Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik

Dissertation

**Evaluierung und Optimierung ausgewählter
Modulationsverfahren mit Direktempfang für
optische Netze bis 100 Gb/s**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der Technischen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Annika Dochhan

Kiel, April 2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Speidel
Datum der mündlichen Prüfung: 14. Juni 2013

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 13

Annika Dochhan

**Evaluierung und Optimierung ausgewählter
Modulationsverfahren mit Direktempfang
für optische Netze bis 100 Gb/s**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2632-0

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

Diese Arbeit stellt die Zusammenfassung meiner Forschungstätigkeiten am Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik an der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel dar. Bei dieser Arbeit betreute mich Herr Prof. Dr. Werner Rosenkranz. Ihm gilt mein Dank für seine Anleitung und Unterstützung, die Möglichkeit, an unterschiedlichen, spannenden Projekten mitzuarbeiten, und für alle fruchtbaren Diskussionen. Ich habe in dieser Zeit sehr viel gelernt! Vor allem bin ich für die Möglichkeit dankbar, das außerordentlich gut ausgestattete Labor für optische Kommunikationstechnik des Lehrstuhls nahezu unbegrenzt nutzen zu können. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Speidel aus Stuttgart für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Heute und Herrn Prof. Dr.-Ing. Höher dafür, dass Sie eine sehr freundliche und faire Prüfungskommission gebildet haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem langjährigen Bürokollegen Jochen Leibrich. Die fachlichen Diskussionen waren durch seinen breiten theoretischen Hintergrund stets äußerst gewinnbringend, und gerade in der Anfangszeit habe ich viel dadurch gelernt. Aber auch später waren kritische Diskussionen über aktuelle Mess- und Simulationsergebnisse stets hilfreich. Nicht zuletzt trugen auch die nichtfachlichen Gespräche zum Gelingen dieser Arbeit bei. Meinen anderen Kollegen, mit denen ich während meiner Zeit am LNT zusammengearbeitet habe, möchte ich ebenfalls danken, insbesondere Murat Serbay (ohne den ich gar nicht am LNT angefangen hätte), Stefan Schöllmann, Patrick Faraj, Chunmin Xia, Christina Hebebrand, Abdulamir Ali, Roi Rath, Christian Ruprecht und Johannes von Hoyningen-Huene. Für alle technische und organisatorische Unterstützung bedanke ich mich bei Sandra Robien und Petra Usinger.

Seit der Zeit meines Studiums verbrachte ich viel Zeit mit den Kollegen der Arbeitsgruppen Computational Electromagnetics (Numerische Feldberechnung) und Integrierte Systeme und Photonik (vormals Allgemeine- und Theoretische Elektrotechnik) in verschiedensten Aktivitäten außerhalb der Arbeit und beim gemeinsamen Mittagessen. Allen ehemaligen Kollegen von CEM, ISP und ATE vielen Dank für die Zeit zusammen und den Spaß mit Euch!

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit oder Teilen dieser Arbeit danke ich Jan-Rainer Riethdorf, Volker Liersch, Sabine Pischke und Stefan Zimmermann.

Zuletzt möchte ich meiner Familie danken für alle Unterstützung und Ermutigung. Ich danke von Herzen meinem Verlobten Jan-Rainer Riethdorf für all die Geduld und Liebe, vor allem in der Endphase dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Stetig steigender Bedarf an Übertragungskapazität bei sich wenig ändernder Glasfaserinfrastruktur erfordert den Einsatz fortschrittlicher mehrstufiger Modulationsformate. Im Metronetz mit einer Übertragungreichweite von bis zu 500-700 km ist dabei Kosteneffizienz die stärkste Prämisse bei der Auswahl des speziellen Formats. Da das zur Verfügung stehende OSNR bei diesen Strecken größer ist als in der Langstreckenübertragung, bieten sich vor allem Formate mit Direktempfang an. In dieser Arbeit werden verschiedene 2- bis 16-stufige Modulationsformate mit Direktempfang vorgestellt und eingehend hinsichtlich ihrer Eignung für die 100-Gb/s-Übertragung untersucht. Dabei gliedert sich die Arbeit in drei Hauptblöcke:

Zunächst wird auf das Thema Dispersionskompensation mithilfe von Faser-Bragg-Gittern (FBGs) eingegangen. Aufgrund ihrer kostengünstigen Herstellung und ihrer geringen Übertragungslatenzzeit eignen sie sich in besonderer Weise für den Einsatz in der Mittelstreckenübertragung. Bedingt durch den Herstellungsprozess besitzen sie eine Störung im Phasengang, sogenannte Phasenrippel, die sich je nach Modulationsformat unterschiedlich auf die Qualität der Signale auswirken. Diese Auswirkungen werden für eine Vielzahl von Formaten und unterschiedliche FBG-Typen theoretisch, simulativ und messtechnisch untersucht. Es zeigt sich, dass die Rippel, insbesondere breitbandiger FBGs, für Metronetze wenig ins Gewicht fallen.

