

Informationstechnik

**Heinrich Nuskowski**

**Digitale Signalübertragung  
im Mobilfunk**

 VOGT

Dresden 2010

*Autor*

Dr.-Ing. habil. Heinrich Nuskowski  
TU Dresden  
Lehrstuhl Mobile Nachrichtensysteme

*Herausgeber*

Prof. Dr.-Ing. Jörg Vogt  
Hochschule Zittau/Görlitz  
Fakultät Elektrotechnik und Informatik  
02763 Zittau

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.

1. Auflage Februar 2010

© Jörg Vogt Verlag, Dresden 2010  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-26-7

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)

# Vorwort

Das Anliegen des vorliegenden Buches ist es, wichtige Grundkenntnisse zu vermitteln, die für das Verständnis der Übertragungskonzepte moderner Mobilfunksysteme notwendig sind. Es basiert auf einer Vorlesung, die der Autor über viele Jahre hinweg an der Technischen Universität Dresden gehalten hat. Es ist auch gedacht als eine Fortsetzung des Buches 'Digitale Signalübertragung', das ebenfalls in diesem Verlag erschienen ist. Gegenstand des vorliegenden Buches ist die digitale Signalübertragung über Mobilfunkkanäle, die durch Mehrwegeausbreitung und Dopplereffekt charakterisiert sind. Diese beiden physikalischen Phänomene sind verantwortlich für Intersymbolinterferenz und zeitliche Veränderungen der Übertragungsbedingungen, die den Mobilfunkkanal im allgemeinen Fall zu einem frequenzselektiven und zeitvarianten Kanal machen. Das Buch wendet sich in erster Linie an Studenten, die sich in ihrem Fachstudium mit den Problemen des Mobilfunks beschäftigen. Es wendet sich aber auch an Naturwissenschaftler und in der Praxis tätige Ingenieure, die sich einen Überblick über die Übertragungsprobleme im Mobilfunk verschaffen möchten oder einen Einstieg für ein vertieftes Studium von Fachliteratur auf diesem Gebiet brauchen. Für das Verständnis des Buches wird vorausgesetzt, dass der Leser mit den Grundlagen der Nachrichtentechnik und der Systemtheorie vertraut ist.

Das Buch ist in sieben Kapitel gegliedert. Nach einer kurzen Einführung im ersten Kapitel, werden im zweiten Kapitel wichtige Eigenschaften und Beschreibungsmethoden des Mobilfunkkanals vorgestellt. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die betrachteten Mobilfunkkanäle WSSUS-Eigenschaft (*wide sense stationary uncorrelated scattering*) besitzen. Diese Annahme führt auf die einfachsten mathematischen Modelle, mit denen die physikalischen Phänomene Mehrwegeausbreitung und Doppler-Effekt erfasst und damit realitätsnahe Mobilfunkkanalmodelle definiert werden können. Die mathematische Beschreibung der WSSUS-Kanäle erfolgt mit Hilfe der Bello-Funktionen. Aus diesen Funktionen lassen sich die notwendigen Informationen ableiten, die die durch den Kanal hervorgerufene zeitliche und spektrale Spreizung der Signale charakterisieren und die bei der Realisierung zuverlässiger Mobilfunkverbindungen zu beachten sind. In dem dritten Kapitel wird eine kurze Rückschau auf die Modulationsverfahren gehalten, die in den vergangenen Mobilfunksystemen Anwendung gefunden haben. Dabei

zeigt sich, dass der Bandbreitebedarf mit der Evolution der Mobilfunksysteme ständig gewachsen ist. Der Grund dafür liegt in den stetig steigenden Anforderungen an die Datenrate für die Übertragung multimedialer Signale und dem schnellen Internetzugang. Die Signalbandbreite der Sendesignale lässt sich aber auch unabhängig von der Datenrate vergrößern, indem man Spreiztechniken anwendet, die ebenfalls im Kapitel drei vorgestellt werden. Spektral gespreizte Signale besitzen eine Reihe von übertragungstechnische Eigenschaften, die sie für Mobilfunksysteme interessant machen. Sie sind robust gegen frequenzselektives Fading, ermöglichen eine hohe zeitliche Auflösung im Empfänger und erlauben die Anwendung eines codegeteilten Zugriffsverfahrens (CDMA) auf die Übertragungsressourcen des Mobilfunksystems. Eine Übersicht über die verschiedenen Zugriffsverfahren im Mobilfunk durch Raum-, Frequenz-, Zeit- und Codeteilung mit ihren wesentlichen Eigenschaften wird im vierten Kapitel gegeben. In den Kapiteln fünf und sechs werden spezielle Übertragungstechniken für den Mobilfunk vorgestellt. Im Kapitel fünf geht es dabei um Übertragungstechniken für frequenzselektive Kanäle, um das Problem der Intersymbolinterferenz zu lösen. Es werden hier verschiedene Methoden der Entzerrung im Zeit- und Frequenzbereich sowie der MLSE-Empfang betrachtet. Im sechsten Kapitel geht es um die Erhöhung der Zuverlässigkeit bei einer Signalübertragung über zeitvariante Kanäle durch Anwendung verschiedener Diversitätsmethoden. Besondere Bedeutung hat die Raum- oder Antennendiversität, die durch den Einsatz von mehreren Sende- und/oder Empfangsantennen realisiert werden kann. Die in den Kapitel fünf und sechs betrachteten Übertragungsverfahren setzen Kanalkennntnis im Empfänger und eventuell auch im Sender voraus. Diese Kanalkennntnis kann im Empfänger durch die Auswertung von übertragenen Test- oder Pilotensignalen erworben werden. Einen Überblick über Kanalschätzverfahren vermittelt das Kapitel sieben.

