompensation in mehreren Wellenlängen nicht. Viele Kanäle = viele Gitter.
 - Das Gitter kann in Abhängigkeit von der Temperatur eingestellt werden, trotzdem ist das nur für die Dispersionskompensation in einer bestimmten Wellenlänge möglich.
 - Anzahl von Wellenlängen = Anzahl von Gittern.
-

Kompensationsschema

Es gibt viele verschiedene Varianten der Dispersionskompensation, z. B. Vor- oder Nachkompensation der Dispersion. Um die beste Variante für das gegebene Netz zu wählen, wird empfohlen, numerische Simulationen des gegebenen optischen Netzes durchzuführen.



Kompensationsschema der optischen Netze.

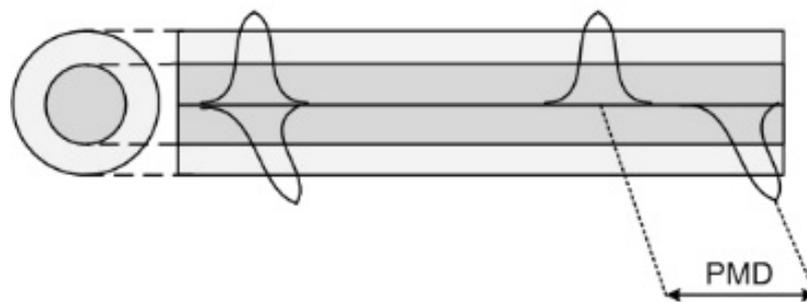
Im Prozess der Dispersionskompensation soll man darauf achten, dass eine Nulldispersion (Wert gleich null) nicht erreicht wird. Auf der einen Seite bedeutet die Nulldispersion, dass die optischen Pulse nicht verbreitert werden, auf der anderen Seite bedingt sie das Entstehen von nichtlinearen Ereignissen, die die optische Übertragung verzerren. Ein solches nichtlineares Ereignis ist zum Beispiel die Vier-Wellen-Mischung (**FWM**, engl. *Four Wave Mixing*). Daher besteht die optimale Lösung in einer niedrigen Dispersion ungleich null, die eine vernachlässigbare Pulsverbreiterung verursacht und zugleich nichtlineare Ereignisse verhindert.

8.3 PMD – Polarisationsmodendispersion

Die Polarisationsmodendispersion (**PMD**, engl. *Polarization Mode Dispersion*) entsteht durch einen unterschiedlichen Brechungsindex von verschiedenen Polarisationskomponenten (Polarisation bedeutet in der Praxis die Oszillation von Vektoren E oder H in einer gewissen Richtung), mit anderen Worten wegen eines unterschiedlichen Brechungsindex für die Achsen „x“ und „y“. Es handelt sich um eine sogenannte schnelle und eine langsame Achse. Ein solcher Stoff ist anisotrop. PMD hat üblicherweise niedrige Werte in der Größenordnung von einigen Pikosekunden, aber auch solche Werte können ein Problem für Hochgeschwindigkeitsübertragungssysteme darstellen.

i

Das Finden der optimalen Lösung ist problematisch, weil PMD ein zufälliger Prozess ist. Es gibt spezielle Dispersionskorrekturen, die angewandt werden, um einen richtigen Empfang von Daten zu erzielen. Um diesem Problem vorzubeugen, werden spezielle doppelbrechende Fasern eingesetzt, die eine erhebliche Asymmetrie aufweisen.



PMD im Lichtwellenleiter.

