

Kapitel 1

Einführung

Erste optische Systeme arbeiteten zunächst im sogenannten ersten Übertragungsfenster bei einer Wellenlänge von 850 nm [1]. Im Jahre 1980 war die Entwicklung von opto-elektronischen Komponenten (Laser und Photodioden aus Halbleitermaterial) soweit fortgeschritten, daß das zweite Fenster um 1300 nm genutzt werden konnte [1]. Vorteilhaft war hier die geringe *Dämpfung* von $0,4 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ und die bei Standard-Lichtwellenleitern (LWL) vernachlässigbare chromatische Dispersion. Mitte der 80er Jahre konnte durch die Entwicklung von Halbleiterlasern für eine Wellenlänge von 1550 nm das dritte optische Fenster genutzt und die Dämpfung auf der LWL-Übertragungsstrecke nochmals halbiert werden [1]. Der Abstand zwischen den Regeneratoren wurde von 40–50 km auf 80–120 km vergrößert. Ohne Regenerator konnten 140 km überbrückt werden, bei einer Datenrate von bis zu 565 Mbit/s [1].

Ein Jahrzehnt später kamen Erbium-dotierte Faserverstärker (EDFA, siehe Anhang A) auf, welche die Verluste durch Dämpfung ausgleichen konnten und weitgehend von Datenrate und -format unabhängig waren [1]. Ihre große Verstärkungsbandbreite ermöglichte ferner den Einsatz der Wellenlängenmultiplex (WDM)-Technik; es konnten mehrere Datenkanäle gleichzeitig übertragen werden. Der kostspielige Umweg über Photodetektion, elektrische Signalverarbeitung und optischer Neuaussendung jedes einzelnen Kanals konnte vermieden werden.

In Kapitel 2.2 der vorliegenden Arbeit wird die Datenrate von 2,5 auf 10

Gbit/s gesteigert. Nun zeigte sich bei 1550 nm Wellenlänge in Verbindung mit Standard-LWL die *chromatische Dispersion* von ca. $17 \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$ als zunächst begrenzender Faktor. Schon nach ca. 100 km Streckenlänge wird die nutzbare Augenöffnung durch erhebliche Verzerrungen halbiert. Abhilfe schafften dispersions-kompensierende LWL (DCF), welche mittlerweile zum Stand der Technik gehören [2]. Heute befinden sich alternative Methoden, die z.B. auf ‚gechirpten‘ Faser-Bragg-Gittern [3] oder ‚Higher-order mode‘-Fasern beruhen, in der Entwicklung. Die Vervierfachung der Kanaldatenrate durch Zeitmultiplex (TDM) hat sich bisher als wirtschaftlicher erwiesen als jeweils vier Kanäle mit entsprechend niedriger Datenrate im WDM-Verfahren zu übertragen (Preface in [1]).

Weniger Sprach-Übertragungsdienste als vornehmlich Internetanwendungen wie beispielsweise das World-Wide-Web (WWW) verlangen nach immer größeren Übertragungskapazitäten. Derzeit verdreifacht sich das mittlere Datenverkehrsaufkommen jährlich, zukünftige Anwendungen wie beispielsweise ‚Video-on-demand‘ werden den Trend weiter anhalten lassen. Eine baldige Steigerung der Datenrate auf 40 Gbit/s pro WDM-Kanal, wie in Kapitel 2.4 realisiert, steht unmittelbar bevor. Neben der Handhabung der (chromatischen) Dispersion kommt nun auch der *Polarisationsmodendispersion* (PMD) eine besondere Bedeutung zu. Lange als kleiner Effekt vernachlässigt, führt sie bereits bei 10 Gbit/s zu Systemausfällen, wenn die Signalverzerrungen zu groß werden. Da sie ein orts- und zeitvariantes Verhalten aufweist, kann sie nicht einfach statisch, sondern nur adaptiv kompensiert werden. Bei langen Übertragungstrecken wie z.B. in den USA machen sich Dispersions- und PMD-Effekte schon bei wesentlich niedrigeren Datenraten bemerkbar.

Um PMD kompensieren zu können, müssen die von ihr verursachten Signalverzerrungen zunächst einmal detektiert werden (Kapitel 3.3). Unter den verschiedenen in der Literatur beschriebenen Verfahren bietet sich eine Signalanalyse durch spektrale Filterung an, da sie kostengünstig und kompakt realisiert werden kann. Die optimale Auslegung der Filter für eine schnelle und eindeutige PMD-Erfassung wird in der vorliegenden Arbeit untersucht. Sie eignet sich für das bisher übliche NRZ-Datenformat und eine Datenübertragung mit Impulsen (RZ). Letztere erhalten zur Zeit zunehmende Beachtung, da sie aufgrund des Solitonen-Effektes eine größere Leistungsreserve und damit Reichweite bieten. Anschließend wurden Filterbänke für Datenraten von 10, 20 und 40 Gbit/s aufgebaut und damit viele PMD-Kompensationsexperimente durchgeführt (Kapitel 3.4). In Zusammenarbeit mit der Industrie ist eine Schaltung

entwickelt und produziert worden, welche in einem Demonstrationsgerät zur PMD-Kompensation bei 10 Gbit/s erfolgreich eingesetzt wurde. Eine weitere Schaltung für den industriellen Einsatz bei 40 Gbit/s wurde ebenfalls realisiert und vermessen.

