Universität Stuttgart

Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

83. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

Leistungssteigerung zellularer Mobilfunksysteme durch Anwendung von Makrodiversität und dynamischem Ressourcenmanagement

von
Ulrich Weiss
2003

D 93

© 2003 Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme, Universität Stuttgart
Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart
ISBN 3-922403-93-X

University of Stuttgart

Institute of Communication Networks and Computer Engineering
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

83th Report on Studies in Congestion Theory

Performance Enhancement of Cellular Mobile Communication Systems by Use of Macrodiversity and Dynamic Resource Management

by
Ulrich Weiss
2003

Summary

Mobile communication is one of today's fastest growing markets. More and more people use mobile communication for voice and data transmission. While the number of people using mobile communication is expected to rise quickly, the amount of transmitted data and the number of voice connections will increase at the same time. The former happens mainly due to the upcoming of new mobile multimedia services, the latter due to the fact that people use mobile telephony more often in their everyday life.

Cellular mobile communication systems must cope with this high growth rates. For this reason they need to improve their performance and to increase their efficiency. This thesis investigates the performance enhancement of cellular mobile communication systems by use of macrodiversity and dynamic resource management.

In today's mobile communication systems a mobile station is typically connected to only one base station. By means of macrodiversity the mobile station can be connected to two, or even more, base stations. As the radio channel is the most difficult link in mobile communications, the technique of macrodiversity has the potential to improve the reliability of mobile radio links.

The main objective of this thesis is the study of the performance enhancements by macrodiversity. Different techniques of macrodiversity are classified and their conditions of use in cellular systems are analysed. The advantages and drawbacks for all techniques are investigated in detail. The focus of evaluation is set on the three most important performance criteria of mobile communication systems: the area coverage, the system capacity, and the link quality.

Due to the shortage of radio frequencies, network operators are forced to plan cellular systems with smaller and smaller cell sizes. The efficient re-use of frequencies within these micro- and pico-cells is a *must* in order to provide sufficient capacity for the increasing amount of traffic. For this reason, macrodiversity is studied within the context of small cell sizes in this thesis. In order to achieve the aims of increased capacity and quality, the different macrodiversity techniques will be supported by a specially developed dynamic resource allocation scheme. It flexibly supports macrodiversity by its ability to make resources dynamically available wherever they are needed.

As the capacity and quality of a mobile communication system is limited by the small amount of available radio spectrum and the error susceptibility of the radio channel, this thesis focuses on the air interface. Additionally, the necessary functionality of the fixed part of the mobile network is described. The studies in this thesis are not bound to any specific mobile communication standard. The general findings can be applied to any system using macrodiversity. The way of applying macrodiversity to standardized systems is described.

Chapters 2 and 3 introduce the fundamentals of cellular mobile communication systems and explain the technique of marcodiversity. They describe the electromagnetic wave propagation in the radio mobile channel, the planning of cellular systems, the frequency and resource allocation techniques, and the mobility concepts. The relevant system parameters used in this thesis are introduced: coverage, capacity, and link quality.

Chapter 4 describes the modelling of the macrodiversity mobile communication system and how to apply the models to discrete event simulation. The system model consists of easily replaceable modules for the service area, the propagation of radio signals, the communication traffic, and the mobility of the users.

The positioning of mobile users and of the base stations is based on a "digital map". Base stations are placed in order to form a cellular pattern suitable for the application of macrodiversity. The propagation of radio signals is described by empirical models respecting the distance dependent path loss as well as shadow fading. The communication traffic is modelled by a stochastic process. Call arrivals follow a Poisson process and call durations are negative exponentially distributed random variables. The mobility of users is based on small sojourn zones. The sojourn time in such a zone is modelled by a random variable. The direction of movement can either follow a random process (random walk) or be directed, e. g. along a street.

Chapter 5 and 6 evaluate the performance of macrodiversity for cellular systems. Chapter 5 studies the gain in system coverage, while chapter 6 deals with the influence of macrodiversity on system capacity and link quality.

Uplink macrodiversity can be achieved by applying different combining methods in the radio access network. The macrodiversity gain on the uplink is the higher the more effort is spent for signal or data combining. Downlink macrodiversity can be achieved by two different methods: selection macrodiversity and simulcasting, i.e. sending the radio signal from one selected base station only or from several base stations at the same time. While selection marodiversity already improves the area coverage, the best performance is achieved by simulcasting. In order to achieve a remarkable coverage gain, it is sufficient to involve two or at most three base stations in simulcast operation. The relative gain of involving more than three base stations does not compensate the increased effort.

In an interference limited system with dynamic channel allocation the highest system capacity can be achieved with selection macrodiversity. Simulcasting has negative effects on the system capacity. It increases the amount of co-channel interference in the system. This leads to an increased re-use distance of resources and hence to a reduced system capacity.

Chapter 6 concludes the discussion on system capacity and link quality with a study of different hard and soft handover algorithms.

The thesis is closed by a summary and an outlook.

Inhaltsverzeichnis

Summary I

Inhaltsverzeichnis V

Abbildungsverzeichnis IX

Tabellenverzeichnis XI

Abkürzungen XIII

Formelzeichen XVII

1 Einleitung 1

1.1 Leistungssteigerung zellularer Mobilfunksysteme 1

1.2 Übersicht über die Arbeit 3

2 Grundlagen und Modellierung zellularer Mobilfunksysteme 5

2.1 Mobilfunksysteme und -standards 5

2.2 Der Mobilfunkkanal und seine Modellierung 9

2.2.1 Mehrwegausbreitung 9

2.2.2 Entfernungsabhängige Dämpfung 11

2.2.2.1 Freiraumausbreitung 12

2.2.2.2 Ausbreitung mit Bodenreflexion 12

2.2.2.3 Modelle nach Okumura, Hata und COST-231 13

2.2.2.4 Allgemeines Modell der entfernungsabhängigen Dämpfung 13

2.2.2.5 Das Wendepunkt-Modell 14

2.2.3 Abschattung 14

2.2.3.1 Örtliche Korrelation der Dämpfungsschwankungen 16

2.3 Zellularer Mobilfunk 17

2.3.1 Kanalwiederverwendung und Gleichkanalinterferenz 17

2.3.2 Nachbarkanalinterferenz 18

2.3.3 Interferenzbegrenzte und rauschbegrenzte Systeme 19

2.3.4 Ressourcenmanagement im zellularen Mobilfunk 20

2.3.4.1 Feste Kanalvergabe 21

2.3.4.2 Dynamische Kanalvergabe 25

2.3.4.3 Handover 26

2.3.4.4 System- und Teilnehmerkapazität 28

2.4 Mobilitätsverwaltung 29

2.4.1 Handover-Verwaltung 29

2.4.2 Verwaltung des Aufenthaltsortes 31

3 Makrodiversität im zellularen Mobilfunk 35

3.1 Diversitätstechniken 35

3.2 Makrodiversität 37

3.3 Voraussetzungen zum Einsatz der Makrodiversität ... 38
3.3.1 Makrodiversitätsfähige zellulare Architekturen ... 39
3.3.2 Architektur eines makrodiversitätsfähigen Zugangsnetzes ... 41
3.3.3 Signalkombination und -verteilung ... 43
3.3.3.1 Aufwärtsstrecke (*Uplink*) ... 43
3.3.3.2 Abwärtsstrecke (*Downlink*) ... 46
3.4 Anwendung von Makrodiversität zur Erhöhung der Gebietsabdeckung, Systemkapazität und Verbindungsqualität ... 47

4 Modellierung und Simulation ... 51
4.1 Modellierung des Dienstgebietes ... 51
4.2 Modellierung der Wellenausbreitung ... 56
4.3 Modellierung des Nachrichtenverkehrs ... 57
4.3.1 Zeitliche Verkehrserzeugung ... 58
4.3.2 Räumliche Verkehrserzeugung ... 59
4.4 Mobilitätsmodell ... 61
4.5 Ressourcenmanagement an der Luftschnittstelle ... 62

5 Untersuchung der Gebietsabdeckung bei Anwendung von Makrodiversität ... 67
5.1 Qualitative Betrachtung des Abdeckungsproblems ... 69
5.2 Methode zur quantitativen Bestimmung der Abdeckungsunterschiede ... 72
5.3 Abdeckungsgewinn durch Makrodiversität ... 73
5.3.1 Makrodiversitätsgewinn in Abhängigkeit von der Abdeckungswahrscheinlichkeit ... 74
5.3.2 Makrodiversitätsgewinn für das allgemeine Ausbreitungsmodell ... 75
5.3.3 Makrodiversitätsgewinn für das Wendepunkt-Modell ... 77
5.4 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb ... 80
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 82

6 Systemkapazität und Verbindungsqualität in einem makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystem mit dynamischem Ressourcenmanagement ... 85
6.1 Parameter zur Leistungsbewertung ... 86
6.2 Systemkapazität im statischen System ... 87
6.2.1 Architektur mit omnidirektionalen Antennen ... 87
6.2.1.1 Strategien zur Ressourcenevaluierung ... 89
6.2.1.2 Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen ... 92
6.2.1.3 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb ... 95
6.2.2 Architektur mit 120-Grad-Richtantennen ... 97
6.2.2.1 Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen ... 100
6.2.2.2 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb ... 101
6.3 Verbindungsqualität im statischen System ... 102
6.3.1 Architektur mit omnidirektionalen Antennen ... 102
6.3.1.1 Verbindungsqualität bei konstanter Blockierwahrscheinlichkeit ... 102
6.3.1.2 Verbindungsqualität bei konstantem Verkehrswert ... 104
6.3.1.3 Verbindungsqualität in Abhängigkeit der Strategien zur

