

# **Design of Efficient and Robust Forward Error Correction for Real-Time Application in Coherent Optical Communication Systems**

## **Entwurf einer effizienten, robusten und echtzeitfähigen Kanalcodierung für kohärente optische Übertragung**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

**Doktor-Ingenieur**  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

**Andreas Bernhard Bisplinghoff**  
aus Forchheim

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung : 13. November 2015

Vorsitzender des Promotionsorgans : Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter : Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß  
Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Andreas Bisplinghoff**

**Design of Efficient and Robust Forward  
Error Correction for Real-Time Application in  
Coherent Optical Communication Systems**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4380-8

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Zusammenfassung

Derzeit in Entwicklung oder Einführung befindliche Modems für kohärente optische Langstreckenübertragung im dichten Wellenlängenmultiplex (DWDM) verwenden zumeist soft-decodierte Fehlerkorrekturverfahren (SD FEC). Zum einen wird mit der dadurch verbesserten Korrekturleistung die Reichweite einstufiger Modulationsformate deutlich erhöht, wie etwa bei quaternärer Phasenumtastung (QPSK). Zum anderen können dann auch rauschempfindlichere höherstufige Modulationsformate wie z.B. 16-wertige Quadraturamplitudenmodulation (16QAM) zum Einsatz kommen um die spektrale Effizienz des Übertragungssystems zu steigern.

In der optischen Kommunikationstechnik wurden bislang meist herkömmliche Hard-Decision Codes (HD FEC) als generisches Modul zur Fehlerkorrektur eingesetzt ohne das Modulationsformat oder spezielle Eigenschaften des Übertragungskanalns explizit zu berücksichtigen. Wie in der vorliegenden Arbeit ausgeführt, müssen jedoch zur Entwicklung besonders leistungsfähiger Fehlerkorrekturverfahren Modulationsformat, Kanaleigenschaften und Kanalcodierung gemeinsam betrachtet werden.

Trotz stetigen Fortschritts in Mikroelektronik und ASIC-Technologie spielt die Implementierungskomplexität beim Entwurf leistungsfähiger Fehlerkorrekturverfahren immer noch eine zentrale Rolle. Vor dem Hintergrund gleichzeitig wachsender Übertragungsgeschwindigkeiten und immer anspruchsvollerer Algorithmen in der digitalen Signalverarbeitung bleiben neuartige Fehlerkorrekturverfahren für den Produkteinsatz weiterhin stark komplexitätsbeschränkt.

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit dem Entwurf eines effizienten und robusten Fehlerkorrekturverfahrens für den Einsatz in kohärenten optischen Übertragungssystemen mit bis zu 200Gbit/s Datendurchsatz. Als Basiskonfiguration für die Optimierung und anschließende Charakterisierung des Fehlerkorrekturverfahrens wird das zu Beginn der Arbeit industrietübliche Verfahren differenziell vorcodierter quaternärer Phasenumtastung im Polarisationsmultiplex (PM-DE-QPSK) mit 20% Code-Redundanz angenommen. Neben dieser Grundkonfiguration unterstützt das untersuchte Fehlerkorrekturver-

fahren binäre Phasenumtastung (BPSK), 16-wertige Quadraturamplitudenmodulation und 7.4% Code-Redundanz.

In dieser Arbeit wird vor allem geklärt, ob die begrenzt zur Verfügung stehenden Schaltungs-Ressourcen eines ASICs der neuesten Generation besser für die lokale Optimierung eines binären Kanalcodes genutzt werden sollten, oder in eine übergreifende Detektion des differenziell vorcodierten QPSK Signals unter Berücksichtigung der Kanalcodierung investiert werden sollten. Das gemeinsame Decodieren von differenziellem Code und des Kanalcodes wird im Folgenden Turbo Differential Decoding (TDD) genannt. Sowohl für die lokale Optimierung der Kanalcodierung als auch für Turbo Differential Decoding kommen binäre Low-Density Parity-Check (LDPC) Codes zum Einsatz, die dafür bekannt sind, dass mit ihnen näherungsweise das Shannon-Limit erreicht werden kann. Die LDPC Codes werden mit einem schwachen Hard-Decision Code verknüpft um restliche Bitfehler zu korrigieren, die typischerweise bei iterativ soft-decodierten Fehlerkorrekturverfahren in einem sogenannten Error Floor beobachtet werden.

