Kapitel 1

Einführung

In unserer Gesellschaft wird im Kommunikations- und Informationszeitalter die Möglichkeit zur globalen Kommunikation und der allgegenwärtige, schnelle und kostengünstige Zugang zu Informationen jeglicher Art zu einer Selbstverständlichkeit. Während auf der Seite der Endbenutzer der Trend zur kabellosen Anbindung der Geräte wie UMTS-Mobiltelefon oder WLAN-fähiger Notebooks geht, so ist für die zugrund liegende Informationsübertragung ein leistungsfähiges Netzwerk unabdingbar. Aufgrund der benötigten Datenraten und der weltumspannenden Reichweite haben sich optische Glasfasern als Rückgrad der Weitverkehrsnetze etabliert. Momentan ist keine Technologie bekannt, die auf diesem Einsatzgebiet eine Konkurrenz zur optischen Übertragung darstellen könnte, so daß Glasfasernetze ein aktuelles Forschungsthema sind, auf dem sich die führenden Geräteanbieter mit immer höheren Datenraten überbieten. Der aktuelle ¹ Datenraten-Rekord liegt beispielsweise bei 32 TBit/s auf einer einzigen Glasfaser [104].

Einige Zeit sah es so aus, als ob das rasante Wachstum der optischen Nachrichtentechnik beendet wäre, da aus den ersten Boomjahren des Internets eine enorme Überkapazität an verlegten Glasfasern vorhanden war, die im Wellenlängenmultiplex (WDM) mit Kanaldatenraten von 2,5 oder 10 GBit/s betrieben wurden. Nachdem die Überkapazität im wachsenden Bandbreitenbedarf aufgegangen ist, herrscht momentan bei den Netzbetreibern wieder eine etwas optimistischere Stimmung vor und neue Übertragungsstrecken werden aufgebaut. Konnten mittlerweile die ersten Übertragungsstrecken mit 40 GBit/s pro Kanal ihre Praxistauglichkeit beweisen, wird der Ruf nach höheren Datenraten wieder lauter, so daß es nur eine Frage der Zeit ist, bis die nächste Generation der Übertragungssysteme ihren Dienst antritt. Dabei ist momentan noch

¹Stand Juni 2009

nicht absehbar, ob dieser nächste Schritt 100 GBit/s oder 160 GBit/s heißen wird. In Branchenkreisen ist momentan von einer Steigerung des Internetverkehrs von 50% bis 100% pro Jahr die Rede, so daß die Notwendigkeit der Forschung auf diesem Themengebiet leicht einsichtig wird.

Motiviert wird die Jagd nach immer höheren Datenraten durch die erwartete Kostenreduzierung. Das Verlegen von Glasfaserstrecken ist im Vergleich zum Aufbau eines Funksystems sehr teuer, da zum einen das Wegerecht erworben und Fasern vergraben werden müssen. Zum anderen kommt beim Anschluß der Fasern Mikromechanik zum Einsatz, alle Bauelemente müssen mit engsten Fertigungstoleranzen gefertigt werden, wodurch die Elemente teuer werden und nur mit großer Sorgfalt in Betrieb genommen werden können. Da diese Kosten unabhängig von der übertragenen Datenrate anfallen, ist es für einen Netzbetreiber häufig günstiger, zusätzlich in teure hochbitratige Sende- und Empfangsgeräte zu investieren, um in der Summe niedrige Kosten pro übertragenem Bit zu erzielen.

1.1 Beschreibung der Problemstellung

Wie jede Übertragungstechnik weist die optische Übertragung ganz spezielle Eigenarten und Störungen auf, die man für eine Weiterentwicklung der Systeme hin zu höheren Datenraten in den Griff bekommen muß. Während die Dämpfung und die chromatische Dispersion technisch bereits gut beherrscht werden, ist die Polarisationsmodendispersion (PMD) ein aktuelles Forschungsthema, für die noch keine elegante und finale Kompensationsmethode gefunden wurde. PMD wird ab Datenraten von 10 GBit/s zu einem Problem und letztendlich sind die durch PMD verursachten Störungen einer der Hauptgründe, weshalb die bestehenden Netze nicht bereits flächendeckend auf 40 GBit/s aufgerüstet wurden.