Ressourcenevaluierung im Gleichwellenbetrieb 107
6.3.1.4 Verbindungsqualität bei Leistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb 108
6.3.2 Architektur mit 120-Grad-Richtantennen 109
6.4 Untersuchungen bei Mobilität 110
6.4.1 Zusätzliche Parameter zur Beurteilung der Systemkapazität bei mobilen Teilnehmern 112
6.4.2 Geographisches Handover im Fall ohne Makrodiversität 113
6.4.3 Empfangsleistungsbasiertes Handover bei Auswahl-Makrodiversität 116
6.4.4 Verbindungsprüfung bei jedem Ortswechsel 120
6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse 126

7 Zusammenfassung und Ausblick 129

Literatur 135

Anhang A Berechnung des Signal-Interferenz-Verhältnisses bei Abschattung 151

Anhang B Erzeugung einer „Hot-Spot"-Verkehrsverteilung 155

Anhang C Kapazitätsvergleich des DCA-Systems mit einem FCA-System 159

Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1: Kategorisierung der wichtigsten Mobilfunksysteme 6
Bild 2-2: Typische Signalfluktuation (Fading) 9
Bild 2-3: Mehrwegausbreitung 10
Bild 2-4: Ideale omnidirektionale (links) und 120-Grad-Richtantenne (rechts) 12
Bild 2-5: Ausbreitung mit Bodenreflexion 13
Bild 2-6: Kanalwiederverwendung im zellularen System 18
Bild 2-7: Nachbarkanalinterferenz 19
Bild 2-8: Ressourcenmanagement an der Luftschnittstelle 20
Bild 2-9: Zellgruppen und Wiederverwendungsabstand 21
Bild 2-10: Interferenzverhältnisse bei einer Clustergröße von 7 23
Bild 2-11: Mögliche Verkehrslenkung bei Handover 30
Bild 2-12: Datenbankhierarchie 31
Bild 2-13: Verteilte Datenbank in Baum-Struktur 33
Bild 3-1: Diversitätstechniken im Mobilfunk 35
Bild 3-2: Makrodiversität im zellularen System 37
Bild 3-3: Zellulare Architekturen zur Realisierung der Makrodiversität 39
Bild 3-4: Makrodiversitätsfähige Zugangsnetzarchitektur 41
Bild 3-5: Das Konzept der abgesetzten Feststation (FS) 43
Bild 4-1: Prinzip der digitalen Karte 52
Bild 4-2: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 24 Mobilstationspositionen pro Sechseck 53
Bild 4-3: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 96 Mobilstationspositionen pro Sechseck 54
Bild 4-4: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 216 Mobilstationspositionen pro Sechseck 54
Bild 4-5: Modellierung eines Gebietes nach dem Vorbild Manhattans 55
Bild 4-6: Bestimmung der Mobilstationspositionen in Polarkoordinaten 59
Bild 4-7: Konstante Verteilungsdichte der Mobilstationen in [0,R] 60
Bild 4-8: Verteilungsdichte des Radius r 61
Bild 4-9: Nachbarschaftsbeziehungen im zonenbasierten System 62
Bild 4-10: Kanalvergabe bei neuem Verbindungswunsch 64
Bild 5-1: Die betrachteten zellularen Architekturen 69
Bild 5-2: Beobachtungsgebiet im Zentrum des Mobilfunksystems (Ausschnitt) 69
Bild 5-3: Entfernungsabhängige Dämpfung ohne Abschattung (Gl. (2-16) mit γ=4) 70
Bild 5-4: Momentaufnahme der Gesamtdämpfung beider zellularer Architekturen 71
Bild 5-5: Gleiches Beobachtungsgebiet für die Verteilungsfunktionen 72
Bild 5-6: Verteilungsfunktionen der Dämpfung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=10 dB) 73
Bild 5-7: Gebietsabdeckungsgewinn in Abhängigkeit der abgedeckten Fläche 74
Bild 5-8: Verteilungsfunktionen der Dämpfung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=4 dB) 75
Bild 5-9: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene σ (bei konstantem γ=4.0) 76
Bild 5-10: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene γ (bei konstantem σ=10 dB) 77
Bild 5-11: Gebietsabdeckung mit Wendepunkt-Modell (g=50 m, α=β=2, σ=10 dB) 78
Bild 5-12: Verteilungsfunktionen der Dämpfung für Gleichwellenbetrieb mit

Leistungsanpassung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=10 dB) 81
Bild 6-1: Blockierwahrscheinlichkeit im System mit omnidirektionalen Antennen ... 88
Bild 6-2: Ressourcenevaluierung bei Auswahl-Makrodiversität 91
Bild 6-3: Ressourcenevaluierung im Gleichwellenbetrieb 92
Bild 6-4: Gleichwellenbetrieb mit maximal drei Feststationen 93
Bild 6-5: Gleichwellenbetrieb mit variabler und fester Anzahl an Feststationen 94
Bild 6-6: Gleichwellenbetrieb mit maximal zwei Feststationen 95
Bild 6-7: Blockierwahrscheinlichkeit im Gleichwellenbetrieb mit Leistungsanpassung 96
Bild 6-8: Blockierwahrscheinlichkeit im System mit 120-Grad-Richtantennen 97
Bild 6-9: Kapazitätsvergleich der beiden Architekturen 99
Bild 6-10: Variable Anzahl an Makrodiversitätszweigen (120-Grad-Antennen, 3 Zweige) 100
Bild 6-11: Variable Anzahl an Makrodiversitätszweigen (120-Grad-Antennen, 2 Zweige) 100
Bild 6-12: Gleichwellenbetrieb mit Leistungsanpassung (120-Grad-Antennen) 101
Bild 6-13: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (2 Zweige) 103
Bild 6-14: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (3 Zweige) 103
Bild 6-15: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 3 Erl. (3-fach MD) 105
Bild 6-16: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 3 Erl. (2-fach MD) 106
Bild 6-17: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 2 Erl. 106
Bild 6-18: Verbindungsqualität der Evaluierungsstrategien bei Auswahl-Makrodiversität 107
Bild 6-19: Verbindungsqualität der Evaluierungsstrategien im Gleichwellenbetrieb .. 107
Bild 6-20: Leistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb 108
Bild 6-21: Verbindungsqualität bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit in beiden Architekturen 110
Bild 6-22: Beispiel für die zufällige Bewegung einer Mobilstation im Dienstgebiet ... 112
Bild 6-23: Geographisches Handover bei konstant 30 km/h 114
Bild 6-24: Geographisches Handover für das neg. exp. Modell (v_m=30 km/h) 115
Bild 6-25: Verbindungsqualität bei geographischem Handover 116
Bild 6-26: Empfangsleistungsbasiertes Handover bei Auswahl-Makrodiversität 117
Bild 6-27: Verbindungsqualität bei Y=3 Erl. bei Auswahl-Makrodiversität 118
Bild 6-28: Relative Handover-Anzahl bei empfangsleistungsbasiertem Handover 119
Bild 6-29: Blockierwahrscheinlichkeit bei konstant 30 km/h (2 Zweige) 121
Bild 6-30: Blockierwahrscheinlichkeit bei konstant 30 km/h (3 Zweige) 122
Bild 6-31: Auswahl-Makrodiversität bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten 122
Bild 6-32: Relative Anzahl an *Hard Handover* 123
Bild 6-33: Relative Anzahl an *Soft Handover* 124
Bild 6-34: Verbindungsqualität bei konstant 30 km/h 125
Bild B-1: Verkehrsdichte im „Hot-Spot"-Szenario 155
Bild B-2: Flächendichte der Mobilstationen 156
Bild B-3: Verteilungsdichtefunktion des Radius r 157
Bild C-1: Vergleich der Blockierwahrscheinlichkeiten für ein FCA- und das DCA-System 160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gleichkanal Signal-Interferenz-Verhältnis für Dämpfungskoeffizient γ=4 24
Tabelle 5-1: Gebietsabdeckungsgewinn in Abhängigkeit der abgedeckten Fläche 74
Tabelle 5-2: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene σ (bei konstantem γ=4) 76
Tabelle 5-3: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene γ (bei konstantem σ=10 dB) 76
Tabelle 5-4: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene g (bei konstantem α=2.0, β=2.0, σ=10 dB) 78
Tabelle 5-5: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene α (bei konstantem β=2.0, g=50 m, σ=10 dB) 79
Tabelle 5-6: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene β (bei konstantem α=2.0, g=50 m, σ=10 dB) 79
Tabelle 5-7: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene σ (bei konstantem α=2.0, β=2.0, g=50m) 79
Tabelle 6-1: Verkehrswerte bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (System mit omnidir. Ant.) 88
Tabelle 6-2: Verkehrswerte bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (System mit 120-Grad-Ant.) 98

