

**Turbo-Empfänger für digitale Mobilfunksysteme,  
gezeigt am Beispiel eines „Software Defined Radio“-Demonstrators**

Vom Fachbereich Ingenieurwissenschaften der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Edgar Faber

aus

Trier

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. habil. Peter Jung

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich K. Jondral

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Mai 2005



Selected Topics in Communications Technologies

**Thomas Faber**

**Turbo-Empfänger für digitale Mobilfunksysteme,  
gezeigt am Beispiel eines  
"Software Defined Radio"-Demonstrators**

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4195-7

ISSN 1860-2800

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) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Kommunikationstechnik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen.

Zuallererst gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jung, dem Leiter des Fachgebiets Kommunikationstechnik, mein besonders herzlicher Dank für die in jeder Hinsicht engagierte Betreuung und Förderung dieser Arbeit. Seine wertvollen Ratschläge und seine jederzeit konstruktive Unterstützung haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich K. Jondral, dem Leiter des Instituts für Nachrichtentechnik der Universität Karlsruhe (TH), für sein Interesse an meiner Arbeit, für zahlreiche interessante Anmerkungen und für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin bedanke ich mich besonders herzlich bei allen Kollegen des Fachgebiets, Prof. em. Dr. Gerhard Dickopp, Dr. Guido Bruck, Dr. Achim Seebens, Tobias Scholand, Arjang Hessian-Alinejad, Admir Burnic, Andreas Waadt, Erika Pauli, Friedhelm Fehr, Dietrich Schwarz und Alexander Viessmann, für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre, die zahlreichen Diskussionen sowie die äußerst fruchtbare Zusammenarbeit und die daraus gewonnenen Anregungen für diese Arbeit. Ich werde alle in sehr guter Erinnerung behalten.

Dank gilt allen derzeitigen und ehemaligen Studierenden, deren Studien- und Diplomarbeiten zum Entstehen der Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt Robert Owen, dem Manager des Europäischen Universitätsprogramms der Firma Texas Instruments. Seine wohlwollende Bereitschaft, das Fachgebiet Kommunikationstechnik stets mit aktuellen digitalen Signalprozessoren (DSPs) u. a. der Serie TMS320 C6000 zu bereichern, haben die Echtzeitimplementierung des entwickelten iterativen SDR-Empfängers und dessen Verifikation in einem Demonstrationssystem ermöglicht.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Projektpartnern des Fachgebiets, besonders bei den Teammitgliedern des 3G Standards R&D Lab der Firma Samsung Electronics in Suwon/Korea, der Firma Infineon Technologies und dem Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS), für die wertvolle Zusammenarbeit, die zu neuen und interessanten Erkenntnissen, insbesondere bei der Implementierung neuartiger Algorithmen und Verfahren für Sender und Empfänger digitaler Mobilfunksysteme, geführt hat.

Ich bedanke mich bei allen, die mir persönlich nahe stehen, bei meinen Freunden und bei meinen Geschwistern Walter, Petra und Andrea und ihren Familien. Sie haben mich in jeglicher Hinsicht unterstützt und mir viel Verständnis entgegengebracht.

Schließlich danke ich besonders herzlich meinen Eltern, Reinhold und Rosemarie, deren Vertrauen und Rat mir jederzeit eine wertvolle Unterstützung waren und die mir das Studium der Elektrotechnik/Nachrichtentechnik ermöglichten. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

# Übersicht

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Realisierung iterativer („Turbo“-) Empfänger für digitale Mobilfunksysteme im Hinblick auf die Implementierung zukünftiger mobiler „Software Defined Radio“ (SDR)-Empfänger.

Es wird dargestellt, wie sich aus den Trends für digitale Mobilfunksysteme Anforderungen an moderne, iterative Empfänger für digitale Mobilfunksysteme ableiten lassen und welche Herausforderungen sich hieraus für den Entwurf solcher iterativer Empfänger ergeben. Eine entsprechende Vorgehensweise zum Entwurf iterativer Empfänger für digitale Mobilfunksysteme wird vorgeschlagen.

