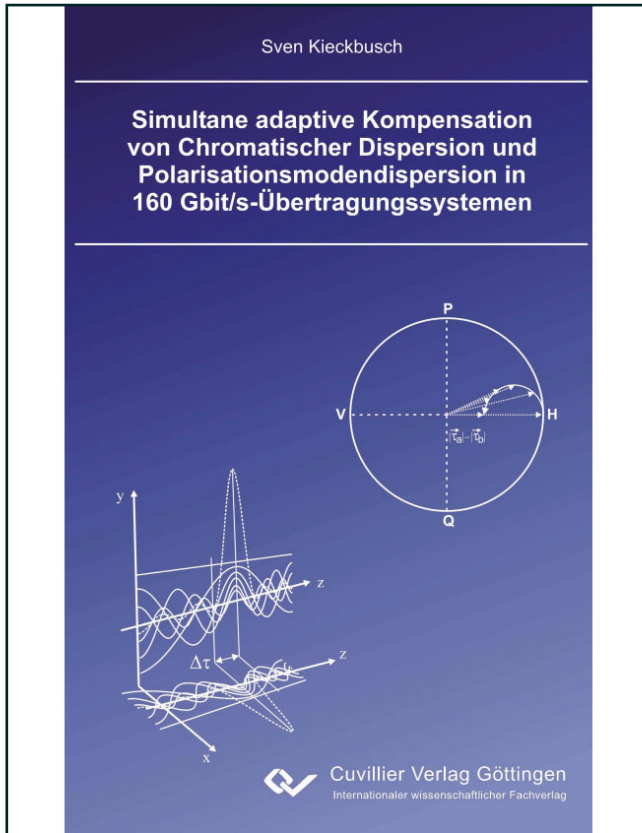




Sven Kieckbusch (Autor)
**Simultane adaptive Kompensation von
Chromatischer Dispersion und
Polarisationsmodendispersion in 160 Gbit/s-
Übertragungssystemen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1122>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Dieses Kapitel umreißt die Entwicklung und den heutigen Stand faseroptischer Übertragungssysteme. Dabei werden signalbeeinträchtigende Effekte wie Dämpfung und Dispersion, Methoden zur Erhöhung der Übertragungsrate, unterschiedliche Modulationsformate sowie Messmethoden zur Beurteilung der Übertragungsqualität erläutert. Abschließend findet sich die Zielsetzung und Gliederung dieser Arbeit.

1.1. Faseroptische Übertragungssysteme

Faseroptische Übertragungssysteme stellen den Kern der heutigen Informationsnetzwerke dar. Die Übertragungsrate elektrischer Netzwerke auf Koaxialleitungen ist durch die starken Leiterverluste bei hohen Frequenzen beschränkt, bzw. es können nur kurze Strecken überwunden werden, bevor das Signal aufgefrischt werden muss. Übertragungssysteme auf Mikrowellenleitungen verhalten sich hier gutmütiger; da die Übertragungsrate allerdings schließlich durch die Trägerfrequenz limitiert wird, sind in Glasfasern prinzipbedingt um Größenordnungen höhere Übertragungsraten möglich. Mitte der 1960er Jahre entstand das Konzept moduliertes Licht von, erst 1960 demonstrierten, Laserquellen in Glasfasern geführt zu übertragen [1]. Erst die dramatische Reduktion der Dämpfung dieser Fasern ermöglichte jedoch den Durchbruch der faseroptischen Übertragungssysteme, auf deren Details in den Unterabschnitten dieses Kapitels etwas näher eingegangen wird. Heute sind alle wesentlichen Stränge der Kommunikationsnetzwerke („Backbone“ genannt), faseroptisch realisiert und der Trend geht dahin, die optische Datenübertragung bis dicht an den Endkunden (FttX, Fiber-to-the-X, z.B. bis zu einem Wohnblock) oder sogar ganz zum Endkunden zu realisieren (FttH, Fiber-to-the-Home).