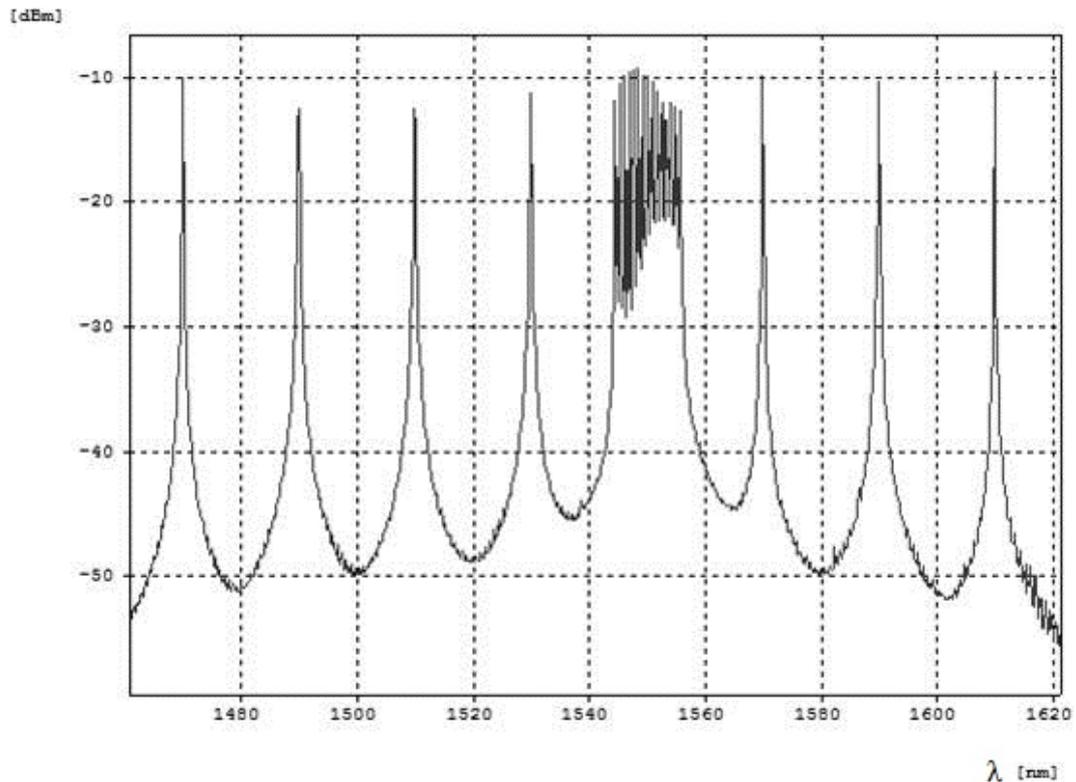
9 Konvergenz und Upgrade von optischen Netzen

9.1 Konvergenz und Upgrade von optischen Netzen

Wenn eine höhere Übertragungskapazität und Bitrate notwendig wird, muss ein Upgrade der optischen Systeme erfolgen oder unterschiedliche Systeme in einer Faser verwendet werden. Die Koexistenz von optischen Systemen betrifft vor allem CWDM- und DWDM-Netze, die die passive optische Infrastruktur teilen können.

DWDM-over-CWDM

- CWDM
 - 8 Kanäle x 10 Gbit/s - 1470 nm - 1610 nm.
- CWDM/DWDM
 - Ersetzen des fünften CWDM-Kanals (1550 nm).
 - DWDM mit Kanälen 15x10 Gbit/s mit Abständen von 100 GHz.
 - Δ des Qualitätsfaktors wird um weniger als 0,1 dB geändert.

