



Florian Jackisch

Erweiterung der Leistungsfähigkeit von Hybrid-Fiber-Coax-Netzen für die hochdatenratige Kommunikation



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Erweiterung der Leistungsfähigkeit von Hybrid-Fiber-Coax-Netzen für die hochdatenratige Kommunikation

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von Florian Jackisch
aus Halberstadt

eingereicht am: 4. Juni 2020
mündliche Prüfung: 16. September 2020

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Joachim Speidel
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck

Druckjahr: 2021

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Band 67

Florian Jackisch

**Erweiterung der Leistungsfähigkeit von Hybrid-Fiber-
Coax-Netzen für die hochdatenratige Kommunikation**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7942-5

ISSN 1865-2484

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig. Während dieser Zeit entwickelte ich gemeinsam mit den Kooperationspartnern *IAF Institut für angewandte Funksystemtechnik GmbH* und *KWS Electronic Test Equipment GmbH* einen Messempfänger für DOCSIS 3.1, der von KWS als *AMA 310* vertrieben wird [Ele18]. Mein Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung von Empfänger-Algorithmen mithilfe von *Software Defined Radio*. Diese Entwicklungsarbeit bildet den Grundstein der weitergehenden Forschung, die in dieser Arbeit beschrieben wird.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei den Menschen, welche diese Arbeit ermöglicht haben. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Joachim Speidel für die Übernahme des Koreferats und Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck für den Vorsitz der Prüfungskommission. Ganz besonders bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers für die fachlichen, aber auch die persönlichen Ratschläge. Er stand mir während aller Phasen der Promotion mit Rat und Tat zur Seite. Darüber hinaus hat Prof. Reimers über Jahrzehnte das Institut für Nachrichtentechnik geleitet und maßgeblich zu einem respektvollen Umgangston beigetragen. Ich werde den fachlichen Austausch mit den Kollegen vermissen, aber auch das soziale Miteinander, beispielsweise die Kaffeepausen, die Institutsausflüge, die Weihnachtsfeiern oder die Staffelmaraathons. Dabei sind mir viele Kollegen über die Jahre als Freunde ans Herz gewachsen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Mark Hoyer, Jonas von Beöczy, Fabian Schriber, Lucca Richter und Stefan Ilsen für die Durchsicht dieser Arbeit.

Abschließend gilt ein großer Dank meiner Familie. Ich konnte mich jederzeit auf die Unterstützung meiner Eltern verlassen, ob in der Kindheit, beim Studium oder der Fertigstellung dieser Arbeit. Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meiner Frau Meike, die immer an meiner Seite ist. Sie ermutigte mich zur Promotion, motivierte mit liebevollen Worten und hatte stets ein offenes Ohr für meine Sorgen. Ich freue mich auf die neuen Herausforderungen, denen wir uns gemeinsam widmen werden.

Braunschweig, 27. Februar 2021

Florian Jackisch

Abstract

The worldwide volume of data delivered over the Internet doubles approximately every three years. To cope with this challenge, cable network operators deploy the *Data Over Cable Service Interface Specification* (DOCSIS) within their *Hybrid Fiber Coax* (HFC) networks. The DOCSIS 3.1 transmission standard was introduced in 2013. Compared to earlier versions, DOCSIS 3.1 features a revised physical layer which enables data rates in the gigabit-per-second range. This physical layer consists of the *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) modulation scheme with large *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) symbols and *Low-Density Parity-Check* (LDPC) codes for error correction.

This thesis examines improvements to the spectral efficiency of HFC data transmissions. The PHYSIM simulation software, which has been developed specifically for this purpose, enables a detailed analysis of the DOCSIS 3.1 downstream within different HFC channel models. The results show that the distance between the spectral efficiency of DOCSIS 3.1 and the theoretical Shannon limit is more than 6 dB in many channels. In addition, configurations with a *Roll-Off* complicate the initial synchronization of DOCSIS 3.1 signals.

An improved physical layer should use a more powerful *Bit-Interleaved Coded Modulation* (BICM) chain, reduce the influence of the cyclic prefix and simplify synchronization. Based on these findings, two different systems are proposed. The optimization approach A1 modifies the physical layer of DOCSIS 3.1 slightly. For instance, longer LDPC codes improve the ability to correct transmission errors and *Overlapped Frequency Domain Equalization* compensates interference in channels with long echoes. While these approaches increase the complexity of receivers and lead to higher transmission latencies, they also reduce the gap to the Shannon limit by several dB. Additionally, a new *bootstrap* symbol simplifies the initial synchronization process.

Increased spectral efficiencies can also be achieved with the optimization approach A2. A2 requires complex modifications to the physical layer, e. g. improved LDPC codes and *Non-Uniform Constellations* (NUCs). Furthermore, A2 uses *Filter-Bank Multi-Carrier* (FBMC) modulation with *Offset-QAM* (OQAM) to reduce interference and *Out-Of-Band* emissions. The FBMC/OQAM filters are optimized specifically for HFC channels.