Zu den Neuigkeitsaspekten, die in dieser Arbeit vorgestellt werden, gehört insbesondere die Synthese iterativer SDR-Empfänger, die eine flexible Signalverarbeitung mit adaptierbarer Leistungsfähigkeit zulässt. Weiterhin wird das Verwenden von LLR (Log-Likelihood Ratio)-Werten an allen Eingängen und Ausgängen der im iterativen Empfänger enthaltenen Signalverarbeitungsblöcke vorgeschlagen. Dies ermöglicht den universellen Einsatz der erwähnten Signalverarbeitungsblöcke, die als Module des iterativen Empfängers betrachtet werden. Diese Module sind somit in iterativen Empfängern, die für verschiedene Umgebungen, wie beispielsweise Umgebungen mit impulsivem Rauschen, entworfen wurden, ohne Änderung einsetzbar bzw. austauschbar, um verschiedene Dienste zu unterstützen.

Unterschiedliche Varianten zur Schätzung der Dienstgüte (QoS, Quality of Service) während des Empfängerbetriebs werden untersucht. Die Leistungsfähigkeit der erwähnten Varianten im Bezug auf die Qualität der Schätzung, die Einhaltung der Echtzeitbedingungen und den Realisierungsaufwand wird analysiert. Es werden geeignete Abbruchkriterien für die iterative Signalverarbeitung im Empfänger vorgeschlagen. In numerischen Simulationen wird untersucht, wie diese Abbruchkriterien möglichst ohne Einbußen der Empfangsqualität eingesetzt werden können. Die durch das vorzeitige Abbrechen der iterativen Signalverarbeitung im Empfänger eingesparte Rechenleistung verringert den Stromverbrauch des Empfängers. Dies ist besonders für batteriebetriebene, mobile Empfänger vorteilhaft.

Ausgehend von einer Auswahl bedeutender digitaler Funkübertragungssysteme, wie UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) und Bluetooth, wird ein realisierbares Konzept eines iterativen SDR-Empfängers definiert. Für die im Bezug auf die verfügbare Hardware besonders kritischen Module des iterativen SDR-Empfängers wird der Realisierungsaufwand abgeschätzt. Anschließend werden Verfahren zur Verringerung des Rechenleistungsaufwands vorgeschlagen und angewendet. Solche Verfahren werden als Optimierungsverfahren betrachtet. Durch die Anwendung der betrachteten Optimierungsverfahren wird eine Echtzeitimplementierung des entwickelten iterativen SDR-Empfängers auf einem einzelnen digitalen Signalprozessor (DSP, Digital Signal Processor) TMS320C6416 der Firma Texas Instruments erreicht. Die Funktionalität des entwickelten iterativen SDR-Empfänger-konzepts wird in einem Demonstrationssystem anhand von Text- und Bildübertragungen verifiziert.

# Abstract

This dissertation represents a contribution to the realisation of iterative (Turbo) receivers for digital mobile radio systems with regard to the implementation of future mobile software defined radio (SDR) receivers.

In this thesis, it is illustrated, how to derive requirements for novel iterative receivers for digital mobile radio systems, setting out from the trends of the anticipated evolution of digital mobile radio systems. Furthermore, arising challenges, which concern the design of such novel iterative receivers, will be discussed. An appropriate procedure for the design of novel iterative SDR receivers for digital mobile radio systems is proposed.

The innovations of this thesis are clustered in the following groups: First, the synthesis of SDR concepts with respect to iterative receivers, allowing flexible signal processing with adaptable service capabilities, is presented. Furthermore, the utilisation of LLR (log-likelihood ratio) values at each input and each output of the signal processing blocks in the iterative receiver is proposed. This enables modularity of signal processing blocks, which are considered as modules of iterative receivers. These modules are universal and can thus be applied in iterative receivers, which are designed for various environments, e.g. impulsive noise environments, without further modifications. As well, these modules are exchangeable in the iterative receiver to support several services.

Different versions of an online QoS (quality of service) estimation in the receiver, i.e. QoS estimation during reception, are studied. The performance of these versions of online QoS estimation is analysed with respect to the quality of estimation, the compliance with real-time conditions, and the realisation complexity. Convenient early stopping criteria for the iterative signal processing in the receiver are proposed. In numerical simulations it is studied, how these early stopping criteria can be applied with lowest possible penalties on the reception quality. The early stopping of the iterative signal processing in the receiver reduces the decoding complexity and thus the power consumption of the receiver. This is particularly beneficial for battery-powered mobile receivers.