Durch den steigenden Bedarf an Übertragungskapazität in optischen Wellenleitersystemen ist eine kontinuierliche Erhöhung der Übertragungsrate notwendig, deren Umsetzung sich deutlich beobachten lässt [2]. In der Vergangenheit erfolgte dabei typischerweise, im Abstand einiger Jahre, eine Erhöhung der Übertragungsrate eines optischen Trägers um den Faktor vier

1. Einleitung

(SONET/SDH-Standard-Bitraten [3]). Kommerziell eingesetzt sind zur Zeit im Wesentlichen 10 Gbit/s -Übertragungssysteme, wobei bereits viele Komponenten für Übertragungsraten von 40 Gbit/s kommerziell verfügbar sind und entsprechende Systeme installiert werden. Übliche installierte Quarzglasfasern weisen einen etwa 120 nm breiten Wellenlängenbereich auf, in dem ihre Dämpfung sehr gering ist [4]. Daher kann die Übertragungsbandbreite und damit die spektrale Breite eines heute eingesetzten optischen Signals um ein Vielfaches erhöht werden, indem lediglich Sender und Empfänger sowie ggf. Signalaufbereiter entlang der Strecke ausgetauscht oder modifiziert werden.

1.1.1. Signalbeeinträchtigungen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Effekte, die zur Signalbeeinträchtigung in faseroptischen Übertragungssystemen beitragen, kurz umrissen. Für hohe optische Leistungen in Glasfasern treten über die hier dargestellten Effekte auch nichtlineare Effekte [5] wie Raman-Streuung, Selbstphasen- und Kreuzphasenmodulation sowie Vierwellenmischung auf, die jedoch an dieser Stelle nicht näher erläutert werden.

Dämpfung

Die erste Hürde für die faseroptische Datenübertragung lag in der Dämpfung. Die ersten verfügbaren Glasfasern wiesen Dämpfungskonstanten von mehr als 1000 dB/km auf. Als 1970 die Dämpfung auf etwa 20 dB/km reduziert werden konnte, war der Weg für die ersten faseroptischen Übertragungssysteme bei etwa 800 nm geebnet, so dass 1980 die ersten Systeme kommerziell verfügbar waren und eingesetzt wurden [6].

Die Dämpfung eines optischen Signals in einer Glasfaser ist bedingt durch unterschiedliche Mechanismen. Der wohl fundamentalste Dämpfungsmechanismus liegt in der intrinsischen Materialabsorption. Glasfasern für die optische Kommunikation werden aus Quarzglas (SiO_2) hergestellt, dessen Moleküle elektronische Resonanzfrequenzen im ultravioletten und Vibrations-Resonanzfrequenzen im infraroten Bereich aufweisen. Hierbei handelt es sich nicht um scharfe Absorptionslinien, sondern um spektral weit ausge dehnte Absorptionsbereiche, die sich bei etwa 1450 nm schneiden. Zusätzlich tritt extrinsische Materialabsorption durch Verunreinigungen im Quarzglas, beispielsweise durch OH-Moleküle auf. Der Einfluss der Dämpfungsmechanismen ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

1.1. Faseroptische Übertragungssysteme

Durch lokale Dichteschwankungen im amorphen Quarzglas kommt es darüber hinaus zur sogenannten Rayleigh-Rückstreuung, einem elastischen Streuprozess aufgrund lokaler Schwankungen des Brechungsindex (häufig auch Brechzahl genannt), dessen Dämpfungskoeffizient proportional zu λ^{-4} ist.

Schließlich kommt es zu Dämpfung aufgrund von nicht perfekter Führung des optischen Signals in der Faser aufgrund von Fehlern entlang der Kern/Mantel-Grenze, durch makroskopische Faserkrümmung sowie durch sogenannte „Microbends“, die auftreten, wenn die Faser gegen eine unebene Oberfläche gepresst wird.