Abkürzungen

AAL	ATM Adaptation Layer
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BS	Basisstation
B-ISDN	Broadband-ISDN (Breitband ISDN)
CDMA	Code Division Multiple Access (Mehrfachzugriff im Codemultiplex)
CINR	Carrier to Noise and Interference Ratio (Signal-zu-Interferenz-und-Rausch-Verhältnis)
CIR	Carrier to Interference Ratio (Signal-Interferenz-Verhältnis)
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
CT	Cordless Telephone (Standards CT-0 bis CT-3 für drahtlose Telefonie)
DCA	Dynamic Channel Allocation (dynamische Kanalvergabe)
DECT	Digital European/Enhanced Cordless Telephony
Erl.	Erlang
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCA	Fixed Channel Allocation (feste Kanalvergabe)
FDD	Frequency Division Duplex (Auf- und Abwärtsstrecke in verschiedenen Frequenzbändern)
FDMA	Frequency Division Multiple Access (Mehrfachzugriff im Frequenzmultiplex)
FS	Feststation
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunication System (heute: IMT-2000)
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre (Mobilfunk-Vermittlungsstelle am Netzübergang)
GSM	Global System of Mobile Communications
HIPERLAN	HIgh PErformance Radio Local Area Network
HLR	Home Location Register (Heimat-Datenbank)

IAT	Inter Arrival Time (Zwischenankunftszeit)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT-2000	International Mobile Telecommunications at 2000 MHz
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
IS-95	Interim Standard 95 (CDMA Mobilfunkstandard in den USA)
ITU	International Telecommunication Union
IU	Intermediate Unit (Steuereinheit)
IWU	Interworking Unit (Anpassungseinheit)
LA	Leistungsanpassung
LAN	Local Area Network (lokales Netzwerk)
MAC	Media Access Control (Medienzugriffssteuerung)
MD	Makrodiversität
MDU	Macrodiversity Unit (Makrodiversitätseinheit)
MS	Mobilstation
MSC	Mobile Switching Centre (Mobilfunk-Vermittlungsstelle)
N-ISDN	Narrowband-ISDN (Schmalband-ISDN)
RAP	Radio Access Point (Feststation)
RAU	Remote Antenna Unit (Feststation)
RLC	Radio Link Control (Radioverbindungssteuerung)
RNC	Radio Network Controller (Steuereinheit des Funksystems)
RP	Radio Port (Feststation)
SDMA	Space Division Multiple Access (Mehrfachzugriff im Raummultiplex)
SIR	Signal to Interference Ratio (Signal-Interferenz-Verhältnis)
SNR	Signal to Noise Ratio (Signal- Rausch-Verhältnis)
SS#7	Signalisiersystem Nr. 7
STP	Signal Transfer Point
TDMA	Time Division Multiple Access (Mehrfachzugriff im Zeitmultiplex)
TR	Transport Relay (Vermittlungseinheit)

UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VLR	Visitor Location Register (Besucher-Datenbank)
ZV	Zufallsvariable

Formelzeichen

Allgemeines

$\mathrm{E}[X]$	Erwartungswert von X
$f_Y(t)$	Verteilungsdichtefunktion der Zufallsvariable Y
$F_Y(t)$	Verteilungsfunktion der Zufallsvariable Y
lg	Logarithmus zur Basis 10 ($\log_{10}$)
ln	Logarithmus zur Basis e ($\log_e$)
$\mathbf{N}^+$	Menge der positiven natürlichen Zahlen
$P\{X \leq x\}$	Wahrscheinlichkeit, daß die Variable X kleiner gleich dem Wert x ist (Verteilungsfunktion)
X	Variable (linearer Maßstab)
X_{dB}	Variable (in Dezibel)
X_{dBm}	Variable (in Dezibel pro Milliwatt)
$\overline{X}$	Mittelwert von X

Formelzeichen

a	Abstand zum Nachbarort
α	Basis-Dämpfungskoeffizient
$\alpha_n(t)$	Dämpfung auf Ausbreitungsweg n
A	Angebot (Nachrichtenverkehr)
A_Δ	Flächeninhalt des Dreiecks
β	zusätzlicher Dämpfungskoeffizient
c, c_0	Proportionalitätskonstante
C	Signalleistung
CIR	Signal-Interferenz-Verhältnis (C/I)
CIR_{min}	Schwellwert des Signal-Interferenz-Verhältnisses
d	Distanz
d_0	Distanzeinheit
D	Wiederverwendungsdistanz
E_z	z-Komponente des E-Feldes
ε	Enderate
f	Frequenz

f_0 , f_c	Trägerfrequenz
g	Wendepunkt
g_0	Leistungsübertragungsfaktor in Distanz d_0
G_r	Gewinn der Empfangsantenne
G_t	Gewinn der Sendeantenne
G_1, G_2	Gewinn (Fall 1, Fall 2)
γ	Dämpfungskoeffizient
h_B	Höhe der Basisstationsantenne
h_t	Höhe der Empfangsantenne
h_r	Höhe der Sendeantenne
H_x	x-Komponente des H-Feldes
H_y	y-Komponente des H-Feldes
I	Interferenzleistung
$I_0(x)$	Modifizierte Besselfunktion nullter Ordnung
J	Anzahl an Ressourcen
k, k_1, k_2	Konstanten
L	Dämpfung (Pfadverlust)
λ	Wellenlänge (Signalübertragung), Ankunftsrate (Nachrichtenverkehr)
m_{dB}	Handover-Schwelle in Dezibel
M	Anzahl an Makrodiversitätszweigen
M_f	Anzahl an Frequenzen
N	Clustergröße
O	Umfang der Aufenthaltszone
Ω	Fläche unter der Verteilungsdichte
$p_A(r,\alpha)$	Räumliche Verteilungsdichte in Polarkoordinaten (Radius, Winkel)
p_{ij}	Übergangswahrscheinlichkeit von Zone i nach Zone j
$p_r(r)$	Verteilungsdichte des Radius
P_r	Empfangsleistung
$P_{r,min}$	Schwellwert der Empfangsleistung
P_t	Sendeleistung
P_B	Blockierwahrscheinlichkeit
P_{BD}	Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung
P_D	Unterbrechungswahrscheinlichkeit
ψ	Empfangsphase
Q	Wiederverwendungsfaktor
$r(t)$	Empfangssignal
r	Variable für den Radius
R	Zellradius

R_n	normierter Zellradius
S	Fläche der Aufenthaltszone
σ	Standardabweichung
t	Zeitvariable
T	Anzahl an Sende- und Empfangseinrichtungen
$\overline{T}_e$	Mittelwert der negativ-exponentiell verteilten Aufenthaltszeit
$\overline{T}_k$	Mittelwert der deterministisch verteilten Aufenthaltszeit
T_i	Aufenthaltsdauer in Zone i
T_D	Verbindungsdauer
T_{IAT}	Zwischenankunftszeit
θ_n	Einfallswinkel auf Ausbreitungsweg n
U_x	Einheit des Rasters in x-Richtung
U_y	Einheit des Rasters in y-Richtung
v	Geschwindigkeit
X_{max}	Größte x-Koordinate des Rastermodells
X_{min}	Kleinste x-Koordinate des Rastermodells
Y	Verkehrswert
Y_{max}	Größte y-Koordinate des Rasters
Y_{min}	Kleinste y-Koordinate des Rasters
z	Anzahl an Zeitschlitzen
Z	Anzahl Dreiecke pro Sechseck

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Leistungssteigerung zellularer Mobilfunksysteme

In den letzten zehn Jahren ist der Markt für Mobilkommunikation weltweit rasant gewachsen [106]. Fast in allen Lebensbereichen, ob privat oder geschäftlich, hat sich die mobile, drahtlose Kommunikation neben der drahtgebundenen etabliert. Während heute vor allem die mobile Telefonie genutzt wird, ist der Wunsch der Anwender, alle Telekommunikationsdienste in Zukunft unabhängig von einer festen Anschlußdose nutzen zu können, klar erkennbar.

Der Durchbruch der mobilen Telefonie wurde durch die Entwicklung der digitalen Mobilfunknetze ausgelöst. Seither können kleine, leichte und preisgünstige Mobiltelefone für eine große Anzahl an Anwendern bereitgestellt werden. Obwohl die heutigen Mobilkommunikationsnetze bereits Datenübertragung erlauben, wird dieser Dienst noch wenig genutzt. Aufgrund der stark steigenden Verbreitung des Internets und der im Internet angebotenen Dienste (World Wide Web, elektronische Post, Bewegtbild- und Musikübertragung) ist jedoch zu erwarten, daß die mobile Datenübertragung in wenigen Jahren eine äußerst wichtige Rolle spielen wird.

Die prognostizierten Zuwachsraten im Mobilfunk, sowohl im Datenvolumen als auch in der Anzahl der Benutzer, sowie die Einführung von Diensten, die bisher dem Festnetz vorbehalten waren, verlangen eine schnelle Weiterentwicklung der heutigen Mobilfunknetze [78]. Um den zukünftigen Ansprüchen gerecht zu werden, ist dazu eine Leistungssteigerung sowohl im Bereich der Kapazität als auch der Qualität nötig.