Im zweiten Abschnitt werden mehrstufige, amplitudenmodulierte Formate in unipolarer und bipolarer Form hinsichtlich ihrer Toleranz gegenüber typischen Übertragungseinflüssen in Metronetzen evaluiert. Dabei wird auf schmalbandige Filterung, chromatische Dispersion, Polarisationsmodendispersion und Kerr-Nichtlinearität eingegangen. Es zeigt sich, dass durch eine Anpassung der Amplitudenstufen die Toleranz, insbesondere hinsichtlich chromatischer Dispersion, erhöht werden kann. Gerade bipolare Formate zeigen eine vielversprechende Leistungsfähigkeit.

Im letzten Teil der Arbeit wird eine 100-Gb/s-Übertragung mit 33%-RZ-DQPSK bei 56 GBaud mit Direktdetektion messtechnisch realisiert und die Leistungsfähigkeit des Modulationsformats hinsichtlich der Anforderungen des Metronetzes charakterisiert. Es zeigt sich gegenüber optischer Filterung, die beim Durchlaufen von Add-Drop-Multiplexern im Netz geschieht, gewachsen. Die Toleranz gegenüber chromatischer Dispersion kann durch schmalbandige Filterung sogar gesteigert werden. Auch unter dem Einfluss von Polarisationsmodendispersion und in der WDM-Übertragung zeigt sich 33%-RZ-DQPSK für das 100-Gb/s-Metronetz geeignet.

Abstract

The continuously increasing demand for transmission capacity on a slowly developing fiber infrastructure requires the employment of new multi-level modulation formats. In networks for metro reach with a transmission length of up to 500-700 km cost efficiency has the strongest priority for the choice of a particular modulation format. Since the available OSNR is higher for these distances as compared to long-haul transmission, especially modulation formats with direct detection are promising candidates. This thesis describes different 2 to 16-level modulation formats with direct detection and evaluates their benefits and issues in the context of 100 Gb/s metro transmission in detail. It can be divided into three main blocks:

First, the topic dispersion compensation by the use of fiber Bragg gratings (FBGs) is discussed. Due to their low manufacturing cost and their low transmission latency FBGs are particularly suited for metro transmission. However, the fabrication process leads to a slight distortion of the phase response, so called phase ripple, which exhibit different influences on the quality of the transmitted signal, dependent on the modulation format used. These influences are explored for various types of FBGs theoretically, simulatively and by measurements. It is shown that phase ripples, especially in the case of broadband FBGs have minor influence in metro networks.

The second block is dedicated to multi-level amplitude modulation formats in unipolar and bipolar form. The formats are tested with respect to their tolerance towards typical transmission impairments in metro networks, such as narrow-band optical filtering, chromatic dispersion, polarization mode dispersion and Kerr non-linearity. It is shown that by careful optimization of the amplitude levels of the optical signal the robustness, especially towards chromatic dispersion, can be significantly increased. In particular, bipolar formats show a good performance for most of the impairments.

The last part of the thesis explores the experimental realization of 100 Gb/s direct detection transmission using the 33%-RZ-DQPSK format at 56 GBaud. The performance of this modulation format with respect to requirements of metro networks is evaluated. It is robust towards optical filtering which occurs within the network at optical add-drop multiplexers. The tolerance towards chromatic dispersion can be even increased by lowering the optical bandwidth. Moreover, under the influence of polarization mode dispersion and within the WDM transmission 33%-RZ-DQPSK confirms its suitability for 100 Gb/s metro networks.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Das optische Übertragungssystem.....	3
2.1	Aufbau des optischen Senders	4
2.1.1	Continuous Wave Laser	4
2.1.2	Elektrisches Datensignal	4
2.2	Externe Modulatoren	5
2.2.1	Phasenmodulator.....	6
2.2.2	Mach-Zehdner-Modulator.....	7
2.2.3	Alternative: Direkt modulierter Laser.....	11
2.3	Multiplexer/Demultiplexer	11
2.4	Übertragungseffekte auf der Glasfaser	12
2.4.1	Dämpfung	12
2.4.2	Chromatische Dispersion	13
2.4.3	Polarisationsmodendispersion.....	14
2.4.4	Nichtlinearitäten.....	16
2.5	Optischer Verstärker	20
2.6	Empfänger.....	22
2.6.1	O/E-Konversion: Fotodiode.....	22
2.6.2	Differenzieller Empfang mit Balanced Receiver	22
2.6.3	Kohärenter Empfang.....	24
2.7	Filterung.....	25
2.7.1	Filterkaskadierung im Netz.....	25
2.7.2	Empfängerfilter.....	26
2.8	Faser-Bragg-Gitter zur Dispersionskompensation.....	29
2.8.1	Funktionsweise eines DCFBG.....	30
2.8.2	DCFBG-Typen.....	31
2.8.3	Störungen in der Übertragungsfunktion - Phasenrippel.....	32

