

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



Untersuchungen zur Abstratenumsetzung in  
einem Multistandard-Empfänger für  
OFDM-basierte Rundfunksysteme

DISSERTATION

zur

Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von

FLORIAN KLINGLER

Bochum, 2010

Dissertation eingereicht am:  
Referent:  
Korreferent:  
Tag der mündlichen Prüfung:

2. Februar 2010  
Prof. Dr.-Ing. H. G. Göckler  
Prof. Dr. rer. nat. F. Jondral  
18. Mai 2010

Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung

Band 7

**Florian Klingler**

**Untersuchungen zur Abstratenumsetzung  
in einem Multistandard-Empfänger für  
OFDM-basierte Rundfunksysteme**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**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.: Bochum, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9808-1

ISSN 1617-2221

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

Diese Dissertation entstand während meiner Arbeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH in Hildesheim unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. Heinz G. Göckler von der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung der Ruhr-Universität Bochum.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Göckler für seine Unterstützung und seinen fachlichen Rat, die ausgesprochen gute Gesprächsatmosphäre, sein Engagement an dem Thema meiner Arbeit und die Gründlichkeit der Durchsicht meiner Dissertation.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Friedrich Jondral von der Universität Karlsruhe für die Übernahme des Korreferats, den damit verbundenen Mühen sowie seine schnelle und genaue Durchsicht meines Manuskripts.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Henrik Schulze von der Fachhochschule Südwestfalen für seine Anmerkungen und sein großes Interesse an den Fragestellungen des Kapitels 5.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Frank Hofmann für seine fachliche Betreuung seitens der Firma Bosch während meiner Zeit als Doktorand und bei meinem Vorgesetzten Herrn Gerald Spreitz, der mir die nötige Freiheit gab, mich in das Thema zu vertiefen.

Der wichtigste Dank gilt meinen Freunden und besonders Katharina Sollinger für ihre Unterstützung in den vergangenen Jahren sowie meinen Eltern, Gisela und Peter Klingler, die mir immer beistanden und den erforderlichen Rückhalt gaben.

Göttingen, im Dezember 2010

Florian Klingler



## Kurzfassung

Die Digitalisierung des Rundfunks hat im letzten Jahrzehnt eine Vielzahl neuer digitaler Rundfunk-Systemstandards hervorgebracht, die zumeist zu ihrer terrestrischen Ausstrahlung das Übertragungsverfahren OFDM<sup>1</sup> verwenden. Ein Gerät, das in der Lage ist, Signale verschiedener dieser Übertragungsstandards zu empfangen und zu verarbeiten, wird als Multistandard-Empfänger bezeichnet. In einem solchen OFDM-basierten Multistandard-Empfänger ist es vorteilhaft, wenn das digitalisierte Signal in einer für jeden Systemstandard spezifischen Abtastrate vorliegt. Da der Analog-zu-Digital-Umsetzer des Empfängers meist mit nur einem einzelnen Quarz betrieben wird, muss diese systembedingte Abtastrate durch digitale Signalverarbeitung nachgebildet werden. Die Aufgabe, diese digitale Abtastratenumsetzung möglichst effizient zu realisieren, wird mit der vorliegenden Arbeit adressiert.

Eine Möglichkeit zur Minimierung des Realisierungsaufwands der Abtastratenumsetzung ist es, die verfügbaren Freiheitsgrade beim Systementwurf optimal einzusetzen. Hierzu ist es notwendig, die Auswirkungen einer nicht idealen Filterung auf die Qualität des Nutzsignals zu kennen. Es wird daher zum einen die Fähigkeit des Empfängers untersucht, den Inbandripple des digitalen Filters im Durchlassbereich zu detektieren und dessen Verzerrungen zu kompensieren. Zum anderen wird der Zusammenhang zwischen der verfügbaren Sperrdämpfung des Filters und der Verschlechterung der Signalqualität aufgrund eines benachbarten Störkanals hergestellt.

Es zeigt sich, dass die geforderte Abtastratenumsetzung besonders vorteilhaft durch eine quasi-kontinuierliche Interpolation mit abschnittsweise definierten Polynomen durchgeführt werden kann. Diese polynomiale Interpolation wiederum kann effizient durch eine sogenannte Farrow-Struktur oder eine ihrer Varianten realisiert werden. Eine bislang offene Frage war es jedoch, welche der verfügbaren Farrow-Strukturen für einen bestimmten Anwendungsfall verwendet werden sollte.

Um dies zu klären, erfolgt zunächst eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Farrow-Strukturen. Im Speziellen wird besonderer Wert auf nicht-transponierte Farrow-Strukturen zur Reduktion der Abtastrate gelegt, da eine ausführliche Beschreibung dieses Typs in der Literatur bislang nicht verfügbar war. Um die Eigenschaften der Farrow-Strukturen optimal zu nutzen, ist es vorteilhaft, diese mit weiteren Abtastratenumsetzern zu kaskadieren. Hierzu wird ein vorausgehender Interpolator zur  $\mathcal{L}$ -fachen Erhöhung und ein nachfolgender Dezimator zur  $\mathcal{M}$ -fachen Verringerung der Abtastrate verwendet. Dieses dreistufige System wird nachfolgend als  $\mathcal{LAM}$ -SRC<sup>2</sup> System bezeichnet.