Polarisationsmodendispersion entsteht auf der Faser durch das Zusammenspiel von lokaler Doppelbrechung und Modenkopplung, der Energiekopplung an den „Stoßstellen“ der lokalen Doppelbrechung. Die Grundlagen werden in Kapitel 2 ausführlich behandelt, vereinfacht kann der Effekt jedoch so betrachtet werden, als ob sich das zu übertragende Signal am Eingang der Faser in eine Vielzahl von Teilsignalen aufspaltet, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten über die Glasfaser wandern und sich am Ende der Faser wieder überlagern. Die Störung ist der in terrestrischen Funksystemen auftretenden Mehrwegeausbreitung sehr ähnlich, die um ein Vielfaches höheren Datenraten erschweren jedoch den Einsatz der dort genutzten Techniken in faseroptischen

Datenrate	T_{Bit}	Max. PMD	Maximale L bei	
			$PMD = 0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	$PMD = 0,02 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
40 GBit/s	25 ps	5 ps	2500 km	62.500 km
100 GBit/s	10 ps	2 ps	400 km	10.000 km
160 GBit/s	6,25 ps	1,25 ps	156 km	3.900 km

Tabelle 1.1: Geht man davon aus, daß bis zu einer PMD von 20% der Bitdauer T_{Bit} keine Signalstörungen auftreten, so läßt sich die maximal zulässige Faserlänge L bestimmen. Die Faser mit einem PMD Koeffizient von $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ gilt als alte Faser, die Faser mit einem PMD Koeffizient von $0,02 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ als moderne Niedrig-PMD-Faser.

Übertragungssystemen. So können in optischen Übertragungssystemen mit der aktuell verfügbaren Elektronik die Entzerrer oder Fehlerschutzalgorithmen verwirklicht werden, die in Funksystemen schon vor einiger Zeit eingeführt wurden. Erschwerend kommt hinzu, daß in den heute üblichen direktdetektierenden Empfängern eine Photodiode zur Wandlung des optischen Signals in einen elektrischen Strom zum Einsatz kommt. Diese Photodiode mißt die optische Leistung, während sich die bei der Übertragung auftretenden Störungen jedoch auf das elektrische Feld des optischen Signals auswirken. Insofern besitzt die Photodiode eine nichtlineare Kennlinie, durch die wichtige Informationen über die Störung verloren gehen - die ursprünglich lineare Störung durch PMD wird nach der Photodiode zu einer nichtlinearen Störung. PMD resultiert in einer Aufweitung der in einem digitalen Übertragungssystem gesendeten Pulse, die zudem zeit- und temperaturvariant sein kann und daher dynamisch behandelt werden muß.

Verschiedene Ansätze sind bekannt, um die Störung durch PMD in den Griff zu bekommen. Einer basiert auf dem Einsatz moderner Glasfasern, die auf niedrige PMD Werte optimiert sind und somit keine oder geringe Signalstörungen verursachen. Dieser Ansatz zieht allerdings den kompletten Austausch der bestehenden Netzwerke nach sich und kann daher nur allmählich und sukzessive mit der regelmäßigen Erneuerung oder dem Ausbau des Netzes erfolgen. Mit der Verlegung neuer Fasern werden die durch PMD verursachten Probleme jedoch nur verzögert und zu höheren Datenraten hin verschoben. Eine Faustformel besagt, daß bei einer einfachen Leistungsmodulation auf der Faser eine PMD von 20 % der Bitdauer zulässig ist, ohne sich störend auf die Übertragung auszuwirken. Anhand dieser Abschätzung ergeben sich die in Tabelle 1.1 gezeigten maximal ohne PMD Kompensation überbrückbaren Faserlängen L . Die Faser mit einem PMD Koeffizient von $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ gilt dabei als alte Faser und die mit dem PMD Koeffizient von

0,02 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ als moderne Niedrig-PMD-Faser. Selbst mit den modernen Fasern ist eine 160 GBit/s Übertragung über maximal 3.900 km möglich, *ultra-long haul* Verbindungen mit transatlantischen Dimensionen sind damit nicht realisierbar. Schwerwiegender wird das Problem der maximal realisierbaren Übertragungsstrecke im Zusammenhang mit der Forschung an optisch transparenten Netzwerken. In diesen Netzen soll die optische Übertragung nicht wie bisher von Punkt zu Punkt realisiert werden, sondern nach den sich ändernden Anforderungen ohne elektrische Regeneration geschaltet werden. Weitverkehrsnetze auf kontinentaler Ebene können leicht optische Pfadlängen von einigen tausend Kilometern erreichen, so daß diese mit den Datenraten von 100 GBit/s oder 160 GBit/s ebenfalls an ihre Grenzen stoßen werden.