An dieser Stelle möchte ich besonders Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fettweis danken für die Förderung und Unterstützung dieser Arbeit an dem Vodafone Stiftungslehrstuhl.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Vogt für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung des Manuskriptes und den zahlreichen Kollegen, die mir in vielen Diskussionen wertvolle Anregungen und Hinweise gegeben haben. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes möchte ich insbesondere den Kollegen Dr.-Ing. S. Bittner, Dipl.-Ing. A. Frotzsch, M.Sc.EE V. Kotzsch und Dipl. Medien-Inf. S. Gerbracht herzlich danken.

Auf Reaktionen aus der verehrten Leserschaft freue ich mich und greife gerne Vorschläge und Hinweise auf.

Dresden, im Februar 2010

Heinrich Nuszowski

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Übertragungskanal</b>	<b>5</b>
2.1	Kanaldefinitionen . . . . .	5
2.2	AWGN-Kanal . . . . .	7
2.3	Mobilfunkkanal . . . . .	9
2.3.1	Allgemeines . . . . .	9
2.3.2	Mehrwegeausbreitung . . . . .	10
2.3.3	Doppler-Effekt . . . . .	13
2.3.4	Rayleigh-Kanal . . . . .	16
2.3.5	Rice-Kanal . . . . .	29
2.3.6	Modellierung des Mobilfunkkanals als FIR-Filter . . . . .	32
2.3.7	Bello-Funktionen . . . . .	36
2.3.8	Korrelationsfunktionen einfacher WSSUS-Kanäle . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Modulation und Signalspreizung</b>	<b>67</b>
3.1	Modulation . . . . .	69
3.2	Spreizverfahren . . . . .	75
3.2.1	Allgemeines . . . . .	75
3.2.2	DS-Spreizung . . . . .	77
3.2.3	MC-Spreizung . . . . .	82
3.2.4	FH-Spreizung . . . . .	87
3.2.5	TH-Spreizung . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Vielfachzugriffsverfahren</b>	<b>93</b>
4.1	SDMA . . . . .	94
4.2	FDMA . . . . .	95
4.3	TDMA . . . . .	99
4.4	OFDMA . . . . .	104
4.5	CDMA . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Übertragung über ISI-Kanäle</b>	<b>121</b>
5.1	MLSE-Empfang . . . . .	122

