

**Untersuchungen zur optischen
Einseitenband- und Restseitenbandübertragung
in hochbitratigen optischen Nachrichtensystemen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Torsten Wuth

Witten
2004

Dissertation eingereicht am: 07.10.2004
Tag der mündlichen Prüfung: 31.01.2005
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 6

Torsten Wuth

**Untersuchungen zur optischen
Einseitenband- und Restseitenbandübertragung in
hochbitratigen optischen Nachrichtensystemen**

Shaker Verlag
Aachen 2005

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 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3854-9

ISSN 1612-3425

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz für die Überlassung der interessanten Aufgabenstellung, die Förderung der Arbeit und sein Engagement bei der Betreuung. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute für die freundliche Übernahme des Korreferates bedanken.

Meinen Kollegen und Kolleginnen während meiner Zeit am Lehrstuhl danke ich für die produktive und unkomplizierte Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Wilfried Kaiser für die stete Diskussionsbereitschaft und Unterstützung.

Ebenfalls möchte ich Christina und Timo Hebebrand sowie Stefan Rehtanz für die Mühen bei der Durchsicht des Manuskriptes danken.

Nürnberg, Februar 2005

Torsten Wuth

Zusammenfassung

Optische Weitverkehrsnetze bilden heute das Rückgrat der weltweiten Sprach- und Datenkommunikation. Aufgrund des weltweit steigenden Bedarfs an Übertragungskapazität ist es notwendig die vorhandenen Ressourcen effektiver als bisher zu nutzen, um auch in Zukunft genügend Übertragungsbandbreite zur Verfügung stellen zu können. Daher wird in dieser Arbeit der Ansatz der Übertragung mit optischen Einseitenband- und Restseitenbandsignalen untersucht, um die hochbitratige optische Übertragung zu verbessern.

Heutige optische Übertragungssysteme arbeiten mit einer Kanaldatenrate von 10 Gb/s im Wellenlängenmultiplexbetrieb. Damit können Gesamtdatenraten von mehreren Tb/s über eine Glasfaser übertragen werden. Bei der nächsten Generation optischer Übertragungssysteme wird die Datenrate der einzelnen Kanäle auf 40 Gb/s erhöht werden. Während der Übertragung über die Glasfaser ist das Datensignal einer Vielzahl von Fasereffekten ausgesetzt, die die Übertragungsreichweite limitieren. Dazu gehören die Dämpfung, die chromatische Dispersion, die Polarisationsmodendispersion und eine Vielzahl nichtlinearer leistungsabhängiger Effekte. Die Verzerrung durch einige dieser Effekte ist zudem abhängig von der belegten Signalbandbreite.

Um die Gesamtdatenrate der Übertragungsfaser zu erhöhen und die Übertragungsqualität zu steigern, wird der Ansatz der Reduktion der belegten Bandbreite der einzelnen Übertragungskanäle verfolgt. Damit ist es möglich, den Kanalabstand in Wellenlängenmultiplexsystemen zu reduzieren und gleichzeitig die Toleranz gegenüber bandbreitenabhängigen Verzerrungseffekten zu erhöhen. Mit der Verringerung des Kanalabstandes geht eine Erhöhung der Gesamtdatenrate der Übertragungsfaser einher. Da die Information in heutigen optischen Übertragungssystemen mit Hilfe der Intensitätsmodulation in zwei redundanten Seitenbändern übertragen wird, bietet es sich an, eine Reduktion der belegten Bandbreite durch Eliminierung der redundanten Informationen zu erreichen. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit verfolgt und führt zur Einseitenband- bzw. zur Restseitenbandmodulation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Komponenten optischer Übertragungssysteme	3
2.1	Optische Sender	4
2.1.1	Direkte Modulation des Lasers	5
2.1.2	Phasenmodulator	5
2.1.3	Mach-Zehnder Modulator	6
2.1.4	Elektroabsorptionsmodulator	9
2.2	Glasfaser	10
2.2.1	Lineare Fasereffekte	12
2.2.1.1	Dämpfung	12
2.2.1.2	Chromatische Dispersion	13
2.2.1.3	Polarisationsmodendispersion	15
2.2.2	Nichtlineare Fasereffekte	18
2.2.2.1	Selbstphasenmodulation	20
2.2.2.2	Kreuzphasenmodulation	21
2.2.2.3	Vierwellenmischung	22
2.2.2.4	Stimulierte Raman-Streuung	22
2.2.2.5	Stimulierte Brillouin-Streuung	23
2.2.2.6	Faserparameter	24
2.3	Optische Verstärker	24
2.3.1	Faserverstärker	24
2.3.2	Raman-Faserverstärker	26
2.4	Optischer Empfänger	26
2.5	Bewertungskriterien	28