$\mathcal{LAM}$ -SRC Systeme besitzen zahlreiche Freiheitsgrade. Sie erlauben es hierdurch, den Aufwand der Filterung auf die drei Teilsysteme aufzuteilen und so zu einem System mit global minimalem Realisierungsaufwand zu gelangen. Zunächst

---

<sup>1</sup>OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

<sup>2</sup>SRC: Sample Rate Conversion

werden die Amplitudengänge der verwendeten Filter in Abhängigkeit der polynomialen Interpolation spezifiziert. Dann werden Entwurfsalgorithmen entwickelt, die den Eigenschaften der verschiedenen Farrow-Strukturen angepasst werden können. Für Randbedingungen, wie sie für einen Multistandard-Empfänger relevant sind, werden in einer empirischen Fallstudie  $\mathcal{LAM}$ -SRC Systeme mit unterschiedlichen Farrow-Strukturen miteinander verglichen und Kriterien zu deren Beurteilung aufgezeigt. Es zeigt sich, dass besonders dezimierende, nicht-transponierte Farrow-Strukturen eine Minimierung der Rechenleistung ermöglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing . . . . .	5
2.1.1 Das OFDM-Übertragungsverfahren . . . . .	5
2.1.2 OFDM-basierte Rundfunkstandards . . . . .	11
2.2 Problemstellung . . . . .	14
<b>3 Digitale Filter</b>	<b>17</b>
3.1 FIR-Filter . . . . .	19
3.1.1 Filterung mit FIR-Filtern . . . . .	19
3.1.2 Entwurfsverfahren . . . . .	21
3.2 Farrow-Strukturen . . . . .	23
3.2.1 Quasi-kontinuierliche Interpolation . . . . .	23
3.2.2 Polynomiale Interpolation . . . . .	24
3.2.3 Die Familie der Farrow-Strukturen . . . . .	25
3.2.4 Entwurfsverfahren . . . . .	40
<b>4 Implementierungsaufwand</b>	<b>45</b>
4.1 Kostenfunktionen . . . . .	45
4.1.1 Rechenleistung und Speicherbedarf . . . . .	45
4.1.2 Gewichtungsfaktoren . . . . .	46
4.2 FIR-Filter . . . . .	46
4.2.1 FIR-Polyphasenfilter zur Interpolation . . . . .	47
4.2.2 FIR-Polyphasenfilter zur Dezimation . . . . .	48
4.3 Farrow-Struktur . . . . .	51
4.3.1 Nicht-transponierte Farrow-Strukturen . . . . .	51
4.3.2 Transponierte Farrow-Strukturen . . . . .	62

<b>5</b>	<b>Untersuchungen zur Signalqualität bei einer Abtastratenumsetzung</b>	<b>67</b>
5.1	Vorüberlegungen . . . . .	67
5.2	Inbandripple . . . . .	72
5.2.1	Verfälschung im MLSE-Dekoder . . . . .	74
5.2.2	Kompensation durch den Kanalschätzer und Kanalentzerrer . . . . .	80
5.2.3	Zusammenfassung . . . . .	82
5.3	Sperrdämpfung . . . . .	84
5.3.1	Randbedingungen . . . . .	84
5.3.2	Filter mit konstantem Betragsfrequenzgang im Sperrbereich . . . . .	87
5.3.3	LMS-Filter . . . . .	89
5.3.4	Analytische Lösung . . . . .	90
5.3.5	Zusammenfassung . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Abtastratenumsetzung mit <math>\mathcal{L}AM</math>-SRC Systemen</b>	<b>99</b>
6.1	Vorüberlegungen . . . . .	99
6.2	Nicht-transponierte, interpolierende Farrow-Strukturen . . . . .	104
6.2.1	Entwurf . . . . .	104
6.2.2	Vergleich der Rechenleistung . . . . .	112
6.3	Nicht-transponierte, dezimierende Farrow-Strukturen . . . . .	117
6.3.1	Entwurf . . . . .	117
6.3.2	Vergleich der Rechenleistung . . . . .	121
6.4	Transponierte Farrow-Strukturen . . . . .	124
6.4.1	Entwurf . . . . .	125
6.4.2	Vergleich der Rechenleistung . . . . .	126
6.5	Vergleich der unterschiedlichen Typen der Farrow-Strukturen . . . . .	128
6.6	Vergleich des Speicherbedarfs . . . . .	129
6.7	Zusammenfassung . . . . .	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>

*Inhaltsverzeichnis*

<b>Anhang</b>	<b>137</b>
A	CIC-Filter . . . . . 137
B	Frequenzgang des polynomialen Interpolators . . . . . 139
C	Herleitungen zur Familie der Farrow-Strukturen . . . . . 141
	C.1 Farrow-Struktur . . . . . 141
	C.2 Modifizierte Farrow-Struktur . . . . . 142
	C.3 Verallgemeinerte Farrow-Struktur . . . . . 143
	C.4 Verlängerte Modifizierte Farrow-Struktur . . . . . 146
	C.5 Obere und untere Schranke bei der Transponierten Farrow-Struktur . . . . . 147
D	Mathematische Ergänzungen zu Kapitel 5 . . . . . 149
	D.1 Herleitung der optimalen Metrik aus Gleichung (5.21) . . . . . 149
	D.2 Herleitung der Fehlerereigniswahrscheinlichkeit aus Gleichung (5.47) . . . . . 149
	D.3 Herleitung der Gleichung (5.49) . . . . . 151
E	Parametrisierungen aller $\mathcal{LAM}$ -SRC Systeme aus Kapitel 6 . . . . . 152
<b>Abkürzungen und Akronyme</b>	<b>157</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>159</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>177</b>