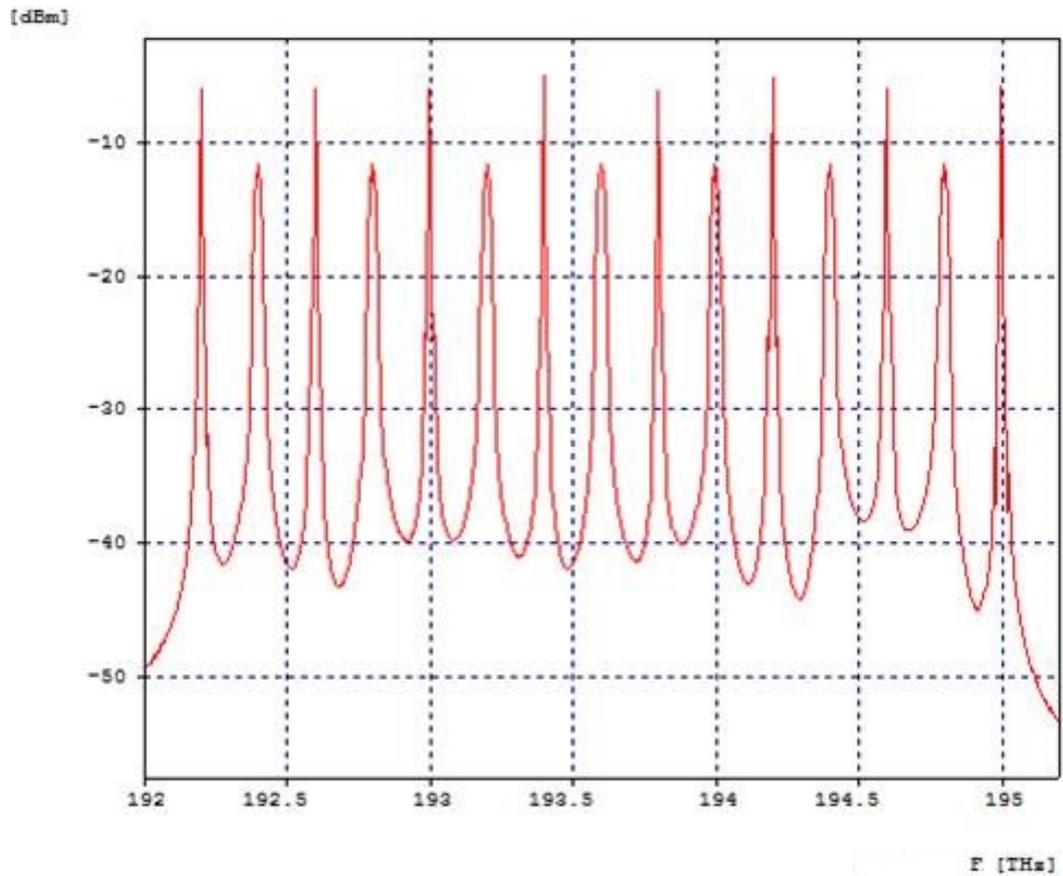


Beispiel der Lösung eines DWDM-over-CWDM-Systems – Anordnung der Kanäle.

Hybride Lösungen

Hybride DWDM 10G/40G

- Ursprünglich 10G DWDM
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, 50 GHz Kanalabstand.
 - 6x80km SSMF (Zweiphasenverstärker, Nachkompensation der Dispersion).
- Hybride DWDM 10G/40G mit Interleaving von Kanälen
 - Kombination mit dem System von 7x40 Gbit/s.
 - Duobinäre Modulation, Modulationsformate P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Einfluss von Kanälen 10 Gbit/s auf Kanäle 40 Gbit/s (Nebensprechen).
 - Problem mit Entstehen einer uneigentlichen Phasenmodulation (**XPM**, engl. *Cross Phase Modulation*).