Als weitere Ergebnisse stellt die Dissertation neue Analysemethoden und Entwurfsregeln zur Konstruktion eines effizienten TDD Codecs vor. Der so entwickelte TDD Codec erreicht für Übertragungskanäle mit additivem weißen Gauß-Rauschen (AWGN) hervorragende Performance. Unter anderem wird ein leicht zu implementierender differentieller SISO (soft-in-soft-out) Decoder präsentiert, der in einen Turbo Differential Decoder mit mehr als 100Gbit/s Datendurchsatz integriert werden kann. Außerdem wird eine vereinfachte Metrik für kohärente soft-Detektion des differenziell encodierten QPSK Signals hergeleitet um die Performance herkömmlicher Fehlerkorrekturverfahren basierend auf LDPC Codes deutlich zu verbessern. Eine Studie zu Komplexität und Machbarkeit gewährt Einblick in fundamentale Abhängigkeiten zwischen Performance, Komplexität und Verlustleistung, die für den Entwurf eines effizienten Fehlerkorrekturverfahrens eine zentrale Rolle spielen. Durch die Implementierung des untersuchten TDD Verfahrens in ein 28 nm ASIC mit bis zu 200Gbit/s Datendurchsatz wird die Machbarkeit von TDD in kohärenten optischen Übertragungssystemen nachgewiesen.

Die zu erwartende Performance von TDD und dessen Stabilität unter realistischen Kanalbedingungen wird mittels Monte-Carlo Simulation bewertet. Ein hierfür entwickeltes Simulationsmodell bildet dominante Signalstörungen, wie sie typischerweise bei kohärenter optischer Übertragung auftreten, mit Hilfe von stark vereinfachten Modellen nach. Durch Einsatz sogenannter General Purpose Computation on Graphics Processing Units (GPGPU) konnte die Geschwindigkeit der Monte-Carlo Simulation im Rahmen dieser

Arbeit um Größenordnungen erhöht werden. Auf diese Weise werden statistisch signifikante Ergebnisse auch bei sehr niedrigen Bitfehlerraten, bis hin zu  $\text{BER} = 10^{-15}$ , erreicht. Im Rahmen der Performance-Charakterisierung wurde ein durch sogenannte Phase Slips hervorgerufenen Versagen der TDD Fehlerkorrektur beobachtet. Eine besonders hohe Phase Slip Rate ist bei stark nichtlinearen Verzerrungen während der optischen Übertragung zu erwarten. Eine in dieser Arbeit neu eingeführte Trägerphasenrückgewinnung reduziert die Slip-Wahrscheinlichkeit erheblich, so dass das beobachtete Versagen der TDD Fehlerkorrektur zusammen mit einer geringfügigen Modifikation des TDD Algorithmus weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Abschließend wird die hervorragende Grundperformance von TDD auf dem AWGN Kanal mittels Echtzeitmessung bei vollem Datendurchsatz und Bitfehlerraten deutlich unter  $10^{-15}$  nachgewiesen, sowie die Robustheit der Lösung unter anspruchsvollen, realistischen Kanalbedingungen bestätigt.



# Abstract

Next generation coherent optical modems for use in dense wavelength-division multiplexed (DWDM) long-haul transmission systems employ soft-decoded forward error correction (FEC) both to increase the reach of single-level modulation formats, such as quaternary phase shift keying (QPSK), and to enable use of higher order modulation formats, such as 16-ary quadrature amplitude modulation (16QAM).

