

**Systemanalyse und Leistungsvergleich  
von MC-CDMA-Übertragungsverfahren**

**Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte  
Dissertation**

**von Dipl.-Ing. Dirk Färber  
geboren am 14.10.1967 in Stadtoldendorf**

**2005**

**1. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Kuchenbecker**

**2. Referent: Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke**

**Tag der Promotion: 22.11.2005**

Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik

Band 1.8

**Dirk Färber**

**Systemanalyse und Leistungsvergleich  
von MC-CDMA-Übertragungsverfahren**

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.: Hannover, 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 3-8322-4718-1

ISSN 1616-5489

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)

## Kurzfassung

Gegenwärtige und geplante Funkübertragungssysteme nutzen das digitale Mehrträger-Modulationsverfahren Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing (OFDM). Die Zusammenfassung von OFDM und Code-Division-Multiple-Access (CDMA) ergibt das Multi-Carrier-CDMA-Verfahren (MC-CDMA). In der Literatur beschäftigen sich die meisten Arbeiten mit der Optimierung eines der beiden Verfahren OFDM oder MC-CDMA. Diese Arbeit hat das Ziel, ein System mit und ohne CDMA-Komponente zu untersuchen. Dabei wird dargestellt, unter welchen Randbedingungen der Einsatz von MC-CDMA gegenüber OFDM ohne CDMA bei diesem System sinnvoll ist.

Für den neuen Systemvorschlag werden die Eigenschaften der einzelnen Übertragungsstufen bestehend aus mehreren Interleavern, Block- und Faltungscodierung, der Spreizung (CDMA) und der OFDM-Modulation nacheinander betrachtet. Die Unterschiede zwischen OFDM und MC-CDMA in den einzelnen Stufen des Übertragungssystems werden aufgezeigt. Die Einflüsse des Funkkanals sowie der verwendeten Spreizcodes werden mit Hilfe von numerischen Simulationen untersucht.

Das in dieser Arbeit vorgestellte System kann OFDM und CDMA optimal kombinieren. Es wird deutlich, dass der Einsatz von CDMA nicht für jeden Anwendungsfall geeignet ist.

Möchte man einen großen Teil der zur Verfügung stehenden Kapazität für die Übertragung zu einem Teilnehmer nutzen, dann zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass ein OFDM-System ohne CDMA eine bessere Bitfehlerrate erreichen kann. Sollen dagegen viele Teilnehmer die Kapazität unter sich aufteilen, dann ist ein MC-CDMA-System besser geeignet, die Störungen durch Mehrwegeausbreitung und Bewegungen im Funkfeld so auszugleichen, dass die Bitfehlerrate mit CDMA besser ist. Verändert sich die Übertragungsanforderung von einem zum anderen Fall, ist die vorgestellte Systemarchitektur in der Lage, die CDMA-Technik einzufügen beziehungsweise herauszunehmen. Diese Umschaltung kann schnell erfolgen, so dass das System eine hohe Flexibilität erhält.

Anhand der Leistungsverteilung des Sendesignals wird gezeigt, dass dieses System mit MC-CDMA durch geeignete Wahl der Spreizcodes eine etwas höhere Leistung als bei OFDM übertragen kann.

Das System kann auch so modifiziert werden, dass nicht alle Subträger für die Übertragung genutzt werden. Eine Anpassung der Technik an lizenzfreie Frequenzbereiche und deren Anforderungen kann damit erreicht werden. Dieses macht das System interessant für viele Anwendungen, für die ein Betrieb in lizenzierten Frequenzbereichen nicht sinnvoll ist.

Für bidirektionale Sprachübertragungen ist das vorgestellte System allerdings nicht optimal geeignet, da die Verzögerungszeiten zu lang sind. Dieses trifft sowohl für MC-CDMA als auch OFDM zu. Eine Optimierung für die Bedürfnisse von Sprachübertragungen würde die BER zu sehr verschlechtern. Für Datenübertragungen ohne allzu kritische Zeitanforderungen ist das Verfahren gut geeignet.

**Schlagerworte:** MC-CDMA, OFDM, Spread-Spectrum



## Abstract

Radio transmission systems can use the multi-carrier-modulation Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing (OFDM). The combination of OFDM and Code-Division-Multiple-Access (CDMA) is called Multi-Carrier-CDMA (MC-CDMA). Most publications cover the optimization of one of the systems OFDM or MC-CDMA. This thesis analyzes a system with and without a CDMA-component. It is shown, which conditions influence the usage of MC-CDMA in comparison to OFDM.

For the new system the characteristics of the transmission steps consisting of several interleavers, block- and convolutional-coding, spreading (CDMA) and OFDM-modulation are described. The differences of OFDM and MC-CDMA in the single steps of the transmission are shown. The influences of the mobile radio channel and the used spreading codes are analyzed by numerical simulations.

The system presented within this thesis combines OFDM and CDMA in an optimum way. It is shown, that CDMA is not suited for all cases.

When a large part of the available channel capacity shall be used for the transmission of one user the results have shown that an OFDM-system without CDMA can achieve a better bit-error-rate. When in comparison many users shall divide the available capacity amongst each others, then a MC-CDMA-system is better suited to combat the effects of multi-path-transmission and movement in the mobile radio channel. This results in a better bit-error-rate of CDMA. When the capacity requirement per user is changing from one case to the other, the presented system-architecture is able, to activate or deactivate the CDMA technique easy and fast. Thus the system is very flexible to react at changing requirements by the user or the network.

The calculation of the power distribution reveals that CDMA-systems can utilize a higher power than OFDM-systems.

