

# Robuste Vorentzerrung in TDD-Systemen mit nicht perfekter Kanalreziprozität

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

*Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)*

vorgelegt dem Fachbereich 1 (Physik/Elektrotechnik)

der Universität Bremen

von

Dipl.-Ing. Mark Petermann

Tag des öffentlichen Kolloquiums:	25. Juni 2012
Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr.-Ing. K.-D. Kammeyer Prof. Dr.-Ing. T. Kaiser
Weitere Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. S. Paul Prof. Dr.-Ing. M. Schneider



Bremen im Juli 2012



Forschungsberichte aus dem Arbeitsbereich Nachrichtentechnik  
der Universität Bremen

Band 24

**Mark Petermann**

**Robuste Vorentzerrung in TDD-Systemen  
mit nicht perfekter Kanalreziprozität**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1244-6

ISSN 1437-000X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Forschungsaktivitäten während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Nachrichtentechnik (ANT) des Instituts für Telekommunikation und Hochfrequenztechnik (ITH) der Universität Bremen. Gefördert wurden diese durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), bei der ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-D. Kammeyer für die Ermöglichung meiner Promotion, sowie die vorbildliche Betreuung und die zahlreichen Hinweise und Vorschläge während meiner Arbeit. Für die Anfertigung des Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Kaiser, sowie den Herren Prof. Dr.-Ing. S. Paul und Prof. Dr.-Ing. M. Schneider für ihr Mitwirken im Prüfungsausschuss.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen im ANT für die konstruktiven Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts bedanken. Insbesondere die Herren Dr.-Ing. D. Wübben, Dr.-Ing. C. Bockelmann und Dr.-Ing. H. Paul trugen durch ihre fachliche Kompetenz mit vielfältigen Anregungen zum Fortschritt dieser Arbeit bei. Weiterhin gilt mein ausdrücklicher Dank den Herren Dipl.-Ing. M. Stefer und Dipl.-Ing. F. Ludwig für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Zuge der Projektbearbeitung. Nicht zuletzt gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Kühn, der mich zum Schreiben dieser Dissertation ermutigt hat.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, die mich während des Studiums immer unterstützt haben und mir ein starker Rückhalt waren. Für ihre immer währende Geduld und Unterstützung möchte ich mich besonders bei meiner Freundin Julia herzlich bedanken.

Bremen, im Juli 2012

Mark Petermann



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Schwerpunkte der Arbeit . . . . .	1
1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Überblick . . . . .	7
2.2 Drahtlose Kommunikation . . . . .	8
2.2.1 Mehrfachzugriffsverfahren . . . . .	9
2.2.2 Lineare digitale Modulation . . . . .	10
2.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	12
2.2.4 Mehrantennensystemmodell . . . . .	15
2.2.4.1 MIMO-OFDM-Systembeschreibung . . . . .	15
2.2.4.2 Polarisationsdiversität . . . . .	18
2.2.4.3 Antennenverkopplungen . . . . .	19
2.3 Front-End Systemstrukturen . . . . .	21
2.3.1 Individuelle Fehlereinflüsse der Hardware . . . . .	23
2.3.2 Matrixdarstellung des erweiterten Funkkanals . . . . .	27
2.4 Sendeseitige Kanalkennntnis in der Abwärtsrichtung . . . . .	33
2.4.1 Feedback in FDD-Systemen . . . . .	33
2.4.2 Kanalkennntnis auf Basis von Kanalreziprozität . . . . .	34
2.4.3 Langzeitkanalkennntnis . . . . .	36
2.4.4 Quantisierung der Kanalkennntnis . . . . .	37
2.4.5 MMSE-Kanalschätzmodell . . . . .	38
2.5 Zusammenfassung . . . . .	39
<b>3 Adaptive Punkt-zu-Punkt-Übertragung</b>	<b>41</b>
3.1 Überblick . . . . .	41
3.2 MIMO-OFDM-Systeme mit Bit- und Power-Loading . . . . .	42

