

Aus der
Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der
Universität Paderborn

Stephan Hinz

**Optisches Polarisationsmultiplex
und Kompensation von Polarisations-
modendispersion bei 40 Gbit/s**



Cuvillier Verlag Göttingen

**Optisches Polarisationsmultiplex
und Kompensation von Polarisations-
modendispersion bei 40 Gbit/s**

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn

vorgelegte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stephan Hinz

aus Holzminden

Referent: Prof. Dr.-Ing. R. Noé

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. A. Thiede

Tag der mündlichen Prüfung: 27.06.2003

Paderborn 2003

D 14 – 191

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.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2003

ISBN 3-89873-975-9

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2004

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-975-9

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden hochratige optische Übertragungsstrecken mit Datenraten von 10, 20 und 40 Gbit/s aufgebaut. Als Datenformat konnte sowohl das bisher übliche NRZ-Format als auch die Übertragung mit Impulsen (RZ) realisiert werden. Experimentelle optoelektronische Komponenten aus Forschungslaboratorien sind hierbei charakterisiert worden. Derartige Systeme werden angesichts einer durch Internet-Anwendungen exponentiell steigenden Nachfrage nach Übertragungskapazität voraussichtlich im Laufe der nächsten Jahre in die Netze der Telekommunikations-Unternehmen (Netzbetreiber) einziehen.

Mit steigender Datenrate zeigt sich insbesondere bei alten Lichtwellenleiterstrecken Polarisationsmodendispersion (PMD) als begrenzender Faktor der Streckenlänge. In der vorliegenden Arbeit werden mehrere Experimente zur Kompensation der PMD dargestellt, um diese Beschränkung umgehen zu können. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Erfassung PMD-bedingter Signalverzerrungen durch spektrale Filterung des detektierten elektrischen Datensignals. Dieses empfindliche Verfahren ist in der Praxis kostengünstig zu realisieren und liefert schnell eindeutige Aussagen über die optische Signalqualität. Parallel dazu wurde der weltweit erste funktionierende PMD-Kompensator als industrieller Prototyp entwickelt und dem interessierten Fachpublikum auf der ECOC 2000-Ausstellung vorgeführt.

Erstmalig konnte in der vorliegenden Arbeit ein praktikables Polarisationsmultiplex-Übertragungssystem aufgebaut werden, mit dem die Kapazität von Lichtwellenleiterstrecken verdoppelt wird. Im Gegensatz zu früheren Experimenten anderer Arbeitsgruppen benötigt es nur einen Laser als Lichtquelle und arbeitet mit gleichen Datenraten in beiden übertragenen Kanälen. Die Polarisations-

II

regelung zur Kanaltrennung am Empfänger arbeitet automatisch; eingangs genannte Datenraten und -formate werden unterstützt. Das System hat sich als ausreichend tolerant gegenüber polarisationsabhängiger Dämpfung und Polarisationsmodendispersion erwiesen. Letzteres wurde in der vorliegenden Arbeit erstmalig für das RZ-Format genauer untersucht. Mit moderatem Aufwand können bestehende Systeme bandbreite-effizienter arbeiten und mehr Daten pro Zeiteinheit übertragen. Eine kostspielige Aufrüstung der gesamten Strecke mit optischen Verstärkern für weitere Wellenlängenbereiche oder das Verlegen von neuen Lichtwellenleiterkabeln entfällt.

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Formelzeichen	VII
1 Einführung	1
2 Hochratige optische Datenübertragung	5
2.1 Einführung	5
2.2 Datenübertragung bei 10 Gbit/s	6
2.2.1 Aufbau des Senders	6
2.2.2 Aufbau des Empfängers	7
2.2.3 Verstärker für Datensignale	13
2.2.4 Elektroabsorptionsmodulator	18
2.3 Datenübertragung bei 20 Gbit/s	23
2.3.1 Aufbau des Senders	23
2.3.2 Aufbau des Empfängers	25
2.3.3 Verstärker für Datensignale	27
2.3.4 Photodiode mit Verstärker	29
2.4 Datenübertragung bei 40 Gbit/s	32
2.4.1 Aufbau des Senders	32
2.4.2 Aufbau des Empfängers	33
2.5 Zusammenfassung	35