In contrast to conventional hard-decision codes, which are often applied as a self-contained FEC component, regardless of modulation format and link characteristic, the design of high-performance soft-decoded FEC schemes requires joint consideration of modulation, channel characteristics, and coding.

Despite continuing progress in CMOS technology constrained processing resources must be taken into account when aiming at constantly growing data rates, increasingly sophisticated digital signal processing, and high-performance soft-decoded FEC schemes.

This thesis discusses the design of an efficient and robust soft-decoded FEC scheme for application in coherent optical communication systems with up to 200Gbit/s throughput. Polarization multiplexed differentially encoded quaternary phase shift keying (PM-DE-QPSK) and 20% coding redundancy are considered as the baseline for FEC optimization and performance characterization. As an extension to this baseline configuration the studied FEC scheme also supports binary phase shift keying (BPSK), 16QAM, and 7.4% code redundancy.

It is investigated in the first place, whether limited ASIC resources are better spent on local optimization of a binary FEC codec or for joint detection and decoding which combines iterative differential and FEC decoding into a so called turbo differential decoder (TDD). Binary low-density parity-check (LDPC) codes, concatenated with a weak hard-decision cleanup code, are considered both for performance optimized standalone FEC as well as for TDD. LDPC codes are known for their capability to approach the Shannon limit. The cleanup code corrects remaining bit errors of an error floor which is typically observed for iterative soft-decoding.

This thesis provides new analysis methods and design rules for the construction of a TDD codec which provides excellent performance on the additive white Gaussian noise (AWGN) channel. A simplified metric for coherent soft-differential decoding of DE-QPSK is derived to improve the performance of conventional LDPC decoding, and a low-complexity soft-in-soft-out differential decoder is presented which can be integrated into a TDD with more than hundred Gbit/s throughput. A complexity and feasibility study gives insight into substantial trade-offs between performance, complexity and power dissipation. As ultimate proof of concept the studied TDD codec was finally implemented in a 28 nm ASIC with up to 200Gbit/s throughput.

Expected performance and robustness under realistic optical link conditions are evaluated via Monte-Carlo simulation, which includes simple models for impairments typical for coherent optical communication. General purpose computation on graphics processing units (GPGPU) was used to accelerate Monte-Carlo performance simulation, which then provides statistically significant results down to very low bit error ratios, even approaching  $10^{-15}$ . A phase slip induced TDD failure was discovered for heavy non-linear distortions on the optical fiber. This failure is addressed by slip-reduced carrier phase recovery and by modification of the turbo differential decoding schedule. Eventually, both the excellent baseline performance of TDD on the AWGN channel down to bit error ratios well below  $10^{-15}$  and the robustness towards very demanding channel conditions of the optical link are verified via real-time measurement.

# Contents

<b>Zusammenfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Fundamentals, System Context and Methodology</b>	<b>5</b>
2.1 Coherent Optical Communication . . . . .	6
2.1.1 Transmitter . . . . .	7
2.1.2 Optical Channel . . . . .	9
2.1.3 Coherent Receiver . . . . .	11
2.1.4 Carrier Phase Recovery, Differential Encoding, and Phase Slips . . . . .	13
2.2 Forward Error Correction . . . . .	17
2.2.1 Shannon Limit . . . . .	17
2.2.2 FEC Concepts . . . . .	18
2.2.3 Standardized and State of the Art FEC for Optical Communication . . . . .	19
2.2.4 Low-Density Parity-Check Codes . . . . .	21
2.2.5 Message Passing Decoding . . . . .	23
2.3 Characterization of FEC Codes and Decoders . . . . .	24
2.3.1 Figures of Merit . . . . .	24
2.3.2 Hard-Decision Bounded-Distance Decoding . . . . .	26
2.3.3 EXIT Chart Analysis . . . . .	26
2.3.4 Code Graph Analysis . . . . .	30
2.3.5 Simulation Techniques . . . . .	31
2.4 ASIC Technology . . . . .	38
2.4.1 Feasibility Limits . . . . .	38