In Forschung und Entwicklung wird an vielen Techniken gearbeitet, die die Leistung heutiger Systeme verbessern können. Um diese Techniken in zukünftigen Systemen gezielt einsetzen zu können, muß ihr Verhalten und ihre Leistungsfähigkeit im einzelnen verstanden werden. Aus diesem Grund untersucht die vorliegende Arbeit die Technik der Makrodiversität im zellularen Mobilfunk.

In heutigen Mobilfunksystemen wird eine Funkverbindung zwischen der Mobilstation und dem Festnetz über eine Basisstation geführt. Dagegen ermöglicht die Anwendung der Makrodiversität eine Verbindung gleichzeitig - oder im raschen Wechsel - mit mehreren Basisstationen aufrechtzuerhalten. Diese Technik hat damit das Potential, die Zuverlässigkeit von Funkverbindungen zu erhöhen.

Die möglichen Leistungssteigerungen im Mobilfunk durch den Einsatz der Makrodiversität sind Thema dieser Arbeit. Dazu werden zunächst die unterschiedlichen Verfahren der Makrodiversität klassifiziert und die Voraussetzungen für ihren Einsatz im Mobilkommunikationssystem ermittelt. Durch detaillierte Systemuntersuchungen werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ausprägungen der Makrodiversität herausgearbeitet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer möglichen Erhöhung der Gebietsabdeckung, der Systemkapazität und der systemweiten Verbindungsqualität.

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Funkfrequenzen, die dem Mobilfunk heute zur Verfügung stehen und in absehbarer Zukunft zur Verfügung gestellt werden können, werden zellulare Systeme zur bestmöglichen Wiederverwendung von Frequenzen aus immer kleineren Zellen aufgebaut sein. Die Makrodiversität wird deshalb im Umfeld dieser kleinzellularen Netze betrachtet. Sie wird bei ihrer Aufgabe der Kapazitäts- und Verbindungsqualitätserhöhung von einem speziell für diese Umgebungen entwickelten Verfahren des Ressourcenmanagements unterstützt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren der dynamischen Kanalvergabe. Es stellt durch seine Fähigkeit, Funkfrequenzen dort zur Verfügung zu stellen, wo sie zu einem bestimmten Zeitpunkt gebraucht werden, eine flexible Unterstützung der Makrodiversität dar.

Wegen der Frequenzknappheit und des im Vergleich zum leitungsgebundenen Übertragungskanal stark fehleranfälligen Funkkanals, wird die Leistungsfähigkeit eines Mobilfunknetzes vor allem durch die Luftschnittstelle bestimmt. Deshalb widmet sich diese Arbeit überwiegend der Beurteilung des Leistungspotentials der Makrodiversität an der Luftschnittstelle. Zusätzlich wird auf die notwendige Funktionalität des gesamten Mobilkommunikationssystems zur Unterstützung der Makrodiversität eingegangen.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit sind nicht an einen bestimmten Mobilfunkstandard gebunden. Die Ergebnisse der Arbeit sollen zur Bewertung der Makrodiversität an sich dienen, ohne den Einschränkungen bereits existierender Systeme unterworfen zu sein. Auf die Möglichkeiten zur Realisierung der Makrodiversität in heutigen Netzen wird ergänzend eingegangen.

1.2 Übersicht über die Arbeit

In Kapitel 2 werden die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen der Mobilkommunikationssysteme vorgestellt. Zuerst wird ein Überblick über die unterschiedlichen Systeme, klassifiziert nach den genutzten Technologien und angebotenen Diensten, gegeben. Danach werden die wesentlichen Phänomene der elektromagnetischen Wellenausbreitung in der Luft dargestellt und die Probleme aufgezeigt, die die Signalübertragung über den Funkkanal mit sich bringt. Es werden verschiedene Modelle zur Nachbildung des Funkkanals vorgestellt, die bei der Leistungsbewertung von Mobilfunksystemen Anwendung finden. Im weiteren wird detailliert auf den zellularen Mobilfunk eingegangen. Verschiedene Verfahren des Ressourcenmanagements und der Mobilitätsunterstützung (Handover) werden erläutert und die relevanten Parameter zur Beurteilung der Gebietsabdeckung, Systemkapazität und Verbindungsqualität werden eingeführt. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über die Verfahren der Mobilitätsverwaltung.

Kapitel 3 beschäftigt sich speziell mit der Technik der Makrodiversität im Mobilfunk. Zuerst wird die Makrodiversität in die Vielzahl der Diversitätstechniken eingeordnet. Danach wird ihr Einsatz im zellularen Mobilfunk beschrieben. Es werden detailliert die Voraussetzungen dargelegt, die ein makrodiversitätsfähiges Mobilfunksystem erfüllen muß. Sie betreffen die zellulare Architektur (Positionierung der Feststationen), die funktionalen Elemente im Zugangsnetz (Festnetz) und die Signalverarbeitung (Signalverteilung und -kombination). Anschließend wird ein Überblick über die Möglichkeiten der Anwendung der Makrodiversität zur Erhöhung der Gebietsabdeckung, der Systemkapazität und der Verbindungsqualität gegeben. Die Ergebnisse bisheriger Studien werden zusammenfassend dargestellt und im Hinblick auf die Untersuchungen dieser Arbeit eingeordnet.

In Kapitel 4 wird auf die Modellierung eines makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystems eingegangen. Da zur Leistungsuntersuchung der Makrodiversität in dieser Arbeit die Technik der diskreten ereignisgesteuerten Simulation eingesetzt wird, wird besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit zur Umsetzung der gewählten Modelle in ein Simulationsprogramm gelegt. Zu Beginn des Kapitels wird die Abbildung des Mobilfunkgebietes mit seiner zellularen Architektur und den Mobil- und Feststationspositionen auf eine sogenannte „digitale Karte“ erläutert. Im weiteren wird die Modellierung des Nachrichtenverkehrs und das verwendete Bewegungsmodell der mobilen Teilnehmer vorgestellt. Abschließend werden die entwickelten Algorithmen des dynamischen Ressourcenmanagements und der Verbindungsannahmesteuerung präsentiert.

Kapitel 5 und 6 widmen sich der Leistungsuntersuchung der Makrodiversität. Zu Beginn der Kapitel werden jeweils die Leistungsgrößen bestimmt, und es wird dargelegt, wie sie im Modellsystem ermittelt werden. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Gebietsabdeckung im zellu-

laren System. Es wird untersucht, inwiefern sie mit Hilfe verschiedener Makrodiversitätstechniken erhöht werden kann. Diese Fragestellung ist besonders relevant für rauschbegrenzte Systeme, deren Ziel darin besteht, möglichst große Gebiete mit Mobilfunk zu versorgen.

Kapitel 6 untersucht den Einfluß der Makrodiversität auf die Systemkapazität und Verbindungsqualität in einem interferenzbegrenzten System. Diese Betrachtungen sind relevant für Gegenden, die gut mit Mobilfunkdiensten versorgt sind und in denen eine hohe Teilnehmerdichte vorliegt. Das oberste Ziel ist es, trotz begrenzter Ressourcen auf dem Funkkanal, möglichst vielen Teilnehmern den gewünschten Mobilfunkdienst in ausreichender Qualität anbieten zu können.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Forschungspunkte, die sich aus dem bisher Erreichten ergeben.

Kapitel 2

Grundlagen und Modellierung zellularer Mobilfunksysteme

Mobile Kommunikation erfreut sich immer größerer Beliebtheit. Der jährliche Zuwachs an Mobilfunkteilnehmern steigt rapide. Weltweit betrug die Zahl der Abonnenten zellularer Mobilfunksysteme[1] im Jahre 1993 ca. 30 Millionen und ist 1998 bereits auf 280 Millionen angewachsen. Schätzungen sehen für das Jahr 2003 eine Zahl von weltweit 700 Millionen Abonnenten voraus [106]. Allein in Deutschland hatten die drei Mobilfunkbetreiber Deutsche Telekom AG (D1), Mannesmann Mobilfunk (D2) und E-plus im September 1999 zusammen ca. 19 Millionen Abonnenten, dabei lagen die Zuwachsraten im Vergleich zum Vorjahr bei 58% (D1), 60% (D2) und 94% (E-plus). Eine Sättigung dieses Marktes scheint nicht in Sicht zu sein. Der in Deutschland erst im April 1998 gestartete vierte Mobilfunkbetreiber Viag Interkom hatte im September 1999 bereits 470 000 Abonnenten [107].

2.1 Mobilfunksysteme und -standards

Außer den zellularen Systemen, die heute vor allem zur Sprachübertragung und nur in geringem Maße zur Datenübertragung eingesetzt werden, gibt es noch weitere drahtlose und mobile Systeme. Eine Übersicht über die Systeme, die gewöhnlich mit dem Überbegriff „Mobilkommunikation" zusammengefaßt werden, gibt Bild 2-1. Die Systeme sind dabei nach den zu erzielenden Bitraten und dem Grad der Mobilität des Benutzers (seiner Fortbewegungsgeschwindigkeit) während der Benutzung des Dienstes eingeteilt.