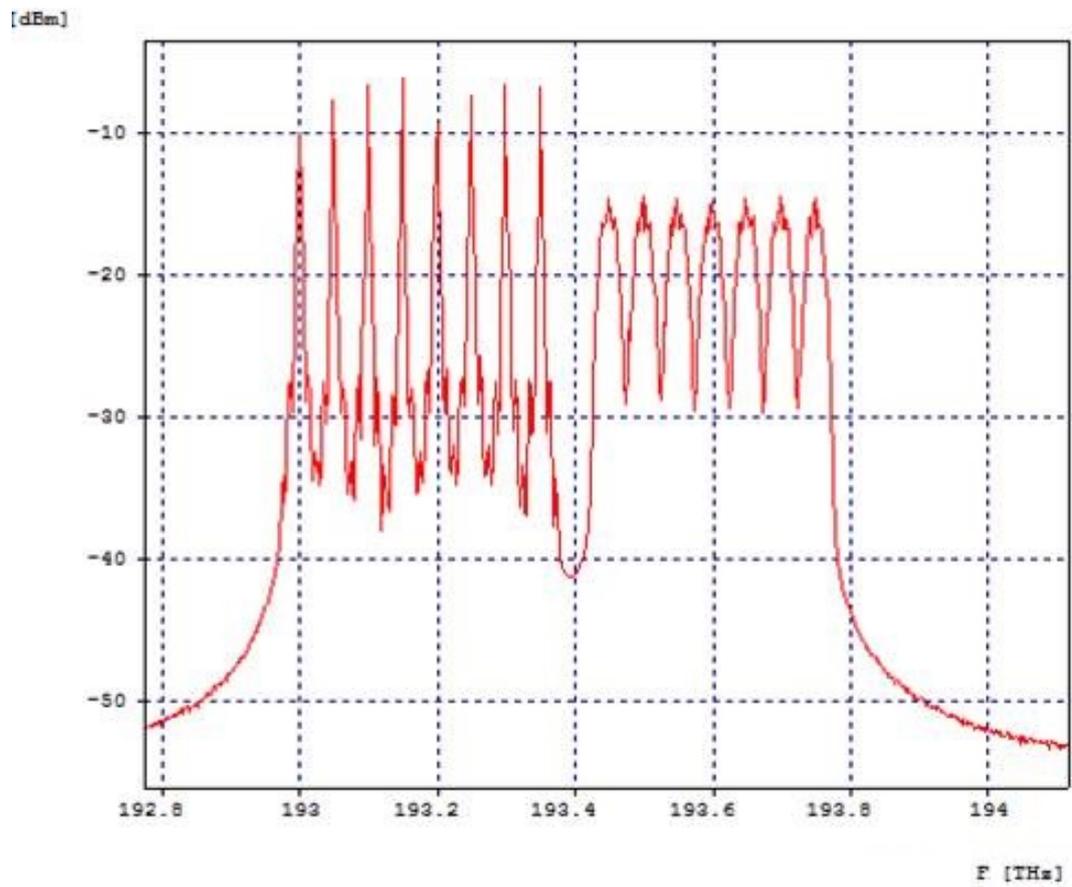


Optisches Spektrum von DWDM mit Interleaving von Kanälen.

Hybrides DWDM-System mit 10G/40G und einem Schutztrennband



Spektrale Trennung der 10G- und 40G-Systeme mit einem Schutzband kann das Problem von einer uneigentlichen Phasenmodulation und energetischen Nebensprechen von 10G-Systemen lösen.



Schutzband (100 GHz) zwischen zwei Systemen (Kanäle RZ-DQPSK und P-DPSK 40G).

10 Schlussfolgerung



FTTx schließen optische Netze ein, gemäß Kapazität und Reichweite gibt es:

- Passive optische Netze (**PON**, engl. *Passive Optical Network*) sind billig, aber bieten eine Übertragungsrate bis zu 10 Gbit/s und eine Reichweite des Lichtwellenleiters in der Größenordnung von einigen zehn Kilometern an.
 - Aktive optische Netze (**AON**, engl. *Active Optical Network*) ermöglichen eine Bitrate in der Größenordnung von Tbit/s mittels der DWDM-Technologie; dadurch müssen oft die folgenden Kriterien erfüllt werden:
 - Optimale Topologie, optimierte Dämpfung, kompensierte Dispersion und nichtlineare Ereignisse – Problematik der Netzplanung.
 - Geschwindigkeit pro Kanal von mindestens 100 Gbit/s.
 - Aktive mindestens 40 G DWDM over 10 G DWDM.
 - Potenzielle Koexistenz oder Konvergenz von verschiedenen Systemen mit einer unterschiedlichen Spezifikation.
-