3	Polarisationsmodendispersion	37
3.1	Einführung	37
3.2	Ursachen, Beschreibung und Auswirkungen	38
3.2.1	Ursachen von optischer Polarisationsdispersion	38
3.2.2	Beschreibung von Polarisationsdispersion	39
3.2.3	Polarisationsdispersion höherer Ordnung	43
3.2.4	Auswirkung auf die Datenübertragung	45
3.2.5	Auswirkung im Zeit- und Frequenzbereich	49
3.3	Detektion von Polarisationsdispersion	52
3.3.1	Anforderungen an einen PMD-Detektor	52
3.3.2	Signalanalyse durch Korrelation	53
3.3.3	Signalanalyse durch Filterung	55
3.3.4	Filterbank für 10 Gbit/s	62
3.3.5	Filterbank für 40 Gbit/s	64
3.3.6	Dimensionierung der Filterverstärkung	66
3.3.7	Zusammenhang Zeit- und Frequenzbereich	68
3.4	Kompensation von Polarisationsdispersion	69
3.4.1	Elektronische PMD-Kompensation	69
3.4.2	Optische PMD-Kompensation	70
3.4.3	Senderseitige PMD-Kompensation	73
3.4.4	Kompensator mit variabler Verzögerungsleitung	74
3.4.5	Kompensator mit einer festen Verzögerungssektion	76
3.4.6	Verteilter PMD-Kompensator	79
3.4.7	Vielstufiger Kompensator auf x-Schnitt Lithiumniobat Basis mit Wellenausbreitung in y-Richtung	83
3.4.8	Mehrstufiger Kompensator auf Basis von Lithiumniobat mit Wellenausbreitung in z-Richtung bei 10 Gbit/s	86

3.4.9	Mehrstufiger Kompensator auf Basis von Lithiumniobat mit Wellenausbreitung in z-Richtung bei 40 Gbit/s . . .	90
3.5	Zusammenfassung	91
4	Polarisationsmultiplex	95
4.1	Einführung	95
4.2	Polarisationsmultiplex-Übertragung	96
4.3	Übertragungssystem mit Korrelation	98
4.4	Übertragungssystem mit Interferenzdetektion	100
4.5	Einfluß polarisationsabhängiger Dämpfung	105
4.6	Einfluß von Polarisationsmodendispersion	106
4.6.1	Übertragung im NRZ-Format	106
4.6.2	Übertragung mit Pulsen	109
4.6.3	Auswirkung der Pulsbreite	114
4.6.4	Augenschließung	115
4.6.5	Zunahme der Bitfehlerquote	116
4.6.6	Empfindlichkeitsverlust bezüglich Rauschen	117
4.7	Zusammenfassung	120
5	Zusammenfassung	123
A	Erbium-dotierte Faserverstärker	125
A.1	Einführung	125
A.2	Aufbauprinzip von EDFA	125
A.3	Einkoppeleinheit für Pumpaserdioden	127
A.4	Realisierung von EDFA	129
A.5	Zusammenfassung	130
	Literaturverzeichnis	131

Liste der verwendeten Formelzeichen

Lateinische Symbole

b	Informationsbit
B	Bandbreite
c	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
d	Tastverhältnis
D	Dispersion
f	Frequenz
f_0	Bezugs- oder Mittenfrequenz
f_c	Nyquist-Frequenz
f_o	Optische Frequenz
h	Impulsantwort
H	Übertragungsfunktion
i, I	Strom
k	Wellenzahl im freien Raum
l	Autokorrelationsfunktion
L	Leistungsdichtespektrum
n	Material-Brechungsindex
p	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
P	Leistung
$\mathbf{q}$	Einheitsvektor schneller PSP ⁺
Q	Filtergüte, Gütefaktor
r	Entscheidungsschwelle
r_0	Datenrate eines (PolDM-)Kanals
r_g	Gesamtdatenrate (beider PolDM-Kanäle)
R	Responsivität
S	Streuparameter, Stokesparameter
t	Zeit
T	Symboldauer
u, U	Spannung
z	Koordinate in Ausbreitungsrichtung

Griechische Symbole

α	Dämpfungskoeffizient
β	Ausbreitungskonstante
γ	Leistungsaufteilung PSP
η	Wirkungsgrad
ϑ	Winkel auf Poincaré-Kugel
λ	Wellenlänge
Λ	Schwebungswellenlänge
Λ_g	Gruppenschwebungswellenlänge
τ	Signallaufzeit
τ_d	Gruppenlaufzeitdifferenz
τ_l	PMD-Koeffizient
τ_p	Zeitdifferenz (PolDM-)Symbole
ω	Kreisfrequenz
Ω	Polarisationsvektor

Abkürzungen

AM	Amplitudenmodulation, <i>Amplitude Modulation</i>
ASE	Verstärkte spontane Emission, <i>Amplified Spontaneous Emission</i>
ASK	Intensitätsumtastung, <i>Amplitude-Shift Keyed</i>
b-to-b	Messung ohne Übertragungsstrecke, <i>back-to-back</i>
BER	Bitfehlerquote, <i>Bit Error Ratio</i>
BERT	Bitfehlerquotenmeßplatz, <i>Bit Error Ratio Tester</i>
BPF	Bandpaßfilter, <i>Band-Pass Filter</i>
CD	Chromatische Dispersion, <i>Chromatic Dispersion</i>
CS	Trägerunterdrückung, <i>Carrier Suppression</i>
CW	Dauerstrich, <i>Continuous Wave</i>
DCF	Dispersionskompensierender Lichtwellenleiter, <i>Dispersion Compensating Fiber</i>
DEMUX	Demultiplexer
DFB	Verteilte Rückkopplung, <i>Distributed Feedback</i>
DGD	Gruppenlaufzeitdifferenz, <i>Differential Group Delay</i>
DSF	Dispersionsverschobener Lichtwellenleiter, <i>Dispersion-Shifted Fiber</i>

