

Jochen Leibrich

Digitale Modulationsverfahren und Signalverarbeitungs- algorithmen für flexible optische Datenübertragung



Lehrstuhl für Nachrichten-
und Übertragungstechnik

Digitale Modulationsverfahren und Signalverarbeitungsalgorithmen für flexible optische Datenübertragung

Habilitationsschrift

Jochen Leibrich

Kiel
2018

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz

Prof. Dr.-Ing. Klaus Petermann

Prof. Dr.-Ing. Berthold Lankl

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmidt

Tag des Habilitationsvortrags und -kolloquiums:

11. Januar 2017

Kieler Berichte zur Nachrichtentechnik

Band 18

Jochen Leibrich

**Digitale Modulationsverfahren und
Signalverarbeitungsalgorithmen für flexible
optische Datenübertragung**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., Habil.-Schr., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6295-3

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

Das Anfertigen einer Habilitationsschrift will gut überlegt sein. Dabei steht zunächst nicht das „Wie“ im Vordergrund, sondern das „Ob“. Der Nutzen des bereits von der Dissertation bekannten beträchtlichen Arbeitsaufwandes drängt sich in der heutigen Zeit gerade in den Ingenieurwissenschaften nicht wirklich auf: Für eine wissenschaftliche Karriere hat die Habilitation an Bedeutung eingebüßt, und für berufliche Betätigung außerhalb der Hochschulwelt erscheint sie auf den ersten Blick vollständig überflüssig.

So kam ich im Sommer 2013 nach einem guten halben Jahr Elternzeit mit gebremster Motivation hinsichtlich der Weiterarbeit an der bereits begonnenen Habilitationsschrift zurück an den Lehrstuhl für Nachrichten- und Übertragungstechnik an der Universität in Kiel. Ich bin Herrn Professor Werner Rosenkranz von Herzen dankbar für seine klare Position in dieser Zeit, dass die Fertigstellung der Arbeit nicht zur Disposition stünde. Wenn auch anfänglich mit wenig Begeisterung, so entstand kurzfristig eine Planung, welche Aspekte noch zu beleuchten wären, um eine in sich schlüssige Geschichte erzählen zu können, und ein gutes Jahr und drei Publikationen später war die erste Version tatsächlich fertig, von der sich die hier vorliegende Arbeit nur an wenigen Stellen unterscheidet.

So wären diese Arbeit und damit die gesamte Habilitation ohne die bereichernde langjährige Zusammenarbeit mit Professor Rosenkranz niemals möglich gewesen. Aber auch anderen Beteiligten am Habilitationsverfahren möchte ich an dieser Stelle herzlich danken: Professor Berthold Lankl, Professor Klaus Petermann und Professor Gerhard Schmidt waren bereit, mir ein großes Stück ihrer Zeit zu schenken, indem sie die Arbeit begutachteten. Stellvertretend für alle Mitglieder der Habilitationskommission bedanke ich mich bei Professor Christian G. Schäffer, der aus Hamburg für die mehrmaligen Sitzungstermine inklusive Habilitationsvorlesung und -kolloquium die weiteste Anreise von allen hatte. Aber auch der Weg vom Kieler Westufer zur Technischen Fakultät auf dem Ostufer, den viele Kommissionmitglieder entsprechend oft hinter sich gebracht haben, um den Fortgang des Verfahrens zu ermöglichen, ist nicht zu unterschätzen, und so will ich auch hier großen Dank aussprechen.

Mit Annika habe ich das Büro über einen lange Zeitraum geteilt, das war eine tolle und wertvolle gemeinsame Zeit. Nicht minder gerne denke ich an die Zeit mit Semjon, der nach Annikas Abschluss ihren Platz einnahm. Die Liste aller anderen Kollegen, die mir über die Jahre wertvoll geworden sind, ist lang, und die Erwähnung jeder/s einzelnen ist mir wichtig: Danke Abdulamir, Ali, Christian, Christina, Chunmin, Dennis, Jiani, Johannes, Murat, Patrick, Petra, Roi, Sandra, Stefan und Susmita!

Wie viel meiner Familie als Basis für alles Tun in dieser Arbeit enthalten ist, ist gerade für einen so langen Zeitraum nur sehr schwer in Worte zu fassen, darum sei an dieser Stelle einfach ein von Herzen kommendes Danke niedergeschrieben.

Zurückblickend, und um den Gedankengang zu Beginn dieses Vorworts zum Ende zu führen, hat sich der mit der Habilitation verbundene Arbeitsaufwand in vielen kleinen und großen Dingen als lohnend erwiesen, so dass ich glücklich bin, diesen Weg bis zum Ende gegangen zu sein!

Kiel, im Sommer 2018

Jochen Leibrich

Zusammenfassung

Hauptthema dieser Arbeit ist die Flexibilisierung der spektralen Effizienz in optischen Übertragungssystemen. Zentraler Ansatz ist dabei die systematische Behandlung digitaler Modulationsverfahren.