Auch mit höchster Datenrate pro WDM-Kanal wird die Übertragungskapazität des LWL einmal erschöpft sein. Es wird daher nach Bandbreite-effizienten Modulationsverfahren gesucht, die eine größere spektrale Effizienz aufweisen als die bisherige einfache zweistufige Intensitätsmodulation (2-IM). Polarisationsmultiplex (PolDM) bietet sich an, beide orthogonale Polarisationsmoden eines ‚einmodigen‘ Lichtwellenleiters anzuregen, um die übertragbare Datenrate zu verdoppeln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde neben dem Aufbau von PolDM-Übertragungssystemen in den Kapiteln 4.3 und 4.4 erstmals die Toleranz von PolDM gegenüber PMD untersucht (Kapitel 4.6).

In diesem Kontext formulieren sich die Ziele der vorliegenden Arbeit wie folgt: Zunächst sollen elektrische und optische Verstärker für Übertragungsexperimente aufgebaut werden. Für letztere ist es erforderlich, die Strahlung aus Pumplaserdioden in einen Lichtwellenleiter einzukoppeln. Anschließend ist die Datenrate einer vorhandenen Datenquelle durch rein elektrisches Zeitmultiplex so weit wie möglich zu steigern. Dann soll gezeigt werden, daß diese über (alte) PMD-behaftete LWL übertragen werden kann, indem ein optischer PMD-Entzerrer eingesetzt wird. Innerhalb diesem sind PMD-Detektoren zu entwerfen und aufzubauen, mit denen die PMD-bedingten Verzerrungen eindeutig, schnell und kostengünstig erfaßt werden können. Schließlich soll mittels Polarisationsmultiplex die übertragbare Datenrate pro LWL Bandbreite-effizient verdoppelt werden.

Kapitel 2

Hochratige optische Datenübertragung

2.1 Einführung

Als erstes soll die Realisierbarkeit einer hochratigen digitalen optischen Datenübertragung untersucht werden. Dazu wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Übertragungsstrecke für eine Datenrate von 10 Gbit/s aufgebaut. Ab etwa dieser Datenrate treten die durch chromatische Dispersion (CD) und Polarisationsmodendispersion (PMD) bedingten Signalverzerrungen deutlich in Erscheinung. Als Quelle für pseudo-zufällige Daten steht jedoch nur ein Bitmuster-generator und Bitfehlerzähler bis zu einer maximalen Datenrate von 3 Gbit/s zur Verfügung. Diese muß daher zunächst durch Zeitmultiplex gesteigert werden.

Eine wichtige Schlüsselkomponente hochratiger Übertragungsstrecken sind breitbandige Hochfrequenzverstärker für Datensignale. Sie dienen zur Ansteuerung bzw. zur Nachverstärkung des Ausgangssignals von elektro-optischen Komponenten wie Modulatoren und Photodioden. Sie werden in der vorliegenden Arbeit aufgebaut und in ihrer Eignung für eine hochratige Datenübertragung bewertet.

Zur Demonstration höherer Datenraten bei nur einer übertragenen Wellenlänge wird anschließend eine Erweiterung der Datenübertragungsstrecke auf 20 Gbit/s

und sogar 40 Gbit/s vorgenommen. Dabei wird wiederum die Tatsache genutzt, daß durch Aufteilung eines Datensignals auf unterschiedlich lange Laufzeitleitungen und anschließendem Multiplexer die Datenrate vervielfacht werden kann.

2.2 Datenübertragung bei 10 Gbit/s

2.2.1 Aufbau des Senders

In Abb. 2.1 ist der Aufbau des in der vorliegenden Arbeit realisierten 10-Gbit/s-Senders gezeigt. Ein Laborsynthesizer (Taktquelle) gibt die genormte Datenrate für eine STM-64-Übertragung vor; das sinusförmige Taktsignal von 9,95328 GHz wird über Hybridkoppler und Dämpfungsglieder an die einzelnen Systemkomponenten verteilt. Zentraler Baustein ist ein experimenteller 4:1-Multiplexer, welcher die Hochsetzung der Datenrate von 2,5 auf 10 Gbit/s vornimmt und das Taktsignal für den ‚langsamen‘ Bitmustergenerator bereitstellt. Dieser erzeugt daraus eine Pseudozufallsfolge (PRBS) der Länge $2^7 - 1$, $2^{10} - 1$, $2^{15} - 1$ oder $2^{23} - 1$. Sein Datenausgangssignal wird mit einer Schaltung [4] zeitlich versetzt insgesamt viermal dem Multiplexer zugeführt.