2.4.2	Progress in ASIC Technologies . . . . .	41
<b>3</b>	<b>FEC Design</b>	<b>45</b>
3.1	Requirements Specification . . . . .	45
3.1.1	Spectral Efficiency . . . . .	46
3.1.2	Performance . . . . .	46
3.1.3	Real-Time Implementation . . . . .	47
3.1.4	Configurability . . . . .	47
3.1.5	Robustness . . . . .	48
3.2	Bit-Interleaved LDPC Coded Modulation . . . . .	49
3.2.1	Structured LDPC Codes . . . . .	50
3.2.2	Algorithm Selection for BICM Decoding . . . . .	53
3.2.3	Optimized Degree Distribution for LDPC Decoding . . . . .	66
3.3	Turbo Differential Decoding . . . . .	74
3.3.1	Soft-Input Soft-Output Differential Decoding . . . . .	77
3.3.2	Optimized Degree Distribution for Turbo Differential Decoding . . . . .	88
3.3.3	Compound Interleaver for Turbo Differential Decoding . . . . .	104
3.3.4	Multi-Rate Turbo Differential Decoding . . . . .	108
3.4	LDPC Code Design . . . . .	114
3.4.1	Girth Maximization for Shift-LPDC Codes . . . . .	115
3.4.2	Girth-Dependent Performance . . . . .	119
<b>4</b>	<b>Implementation Aspects</b>	<b>123</b>
4.1	Complexity Considerations . . . . .	124
4.1.1	Algorithmic Complexity . . . . .	125
4.1.2	Architectural Complexity . . . . .	128
4.1.3	Gate-Level Complexity . . . . .	136
4.2	Feasibility . . . . .	140
4.2.1	General Feasibility Limits . . . . .	140
4.2.2	Routability . . . . .	142
4.3	Power Consumption and Toggle Activity . . . . .	150
4.3.1	Convergence Behavior of TDD . . . . .	151
4.3.2	Iteration Control Algorithms . . . . .	153
4.3.3	Gate-Level Activity and Number Representation . . . . .	154

<b>5</b>	<b>Performance and Robustness Characterization</b>	<b>157</b>
5.1	AWGN Performance Baseline . . . . .	157
5.1.1	LDPC Decoding . . . . .	158
5.1.2	Turbo Differential Decoding . . . . .	159
5.1.3	Error Floor and Post-Cleanup Performance . . . . .	160
5.2	Robustness Characterization . . . . .	168
5.2.1	Enhanced Channel Model for Coherent Optical Communication . . . . .	169
5.2.2	Phase Noise . . . . .	170
5.2.3	Slip-Induced TDD Failure . . . . .	171
5.2.4	Polarization Dependent Loss . . . . .	174
5.2.5	DE-16QAM Constellation Mismatch . . . . .	175
<b>6</b>	<b>Improved Non-Linear Phase Noise Tolerance</b>	<b>179</b>
6.1	Laser Linewidth and Non-linear Phase Noise Model . . . . .	179
6.2	Viterbi-Viterbi Carrier Phase Recovery . . . . .	181
6.3	Slip-Reduced Carrier Phase Recovery . . . . .	183
6.4	Hybrid Turbo Differential Decoding . . . . .	185
6.5	Combined Characterization of CPR and TDD . . . . .	187
<b>7</b>	<b>Real-Time Measurements</b>	<b>191</b>
7.1	Test Setup . . . . .	191
7.2	Base Performance for Emulated AWGN . . . . .	193
7.3	Non-Linear Robustness . . . . .	195
<b>8</b>	<b>Summary and Outlook</b>	<b>199</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>203</b>
	<b>List of Figures</b>	<b>214</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>221</b>
	<b>Acknowledgement</b>	<b>223</b>