Adaptive Entzerrung des Glasfaser-Übertragungskanals mit optischen Filterstrukturen in hochbitratigen Übertragungssystemen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der Technischen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Marc Bohn

Kiel

2005

Dissertation eingereicht:	April 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Oktober 2005
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz Prof. Dr.-Ing. Edgar Voges Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 7

Marc Bohn

**Adaptive Entzerrung des Glasfaser-Übertragungs-
kanals mit optischen Filterstrukturen in
hochbitratigen Übertragungssystemen**

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5229-0

ISBN-13: 978-3-8322-5229-8

ISSN 1612-3425

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407/95 96 - 0 • Telefax: 02407/95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Meinen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz für sein Vertrauen, die Förderung der Arbeit und die tatkräftige Unterstützung aussprechen. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Voges und Herrn Prof. Dr.-Ing Ulrich Heute für die Übernahme der Korreferate.

Allen Kollegen und Kolleginnen am Lehrstuhl danke ich für die gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft, insbesondere meinen Freunden Christoph Wree und Jochen Leibrich.

Ein besonderes Dankeschön geht auch an die Kollegen in der Vorfeldabteilung der Entwicklung optischer Übertragungssysteme der Siemens AG in München. Zu nennen sind hier meine wechselnden Ansprechpartner, angefangen bei Christoph Glingener und Christian Scheerer, die mich überhaupt erst ermuntert haben zu promovieren, Georg Mohs, mit dem ich am Meisten Spass gehabt und die ersten Veröffentlichungen geschrieben habe, Eckhard Meissner und schließlich Peter Krummrich, der immer ein offenes Ohr hatte und mich super unterstützt hat. Die Laborexperthen Claus Weiske und Andreas Schöpflin haben mir in so mancher Situation mit Rat und Tat bei den Messungen weitergeholfen. Sowie Sander Jansen, mit dem ich in München Labor und Büro geteilt habe und jede Menge Spaß bei der Arbeit hatte.

Weiter möchte ich mich bei Gian-Luca Bona, Folkert Horst und Bert-Jan Offrein vom IBM Research, Zürich Laboratory bedanken, die mir für meine Arbeiten die optischen Filterstrukturen hergestellt und überlassen haben. Ohne die Messungen mit den Filterstrukturen wäre aus der Arbeit sicher nicht das geworden, was sie jetzt ist.

Bei meiner Freundin Amparo bedanke ich mich für die Hilfe bei der Korrektur und das Verständnis für die oftmals sehr knappe Zeit, insbesondere während der Endphase der Arbeit. Und last but not least, danke ich meinen Eltern, denn ohne deren Unterstützung hätte ich gar nicht studieren können.

München, April 2005

Marc Bohn

Kurzfassung

In aktuellen und zukünftigen hochbitratigen optischen Übertragungssystemen sind Lösungen zur adaptiven Entzerrung des Glasfaser-Übertragungskanals von großem Interesse. Mit wachsender Datenrate, wachsender Kanalanzahl und flexibleren optischen Netzen erhöhen sich die Komplexität und die Anforderungen an die optische Übertragungsschicht. Dies führt zu einer steigenden Anzahl von Ursachen für Verzerrungen im Übertragungskanal, zu geringeren Systemtoleranzen, einer kürzeren Übertragungslänge und letztendlich zu mehr kostspieligen optisch/elektrisch/optischen Wandlungen und Regenerationen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Verfahren der adaptiven Entzerrung des Glasfaser-Übertragungskanals mit elektrischen und optischen Filterstrukturen aufgezeigt, so daß die Systemtoleranzen und die Übertragungslänge gesteigert sowie die Anzahl der Regenerationen gesenkt werden können.