5.1.1	Euklidische Distanzmetrik . . . . .	122
5.1.2	Ungerboeck-Empfänger . . . . .	125
5.1.3	Forney-Empfänger . . . . .	135
5.2	Entzerrung im Zeitbereich . . . . .	141
5.2.1	Zero-Forcing-Entzerrer . . . . .	142
5.2.2	MMSE-Entzerrer . . . . .	144
5.2.3	Decision-Feedback Entzerrer . . . . .	146
5.2.4	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung . . . . .	148
5.3	Entzerrung im Frequenzbereich . . . . .	153
5.3.1	OFDM . . . . .	153
5.3.2	Einzelträgermodulation . . . . .	154
<b>6</b>	<b>Übertragung über zeitvariante Kanäle</b>	<b>157</b>
6.1	Raumdiversität . . . . .	157
6.1.1	Empfangsdiversität . . . . .	159
6.1.2	Sendediversität bei Kanalkennntnis . . . . .	165
6.1.3	Sendediversität ohne Kanalkennntnis . . . . .	169
6.1.4	Diversität in MIMO-Systemen . . . . .	175
6.1.5	Antennenabstand für Raumdiversität . . . . .	177
6.2	Zeit-, Frequenz- und Polarisationsdiversität . . . . .	180
<b>7</b>	<b>Kanalschätzung</b>	<b>183</b>
7.1	Kanalschätzung für Einzelträgermodulation . . . . .	183
7.2	Kanalschätzung für OFDM . . . . .	190
<b>A</b>	<b>Übertragungskanal</b>	<b>195</b>
A.1	Transformation von Wahrscheinlichkeitsdichten . . . . .	195
A.2	Bello-Funktionen . . . . .	196
<b>B</b>	<b>Signalspreizung</b>	<b>199</b>
B.1	Bitfehlerwahrscheinlichkeit in einem DS-SSS . . . . .	199
B.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit in einem FH-SSS . . . . .	205
<b>C</b>	<b>Vielfachzugriff</b>	<b>207</b>
C.1	Datendurchsatz im ALOHA-Netz . . . . .	207
C.2	Vektordarstellung von Signalen . . . . .	209
<b>D</b>	<b>Entzerrung</b>	<b>213</b>
D.1	Tomlinson-Harashima-Vorcodierung . . . . .	213
D.2	MMSE-Entzerrung bei OFDM . . . . .	214
<b>E</b>	<b>Diversität</b>	<b>215</b>
E.1	Empfangsdiversität . . . . .	215
E.1.1	Selection Diversity Combining . . . . .	215

E.1.2	Maximum Ratio Combining . . . . .	217
E.1.3	Equal Gain Combining . . . . .	217
E.1.4	Space-Time Transmit Diversity . . . . .	217
E.2	Korrelation zwischen Antennen . . . . .	219
	<b>Abkürzungen</b>	<b>221</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>225</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Funkkommunikation mit mobilen Fahrzeugen ist nahezu genauso alt wie die Funktechnik selbst. So gelang es Marconi, 1897 telegrafische Funkverbindungen zu Schiffen herzustellen. Der erste mobile Polizeifunk wurde 1924 in den USA in Betrieb genommen, das erste Zugtelefon 1926 in Deutschland im Schnellzug Berlin-Hamburg. Doch trotz dieser Pioniertaten war der wissenschaftliche und technologische Stand jener Jahre bei weitem nicht ausreichend, das Problem der flächendeckenden, weltweiten, mobilen Kommunikation für Millionen von Teilnehmern zu lösen. Abgesehen davon, dass die Mobilfunkgeräte jener Zeit aufgrund ihres Gewichtes und Volumens nicht portabel waren und nur in Fahrzeuge montiert werden konnten, waren zwei prinzipielle Probleme zu lösen:

- Das Problem der endlichen Reichweite von Funkverbindungen, da mobile Terminals nur über kleine Sendeleistungen und Antennen verfügen, und
- das Problem der begrenzten Frequenzressourcen, da sich Mobilfunksysteme das Frequenzspektrum mit vielen anderen Funksystemen teilen.

Die Lösung beider Probleme wurde durch die zellulare Struktur von Mobilfunknetzen möglich, die 1969 von den Bell Laboratorien (USA) vorgeschlagen wurde. Die Idee besteht darin, die mit Mobilfunk zu versorgende geographische Fläche mit einem Netz von Zellen zu überdecken, wobei die Zelldurchmesser von wenigen Hundert Metern bis zu einigen Zehn Kilometern reichen können. Im Mittelpunkt einer jeden Zelle befindet sich eine Basisstation, die den Funkverkehr mit den Mobilfunkteilnehmern innerhalb der Zelle abwickelt. Dieser Teil des Mobilfunknetzes wird als Zugangsnetzwerk (*access network*) bezeichnet. Die Verbindung der Basisstationen untereinander erfolgt durch das Kernnetzwerk (*core network*), das ein Festnetz darstellt. Es wird durch leitungsgebundene Verbindungen (z.B. Lichtwellenleiter) und Richtfunkverbindungen realisiert.