2.5.1	Augendiagramm	28
2.5.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	29
3	Modulationsformate	31
3.1	Systemtheoretische Eigenschaften der Zweiseitenbandmodulation	32
3.1.1	Zweiseitenbandmodulation mit Träger	32
3.1.2	Zweiseitenbandmodulation mit Trägerunterdrückung	34
3.1.3	Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals	35
3.2	Systemtheoretische Eigenschaften der Einseitenbandmodulation	37
3.2.1	Hilberttransformator	37
3.2.2	Analytisches Signal	39
3.2.3	Einseitenbandsender	39
3.2.3.1	Filtermethode	41
3.2.3.2	Phasenmethode (Hartley-Modulator)	41
3.2.3.3	Pilottonverfahren (Weaver-Modulator)	43
3.2.4	Detektion des Einseitenbandsignals	45
3.2.5	Kompatible Einseitenbandmodulation	46
3.3	Restseitenbandmodulation	48
3.3.1	Detektion des Restseitenbandsignals	49
3.4	Optische Einseitenband- und Restseitenbandsender	50
3.4.1	Aufbau eines Zweiseitenband-Referenzsystems	52
3.4.2	Realisierungsformen optischer Einseitenbandsender	55
3.4.2.1	Phasenmethode	55
3.4.2.2	Kompatible und linearisierte kompatible Einseitenband- modulation	65
3.4.3	Realisierungsformen optischer Restseitenbandsender	70
3.4.3.1	Filterformen	71
3.4.3.2	Restseitenbandübertragung ohne Faser	72
3.5	Zusammenfassung	73

4 Einkanalige Übertragung mit Einseitenband- und Restseitenbandsignalen	75
4.1 Lineare Übertragungseigenschaften	75
4.1.1 Zweiseitenbandmodulation mit Träger	77
4.1.2 Übertragungseigenschaften optischer ESB-Signale	78
4.1.2.1 Einseitenbandmodulation mit der Phasemethode und einem elektrischen Hilberttransformator	78
4.1.2.2 Einseitenbandmodulation mit der Phasemethode und einem optischen Hilberttransformator	83
4.1.2.3 Kompatible und linearisierte kompatible optische Einseitenbandmodulation	86
4.1.3 Übertragungseigenschaften bei optischer Restseitenbandübertragung	93
4.1.4 Vergleich der Ergebnisse der dispersiven Übertragung	96
4.2 Einfluss der Stimulierten Brillouin-Streuung	98
4.2.1 Systemaufbau	98
4.2.2 Messergebnisse	99
4.3 Einfluss der Selbstphasenmodulation	100
4.3.1 Unkompensierte Übertragung	100
4.3.1.1 Messtechnische Untersuchung	101
4.3.1.2 Simulative Untersuchung	106
4.3.1.3 Zusammenfassung der unkompenzierten Übertragung	108
4.3.2 Kompensierte Übertragung	109
4.3.3 Übertragung über mehrere Abschnitte	112
4.3.3.1 Ergebnisse	114
4.3.3.2 Zusammenfassung der kompensierten Übertragung	117
4.4 Einfluss der Polarisationsmodendispersion	117
4.4.1 Aufbau der Messanordnung	118
4.4.2 Messergebnis	118
4.4.3 Zusammenfassung des Einflusses von Polarisationsmodendispersion	121
4.5 Einsatz einer Raman-Quelle zur Reichweitensteigerung	121
4.5.1 Systemaufbau und Grundlagen der Raman-Verstärkung	121
4.5.2 Ergebnisse	123

4.5.3	Zusammenfassung der ramanunterstützten Übertragung	126
4.6	Zusammenfassung der einkanaligen Übertragung	126
5	DWDM-Übertragung	129
5.1	Lineares Übersprechen	130
5.2	Nichtlineare DWDM-Einflüsse	131
5.2.1	Simulationsaufbau	131
5.2.2	Simulationsergebnisse	132
5.2.3	Vergleich der Modulationsverfahren	137
5.3	Messtechnische Untersuchung	139
5.3.1	Messaufbau	139
5.3.2	Messergebnisse	139
5.3.2.1	Zweiseitenbandmodulation	141
5.3.2.2	Zweiseitenbandmodulation mit unsymmetrischer Filte- rung	143
5.3.2.3	Linearisierte kompatible Einseitenbandmodulation	144
5.4	Zusammenfassung	146
6	Zusammenfassung und Ausblick	149
A	Diskreter Hilberttransformator	151
B	Aufbau des PMD-Emulators	155
C	Abkürzungen	159
	Literaturverzeichnis	163
	List of LNT publications	175