Während die zweite Generation faseroptischer Übertragungssysteme bei 1300 nm operierte, da dort die Dispersion einer SiO₂-Singlemode-Faser am geringsten ist, sind seit 1990 Übertragungssysteme kommerziell verfügbar, die bei 1550 nm arbeiten und damit im Dämpfungsminimum, bei Berücksichtigung aller aufgeführten Dämpfungsmechanismen, operieren. Hier werden Dämpfungswerte von nur 0,2 dB/km erreicht.

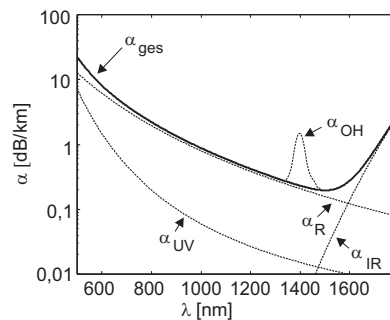


Abbildung 1.1.: Spektraler Verlauf der Dämpfungskonstanten α , bedingt durch intrinsische Absorption im ultravioletten (α_{UV}) und im infraroten (α_{IR}) Wellenlängenbereich, durch Rayleigh-Streuung (α_R), durch extrinsische Absorption (aufgrund von Verunreinigungen, z.B. OH (α_{OH})) und die resultierende Dämpfungskonstante (α_{ges}).

Trotz dieser sehr geringen Dämpfungswerte ist keine Übertragung über mehrere tausend Kilometer möglich, das Signal muss in regelmäßigen Abständen aufgefrischt werden. Hierzu bieten sich prinzipiell zwei unterschiedliche Ansätze an: elektronische und optische Regeneration.

Ein klassischer „Repeater“ besteht aus einem Empfänger und einem Trans-

1. Einleitung

mitter, das Signal wird detektiert, ausgewertet und dann neu gesendet. Auf diese Weise kann nach jedem Repeater ein Signal in der ursprünglichen Sendequalität vorliegen, jedoch ist ein nicht unerheblicher Material- und Wartungsaufwand nötig, um viele Repeater entlang der Strecke einzusetzen.

Die einfachste Form der optischen Regeneration besteht aus der Verwendung eines optischen Verstärkers. Typischerweise werden heute Erbium-dotierte Faserverstärker [7] eingesetzt. In einem solchen, sogenannten EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), wird über einen wellenlängenselektiven Koppler Licht einer Pumpquelle bei typisch 980 nm in die dotierte Faser eingekoppelt, um die Er^{3+} -Ionen in angeregte Energiezustände zu versetzen. Aufgrund der amorphen Struktur des Quarzglas der Faser ergibt sich statt diskreter Absorptionslinien ein Kontinuum von 10 bis 100 nm, in dem Übergänge möglich sind. Durch diese Faser wird nun zusätzlich das Übertragungssignal bei etwa 1550 nm gesendet, wo es durch stimulierte Emission verstärkt wird. Da ein solcher Verstärker breitbandig rauscht, ist zusätzlich der Einsatz von optischen Bandpassfiltern, beispielsweise Fabry-Perot-Resonatoren [9], erforderlich. Auch dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Rauschanteil im Bandpassbereich des Filters das Signal-Rauschverhältnis des Übertragungssignals reduziert, so dass auch hier keine beliebig häufige Verstärkung möglich ist. Zudem hilft es nicht, beliebig viele EDFAs direkt zu kaskadieren, da der Gewinn eines EDFAs unter Vernachlässigung spontaner Emission für Signalleistungen, die deutlich größer sind als die Pumpleistung, gegen eins geht [7]. Dementsprechend werden EDFAs üblicherweise jeweils vor bzw. hinter stark dämpfenden Systemabschnitten eingesetzt, um das Signal regelmäßig aufzufrischen.