EAM	Elektroabsorptions-Modulator, <i>Electro-Absorption Modulator</i>
EDFA	Erbium-dotierter Faserverstärker, <i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
EO	Augenöffnung, <i>Eye Opening</i>
EOP	Augenschließung, <i>Eye Opening Penalty</i>
EPT	Polarisationstransformator mit endlosem Nachführbereich, <i>Endless Polarization Transformer</i>
FM	Frequenzmodulation, <i>Frequency Modulation</i>
FIR	Endliche Impulsantwort, <i>Finite Impulse Response</i>
FSK	Frequenzumtastung, <i>Frequency-Shift Keying</i>
FF	Bistabiler Multivibrator, <i>Flip Flop</i>
FFT	Schnelle Fouriertransformation, <i>Fast Fourier Transform</i>
FWHM	Volle Halbwertsbreite, <i>Full-Width Half-Maximum</i>
HPF	Hochpaßfilter, <i>High-Pass Filter</i>
IFFT	Inverse schnelle Fouriertransformation, <i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IIR	Unendliche Impulsantwort, <i>Infinite Impulse Response</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LWL	Lichtwellenleiter („Glasfaser“)
MMIC	Monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung, <i>Monolithic Microwave Integrated Circuit</i>
MPT	Motorisierter Polarisationstransformator, <i>Motorized Polarization Transformer</i>
MUX	Multiplexer
NRZ	Datensignal, das nach einer ‚1‘ nicht auf ,0‘ -Niveau zurückkehrt, <i>Non-Return-to-Zero</i>
NWA	Netzwerkanalysator, <i>Network Analyzer</i>
OSNR	Optisches Signal-Rauschleistungs-Verhältnis, <i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OSNRP	Optischer Empfindlichkeitsverlust bzgl. Rauschens, <i>Optical Signal-to-Noise Ratio Penalty</i>
PC	Personalcomputer, <i>Personal Computer</i>
PD	PMD-Detektor, <i>PMD Detector</i>
PCD	Polarisationsabhängige chromatische Dispersion, <i>Polarization-dependent Chromatic Dispersion</i>

PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, <i>Probability Density Function</i>
PDG	Polarisationsabhängige Verstärkung, <i>Polarization Dependent Gain</i>
PDL	Polarisationsabhängige Dämpfung, <i>Polarization Dependent Loss</i>
PLL	Phasenregelkreis, <i>Phase Locked Loop</i>
PMD	Polarisationsmodendispersion, <i>Polarization Mode Dispersion</i>
PMF	Polarisationserhaltender Lichtwellenleiter, <i>Polarization Maintaining Fiber</i>
PolDM	Polarisationsmultiplex, <i>Polarization Division Multiplexing</i>
PRBS	Pseudozufallsfolge, <i>Pseudo Random Bit Sequence</i>
PSK	Phasenumtastung, <i>Phase-Shift Keying</i>
PSP	Hauptpolarisation(szustand), <i>Principal State of Polarization</i>
PT	Polarisationstransformator, <i>Polarization Transformer</i>
RX	Empfänger, <i>Receiver</i>
RZ	Datensignal, das nach einer ‚1‘ auf ‚0‘-Niveau zurückkehrt, <i>Return-to-Zero</i>
SAW	Oberflächenwelle, <i>Surface Acoustic Wave</i>
SBS	Stimulierte Brillouin-Streuung, <i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SDH	Synchrone Digitale Hierarchie, <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SHG	Erzeugung der zweiten Harmonischen, <i>Second Harmonic Generation</i>
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis, <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SOP	Polarisation(szustand), <i>State of Polarization</i>
SPM	Selbstphasenmodulation, <i>Self-Phase Modulation</i>
SSB	Einseitenband, <i>Single-Side Band</i>
SSMF	Standard Einmodenfaser, <i>Standard Single-Mode Fiber</i>
STM	Synchrones Transport-Modul, <i>Synchronous Transport Module</i>
TDM	Zeitmultiplex, <i>Time Division Multiplexing</i>
TLF	Taktlinienfilter, <i>Clock-Line Filter</i>
TPF	Tiefpaßfilter, <i>Low-Pass Filter</i>
TW	Wanderwellen, <i>Travelling Wave</i>
TX	Sender, <i>Transmitter</i>

VCO	Spannungsgesteuerter Oszillator, <i>Voltage Controlled Oscillator</i>
VNWA	Vektorieller Netzwerkanalysator, <i>Vector Network Analyzer</i>
WDM	Wellenlängenmultiplex, <i>Wavelength Division Multiplex</i>
w.E.	willkürliche Einheiten, <i>arbitrary units</i>
XOR	Exklusiv-Oder, <i>Exclusive Or</i>
XPM	Kreuzphasenmodulation, <i>Cross-Phase Modulation</i>

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 Übertragungsstrecken 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