Vor allem für den stationären Gebrauch gedacht sind die Systeme, die zur drahtlosen Telefonie oder Datenübertragung innerhalb der Wohnung oder des Büros eingesetzt werden. Die bekanntesten Vertreter in Europa sind die CT-Standards (*Cordless Telephone*, CT-0 bis CT-3) [156] und der pan-europäische DECT-Standard (*Digital European Cordless Telephone*) [155]. Letz-

1. Der Begriff „zellular" wird in Kapitel 2.3 näher erläutert.

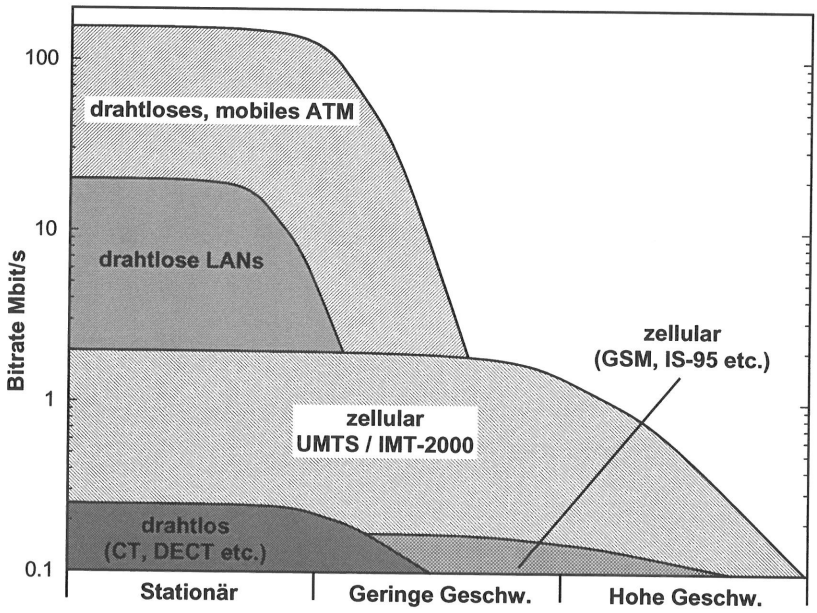


Bild 2-1: Kategorisierung der wichtigsten Mobilfunksysteme

terer wird heute bei den meisten schnurlosen Telephonen in Deutschland eingesetzt. Mit dem neuen DECT-Standard, der nun *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* genannt wird [48], lassen sich jedoch auch kleinzellulare Netze im Innenstadt-Bereich aufbauen [126]. Im Inhouse-Bereich sind Datenraten bis ca. 250 kbit/s erreichbar [155]. Für höhere Geschwindigkeiten der Mobilfunk-Teilnehmer sind die drahtlosen Systeme nicht ausgelegt.

Für hohe Geschwindigkeiten und flächendeckende Funkversorgung wurden die zellularen Netze entwickelt. Sie ermöglichen Telefonie für mobile Benutzer im Auto oder Zug. Zusätzlich bieten sie die Möglichkeit, Kurzmitteilungen zu empfangen oder zu versenden und erlauben den Telefaxdienst und niederbitratige Datendienste. Die heute neu installierten zellularen Mobilfunknetze gehören zur sogenannten „zweiten" Generation. Sie übermitteln Sprache und Daten in digitaler Form. Die „erste" Generation verwendet analoge Übertragung. Diese Systeme sind vor allem in Amerika noch weit im Einsatz (*Advanced Mobile Phone System,* AMPS [116]). Auch in Deutschland nutzen noch ca. 500 000 Abonnenten das analoge C-Netz der Deutschen Telekom AG [106]. Zu den zwei am weitesten verbreiteten Standards der zweiten Generation gehören der amerikanische IS-95-Standard [149] und der europäische GSM-Standard (*Global System of Mobile Communications*) [62]. GSM ermöglicht außer Sprach- und Faxübertragung, Datenübertragung bis zu 9.6 kbit/s bei Benutzer-Geschwindigkeiten bis zu 250 km/h. Erweiterungen sind bereits geplant. So soll *High Speed Circuit Switched Data*

(HSCSD) durch Kanalbündelung Datenraten von bis zu 100 kbit/s ermöglichen [108,138]. Der *General Packet Radio Service* (GPRS) soll paketorientierte Datenübertragung bis theoretisch 170 kbit/s erlauben [25,28,100,146]. Ebenso gibt es Studien darüber, die unterstützte Maximalgeschwindigkeit des bewegten Nutzers auf 400 km/h (Hochgeschwindigkeitszug) anzuheben [108].

Die zukünftige „dritte" Generation der zellularen Mobilfunknetze möchte, aufbauend auf der „zweiten" Generation, vor allem weltweite Verfügbarkeit und ein sehr breites Spektrum an Diensten bieten. In Europa wird ein solches System von ETSI unter dem Namen *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) standardisiert [43]. International arbeitet die ITU an einem Weltstandard unter dem Namen *International Mobile Telecommunications* (IMT-2000). Die Zahl 2000 steht dabei sowohl für das Jahr, in dem die ersten Systeme dieses Standards in Betrieb gehen sollen, als auch für den Frequenzbereich in Megahertz, in dem die Systeme senden werden. Die frühere Bezeichnung dieses Standards war *Future Public Land Mobile Telecommunication System* (FPLMTS) [72,71,158].

Das Ziel von UMTS/IMT-2000 ist es, als weltumspannendes Netz globale, mobile Kommunikation an jedem Punkt der Erde jederzeit zu ermöglichen. Aus dem Wunsch der Teilnehmer, ihr Endgerät möglichst weltweit einsetzen zu können, ergibt sich die Forderung nach einem harmonisierten internationalen Standard. Die Zusammenarbeit von terrestrischen und satellitengestützten Systemen ergibt die gewünschte weltweite Abdeckung. Einen detaillierten Überblick über UMTS/IMT-2000 findet sich in [29,39,79].

Auf Seiten der Dienste möchte UMTS/IMT-2000 sowohl durchschaltevermittelte als auch paketorientierte Dienste anbieten können. In die erste Kategorie fallen Sprache und Telefax. Sie werden auch in Zukunft wichtige Dienste sein und deshalb natürlich weiterhin angeboten werden. An einer Verbesserung der Sprachqualität gegenüber der zweiten Generation wird verstärkt gearbeitet.

In die zweite Kategorie fallen die datenbasierten Dienste. Die wichtigsten dieser, vor allem aus dem Internet bekannten, Dienste sind das *World Wide Web* (WWW), *e-mail* (elektronische Post) und der Dateitransfer. Da diese Dienste heute im Festnetz sehr wichtig sind, soll die dritte Generation der Mobilfunksysteme sie genauso unterstützen wie Dienste zur Videoübertragung, Videokonferenzschaltung und Bildtelefonie. Als höchste Benutzerdatenrate wird ein Wert von 2 Mbit/s angestrebt. Für hohe Fahrgeschwindigkeiten und für schwach besiedelte Gebiete wird jedoch eine Maximaldatenrate von 128 kbit/s pro Benutzer als realistisch angesehen [43]. Die ersten Systeme der dritten Generation sollen in den Jahren 2002-2005 in den kommerziellen Betrieb gehen [71].

Um diesen hohen Anforderungen an die Systeme der dritten Generation gerecht zu werden, sind große technische Anstrengungen nötig. Seit Mitte der neunziger Jahre sind deshalb weltweite Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur Realisierung von UMTS/IMT-2000 angelaufen [33,34,112]. In dieses Umfeld ist diese Arbeit einzuordnen. Ihr Ziel ist es, neue Erkenntnisse aufzuzeigen, die helfen können, die notwendigen Abdeckungs-, Qualitäts- und Kapazitätsverbesserungen im Mobilfunk zu erzielen.

Im weiteren sind in Bild 2-1 die drahtlosen lokalen Netze (LAN) und das drahtlose, mobile ATM aufgezeigt. Die drahtlosen lokalen Netze sollen vor allem die drahtgebundenen LANs (Ethernet, Token Ring etc.) im Inhouse-Bereich ergänzen. Der IEEE-Standard 802.11 [69,70], für den es heute bereits käufliche Produkte gibt, spezifiziert Datenraten bis zu 2 Mbit/s. Proprietäre LANs erreichen auch Datenraten bis zu 11 Mbit/s [88]. Der europäische Standard HIPERLAN 1 [46,47] spezifiziert bereits Datenraten bis zu 20 Mbit/s. Produkte, die diesen Standard unterstützen, werden demnächst auf den Markt kommen. Geplante Erweiterungen des IEEE 802.11 Standards (802.11a im 5 GHz Band und 802.11b im 2,4 GHz Band) sollen ebenfalls Datenraten bis zu 20 Mbit/s erreichen [140]. In drahtlosen LANs sind die Endgeräte meist beweglich, während der Operation jedoch stationär. Theoretisch können bei entsprechender Unterstützung im kabelbasierten Festnetz (z. B. durch Mobile-IP) auch zellulare Netze mit der Möglichkeit der Verbindungsübergabe (Handover) aufgebaut werden. Die Unterstützung höherer Geschwindigkeiten als Schrittgeschwindigkeit ist aber nicht das Ziel dieser Netze.