Das Konzept der optischen Signalaufbereitung geht bis zu sogenannten 3R-Regeneratoren („Re-Shaping“, „Re-Amplification“, „Re-Timing“), die beeinträchtigte Signale durch Nutzung optischer Effekte verstärken, die Pulsform wiederherstellen und die zeitliche Folge der Pulse angleichen [10].

Dispersion

Nachdem die Dämpfung in Glasfasern auf ein Maß reduziert werden konnte, das es ermöglichte, optische Signale über mehrere zehn Kilometer zu übertragen, ergab sich mit den unterschiedlichen Dispersionseffekten die nächste Limitation der Länge der Übertragungstrecken bzw. der Übertragungsrates.

Dispersion in Glasfasern beschreibt Laufzeitunterschiede verschiedener

1.1. Faseroptische Übertragungssysteme

Signalkomponenten aufgrund unterschiedlicher Ursachen. In einer Glasfaser sind allgemein verschiedene Moden ausbreitungsfähig. Je größer der Kerndurchmesser im Verhältnis zur Wellenlänge ist, desto mehr Moden sind ausbreitungsfähig.

In einer Multimode-Faser wird typischerweise ein strahlenoptisches Modell zur Beschreibung verwendet, so dass sich die Moden durch ihren Einkopplungswinkel beschreiben lassen und rein geometrisch unterschiedliche Weglängen in der Faser zurücklegen müssen. Typische Gruppenlaufzeitstreuungen für Stufenindexfasern liegen bei 50 ns/km , für Gradientenprofilfasern bei 250 ps/km [11]. Entsprechend ist die maximale Übertragungsrate bzw. Übertragungslänge stark eingeschränkt, so dass Multimode-Fasern üblicherweise nur für lokale Netzwerke eingesetzt werden.

Liegt der Kerndurchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge, so spricht man von Singlemode-Fasern (SMF). Hier wird nur noch der Grundmodus geführt und das Strahlenmodell kann nicht mehr angewendet werden. Für solche Fasern lässt sich dann Chromatische Dispersion (CD) beobachten, die aufgrund der intrinsischen Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex des Übertragungsmediums sowie aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Grundmodus bei unterschiedlichen Wellenlängen auftritt (Abb. 1.2a). Da eine übertragene Signalfolge durch überlagerte Schwingungen unterschiedlicher Frequenz beschrieben werden kann, die aufgrund der chromatischen Dispersion unterschiedlich stark verzögert werden, kommt es daher zu einer Pulsverbreiterung, wie in Abbildung 1.3a illustriert ist. Für Übertragungssysteme der zweiten Generation erfolgte die Übertragung im sogenannten O-Band, nahe 1300 nm , in der Dispersionsnullstelle der Quarzglasfasern, so dass CD zunächst nicht relevant war. Da heutige Übertragungssysteme um 1550 nm betrieben werden, ist die CD mit etwa $17 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ nicht mehr vernachlässigbar und muss durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden. Auch darf für hochbitratige Übertragungssignale nicht von einer über der Wellenlänge konstanten Dispersion ausgegangen werden, sondern es muss die sogenannte „Dispersion Slope“, die Steigung der Dispersion an der Betriebswellenlänge, und ggf. sogar noch höhere Ordnungen kompensiert werden. Kapitel 2 enthält eine detailliertere Erläuterung der CD sowie typischer Kompensationsansätze.

In einem CD-kompensierten Übertragungssystem wirkt schließlich die Polarisationsmodendispersion (PMD) als beschränkende Größe für Übertragungsrate bzw. Übertragungslänge. Tatsächlich einmodig ist nur eine ideal zylindersymmetrische Faser ohne intrinsische und extrinsische Span-