2.9 Gütekriterien für die optische Übertragung	35
2.9.1 Augendiagramm - Eye Opening Penalty	35
2.9.2 Empfängerempfindlichkeit und Bitfehlerrate	36
3 Modulationsformate für optischen Direktempfang	39
3.1 Amplitudenmodulation	39
3.1.1 Sender- und Empfängerstruktur	40
3.1.2 Empfangslogik	41
3.1.3 Augendiagramme und Spektren	43
3.2 Optische Duobinärmodulation	46
3.3 Phasenmodulation	47
3.3.1 Sender- und Empfängerstruktur	47
3.3.2 Augendiagramme und Spektren	48
3.3.3 Differenzielle Vordcodierung	49
3.4 Kombinationen aus Phasen- und Amplitudenmodulation	51
3.4.1 Sender- und Empfängerstruktur	51
3.4.2 Empfangslogik	53
3.4.3 Augendiagramme und Spektren	53
4 Systemeinfluss von Phasenripplestörungen in DCFBGs	57
4.1 Sinusförmige Phasenripple	57
4.1.1 Binäre Amplitudenmodulation	58
4.1.2 Optische Duobinärmodulation	59
4.1.3 Differenzielle binäre Phasenmodulation	60
4.1.4 Differenzielle Quaternäre Phasenmodulation	62
4.2 Zufällige Phasenripple im linearem Einkanalssystem	63
4.2.1 Statistische Simulation	63
4.2.2 Messung	69
4.3 Zufällige Phasenripple im realen WDM-Szenario	73
4.4 Elektronische Entzerrung von Phasenripplestörungen im realen WDM-Szenario	79
5 Optimierung amplitudenmodulierter Modulationsformate für Metronetze	84

5.1	Empfängerempfindlichkeit	84
5.2	Einfluss optischer und elektrischer Filter	86
5.2.1	Filteroptimierung	86
5.2.2	Kaskadierung optischer Filter im Netz	90
5.3	Optimierung von Amplitudenstufen	90
5.3.1	Optimierung hinsichtlich chromatischer Dispersion	91
5.3.2	Optimierung hinsichtlich Polarisationsmodendispersion	98
5.3.3	Optimierung hinsichtlich Selbstphasenmodulation	102
5.4	Zusammenfassung und Bewertung	107
6	DQPSK für das optische 100 Gb/s-Metronetz	108
6.1	Mehrstufige ASK- und ODB-Formate	109
6.1.1	Optische Duobinärmodulation	109
6.1.2	Quadratische-Polarisations-ASK	110
6.1.3	Quadratische ASK und quadratische ODB	112
6.2	Voruntersuchungen zum Aufbau von 33%-RZ-DQPSK	114
6.3	Back-to-Back Charakterisierung von 33%-RZ-DQPSK	120
6.3.1	Filterung und chromatische Dispersion	120
6.3.2	Polarisationsmodendispersion	123
6.4	Übertragungseigenschaften von 33%-RZ-DQPSK	127
6.4.1	Taktrückgewinnung	127
6.4.2	Einkanal-Übertragung	128
6.4.3	WDM-Übertragung	136
6.5	Zusammenfassung DQPSK	143
7	Zusammenfassung und Bewertung	144
	Anhang A: Einfluss von Filterung auf NRZ- und RZ-Pulse	146
	Anhang B: Abkürzungen	148
	Anhang C: Formelzeichen	155
	Anhang D: Geräte und Komponenten	166
	Literaturverzeichnis	170

Eigene Veröffentlichungen	180
Liste der Veröffentlichungen der Lehrstuhl-Reihe	182