

Signalverarbeitung für die Relay-gestützte Datenübertragung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)
der Universität Bremen

von

Dipl.-Ing. Petra Weitkemper

Tag des öffentlichen Kolloquiums: 18. Januar 2013
Gutachter der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. K.-D. Kammeyer
Prof. Dr.-Ing. V. Kühn
Weitere Prüfer: Prof. Dr.-Ing. R. Laur
Prof. Dr.-Ing. S. Paul



Germering im Juni 2013

Forschungsberichte aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik
der Universität Bremen

Band 25

Petra Weitkemper

**Signalverarbeitung für die
Relay-gestützte Datenübertragung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Bremen, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2020-5

ISSN 1437-000X

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 Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Arbeitsbereich Nachrichtentechnik der Universität Bremen entstanden. Ich hatte das Glück, Teil eines Instituts mit einer außergewöhnlichen, konstruktiven Arbeitsatmosphäre zu sein. Für die Möglichkeit, in diesem besonderen Institut arbeiten zu dürfen und für die fachliche und menschliche Unterstützung möchte ich mich bei allen ehemaligen Kollegen und ganz besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Kammeyer bedanken. In dieser Zeit habe ich Dank der offenen Atmosphäre sehr viel mehr gelernt, als ich in dieser Arbeit wiedergeben kann. Von den anregenden Diskussionen mit meinen Kollegen und der breiten Themenvielfalt im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik profitiere ich nach wie vor sehr.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Kammeyer für die Betreuung der Arbeit, für die vielen Anregungen während meiner Zeit am ANT und insbesondere für die Geduld und die Anmerkungen bezüglich dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kühn danke ich für die fachliche Betreuung in meiner Anfangszeit am ANT, für die zeitnahe Erstellung des Zweitgutachtens und für die wertvollen Kommentare zu dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Paul und Prof. Dr.-Ing. Rainer Laur danke für ihre Tätigkeit als Prüfer.

Hohen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat neben den Gutachtern insbesondere Herr Dr.-Ing. Wübben, der bei der Durchsicht der Arbeit sehr viel Zeit und seine fachliche Kompetenz investiert hat. Meinen Zimmerkollegen, Herrn Dr.-Ing. Klaus Knoche und Dr.-Ing. Peter Klenner danke ich für die gute Gesellschaft und netten Gespräche. Für die finanzielle Unterstützung möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken.

Tiefe Dankbarkeit empfinde ich für meine Familie, die den Grundstein für meinen Weg zu dieser Dissertation gelegt hat, indem sie mich immer ermutigt und unterstützt haben. Ohne den Rückhalt und Zuspruch durch meine Mutter und meine Schwestern wäre diese Arbeit wahrscheinlich nicht entstanden und ohne das Vorbild und die Erinnerung an meinen Vater wäre

ich womöglich nicht in den Ingenieurwissenschaften gelandet.
Die größte Geduld und Unterstützung, sowohl fachlich als auch menschlich, habe ich durch meinen Lebensgefährten, Herrn Dipl.-Ing. Ronald Böhnke erfahren, der in vielfältigster Hinsicht zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Germering, Juni 2013

Petra Weitkemper

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung der Arbeit	3
1.3	Gliederung der Arbeit	5
1.4	Nomenklatur	6
2	Grundlagen der Informationsübertragung	9
2.1	Überblick	9
2.2	Sender	10
2.2.1	Kanalcodierung	10
2.2.2	Modulation	11
2.3	Übertragungskanal	13
2.4	Empfänger	17
2.5	Informationstheorie	21
2.5.1	Informationsgehalt und Entropie	22
2.5.2	Transinformation	22
2.5.3	Kapazität des AWGN-Kanals	24
2.5.4	Kapazität bei diskreten Alphabeten	26
2.6	Zusammenfassung	27
3	Erzielbare Raten in Relay-Netzwerken	29
3.1	Überblick	29
3.2	Full-Duplex	30
3.2.1	Max-Flow Min-Cut Schranke	30
3.2.2	Decode-Forward mit Full-Duplex Relay	36
3.2.3	Compress-Forward mit Full-Duplex Relay	38
3.2.4	Amplify-Forward mit Full-Duplex Relay	42
3.3	Halb Duplex	44
3.3.1	Max-Flow Min-Cut für Halb-Duplex	44
3.3.2	Decode-Forward mit Halb-Duplex Relay	48

3.3.3	Amplify-Forward mit Halb-Duplex Relay	49
3.3.4	Compress-Forward mit Halb-Duplex Relay	54
3.4	Orthogonale Trennung der Phasen	55
3.4.1	Decode-Forward mit orthogonalen Phasen	58
3.4.2	Amplify-Forward mit orthogonalen Phasen	60
3.4.3	Compress-Forward mit orthogonalen Phasen	65
3.4.4	Vergleich von DF, AF und CF	66
3.5	Fester Time-Sharing Faktor	68
3.6	Wiederholungscodierte Übertragung	73
3.7	Relay-Systeme mit endlichen Modulationsalphabeten	76
3.8	Zusammenfassung	78
4	Relayfunktionen für uncodierte Systeme	79
4.1	Überblick	79
4.2	Amplify-Forward	81
4.3	Detect-Forward	84
4.4	Optimale Relayfunktionen	90
4.4.1	BER-minimierende Funktion für BPSK	91
4.4.2	MSE minimierende Funktion: Estimate-Forward	94
4.5	Empfänger für Estimate-Forward	101
4.5.1	Empfänger unter der Annahme Gauß'scher Störungen	102
4.5.2	Maximum-Likelihood Empfänger	104
4.6	Zusammenfassung	115
5	Relayfunktionen für codierte Systeme	117
5.1	Überblick	117
5.2	Gedächtnislose Relays in codierten Systemen	118
5.3	Relayfunktionen mit Kanaldecodierung	121
5.3.1	Decode-Amplify-Forward	125
5.3.2	Decode-Estimate-Forward	130
5.3.3	Empfänger für Decode-Estimate-Forward	135
5.3.4	Decode-Forward	142
5.4	Adaptive Relayfunktionen	147
5.5	Zusammenfassung	150
6	Zusammenfassung	153
	Symbole und Formelzeichen	159
	Abkürzungen	163
	Literaturverzeichnis	165