Die Amplitudenumtastung wird um eine Variante erweitert, bei der die Bits auf eine Gruppe von Symbolen abgebildet werden. Die Konstellation ist bereits bei reeller Amplitudenumtastung mehrdimensional. Die erarbeitete Entwurfsmethodik liefert die Anzahl an Konstellationspunkten, ihre Positionierung im Raum und die Abbildung der zu übertragenden Bits. Durch Erweiterung der Entwurfsmethodik auf Phasenumtastung und Quadraturamplitudenmodulation entstehen einfache Ausdrücke für die Bitfehlerwahrscheinlichkeit mehrerer konkreter Modulationsformate mit einer hohen Dichte an Werten für die spektrale Effizienz. Diese Ausdrücke werden simulativ und messtechnisch überprüft.

Hiernach erfolgt die Anwendung im optischen Übertragungskanal. Die Eigenschaften des optischen Kanals erfordern diverse Signalverarbeitungsverfahren zur Kompensation der eingebrachten Störgrößen. Bei kohärenter Detektion ist eine Trägersynchronisation erforderlich. Nach einer Übersicht über die verschiedenen Verfahren werden zwei Methoden im Detail betrachtet. Weiterhin ist die Entzerrung der Eigenschaften der optischen Faser erforderlich. Es wird ein entsprechender Überblick gegeben und die grundlegendsten Verfahren werden messtechnisch angewendet.

Als Alternative zur digitalen Modulation im Zeitbereich wird OFDM diskutiert. In der Hauptsache wird die Intensitätsmodulation behandelt. Im optischen Kanal ist die Implementierung anspruchsvoll, weswegen eine detaillierte Modellierung stattfindet.

Abschließend wird die WDM-Technologie als Mittel zur flexiblen Ausnutzung der Bandbreite des optischen Kanals behandelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Überblick	2
2	Verfahren für digitale Einträgermodulation	5
2.1	Allgemeine Betrachtung	5
2.1.1	Modellierung der betrachteten Übertragungskanäle	6
2.1.2	Binäre Modulation	13
2.1.3	Mehrstufige reelle Amplitudenumtastung	17
2.1.4	Phasenumtastung	44
2.1.5	Quadraturamplitudenmodulation	55
2.1.6	Zwischenfazit	71
2.2	Spezielle Betrachtung für die optische Nachrichtentechnik	72
2.2.1	Intensitätsmodulation mit Direktdetektion	74
2.2.2	Kombinierte Phasen- und Intensitätsmodulation mit differentieller Detektion	86
2.2.3	I-Q-Modulation mit kohärenter Detektion	89
3	Synchronisationsverfahren	97
3.1	Taktsynchronisation	97
3.2	Trägersynchronisation	98
3.2.1	Modellierung des Phasenrauschens	99

3.2.2	Übersicht über die Verfahren	101
3.2.3	Entscheidungsbasierte Trägerphasenschätzung	103
3.2.4	Trägerphasenschätzung nach Viterbi und Viterbi	106
3.2.5	Messungen	116
4	Entzerrungsverfahren	123
4.1	Allgemeine Verfahren	124
4.1.1	Lineare Verfahren	124
4.1.2	Nichtlineare Verfahren	128
4.1.3	Schätzung von Datenfolgen	132
4.2	Entzerrung des optischen Kanals	133
4.2.1	Modellierung des Übertragungsmediums	134
4.2.2	Entzerrung bei direkter Detektion	140
4.2.3	Entzerrung linearer Kanaleigenschaften bei kohärenter De- tektion	141
4.2.4	Entzerrung nichtlinearer Kanaleigenschaften bei kohären- ter Detektion	145
5	OFDM als Mehrträgerverfahren	149
5.1	Allgemeine Betrachtung	150
5.1.1	Systemaufbau	150
5.1.2	Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandlung	153
5.1.3	Guardintervall und Entzerrung	160
5.1.4	Synchronisation	163
5.2	Spezielle Betrachtung für die optische Nachrichtentechnik	165
5.2.1	Intensitätsmodulation mit Direktdetektion	165
5.2.2	I-Q-Modulation mit kohärenter Detektion	180
6	Wellenlängenmultiplexverfahren	183
6.1	Klassischer Wellenlängenmultiplex	183

6.2	Flexgrid	184
6.3	Anwendungsszenarien für flexible Modulationsverfahren	185
7	Zusammenfassung	187
A	Modellierung des Messaufbaus als AWGN-Kanal	191
B	Entwurf des Empfängerfilters im AWGN-Kanal mit gezielter Fehlanpassung	197
C	Abkürzungen	201
D	Formelzeichen	203
	Alphabetisches Literaturverzeichnis	215
	Liste der Veröffentlichungen der Lehrstuhl - Reihe	231