Ein anderer Ansatz zur Unterdrückung der durch PMD verursachten Störungen beruht darauf, die Störung auf der Faser zuzulassen und anschließend zu kompensieren. Derartige Ansätze umfassen sowohl optische als auch elektronische PMD Kompensatoren. Der wichtigste Unterschied zwischen diesen beiden Methoden wird durch die bereits erwähnte Leistungsdetektion der Photodiode verursacht. Während PMD im optischen Bereich eine lineare Signalverzerrung ist, wird sie bei der direkten Empfangstechnik durch die Photodiode in eine nichtlineare Verzerrung im elektrischen Bereich gewandelt. Folglich sind optische PMD Kompensatoren theoretisch in der Lage, die Störung durch PMD vollständig aufzuheben, während dies beim direkten Empfang durch elektronische Kompensatoren nicht mehr möglich ist. Lediglich durch die Verwendung kohärenter Empfänger ist es möglich, eine lineare optisch-elektrische Wandlung durchzuführen, wodurch die Leistungsfähigkeit elektronischer PMD Kompensation wesentlich verbessert werden kann. Kohärente Empfänger sind mit einem höheren Implementierungsaufwand und -kosten verbunden, können aber zusätzlich zur PMD Kompensation zur Kompensation weiterer Störungen und zur Demodulation von höherwertigen Modulationsformaten genutzt werden.

Die Einstellung optischer Kompensatoren kann entweder *feed-back* oder *feed-forward* erfolgen. Bei der *feed-back* Einstellung wird nach dem Kompensator eine mit der PMD korrelierte Ausgangsgröße — jedoch nicht die PMD selbst — gemessen und durch kontinuierliche Veränderung des Kompensators optimiert. Diese Methode stellt die iterative Suche nach einem Optimum der Meßgröße dar, wobei im Allgemeinen nicht bekannt ist, wie die Änderung der Kompensatoreinstellung die Ausgangsgröße verändert. Es besteht daher die Gefahr, daß der Kompensator die Meßgröße auf ein lokales Extremum einstellt, ihr globales Optimum jedoch nicht findet. Gerade bei komplexen und leistungsfähigen Kompensatoren mit einer Vielzahl von Einstellmöglichkeiten wird die *feed-back* Ein-

stellung in aller Regel nicht zum optimalen Ergebnis führen. Da die in dieser Arbeit vorgestellten Kompensatoren ² für *feed-back* Einstellung zu komplex sind, kommt die *feed-forward* Einstellung zum Einsatz. Bei dieser Einstellung wird zusätzlicher Aufwand für eine Messung der PMD Eigenschaften der Faser betrieben, um daraus eine geeignete Einstellung des Kompensators zu berechnen. Auf diese Weise lassen sich auch komplexe Kompensatoren mit vielen Freiheitsgraden sinnvoll einstellen.

Bei der Entwicklung optischer Kompensatoren tritt das Problem auf, daß die exakte Bestimmung der für die Rekonstruktion einer gegebenen PMD Charakteristik nötige Kompensatoreinstellung ausschließlich für sehr einfache Kompensatorstrukturen möglich ist. Für komplexe Kompensatoren muß die PMD Charakteristik mit Näherungsalgorithmen bestimmt werden, die Leistungsfähigkeit eines Kompensators hängt somit nicht nur von seiner Komplexität sondern auch wesentlich vom Einstellalgorithmus ab.

Vor diesem Hintergrund werden in der vorliegenden Arbeit drei Themengebiete intensiv bearbeitet und mit neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen weiterentwickelt.