The presented system can be modified in such, that not all subcarriers are used for transmission. An adaptation of this system for license free frequency ranges and their requirements can be achieved. This makes the system useful in areas where a usage in licensed frequency areas is not appropriate.

The presented system is not well usable for voice transmission because of long signal delays. This is valid for MC-CDMA and OFDM. An optimization of this system for the needs of voice transmission would degrade the bit-error-rate. For data transmissions without too critical timing requirements the system is well suited.

**Key Words:** MC-CDMA, OFDM, Spread-Spectrum



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Informationsübertragung</b>	<b>3</b>
2.1	Ressourcenaufteilung für das Übertragungsmedium Funk . . . . .	3
2.2	Multiple-Access und Multiplex . . . . .	6
2.3	CDMA und SS . . . . .	7
2.4	Spreizverfahren . . . . .	8
2.5	QoS-Parameter . . . . .	10
2.6	Informationsübertragung . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Multi-Carrier-Übertragungsverfahren</b>	<b>15</b>
3.1	Kanal- und Symbolcodierung . . . . .	16
3.2	Spreizung . . . . .	18
3.3	Interner Interleaver . . . . .	24
3.4	Pilotsymbole . . . . .	28
3.5	OFDM-Modulator . . . . .	28
3.5.1	Sendesignal im äquivalenten Tiefpassbereich . . . . .	29
3.5.2	Sendesignal im Bandpassbereich . . . . .	32
3.5.3	Spektrum des OFDM-Sendesignals . . . . .	33
3.5.4	Zeitdiskrete Darstellung . . . . .	35
3.5.5	Matrix-Vektor-Notation . . . . .	36
3.5.6	Phasenübergänge . . . . .	38
3.6	OFDM-Demodulator . . . . .	39
3.6.1	Zeitdiskrete Darstellung . . . . .	43
3.6.2	Matrix-Vektor-Notation . . . . .	44
3.7	Interner Deinterleaver . . . . .	45
3.8	Entspreizung . . . . .	45
3.9	Differentielle Modulation und Demodulation . . . . .	48
3.10	Externer Interleaver und Deinterleaver . . . . .	49
3.11	Faltungscodierung . . . . .	50
3.12	Die Interleaver im Überblick . . . . .	52

<b>4</b>	<b>Der Mobilfunkkanal</b>	<b>57</b>
4.1	Physikalischer Hintergrund . . . . .	57
4.2	Kanalmodelle . . . . .	59
4.2.1	Raytracer Kanalmodelle . . . . .	59
4.2.2	Stochastische Kanalmodelle . . . . .	60
4.3	Das Kanalmodell als lineares Filter . . . . .	61
4.3.1	Beschreibung in Zeit- und Frequenzbereich mit Übertragungsfunktionen . . . . .	61
4.3.2	Schmalband-Kanalmodell: Rayleigh-Kanalmodell . . . . .	63
4.3.3	Breitband-Kanalmodell . . . . .	66
4.4	Empfang von MC-CDMA-Signalen bei Mehrwegekanälen . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Spreizcodes</b>	<b>71</b>
5.1	Codeauswahl . . . . .	71
5.1.1	Gold-Folgen-Familie . . . . .	72
5.1.2	Walsh-Hadamard-Codes . . . . .	72
5.2	Codeeigenschaften . . . . .	73
5.2.1	Korrelationseigenschaften . . . . .	73
5.2.2	Einfluss von Chipfehlern auf die BER . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Untersuchungen von Multi-Carrier CDMA</b>	<b>79</b>
6.1	MC-CDMA bei AWGN-Kanälen . . . . .	79
6.1.1	Leistungsverteilung . . . . .	80
6.1.2	Bitfehlerrate für AWGN Kanäle . . . . .	82
6.1.3	Bitfehlerrate bei mehreren Teilnehmern . . . . .	83
6.1.4	Einfluss der Faltungscodierung . . . . .	85
6.2	MC-CDMA bei Mehrwegekanälen . . . . .	86
6.2.1	Definition der verwendeten Mehrwegekanäle und Anordnungen . . . . .	86
6.2.2	BER bei idealer Kanalschätzung ohne Codierung . . . . .	90
6.2.3	BER bei idealer Kanalschätzung mit Codierung . . . . .	91
6.2.3.1	Betrachtung der Bündelfehler . . . . .	91
6.2.3.2	Dimensionierung des internen Interleavers . . . . .	92
6.2.3.3	Betrachtung des externen Interleavers und Einfluss der Faltungscodierung . . . . .	94
6.2.4	Vergleich der Verfahren . . . . .	96
6.3	Analyse der Interleavereinstellungen . . . . .	103

---

6.3.1	Analyse des internen Interleavers . . . . .	103
6.3.2	Analyse des externen Interleavers . . . . .	104
6.4	Einfluss der Systemauslastungen . . . . .	106
6.5	Verzögerungen der Nutzsignale . . . . .	112
6.6	Vergleich von Block- und Faltungscodierung . . . . .	113
6.6.1	Dimensionierung des Interleavers zwischen Block- und Faltungscodierung . . . . .	114
6.7	Kanalschätzung und -korrektur . . . . .	117
6.7.1	Dimensionierung der Pilotttöne . . . . .	119
6.7.2	Bestimmung des Pilottonabstandes . . . . .	120
6.7.3	Bestimmung der Pilottonamplitude . . . . .	121
6.7.4	BER bei nicht idealer Kanalschätzung und -korrektur . . . . .	122
6.7.5	Bestimmung des Pilottonabstandes bei codierter Übertragung . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>129</b>
<b>B</b>	<b>Formelverzeichnis</b>	<b>131</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>