Starting from the selection of important digital radio systems, like UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) and Bluetooth, a realisable concept of an iterative SDR receiver is defined. The realisation complexity is evaluated with respect to the deployed hardware, taking the most critical signal processing blocks of the iterative SDR receiver into account. Subsequently, techniques to reduce the computational complexity are proposed and applied to the developed concept of an iterative SDR receiver. Such techniques to reduce the computational complexity are considered as optimisation techniques. By means of applying these optimisation techniques, the real-time implementation of the developed iterative SDR receiver on a single Texas Instruments' TMS320C6416 digital signal processor (DSP) is achieved. The functionality of the developed iterative SDR receiver concept, i.e. the proof of concept, is verified in a demonstration system by virtue of text and picture transmissions, respectively.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Entwurf von Empfängern für digitale Mobilfunksysteme .....	1
1.1.1	Drahtlose Nachrichtensysteme.....	1
1.1.2	Systemmodell eines digitalen Mobilfunksystems.....	2
1.1.3	Trends, Anforderungen und Herausforderungen.....	5
1.2	Iterative „Software Defined Radio“-Empfänger.....	9
1.2.1	Iterative („Turbo“-) Empfänger.....	9
1.2.2	„Software Defined Radio“ (SDR) .....	14
1.2.3	Synthese iterativer Empfänger und SDR.....	19
1.3	Ziele, Aktivitäten und Ergebnisse der Arbeit.....	21
1.4	Gliederung der Arbeit.....	24
<b>2</b>	<b>KONZEPT EINES REALISIERBAREN MOBILEN SDR-EMPFÄNGERS.....</b>	<b>27</b>
2.1	Einführung.....	27
2.2	Hardware-Plattformen für mobile SDR-Empfänger.....	27
2.2.1	Evolution der digitalen Mikroelektronik .....	27
2.2.2	Notwendige Rechenleistung für mikroelektronische Komponenten mobiler Endgeräte.....	30
2.2.3	Realisierungen mobiler Empfänger digitaler Mobilfunksysteme .....	33
2.2.4	Hardware-Anforderungen an zukünftige mobile Endgeräte .....	35
2.2.5	Vorgehensweise zur Definition eines realisierbaren mobilen SDR-Empfängers.....	38
2.3	Definition eines mobilen SDR-Empfängers .....	40
2.3.1	Überblick.....	40
2.3.2	Verfügbarkeit .....	42
2.3.3	Dienstgüte .....	44
2.3.4	Realisierbarkeit .....	45
2.4	HW/SW-Partitionierung für grundsätzliche SDR-Architekturen .....	45
2.4.1	Mikroelektronisch realisierbare SDR-Empfängerarchitektur.....	45
2.4.2	HW/SW-Partitionierung im digitalen Basisband .....	47
2.5	Mögliche SDR-Endgeräteklassen.....	49
<b>3</b>	<b>ENTWURF ITERATIVER EMPFÄNGER .....</b>	<b>52</b>
3.1	Einführung.....	52
3.2	Wichtige Senderkomponenten in digitalen Mobilfunksystemen .....	52
3.2.1	Quellencodierung .....	52
3.2.2	Kanalcodierung .....	56
3.2.3	Digitale Modulation.....	59
3.3	Übertragungskanal in digitalen Mobilfunksystemen.....	60
3.3.1	Überblick.....	60
3.3.2	Mehrwegkanäle .....	61
3.3.3	Ein-Weg-Kanäle mit additivem weißem Gauß-Rauschen .....	63
3.3.4	Kanäle mit impulsivem Rauschen.....	65