Das drahtlose, mobile ATM (*wireless, mobile ATM*) dehnt das Festnetz-ATM über die Luftschnittstelle aus [134]. Wie im Festnetz sollen Datenraten von 155 Mbit/s angeboten werden. Bei höheren Geschwindigkeiten der mobilen Teilnehmer sinkt jedoch die nutzbare Datenrate. Prinzipiell sollen die funkbasierten ATM-Netze dieselben Dienste wie das Festnetz-ATM anbieten können. Wie trotz des fehleranfälligen Funkkanals eine einmal angeforderte Dienstgüte möglichst für die gesamte Verbindungsdauer garantiert werden kann, ist einer der Hauptuntersuchungspunkte der Forschung [143,144]. Der Einsatz dieser ATM-Netze wird vor allem im Inhouse-Bereich, z. B. in einer Fabrikhalle oder einem Operationssaal gesehen, wo eine Verkabelung der Endgeräte schwer möglich ist oder sich häufig ändern muß [7,55]. Die Standardisierung von drahtlosen, mobilen ATM-Systemen für verschiedene Einsatzgebiete erfolgt unter anderem bei ETSI unter den Namen HIPERLAN 2, 3, und 4 [54]. Einen endgültigen Standard gibt es noch nicht.

Abschließend sind noch die satellitengestützten Mobilfunksysteme zu erwähnen, die vor allem auf dem Gedanken der globalen Kommunikation basieren. Je nach Betreiber und der verwendeten Systemtechnik bieten sie ähnliche Dienste an, wie sie bereits oben bei den rein terrestrischen Systemen und bei UMTS/IMT-2000 erwähnt wurden. Eine gute Übersicht gibt [77].

In dieser Arbeit werden vor allem die terrestrischen zellularen Systeme betrachtet.

2.2 Der Mobilfunkkanal und seine Modellierung

Der Mobilfunkkanal ist einer der ungünstigsten Kanäle zur Übertragung von Informationen. Er ist zeit- und ortsabhängig, das heißt er wird durch die räumliche Lage und Bewegung der Mobilstationen relativ zur Basisstation beeinflußt. Die im folgenden erläuterten physikalischen Phänomene der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen verändern die Signalform des Sendesignals auf dem Weg zum Empfänger. Daraus resultiert eine Fluktuation der Empfangsleistung, die mit Hilfe von statistischen Modellen beschrieben werden kann. Diese Modelle werden in den folgenden Kapiteln verwendet, um die verschiedenen Leistungsdaten eines Mobilfunksystems, wie Verbindungsqualität oder Kapazität, ermitteln zu können.

2.2.1 Mehrwegausbreitung

Wenn sich Sender, Empfänger oder die Umgebung (z. B. Autos) in einem Mobilfunksystem bewegen, werden am Empfänger starke Pegelschwankungen des Empfangssignals verzeichnet.

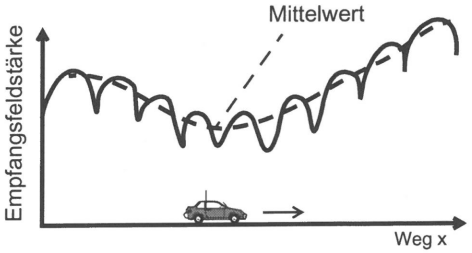


Bild 2-2: Typische Signalfluktuation (Fading)

Die in Bild 2-2 gezeigten Signaleinbrüche liegen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit im Bereich von einer halben Wellenlänge [35,97]. Da dies relativ schnelle Pegelschwankungen sind, wird auch von „schnellem Schwund" (*fast fading* oder *short-term fading*) gesprochen. Dieser schnelle Schwund ist vor allem auf die Mehrwegausbreitung des Funksignals zurückzuführen. Im Gegensatz dazu wird die Schwankung des Mittelwerts der Empfangsfeldstärke (in Bild 2-2 gestrichelt dargestellt) als „langsamer Schwund" (*slow fading* oder *long-term fading*) bezeichnet. Seine Entstehung erklärt sich aus der Abschattung des Empfängers gegenüber dem Sender durch Gebäude oder andere Hindernisse (Kapitel 2.2.3).

Die Mehrwegausbreitung ergibt sich aus dem natürlichen Phänomen, daß das Sendesignal den Empfänger nicht nur auf einem Weg erreicht, sondern auf vielen verschiedenen. In einem natürlichen oder auch bebauten Gebiet wird ein Funksignal an Bergen, Bäumen, Gebäuden und anderen Hindernissen gebrochen, gestreut und reflektiert (Bild 2-3).

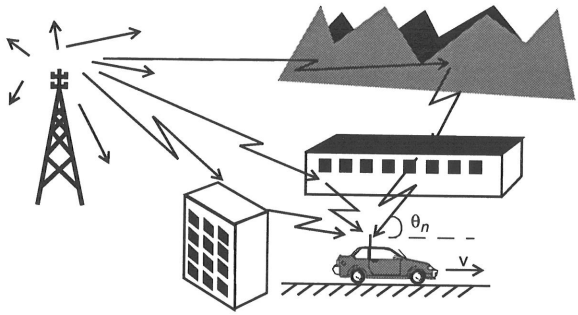


Bild 2-3: Mehrwegausbreitung

Aus diesem Grund treffen immer mehrere unterschiedlich gedämpfte und phasenverschobene Signale beim Empfänger ein. Bei der Übertragung eines unmodulierten Trägers f_0 läßt sich das Empfangssignal *r(t)* daher als Summe der Signale auf den unterschiedlichen Ausbreitungswegen angeben als

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} \alpha_n(t)\exp(-j2\pi f_0 t)\exp\left(-j2\pi\frac{v}{\lambda}t\cos\theta_n\right) \qquad (2\text{-}1).$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß sich der mobile Empfänger mit konstanter Geschwindigkeit v bewegt. Der Term $v/\lambda \cdot \cos\theta_n$ entspricht der Dopplerfrequenz mit Wellenlänge λ. α_n ist die Dämpfung und θ_n der Einfallswinkel des Signals auf Ausbreitungsweg n. θ_n wird, wie in Bild 2-3 angedeutet, gegenüber der Horizontalen gemessen.

Für den typischen Fall, daß die Anzahl der Wege N sehr groß ist, lassen sich die einzelnen Wegdämpfungen α_n und die Einfallswinkel θ_n nicht mehr im einzelnen angeben. Um dennoch Aussagen über den Empfangspegel machen zu können, wird zu einer statistischen Beschreibung der Mehrwegausbreitung übergegangen. Das Empfangssignal *r(t)* wird dazu als komplexe Zufallsvariable modelliert und wie folgt geschrieben:

$$r(t) = A\exp(j\psi)\exp(-j2\pi f_0 t) \qquad (2\text{-}2).$$

Die Empfangsamplitude A und die Empfangsphase ψ sind Zufallsvariablen.

Gibt es, wie es im städtischen Gebiet häufig der Fall ist, keinen direkten Pfad zwischen Sender und Empfänger (*Non Line Of Sight*, NLOS), dann ist ψ gleichverteilt zwischen 0 und 2π und A ist Rayleigh-verteilt mit der Verteilungsdichtefunktion

$$f_A(x) = \frac{x}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (2\text{-}3).$$

σ^2 ist der Zeitmittelwert der Empfangsleistung vor der Detektion [133].

Gibt es dagegen eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger (*Line Of Sight*, LOS) und damit eine dominante Signalkomponente s, so ist die Empfangsamplitude Rice-verteilt mit

$$f_A(x) = \frac{x}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2+s^2}{2\sigma^2}\right)I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right) \qquad (2\text{-}4).$$

Hierbei ist $I_0(x)$ die modifizierte Besselfunktion erster Art und nullter Ordnung.

Die Empfangsphase folgt dann einer Verteilung, die sich für eine schwache direkte Signalkomponente einer Gleichverteilung (wie im NLOS-Fall) und für eine starke direkte Signalkomponente der Phasenlage eben dieser Komponente annähert [35,130].

Für die Planung von Mobilfunknetzen und die Bewertung der zu erzielenden Verbindungsqualität ist die Betrachtung der mittleren Empfangsleistung sehr wichtig. Um die komplizierten Vorgänge der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen nicht in jedem Einzelfall berechnen zu müssen, sind aus zahlreichen Messungen empirische Modelle geschaffen worden, die es erlauben, die Empfangsleistung am Ort des Empfängers vorauszusagen. Im folgenden wird auf die Modelle eingegangen, die in dieser Arbeit Anwendung finden. Es sind dies die Modelle der entfernungsabhängigen Dämpfung und der Abschattung.

2.2.2 Entfernungsabhängige Dämpfung

Mit steigender Entfernung eines Empfängers vom Sender nimmt die Empfangsleistung stetig ab [97,133]. Die Empfangsleistung P_r kann demnach mit folgender allgemeiner Formel in Abhängigkeit von der Sendeleistung P_t beschrieben werden:

$$P_r \sim L(d) \cdot P_t \qquad (2\text{-}5).$$

Dabei ist L die Dämpfung oder der Pfadverlust (*path loss*), der von der Entfernung d des Empfängers vom Sender abhängt. Wird diese Formel zu einer Gleichung umformuliert, ergibt sich

$$P_r = c \cdot L(d) \cdot P_t \qquad (2\text{-}6)$$

mit c eine Proportionalitätskonstante, deren genaue Bedeutung die nachfolgenden Modelle erläutern.