1. Einleitung

nungen. Sobald eine dieser Bedingungen nicht mehr erfüllt ist – und das ist in der Praxis immer der Fall – ergeben sich lokal zwei ausgezeichnete Moden, die sich nun allerdings nicht anhand des Einstrahlwinkels oder der Wellenlänge unterscheiden, sondern anhand der anregenden Polarisationsrichtung. Im vereinfachten Fall einer Faser, die auf der gesamten Länge einen konstant elliptischen Kern aufweist, ergeben sich zwei orthogonale Polarisationsrichtungen, wobei das Signal bei Anregung mit einer der beiden die maximale, bei Anregung mit der anderen die minimale Laufzeit erfährt. Die Differenz beider Laufzeiten ist die sogenannte Differentielle Gruppenlaufzeit (DGD, differential group delay) $\Delta\tau$. Auf diese Weise kommt es ebenfalls zu einer Pulsverbreiterung (Abb. 1.3b), ggf. sogar zu einer Aufteilung eines Pulses in zwei Teilpulse. Für eine reale Singlemode-Faser herrschen lokal jeweils unterschiedliche Verhältnisse, so dass eine Übertragungsstrecke als Kaskade vieler willkürlich orientierter Teilstücke angesehen werden kann, die dem gerade erläuterten Beispiel mit elliptischem Faserkern entsprechen. Es lässt sich zeigen, dass dies zu einer Laufzeitverzögerung zwischen zwei orthogonalen Hauptzuständen führt, wobei alle Parameter (DGD und Orientierung der Hauptzustände) über der Wellenlänge und zusätzlich aufgrund von Umwelteinflüssen variieren (Abb. 1.2b). Für einen schmalen Wellenlängenbereich und zu einem isoliert betrachteten Zeitpunkt spricht man von instantaner DGD. Die über einen langen Zeitraum gemittelte instantane DGD einer Faser wird üblicherweise als PMD oder mittlere DGD der Faser bezeichnet. Wenn Messdaten über einen breiten Wellenlängenbereich vorliegen, wird stattdessen auch häufig über der Wellenlänge gemittelt. Analog zur CD enthält Kapitel 3 eine detailliertere Erläuterung der PMD sowie typischer Kompensationsansätze.

1.1.2. Methoden zur Erhöhung der Übertragungsrate

Gemäß Abschnitt 1.1.1 steht ein großer Spektralbereich zur Verfügung, in dem optische Nachrichtenübertragung möglich ist, so dass die sehr kostenintensive Verlegung zusätzlicher Fasern zur Kapazitätserhöhung nicht der bevorzugte Ansatz ist. Da die Signalerzeugung üblicherweise elektrisch erfolgt, ist die maximale Signalbandbreite zunächst elektronisch begrenzt. Neben höherwertigen Modulationsformaten auf einem einzelnen Trägersignal, auf die in Abschnitt 1.1.3 kurz eingegangen wird, stehen sich als Maßnahme im Wesentlichen die Ansätze Wellenlängenmultiplex und Zeitmultiplex gegenüber, die im Folgenden erläutert werden.

1.1. Faseroptische Übertragungssysteme

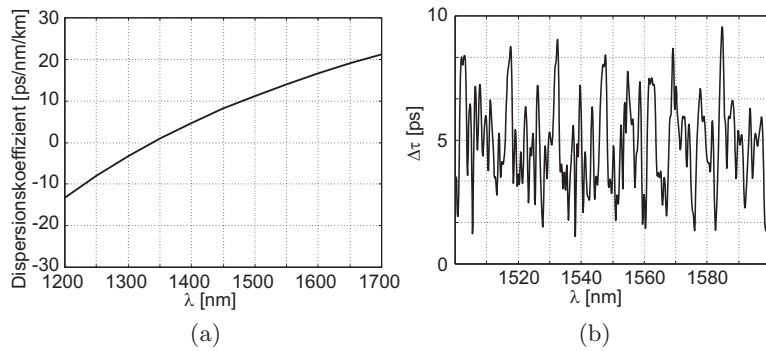


Abbildung 1.2.: Typischer Dispersionsverlauf einer Singlemode-Faser (simuliert für einen Kernradius von $4\ \mu\text{m}$) (a) und simulierter DGD-Verlauf für 100 willkürlich orientierte Segmente zu je $\Delta\tau = 0,5\ \text{ps} \pm 10\%$ (b).