3.4	Verallgemeinertes Konzept iterativer („Turbo“-) Empfänger .....	67
3.5	Verarbeitung von logarithmischen Wahrscheinlichkeitsverhältnissen (Log-Likelihood Ratios, LLRs) .....	69
3.5.1	Überblick.....	69
3.5.2	Neuartiges Verfahren zum universellen Einsatz von Empfängern.....	69
3.5.3	Wirkungsweise der LLR-Werte.....	70
3.5.4	Leistungsverhalten bei Verarbeitung von LLR-Werten.....	73
3.6	Realisierungen iterativer Detektions- und Decodierkonzepte .....	76
3.6.1	Überblick.....	76
3.6.2	MAP-Symboldetektion in verrauschten Kanälen mit multiplikativem Schwund .....	76
3.6.3	MAP-Decoder für seriell verkettete Faltungscodes.....	79
3.6.4	Parallel verkettete Faltungscodes (Turbo-Codes) .....	80
3.6.5	Realisierung gemeinsamer Quellen- und Kanalcodierung .....	83
3.7	Realisierungen von SISO-Decodieralgorithmen .....	87
3.7.1	Einführung.....	87
3.7.2	Log-MAP-Algorithmus.....	87
3.7.3	Max-Log-MAP-Algorithmus.....	90
3.7.4	Max <sup>*</sup> -Log-MAP-Algorithmus.....	90
3.7.5	Zusammenfassung.....	90
3.8	Optimierungskriterien beim Entwurf iterativer Empfänger.....	91
3.8.1	Überblick.....	91
3.8.2	EXIT-Charts.....	91
3.8.3	Messung der normierten Varianz der extrinsischen Information .....	102
3.8.4	HDA-Abbruchkriterium für die iterative Signalverarbeitung im Empfänger .....	109
4	DSP-IMPLEMENTIERUNG EINES MOBILEN SDR-EMPFÄNGERS .....	116
4.1	Einführung.....	116
4.2	DSP-Architekturen.....	116
4.3	Realisierungskonzept und Systemsimulation eines mobilen SDR-Empfängers.....	118
4.3.1	Überblick.....	118
4.3.2	UMTS/WCDMA-Simulationskette.....	118
4.3.3	Evaluierung der UMTS/WCDMA-Simulationskette .....	122
4.4	DSP-Implementierung der UMTS/WCDMA-Sender- und Empfängeralgorithmen.....	126
4.5	Realisierung wichtiger Algorithmen für mobile SDR-Empfänger.....	130
4.5.1	Realisierung von Turbo-Codes auf DSPs.....	130
4.5.2	Realisierung von Tap-Delay-Tracking und Interpolation im Rake-Empfänger auf DSPs.....	134
4.5.3	Realisierung SIR-Schätzer und LLR-Konverter.....	136
5	REALISIERUNG UND EVALUIERUNG DES SDR-DEMONSTRATORS .....	139
5.1	Einführung.....	139
5.2	SDR-Demonstrationskonzept.....	139
5.2.1	Software-Konzept des SDR-Demonstrators.....	139
5.2.2	Hardware-Konzept des SDR-Demonstrators .....	141

5.3	Realisierung eines SDR-Demonstrators in Hardware – der Turbo-SDR-Demonstrator .....	143
5.4	Validierung des SDR-Demonstrationskonzepts .....	144
5.4.1	Bitfehlerverhalten des SDR-Demonstrators .....	144
5.4.2	Echtzeitfähigkeit – unterstützte Dienste.....	145
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	147
6.1	Zusammenfassung.....	147
6.2	Ausblick.....	148
ANHANG A	ERGÄNZENDE BEMERKUNGEN .....	149
A.1	Herleitung der spektralen Störleistungsdichte .....	149
A.2	Weitere Ergebnisse der Arbeit.....	151
A.2.1	Überblick.....	151
A.2.2	Hardware-in-the-Loop (HITL)-Simulation in Simulink.....	151
A.2.3	DSP als Hardware-Beschleuniger .....	152
A.2.4	Rapid-Prototyping und Hardware/Software-Co-Design .....	152
A.2.5	Untersuchungen zum DSP-Echtzeitbetriebssystem .....	153
A.3	Mathematische Modellierungen für Informationsquellen .....	156
A.4	Zur Formelherleitung der MAP-Symboldetektion in Kanälen mit multiplikativem Schwund.....	157
ANHANG B	ERGÄNZENDE TABELLEN.....	161
B.1	Formelsammlung der iterativen Detektions- und Decodierkonzepte.....	161
B.2	Begriffsdefinitionen zum mobilen SDR-Empfänger .....	168
B.3	Wichtige Senderkomponenten für verschiedene Systeme bzw. Standards ....	170
SCHRIFTTUM	.....	172
BILDVERZEICHNIS	.....	190
TABELLENVERZEICHNIS	.....	194
HÄUFIG VERWENDETE GRÖßEN UND SYMBOLE	.....	196
HÄUFIG VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	.....	203