1.1.1 Optische Mehrkanal-PMD-Kompensation

Optische Kompensatoren besitzen aufgrund der in der Optik verwendeten kurzen Wellenlängen von $1,5 \mu\text{m}$ sehr enge Fertigungstoleranzen und sind schon allein deswegen sehr teuer. Da der einfache optische PMD Kompensator erster Ordnung die PMD nur in einem derart schmalen Frequenzband kompensiert, in dem nur ein einzelner WDM Kanal untergebracht werden kann, wird häufig der Wunsch nach Mehrkanal-PMD-Kompensatoren geäußert. Könnten sich mehrere WDM-Kanäle einen Kompensator teilen, so würden auch die Kosten des Kompensators geteilt, so daß sich eventuell Einsparmöglichkeiten ergeben. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiger Zweikanal-Kompensator entwickelt. Die Leistungsfähigkeit des Kompensators wird untersucht und mit einfachen PMD-Kompensatoren erster Ordnung verglichen.

1.1.2 PMD-Messung im Betrieb

Für die *feed-forward* Einstellung eines Kompensators ist eine genaue Messung der PMD-Charakteristik der Übertragungsfaser notwendig. Die PMD ist sowohl zeit- als auch frequenzvariant und ändert sich in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie Tempera-

²Abgesehen von den als Referenz herangezogenen Kompensatoren erster Ordnung.

tur oder Druck. Eine pauschale Aussage über die PMD-Eigenschaften einer Faser kann lediglich in Form von statistischen Erwartungswerten erfolgen, die genaue Ausprägung der PMD muß hingegen im Einzelfall gemessen werden — durch die Zeit- und Frequenzvarianz muß die Messung während der Datenübertragung in dem für die Übertragung genutzten Wellenlängenbereich stattfinden. Da die fehlerfreie Datenübertragung höchste Priorität besitzt, darf das Datensignal durch die Messung nicht beeinflusst werden, und eine Übertragung spezieller Meßsignale ist nicht zulässig. Eine solche *in-situ* Messung stellt daher besondere Anforderungen an das Meßverfahren. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Meßverfahren präsentiert, das aus einem beliebigen übertragenen Datensignal die PMD mit Hilfe eines Polarisationsvielfachempfängers extrahieren kann. Zum einen wird die Genauigkeit des Meßverfahrens untersucht, zum anderen wird das Verfahren für die Einstellung diverser PMD-Kompensatoren herangezogen. Durch einen Vergleich der Ausfallraten nach den derart eingestellten PMD-Kompensatoren wird die Verwendung des Meßverfahrens als Stellgröße für den *feed-forward* Einsatz untersucht.

1.1.3 Elektronische PMD-Kompensation nach kohärentem Empfänger

In den letzten Jahren erlebt die Forschung an kohärenten Empfängern eine Renaissance, nachdem sich kohärent empfangende Systeme mit ihrer besseren Empfindlichkeit Anfang der neunziger Jahre nicht gegen die günstigeren mit optischen Faserverstärkern und Direktempfänger ausgestatteten Systeme durchsetzen konnten (Vgl. [93] und [34]). Mittlerweile wird die Forschung an kohärenten Empfängern durch die Möglichkeit einer linearen optisch-elektrischen Wandlung motiviert. Auf diese Weise läßt sich die durch PMD verursachte Signalverzerrung linear in eine Verzerrung des elektrischen Signals überführen, die selbst im elektrischen Bereich reversibel ist. Somit ist theoretisch eine vollständige Kompensation der PMD mittels elektronischer Signalverarbeitung möglich. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus präsentiert und untersucht, der eine breitbandige PMD-Kompensation erlaubt.

In der Praxis wird die theoretisch erreichbare Qualität der Kompensation durch eine begrenzte Komplexität der Filter und durch die begrenzte Auflösung der analog-digital Wandler eingeschränkt werden. Die durch diese Einschränkung gegebenen Rahmenbedingungen werden in Simulationen eingebunden, um damit die Auswirkung auf eine Kompensation mittels FIR Filter oder eines digitalen Signalprozessors abschätzen zu können.