3.2.1	Grundprinzip . . . . .	42
3.2.2	Auswirkung nicht-perfekter Kanalkennntnis . . . . .	46
3.3	Spitzenwertreduktion in adaptiven OFDM-Systemen . . . . .	51
3.3.1	Leistungsverstärkermodelle . . . . .	54
3.3.2	Additive Spitzenwertreduktion im Zeitbereich . . . . .	56
3.3.2.1	Erweiterung der Signalraumkonstellationen . . . . .	57
3.3.2.2	Ausnutzung nutzdatenfreier Unterträger . . . . .	58
3.3.2.3	Gemeinsame Optimierung beider Verfahren . . . . .	59
3.3.3	Erweitertes Gradientenprojektionsverfahren . . . . .	63
3.3.4	Leistungsfähigkeit der Verfahren . . . . .	65
3.4	Zusammenfassung . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Mehrnutzerkommunikation mit verteilten Empfängern</b>	<b>75</b>
4.1	Überblick . . . . .	75
4.2	Lineare Vorentzerrung in MU-MISO-OFDM Systemen . . . . .	75
4.2.1	Matched Filter . . . . .	77
4.2.2	Zero-Forcing Sendefilter . . . . .	78
4.2.3	Wiener Sendefilter . . . . .	79
4.2.4	Ergebnisse der Systeme mit linearer Vorentzerrung . . . . .	82
4.2.5	Auswirkung nicht-perfekter Kanalreziprozität . . . . .	86
4.2.6	Vergleich mit einem Frequenzbereichsvorentzerrer . . . . .	91
4.3	Nicht-lineare Vorentzerrung . . . . .	94
4.3.1	Dirty-Paper Codierung . . . . .	94
4.3.2	Tomlinson-Harashima Vorcodierung . . . . .	95
4.3.3	Leistungsfähigkeit der nicht-linearen Verfahren . . . . .	100
4.4	Zusammenfassung . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Methoden zur robusten Vorverarbeitung</b>	<b>105</b>
5.1	Überblick . . . . .	105
5.2	Robuste Vorentzerrung . . . . .	106
5.3	Kalibrierverfahren im Frequenzbereich . . . . .	110
5.3.1	Reduzierung der Komplexität des TLS-Verfahrens . . . . .	120
5.3.2	Interpolationsbasierte Kalibrierung bei OFDM . . . . .	126
5.3.3	Implementierungsaspekte . . . . .	130
5.3.3.1	Reduziertes Feedback . . . . .	130
5.3.3.2	Rekursives TLS-Verfahren (RTL) . . . . .	134
5.4	Kalibrierverfahren im Zeitbereich . . . . .	138
5.4.1	Parameterschätzung im Einantennenfall . . . . .	138
5.4.2	Erweiterung auf Mehrantennensysteme . . . . .	140
5.4.3	Leistungsfähigkeit des Verfahrens . . . . .	146
5.5	Zusammenfassung . . . . .	149

---

<b>6</b>	<b>Messungen im 2,4 GHz Band</b>	<b>151</b>
6.1	Überblick . . . . .	151
6.2	Mehrantennensystem zur Übertragung im ISM-Band (MASI)	152
6.3	Ausnutzung der Polarisationsrichtungen von Dipolantennen .	153
6.4	Untersuchungen zur Kanalreziprozität . . . . .	156
6.5	Kalibrierverfahren . . . . .	160
6.5.1	Referenzphasenkalibrierung . . . . .	160
6.5.2	Relative Kalibrierung auf Basis der TLS-Lösung . . .	166
6.6	Zusammenfassung . . . . .	169
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Arbeit</b>	<b>171</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>177</b>
A.1	Kronecker-Produkt . . . . .	177
A.2	Matrix-Inversionslemma . . . . .	178
A.3	Eigenwerte, Eigenvektoren und Matrixnorm . . . . .	178
A.4	Least Squares Verfahren . . . . .	181
A.4.1	Einfaches Least Squares Problem . . . . .	182
A.4.2	Total Least Squares Problem . . . . .	183
A.4.3	Strukturierte Total Least Squares Probleme . . . . .	188
A.4.3.1	Lösung des STLS-Problems . . . . .	189
A.4.3.2	STLN und das Entfaltungsproblem . . . . .	192
A.4.4	Graphische Interpretation der Verfahren . . . . .	195
<b>B</b>	<b>Systembeschreibung durch Streumatrizen</b>	<b>197</b>
B.1	Streumatrix eines Mehrtores . . . . .	197
B.2	Streumatrixdarstellung des idealen Mehrantennensystems . .	200
<b>C</b>	<b>Verwendete Kanalmodelle</b>	<b>203</b>
<b>D</b>	<b>Lineare Sendefilter</b>	<b>207</b>
D.1	Herleitung des Zero-Forcing Sendefilters (ZF) . . . . .	207
D.2	Das Wiener Sendefilter (MMSE) . . . . .	209
D.2.1	Herleitung des Wiener Sendefilters . . . . .	209
D.2.2	Fehl Anpassung in schwach reziproken Kanälen . . . . .	211
D.3	Wiener Sendefilter bei schwach reziproken Kanälen . . . . .	213

<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>217</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>225</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>239</b>