Bei Festlegung auf eine Wortlänge von beispielsweise 2^7-1 kann bei Verzögerung um 0, 32, 64 und 96 Bit erneut eine ‚echte‘ PRBS erzeugt werden. Da innerhalb der Wortlänge das Auftreten einer ‚0‘ oder ‚1‘ zufällig ist, kann die Qualität der Datenübertragung objektiv bestimmt werden. Das Spektrum weist (beim NRZ-Format) einen si-förmigen Verlauf auf, ohne daß bestimmte Frequenzen bevorzugt werden. Da sich die Sequenz fortlaufend wiederholt, besteht es aus diskreten Spektrallinien.

Ein nachgeschaltetes D-Flipflop (D-FF) [5] verbessert das Ausgangssignal des Multiplexers (Abb. 2.2a) durch zeitliche Abtastung (Abb. 2.2b). Ein kommerziell verfügbarer Breitbandverstärker, welcher in leichter Übersteuerung betrieben wird, entfernt störendes Überschwingen (Abb. 2.2c). Um schließlich mittels eines Mach-Zehnder-Modulators auf Lithiumniobat-Basis (LiNbO_3) Licht von einem Laser modulieren zu können, ist eine weitere Verstärkung erforderlich. Mit einem in der vorliegenden Arbeit entwickelten 20-GHz-Breitband-Verstärker (Kapitel 2.2.3) wird ein Spannungshub von 5 V erzielt (Abb. 2.2d). Dieser erweist sich für den verwendeten Modulator als gerade ausreichend, um ein gutes optisches Extinktionsverhältnis zu erreichen. Aus den gemessenen Augenmustern wird erkennbar, wie durch die geschickte Anordnung von zeitlicher

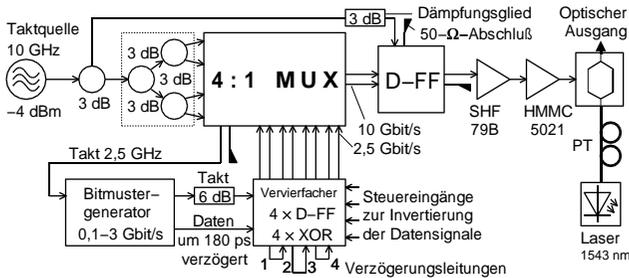


Abbildung 2.1: Aufbau optischer Sender für 10 Gbit/s; MUX: Multiplexer, D-FF: D-Flipflop, PT: Polarisationsstransformator

Neuabtastung, Amplitudenbegrenzung und Verstärkung die Qualität des Datensignals schrittweise erheblich verbessert wird.

Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung einer Pseudozufallsfolge ist in [6] beschrieben. Es vermeidet bei großen Wortlängen ab etwa $2^7 - 1$ lange Laufzeitleitungen durch den Einsatz von Flipflops und Exklusiv-Oder-Gattern. In der vorliegenden Arbeit wird das zunächst ebenso außer acht gelassen, wodurch sich am Ausgang des Multiplexers keine ‚echte‘ PRBS ergibt. In [7] wird jedoch für optisches Zeitmultiplex gezeigt, daß in diesem Fall die Abschätzung bezüglich der Übertragungsqualität auf der Strecke konservativ ausfällt.

2.2.2 Aufbau des Empfängers

Um das gesendete, optische Signal zu bewerten, wurde es zunächst mit einem kommerziell erhältlichen Photodiodenmodul vom Typ Lasertron QDMH1 detektiert, welches eine große Bandbreite von 20 GHz aufweist (Abb. 2.3a). Durch Anlegen einer Modulatorvorspannung konnte ein im Rahmen der Meßgenauigkeit ideales Extinktionsverhältnis zwischen ‚1‘ (Spannung am Photodiodenausgang $u < 0$) und ‚0‘ erreicht werden.

Für den eigentlichen Empfänger in Abb. 2.4 wurde ein QDMH3-Photodiodenmodul ausgewählt, da es aufgrund des fehlenden internen Abschlußwiderstandes die doppelte Ausgangsspannung im Vergleich zu einem QDMH1-Modul mit eingebautem Abschlußwiderstand abgibt. Es verfügt über eine für 10 Gbit/s-Daten-