Im logarithmischen Maßstab wird Formel (2-6) zu:

$$P_{r_{dBm}} = c_{dB} + L_{dB}(d) + P_{t_{dBm}} \qquad (2\text{-}7).$$

Hierbei werden die Leistungen in *dBm* (Dezibel pro Milli-Watt) und die Dämpfung in *dB* angegeben. Für die Umrechnung in den logarithmischen Maßstab gilt allgemein für die Leistungen $P_{dBm} = 10 \lg\left(\frac{P}{1\,\mathrm{mW}}\right)$ und für die Dämpfung $L_{dB} = 10 \lg L$, wobei „lg" der Logarithmus zur Basis 10 ist. L_{dB} ist kleiner null, da $L<1$.

2.2.2.1 Freiraumausbreitung

Bei Freiraumausbreitung nimmt die Empfangsleistung P_r eines Funksignals umgekehrt proportional zum Quadrat der Distanz d zwischen Sender und Empfänger ab:

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t \qquad (2\text{-}8).$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Sendesignals, P_t die Sendeleistung und G_t bzw. G_r der Gewinn der Sende- bzw. Empfangsantenne [35].

Die Antennengewinne sind abhängig von der räumlichen Ausrichtung der Mobilstation zur Basisstation. Sie werden von den Richtdiagrammen der Antennen bestimmt. In dieser Arbeit werden die horizontalen Richtdiagramme für zwei verschiedene Antennentypen verwendet (Bild 2-4): die ideale omnidirektionale Antenne, deren Gewinn in alle Richtungen konstant ist und die ideale 120-Grad-Richtantenne, deren Gewinn nur in einem Winkel von 120 Grad von null verschieden ist.

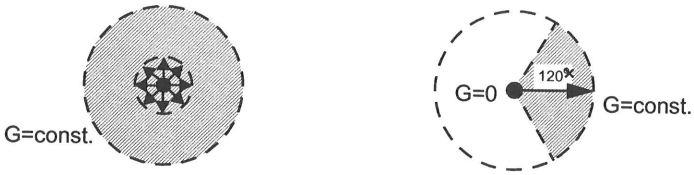


Bild 2-4: Ideale omnidirektionale (links) und 120-Grad-Richtantenne (rechts)

2.2.2.2 Ausbreitung mit Bodenreflexion

Im Mobilfunk liegt selten der Fall vor, daß sich das Sendesignal auf unverbautem, direktem Weg zwischen Sender und Empfänger ausbreiten kann. Eine bessere Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse wird deshalb unter Einbeziehung der Bodenreflexion erreicht.

Mit dem sogenannten Zweiwegemodell, bei dem ein direkt am Empfänger einfallendes und ein am Boden reflektiertes Signal (siehe Bild 2-5) berücksichtigt werden, ergibt sich folgende Gleichung:

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}\right) P_t \qquad (2\text{-}9).$$

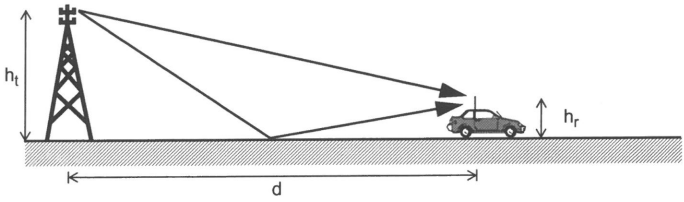


Bild 2-5: Ausbreitung mit Bodenreflexion

Dabei ist h_t die Höhe der Sendeantenne und h_r die Höhe der Empfangsantenne.

Für große Distanzen d ($d \gg \sqrt{h_t h_r}$) sinkt die Empfangsleistung mit $\frac{1}{d^4}$ also erheblich schneller als bei Freiraumausbreitung. Auch wird die Dämpfung für großes d unabhängig von der Frequenz des Signals [133].

2.2.2.3 Modelle nach Okumura, Hata und COST-231

Aus umfangreichen Ausbreitungsmessungen von Okumura [113] im städtischen Gebiet bei Tokio hat Hata [65] eine empirische Formel zur Bestimmung der Dämpfung L_{dB} (in Dezibel) hergeleitet:

$$L_{dB} = 69{,}55 + (26{,}16 \cdot \lg f_c) - (13{,}82 \cdot \lg h_B) + (44{,}9 - (6{,}55 \cdot \lg h_B)) \cdot \lg d \qquad (2\text{-}10).$$

Hierbei ist f_c die Sendefrequenz in MHz (von 150 bis 1500 MHz), h_b die Antennenhöhe der Basisstation in Metern (von 30 bis 200 m), d die Distanz in Kilometern (d>1km). Zur Verwendung der Formel in anderen als den angegeben Parameterbereichen und in weniger bebauten Gebieten sind von Hata und anderen Forschern Korrekturfaktoren zur Ergänzung der Formel veröffentlicht worden (eine Übersicht gibt [133]). Eine Erweiterung der Formel auf den Frequenzbereich von 2 GHz wurde zum Beispiel von COST-231 vorgeschlagen [30].

2.2.2.4 Allgemeines Modell der entfernungsabhängigen Dämpfung

Die oben angeführten Modelle der entfernungsabhängigen Dämpfung (Freiraumausbreitung, Ausbreitung mit Bodenreflexion, Okumura-, Hata- und COST-231-Modell) lassen sich in einem verallgemeinerten Modell zusammenfassen. Die Dämpfung L läßt sich dann schreiben als

$$L = g_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma} \qquad (2\text{-}11)$$

mit d der Distanz zwischen Sender und Empfänger, γ dem Dämpfungskoeffizienten, d_0 einer Distanzeinheit (Einheitsabstand vom Sender) und g_0 dem Leistungsübertragungsfaktor in der Distanz d_0.

Der Koeffizient γ ist bei Freiraumausbreitung 2, beim Okumura-Hata- und COST-231-Modell ist er von den Antennenhöhen abhängig. Für gängige Antennenhöhen liegt γ zwischen 3 und 4.

Dieses allgemeine Modell wird in der Literatur häufig zur Modellierung der Ausbreitungsbedingungen in vorstädtischen und ländlichen Gebieten angewandt [97,129,175].

2.2.2.5 Das Wendepunkt-Modell

Messungen der entfernungsabhängigen Dämpfung in städtischem Gebiet bei Antennenhöhen an der Basisstation unterhalb der Hausdächer (<30m) wurden von Harley [64] durchgeführt. In Anlehnung an das von ihm vorgeschlagene Modell läßt sich die entfernungsabhängige Dämpfung wie folgt schreiben:

$$L = c_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^{\alpha} \frac{1}{\left(1+\frac{d}{g}\right)^{\beta}} \qquad (2\text{-}12),$$

mit c_0 einer Konstanten, d_0 der Distanzeinheit im Abstand zum Sender, d der Distanz zwischen Sender und Empfänger, α dem Basis-Dämpfungskoeffizienten, β dem zusätzlichen Dämpfungskoeffizienten und g dem Wendepunkt.

In diesem Modell setzt sich die Steigung der Dämpfungskurve aus zwei Faktoren zusammen. Vor dem Wendepunkt gilt im wesentlichen der Dämpfungskoeffizient α ($L \sim \frac{1}{d^{\alpha}}$ für $d \ll g$), nach dem Wendepunkt der Koeffizient $\alpha+\beta$ ($L \sim \frac{1}{d^{(\alpha+\beta)}}$ für $d \gg g$).

Aufgrund der Eigenschaft, daß sich der Dämpfungskoeffizient ab einer bestimmten Entfernung vom Sender ändert, wird dieses Modell als Wendepunkt-Modell bezeichnet (auch *turning point*- oder *break point*-Modell) [129].

Ein ähnliches Modell, das sich gut für die Modellierung der Ausbreitungsbedingungen in einem städtischen Gebiet mit perfekt in Nord-Süd- und West-Ost-Richtung verlaufenden Straßen (*Manhattan streets*) eignet, findet sich in [16]. Es beruht auf demselben Prinzip wie Harleys Modell. Auf der Strecke zwischen Basisstation und der nächsten Gebäudeecke herrscht freie Sicht und damit ein geringer Dämpfungskoeffizient, nach dem Wendepunkt jedoch nimmt die Dämpfung stark zu, da keine freie Sicht mehr besteht. Dieses Modell kann als eine Spezialisierung des Wendepunkt-Modells gesehen werden. Auf seine Anwendung im Umfeld dieser Arbeit wird in Kapitel 4 eingegangen.