Die Lösung des Reichweitenproblems durch das zellulare Konzept ist offensichtlich, da die maximale Reichweite einer Funkverbindung nicht größer als etwa der

Zellradius sein muss. Der positive Aspekt der endlichen Reichweite einer Funkverbindung besteht darin, dass gleiche Trägerfrequenzen in Zellen verwendet werden dürfen, wenn sie einen genügend großen Abstand zueinander haben, so dass die zu erwartenden Störungen tolerierbar sind. Damit bietet das zellulare Konzept auch die Möglichkeit, mit einer begrenzten Anzahl von Trägerfrequenzen ein flächendeckendes Mobilfunksystem aufzubauen. Allerdings erzeugt das zellulare Konzept ein neues Problem: Die Funkverbindung eines mobilen Teilnehmers muss bei der Überschreitung von Zellgrenzen von Zelle zu Zelle weitergereicht werden. Die Funkverbindung zur alten Basisstation muss abgebrochen und zu der neuen Basisstation aufgebaut werden, was als *Handover* oder *Handoff* bezeichnet wird. Die Qualität der Verbindung darf dadurch nicht beeinträchtigt werden, auch dann nicht, wenn sich der Teilnehmer schnell durch kleine Zellen bewegt. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass die mobilen Terminals parallel zur eigentlichen Informationsübertragung zusätzlich Kontrollmessungen für die zu empfangenden Signale benachbarter Basisstationen ausführen. Diese Informationen werden ständig über spezielle Signalisierungskanäle den Basisstationen mitgeteilt und bilden die Grundlage für die Organisation des Handovers.

Nachdem die prinzipiellen Probleme der Mobilfunkübertragung gelöst und die technologischen Voraussetzungen für ihre Umsetzung erfüllt waren, begann Anfang der 80iger Jahre eine rasante Entwicklung des Mobilfunks. Die Mobilfunksysteme, die in den 80iger Jahren aufgebaut wurden, man spricht heute von den Mobilfunksystemen der ersten Generation (1G), waren ausschließlich für eine Sprachübertragung konzipiert. Die Signalübertragung erfolgte analog durch Schmalband-Frequenzmodulation. Seitdem wurde mit jeder neuen Dekade eine neue Mobilfunkgeneration mit erweiterten Möglichkeiten und Eigenschaften eingeführt. Die Mobilfunksysteme der zweiten Generation (2G) vollzogen den Übergang zur digitalen Signalübertragung und ermöglichten in der Folgezeit neben der Sprachübertragung immer weiter verbesserte Möglichkeiten der Datenübertragung. Anfang dieses Jahrtausends begann der Aufbau der 3G-Systeme, die die Übertragung von Multimedia-Signalen und einen schnellen Internet-Zugang ermöglichen. Die mobile Kommunikation ist heute ein fester Bestandteil der Infrastruktur unserer Gesellschaft geworden und hat wesentliche Veränderungen in unseren Arbeits- und Lebensgewohnheiten bewirkt. Eine zuverlässige und schnelle Kommunikation für jede Art von Information von jedem Ort und zu jeder Zeit ist heute der Anspruch der Gesellschaft, den zukünftige Mobilfunksysteme immer besser erfüllen müssen. Dieser Anspruch verlangt nach neuen Übertragungstechnologien. Die Realisierung höherer Datenraten wurde in der Vergangenheit insbesondere mit höheren Bandbreiten realisiert. Stetig wachsender Bandbreitenbedarf ist ein charakteristisches Merkmal in der Evolution der vergangenen Mobilfunksysteme. Betrug die Kanalbandbreite etwa 20 kHz für 1G, so ist sie auf 200 kHz bei den 2G-Systemen nach dem GSM-Standard und auf 5 MHz bei den 3G-Systemen nach dem 3GPP-Standard angestiegen. Für die 4G-Systeme ist die

Verwendung variabler Bandbreiten bis zu 20 MHz vorgesehen. Schwerpunkt für die weitere Erhöhung von Kapazität und Übertragungsgeschwindigkeit zukünftiger Mobilfunksysteme ist jedoch eine bedeutende Steigerung ihrer spektralen Effizienz, d.h., eine wesentliche bessere Nutzung der Frequenzressourcen. Die Erhöhung der spektralen Effizienz erfordert intelligente Übertragungsalgorithmen, die eine möglichst genaue Kanalkennntnis voraussetzen und sich den ändernden Übertragungsbedingungen adaptiv anpassen. Beispiele solcher intelligenter Übertragungsalgorithmen sind:

- Adaptive Modulations- und Codierschemata: Sie gestatten eine optimale Anpassung an die momentanen Übertragungsanforderungen unter den gegebenen Übertragungsbedingungen;
- Interferenzauslöschung (*interference cancelation*): Sie ermöglicht einen wesentlichen Verbesserung des SINR (*signal to interference-plus-noise ratio*) im Empfänger;
- MIMO-Übertragungsstrategien (*multiple input multiple output*) durch Anwendung mehrerer Sende- und/oder Empfangsantennen: Sie erlauben durch Nutzung von Raummultiplex die Übertragungskapazität zu erhöhen und durch Nutzung von Raumdiversität die Übertragungssicherheit zu verbessern.