Modellierungen, Simulationen, Komponenten- und Systemmessungen bei einer Datenrate von 40Gb/s demonstrieren die Möglichkeiten und Grenzen von integriert optischen FIR-Lattice-Filtern zur adaptiven Entzerrung. Die Filterstruktur wird nachrichtentechnisch beschrieben. Unterschiedliche Ansätze zur Generierung eines adaptiven Rückkoppelsignals werden modelliert, bewertet und in Form von Simulationen sowie mektechnisch umgesetzt. Die statische Kompensation im Filterentwurf über das inverse System und die adaptive Entzerrung von limitierenden Fasereffekten wird gezeigt. Die betrachteten Effekte sind Chromatische Dispersion, Selbstphasenmodulation, Polarisationsmodendispersion und Abweichungen vom idealen Phasenverlauf in optischen Bauelementen sowie Kombinationen all dieser Verzerrungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Optische Übertragungstechnik	1
1.2	Aufbau optischer Übertragungssysteme	1
1.3	Motivation	5
1.4	Entzerrungsansätze	5
1.5	Struktur der Arbeit	8
2	Eigenschaften des Glasfaser-Übertragungskanals	9
2.1	Verluste und optische Verstärker	9
2.2	Chromatische Dispersion	10
2.3	Polarisationsmodendispersion	12
2.3.1	Beschreibung von polarisiertem Licht	13
2.3.2	Eigenschaften und Modellierung von PMD	17
2.3.2.1	Das Waveplatemodell	18
2.3.2.2	PSOP, PMD-Vektor	21
2.3.2.3	PMD erster und höherer Ordnung	24
2.4	Kerr-Effekt	26
2.4.1	Selbstphasenmodulation	27
2.4.2	Kreuzphasenmodulation	28
2.4.3	Vier-Wellen-Mischung	28
2.5	Weitere nichtlineare Faser-Effekte	29
2.5.1	Stimulierte Raman-Streuung	29
2.5.2	Stimulierte Brillouin-Streuung	30

3	Entzerrerstrukturen für den Glasfaser-Übertragungskanal	31
3.1	Grundlagen: Filter	31
3.2	Elektrische Entzerrer	35
3.2.1	Elektrische FIR-Filter und FIR-Filter mit quantisierter Rückkopplung	35
3.3	Optische Entzerrer	39
3.3.1	Optische FIR-Filter	40
3.3.1.1	FIR-Lattice-Filter	45
3.3.1.2	FIR-Lattice-Filter-Synthese: Berechnung der Latticekoeffizienten	47
3.3.2	Optische IIR-Filter	49
3.3.2.1	IIR-Ringresonator Filter	51
3.3.3	Technologie	54
3.3.3.1	Herstellung von SiON/SiO ₂ -Wellenleitern	57
4	Filterentwurf und Adaptionkriterien für optische Entzerrer	59
4.1	Modellierung des inversen Systems	59
4.2	Adaptive Entzerrung	61
4.2.1	Adaptionkriterien im Zeitbereich	64
4.2.1.1	Intersymbolinterferenz	64
4.2.1.2	Polarisationsgrad	66
4.2.1.3	Weitere Kriterien	69
4.2.2	Adaptionkriterien im Frequenzbereich	72
4.2.2.1	Spektrum des empfangenen elektrischen Signals	72
4.2.2.2	Weitere Kriterien	76
5	Simulationsergebnisse zur Entzerrung des Glasfaser-Übertragungskanals mit optischen IIR-Filtern	83
5.1	Entzerrung von Chromatischer Dispersion	83

6	Simulations- und Messergebnisse zur Entzerrung des Glasfaser-Übertragungskanal mit optischen FIR-Filtern	87
6.1	Modellierung des inversen Systems	87
6.1.1	Simulations- und Messergebnisse zur Entzerrung von Dispersion	88
6.1.2	Simulations- und Messergebnisse zur Entzerrung von PMD	94
6.1.3	Simulationsergebnisse zur Entzerrung von Gruppenlaufzeitschwankungen	98
6.2	Adaptive Entzerrung	101
6.2.1	Entzerrung im Zeitbereich	101
6.2.1.1	Simulationsergebnisse zur Intersymbolinterferenz	101
6.2.1.2	Simulationsergebnisse zum Polarisationsgrad als Regelkriterium	108
6.2.2	Entzerrung im Frequenzbereich über das elektrische Spektrum	111
6.2.2.1	Simulations- und Messergebnisse zur adaptiven Entzerrung von Dispersion	111
6.2.2.2	Simulations- und Messergebnisse zur adaptiven Entzerrung von Polarisationsmodendispersion	115
6.2.2.3	Simulations- und Messergebnisse zur gleichzeitigen adaptiven Entzerrung von Dispersion und Polarisationsmodendispersion	117
7	Zusammenfassung und Ausblick	123
A	Formelzeichen und Abkürzungen	127
A.1	Formelzeichen	127
A.2	Abkürzungen	129
B	Elektrische FIR-Filter Beschreibung	133

C Lösung von Ausgleichsproblemen	137
C.1 Gauß-Newton Verfahren	137
C.2 Levenberg-Marquardt-Verfahren	139
D Messaufbau	141
D.1 Bilder des Messaufbaus	141
D.2 Grafische Benutzeroberfläche	144
Literaturverzeichnis	147
Publikationsliste	157
Veröffentlichungen der Lehrstuhl - Reihe	159