Kurzfassung

Das weltweite Datenaufkommen im Internet verdoppelt sich etwa alle drei Jahre. Um diesem Bedarf nachzukommen, setzen Betreiber von Fernseekabelnetzen den Übertragungsstandard *Data Over Cable Service Interface Specification* (DOCSIS) für die Internetübertragung in *Hybrid-Fiber-Coax*-(HFC)-Netzen ein. Die 2013 eingeführte Version DOCSIS 3.1 ermöglicht dank einer im Vergleich zu den Vorversionen überarbeiteten Bitübertragungsschicht (englisch *Physical Layer*) Datenraten im Gigabit-pro-Sekunde-Bereich. Dieser Physical Layer besteht aus dem Modulationsverfahren *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) mit großen *Quadrature-Amplitude-Modulation*-(QAM)-Symbolen sowie *Low-Density-Parity-Check*-(LDPC)-Codes für den Fehlerschutz.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie die spektrale Effizienz bei der Datenübertragung in HFC-Netzen gegenüber DOCSIS 3.1 weiter verbessert werden kann. Dazu wird mithilfe der eigens entwickelten Simulationsumgebung *PHYSIM* der Physical Layer des DOCSIS-3.1-Downstreams in verschiedenen HFC-Kanälen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abstand zwischen der spektralen Effizienz von DOCSIS 3.1 und der theoretischen Shannon-Grenze in vielen Kanälen mehr als 6 dB beträgt. Zudem erschweren Konfigurationen mit einem *Roll-Off* die initiale Synchronisation von DOCSIS-3.1-Signalen.

Ein verbesserter Physical Layer sollte eine leistungsfähigere *Bit-Interleaved-Coded-Modulation*-(BICM)-Kette verwenden, den Einfluss des *Cyclic Prefix* reduzieren und die Synchronisation erleichtern. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden zwei unterschiedliche Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Der Optimierungsansatz A1 nimmt leichte Modifikationen am Physical Layer von DOCSIS 3.1 vor. Beispielsweise können mithilfe von längeren LDPC-Codewörtern mehr Übertragungsfehler korrigiert werden. Zudem ermöglicht *Overlapped Frequency Domain Equalization* (OFDE) eine Kanalkorrektur bei langen Echos, wodurch Interferenzen reduziert werden. Dies erhöht einerseits die Komplexität von Empfängern und die Latenz der Übertragung, verringert andererseits aber den Abstand zur Shannon-Grenze im Vergleich zu DOCSIS 3.1 um mehrere dB. Zusätzlich wird die Synchronisation durch ein neues *Bootstrap*-Symbol erleichtert.

Eine verbesserte spektrale Effizienz wird auch durch den Optimierungsansatz A2 erzielt. Dieser erfordert größere Modifikationen am Physical Layer, beispielsweise durch verbesserte LDPC-Codes und *Non-Uniform Constellations* (NUCs). Weiterhin

verwendet A2 das Übertragungsverfahren *Filter-Bank Multi-Carrier* (FBMC) mit *Offset-QAM* (OQAM), um Interferenzen und *Out-Of-Band*-Emissionen zu reduzieren. Die FBMC/OQAM-Filter werden speziell für HFC-Kanäle optimiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Datenübertragung mit DOCSIS	5
2.1	Frequenzbereiche und Full-Duplex	5
2.2	Low-Density-Parity-Check-(LDPC)-Codes	8
2.3	Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	10
2.4	Framestruktur	11
2.5	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)	13
2.6	Kanalmodelle für HFC-Netze	16
3	Simulationsumgebung PHYSIM	17
3.1	Softwarearchitektur	17
3.2	Grafische Oberfläche	19
4	Grenzen des DOCSIS-Downstreams	23
4.1	Spektrale Effizienz im AWGN-Kanal	23
4.1.1	Definition der Shannon-Grenze	24
4.1.2	Definition des quasi-fehlerfreien Empfangs	24
4.1.3	Einfluss der BICM-Kette	28
4.1.4	Einfluss der Guard Bands	32
4.1.5	Einfluss des Cyclic Prefix	34
4.1.6	Einfluss der Signalisierungsträger	35
4.1.7	Analyse anhand von Beispiel-Konfigurationen	38
4.1.8	Spektrale Effizienz der bestmöglichen Parameter-Konfigurationen	41
4.2	Spektrale Effizienz in Echokanälen	43
4.2.1	Modulation Error Ratio (MER)	45
4.2.2	Spektrale Effizienz der bestmöglichen Parameter-Konfigurationen	46
4.3	Synchronisierung mithilfe des Cyclic Prefix	49
4.3.1	Schätzung des Timing Offsets	49
4.3.2	Schätzung des Fine Frequency Offsets	50
4.4	Komplexität	53

4.5	Ansätze zur Optimierung	54
5	Optimierung A1: Verbesserung des bestehenden Physical Layers	55
5.1	Längere LDPC-Codes	55
5.2	OFDM ohne Cyclic Prefix	57
5.3	Neue Framestruktur	61
5.3.1	Adaption des ATSC-3.0-Bootstraps	61
5.3.2	Beispiel: Synchronisierung mithilfe der neuen Framestruktur	65
5.4	Auswirkungen auf die Anzahl der Signalisierungsträger	70
5.5	Auswirkungen auf die spektrale Effizienz	72
5.6	Auswirkungen auf die Komplexität des Demodulators	73
5.7	Auswirkungen auf die Latenz der Übertragung	74
6	Optimierung A2: Entwurf eines neuartigen Physical Layers	77
6.1	Einsatz einer modifizierten ATSC-3.0-BICM-Kette	77
6.1.1	Verbesserte LDPC-Matrizen	78
6.1.2	Ungleichförmige Konstellationen	81
6.1.3	Anpassungen für HFC-Netze	83
6.2	FBMC/OQAM statt OFDM	86
6.2.1	FBMC/OQAM-Modulation	87
6.2.2	Übersicht typischer FBMC-Filter	91
6.2.3	Optimierung von FBMC-Filtern	92
6.3	Reduktion der Guard Bands	98
6.4	Neue Framestruktur	99
6.5	Auswirkungen auf die spektrale Effizienz	103
6.6	Auswirkungen auf die Komplexität des Demodulators	107
6.7	Auswirkungen auf die Latenz der Übertragung	109
7	Vergleich der Optimierungsansätze	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Abkürzungen	117
	Symbole	119
	Literatur	127
	Veröffentlichungen und Vorträge des Autors	139
	Vom Autor betreute studentische Arbeiten	141