1.2 Kapitelübersicht

Im Kapitel 2 werden die für das Verständnis der PMD notwendigen physikalischen und mathematischen Grundlagen vermittelt. Dies beinhaltet die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf einer Glasfaser und die Betrachtung der dabei auftretenden Störeffekte wie der chromatischen Dispersion, Nichtlinearitäten und lokaler Doppelbrechung der Faser. Für die Beschreibung der Polarisierung einer elektromagnetischen Welle notwendigen mathematischen Werkzeuge und Zusammenhänge werden in Kapitel 2.3 ausführlich behandelt, da diese grundlegend für die Betrachtung der PMD Kompensatoren und Meßverfahren sind. Schließlich wird der Effekt der Modenkopplung erklärt, die den entscheidenden Unterschied zwischen lokaler Doppelbrechung und PMD ausmacht. Wichtige Größen wie die differentielle Gruppenlaufzeit, die Polarisationshauptzustände und der PMD Vektor werden vorgestellt und die statistischen Eigenschaften der PMD werden hergeleitet.

Kapitel 3 konzentriert sich auf die technischen Rahmenbedingungen der untersuchten Übertragungssysteme. Neben den Modulationsformaten werden Wellenlängenmultiplex-Systeme vorgestellt und die für die PMD wichtigen Eigenschaften beschrieben.

Die durch PMD verursachten Störungen müssen immer im Zusammenhang mit dem Rauschen betrachtet werden, denn erst durch das Rauschen ergibt sich die Unsicherheit bei der Detektion, die schließlich zu Bitfehlern führt. In optischen, direkt detektierenden Empfängern findet — wieder durch die Leistungsdetektion der Photodiode verursacht — eine Mischung von Rauschen und Signal statt. Die Verteilung der Rauschamplituden ist danach signalabhängig und kann zusätzlich nicht mehr durch eine Normalverteilung angenähert werden, wie dies bei anderen Problemen der Nachrichtentechnik üblich ist. In Kapitel 3.3 wird die signalabhängige Rauschverteilung hergeleitet und mit weiteren Näherungen und Bewertungskriterien verglichen. In Kapitel 3.4 wird schließlich die für numerische Simulationen häufig genutzte Monte-Carlo Simulation vorgestellt. Aufgrund des hohen Rechenaufwands für Monte-Carlo Simulationen wird Importance Sampling als Methode der Varianzreduktion zur Verringerung des Rechenaufwands am konkreten Beispiel der Erzeugung von Fasermodellen mit hoher PMD implementiert.

Nach den theoretischen Grundlagen beginnt in Kapitel 4 die Beschreibung von PMD-Meßverfahren. Dabei werden die grundlegenden und bekanntesten Verfahren vorgestellt, der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt jedoch auf den *in-situ* Meßverfahren, die eine Messung des PMD Vektors auf einer datenführenden Faser ohne eine Unterbrechung der Datenübertragung erlauben. Ein derart gemessener PMD Vektor eignet sich unter anderem

als Stellgröße für PMD Kompensatoren. Das im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Meßverfahren wird an dieser Stelle vorgestellt und diskutiert.

In Kapitel 5 werden schließlich verschiedene Ansätze zur Kompensation der PMD vorgestellt. Beginnend mit den optischen Kompensatoren werden verschiedene Anordnungen präsentiert und die Einstellalgorithmen erläutert. In diesem Zusammenhang werden die beiden vom Autor entwickelten Zweikanalkompensatoren vorgestellt und deren Wirkungsweise wird erklärt. In Kapitel 5.2 werden anschließend die Ansätze zur PMD Kompensation mit Hilfe elektronischer Signalverarbeitung nach einem kohärenten Empfänger behandelt. Dazu wird kurz das Prinzip kohärenter Detektion vorgestellt. Ein Algorithmus zur breitbandigen Kompensation der PMD wird vorgestellt und anhand numerischer Simulationen auf seine Fähigkeit zur Reduzierung der System-Ausfallraten untersucht. Die elektronischen Kompensatoren werden dabei als FIR-Filter, aber auch in einem digitalen Signalprozessor implementiert, wobei sowohl die Anzahl der Filterkoeffizienten und die zugehörige zeitliche Verzögerung, als auch die Anforderungen an eine Analog-Digital-Wandlung systematisch untersucht werden.