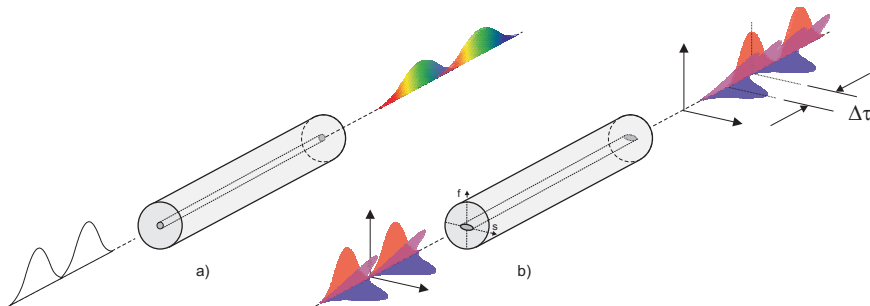


Abbildung 1.3.: Schematische Darstellung des Einflusses von CD (a) und PMD (b).

1. Einleitung

WDM-Systeme

Beim Wellenlängenmultiplex-Verfahren (WDM) werden einzelne Sender und Empfänger verwendet, die paarweise auf unterschiedlichen Wellenlängen arbeiten. Der Kanalabstand ist durch die ITU standardisiert und betrug in einem frühen Standard 100 GHz, in einem jüngeren ITU-Standard 50 GHz [2]. Durch Einhaltung dieses Kanalabstands bei Quellen und anderen Komponenten im Übertragungssystem wird gewährleistet, dass es nicht zu einem Übersprechen zwischen den Kanälen kommt. Typische kommerzielle WDM-Systeme arbeiten dabei mit 10 Gbit/s auf jedem Kanal, wobei 40 Gbit/s-Systeme unmittelbar vor der Marktreife stehen.

WDM-Systeme bieten den Vorteil, dass die Anforderungen an Sender und Empfänger prinzipiell gering sind, da hier ausgereifte Technologie für mäßig hohe Übertragungsrate zum Einsatz kommen kann.

In Hinblick auf Filterkomponenten entlang der Übertragungsstrecke entstehen allerdings erhöhte Anforderungen, da die Komponenten für alle Kanäle nicht nur transparent sein, sondern auch das geforderte, häufig unterschiedliche Filterverhalten für jeden einzelnen Kanal aufweisen müssen. Eine ganze Reihe von Filter-Verfahren (z.B. Thin-Film-Filter und Lattice-Filter) weisen eine spektral periodische Filtercharakteristik auf [12], die der Forderung nach identischem Kanalverhalten sehr entgegenkommt. Abgesehen von diesen speziellen Filtertypen zeichnet sich der WDM-Ansatz im Allgemeinen dadurch aus, dass viele Komponenten benötigt werden, die jede für sich tendenziell günstig ist, da sie nur für eine geringe Bandbreite ausgelegt sein muss. Zur Verwendung solcher Komponenten muss allerdings das Signal vorher in die einzelnen Kanäle zerlegt (demultiplex) und hinterher wieder kombiniert (multiplex) werden.

Als Komponenten zum De- und Multiplexen der WDM-Signale kommen typischerweise Bragg-Grating-Strukturen oder Arrayed-Waveguide-Gratings (AWGs, auch Phased Arrays genannt) in planaren Strukturen zum Einsatz [13].

OTDM-Systeme

Beim optischen Zeitmultiplex-Verfahren (OTDM) wird eine hohe Übertragungsrate auf einem einzelnen Wellenlängenkanal realisiert. Da die optischen Signale zunächst elektrisch erzeugt werden müssen, werden beim OTDM beispielsweise mehrere 40 Gbit/s-Signale im Zeitbereich verzögert und dann