2.2.3 Abschattung

Im Mobilfunk hängt die Dämpfung zwischen Sender und dem sich bewegenden Empfänger jedoch nicht nur von der Entfernung ab. Infolge der Abschattung des Empfängers durch Gebäude, Bäume oder sich bewegende Hindernisse (Lastwagen, Autos etc.) ist die Empfangsleistung nie konstant, sondern schwankt um ihren Mittelwert (siehe Bild 2-2). Messungen

haben ergeben, daß sich diese Dämpfungsschwankung um den Mittelwert durch eine Normalverteilung im Dezibel-Maßstab beschreiben läßt [97]. Dies entspricht im linearen Maßstab einer Log-Normalverteilung; im Englischen wird deshalb außer von *slow fading* (siehe Kapitel 2.2.1) auch von *shadow fading* oder *log-normal fading* gesprochen.

In Verfeinerung der Gleichung (2-6) läßt sich die mittlere Empfangsleistung P_r (*local mean power*) wie folgt schreiben:

$$P_r = LG_tG_rP_t \tag{2-13}$$

mit der Sendeleistung P_t, den Antennengewinnen der Sende- bzw. Empfangsantenne G_t und G_r und dem Pfadverlust L. Nach Übergang in den Dezibel-Maßstab ergibt dies

$$P_{r_{dBm}} = L_{dB} + G_{t_{dB}} + G_{r_{dB}} + P_{t_{dBm}} \tag{2-14}.$$

Die Verteilungsdichte von L_{dB} ist dann aufgrund der Abschattung gegeben als:

$$f(L_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(L_{dB}-\bar{L}_{dB})^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2-15}.$$

Dabei ist $\bar{L}_{dB}$ der Mittelwert der Dämpfung. Er läßt sich aus den verschiedenen Gleichungen der entfernungsabhängigen Dämpfung nach Kapitel 2.2.2 berechnen. Nach dem allgemeinen Modell der Gleichung (2-11) kann der Mittelwert $\bar{L}_{dB}$ angegeben werden als

$$\bar{L}_{dB} = 10\lg\left(g_0\left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma}\right) \tag{2-16}$$

mit den Parametern wie in Kapitel 2.2.2.4 beschrieben.

Bei Anwendung des mikrozellularen Modells ergibt sich der Mittelwert $\bar{L}_{dB}$ nach Gleichung (2-12) zu

$$\bar{L}_{dB} = 10\lg\left(c_0\left(\frac{d_0}{d}\right)^{\alpha}\frac{1}{\left(1+\frac{d}{g}\right)^{\beta}}\right) \tag{2-17}$$

mit den Parametern nach Kapitel 2.2.2.5.

Die Gesamtdämpfung des Signals setzt sich also immer aus der entfernungsabhängigen Dämpfung und der zufälligen Dämpfung aufgrund der Abschattung zusammen.

2.2.3.1 Örtliche Korrelation der Dämpfungsschwankungen

Die von der Abschattung herrührenden örtlichen Dämpfungsschwankungen können je nach Morphologie der Umgebung für nah beieinanderliegende Orte ähnlich sein. Ein Maß für diese Ähnlichkeit ist die Korrelation der Dämpfungswerte.

Um die örtliche Autokorrelation der Empfangssignale von derselben Basisstation zu beschreiben, schlägt Gudmundson eine exponentiell abnehmende Funktion vor [63]. Wird die Abschattung L_{dB} im Dezibel-Maßstab als Summe der entfernungsabhängigen Dämpfung und einer mittelwertfreien, normalverteilten Zufallsvariablen U geschrieben, dann ist die Autokorrelationsfunktion von U mit

$$E[U(d_1)U(d_2)] = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|d_2 - d_1|}{\varepsilon}\right) \tag{2-18}$$

gegeben. Dabei ist $|d_2\text{-}d_1|$ der Wegunterschied der betrachteten Orte, σ^2 die Varianz der Abschattung und ε die Distanz, bei der die Autokorrelation auf 1/e abgefallen ist.

Gudmundsons Messungen ergaben in vorstädtischem Gebiet eine signifikante Korrelation bis zu einigen hundert Metern Ortsunterschied, in städtischem Gebiet schwindet die Korrelation dagegen schon ab 20 m [63]. Gudmundson selbst weist darauf hin, daß sein Modell nur für vorstädtisches Gebiet geeignet zu sein scheint. In städtischem Gebiet sind die Abweichungen der Modellergebnisse von den gemessenen Werten sehr groß. Generell läßt sich sagen, daß die Parametrisierung von Gleichung (2-18) schwierig ist, da verschiedene publizierte Meßergebnisse bezüglich der Korrelation stark schwanken. So mißt Grimlund in [61] für einen Ortsunterschied von 6 m einen Korrelationsfaktor von 0,5 in größerer Entfernung von der Basisstation und einen Faktor von nur 0,1 in der Nähe der Basisstation. In [50] ziehen Evans und Everitt das Fazit, daß die Korrelation zwischen weit entfernten Orten nicht signifikant ist.

Für den Fall, daß dasselbe Signal von zwei unterschiedlichen Basisstationen gesendet wird, gibt es bezüglich der Korrelation unterschiedliche Annahmen. Während Grimlund [61] und Stüber [145] davon ausgehen, daß die Abschattung dieser Signale als unkorreliert angenommen werden kann, möchten Viterbi et al. [157] dies nicht ausschließen. Sie formulieren deswegen ein theoretisches Korrelationsmodell, nach dem der Korrelationskoeffizient (normierte Kovarianz) der Gleichung

$$\frac{E[U_i U_j]}{\sigma^2} = a^2 \tag{2-19}$$

genügt. Die Indizes i und j bezeichnen dabei die beiden entfernt stehenden Basisstationen. Eine empirische Bestätigung dieses Modells ist nicht bekannt. Deshalb ist auch die Wahl des Parameters a schwierig [157].

In dieser Arbeit werden die Signale, die von weit entfernt stehenden Basisstationen herrühren, als unkorreliert angenommen.

2.3 Zellularer Mobilfunk

Um ein großes Gebiet wie eine Stadt oder ein ganzes Land flächendeckend mit Mobilfunk versorgen zu können, werden sogenannte zellulare Mobilfunksysteme eingesetzt. Zur Flächendeckung werden viele Feststationen im Dienstgebiet verteilt, damit an jedem Ort eine ausreichende Funkversorgung gewährleistet ist. Das Versorgungsgebiet einer Feststation wird als Zelle bezeichnet. Es ist das Gebiet, in dem die Dämpfung des Sendesignals gerade noch so niedrig ist, daß eine Mobilstation das Signal dekodieren kann. Da die Dämpfung mit zunehmender Entfernung zunimmt (siehe Kapitel 2.2), ist die Zellgröße aufgrund der endlichen Sendeleistung begrenzt.

Wird eine Mobilfunkzelle näherungsweise als gleichseitiges Hexagon gezeichnet (siehe Bild 2-6), erlaubt dies eine symmetrische Aufteilung des Dienstgebietes ohne Überlappung. In der Praxis sind die Zellränder aufgrund der Abschattung, Brechung und Reflexion der Funkwellen nicht symmetrisch. Auch Überlappungen der Zellgebiete sind nicht vermeidbar. Die Hexagone sind eine grobe Annäherung an die Kreisform, die sich ergibt, wenn nur die entfernungsabhängige Dämpfung ohne Abschattung betrachtet (Kapitel 2.2.2) wird. Unter der Annahme, daß für alle Entfernungen d in der Zelle

$$G_t G_r g_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma} P_t \geq P_{r,\,min} \tag{2-20}$$

gelten muß, ergibt sich der Zellradius R zu:

$$R = d_0 \cdot \sqrt[\gamma]{\frac{G_t G_r g_0 P_t}{P_{r,\,min}}}. \tag{2-21}$$

2.3.1 Kanalwiederverwendung und Gleichkanalinterferenz

Ein weiteres Ziel des zellularen Konzeptes [99] ist es, bei begrenzter Anzahl an Funkfrequenzen (Kanälen)[2] eine möglichst hohe Anzahl an Benutzern gleichzeitig bedienen zu können, also eine hohe Teilnehmerkapazität zu ermöglichen. Um dies zu erreichen, werden Kanäle nicht nur einmal, sondern mehrmals, jedoch an unterschiedlichen Orten, verwendet. Bild 2-6 zeigt ein Beispiel der Kanalwiederverwendung.

2. Um die Erklärung an dieser Stelle möglichst anschaulich zu gestalten, wird eine Funkfrequenz hier einem Kanal gleichgesetzt (s. auch Kapitel 2.3.4.1).

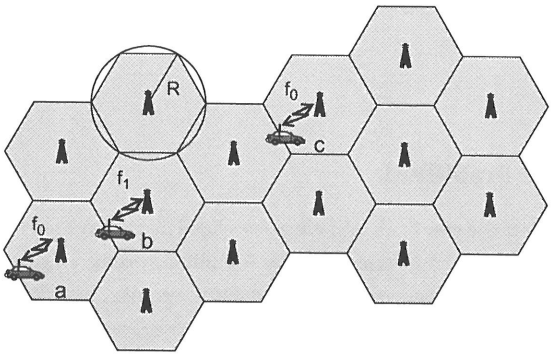


Bild 2-6: Kanalwiederverwendung im zellularen System

Die Mobilstationen in Zelle *a* und *c* können beide denselben Kanal verwenden (Frequenz f_0), da sie räumlich weit von einander getrennt sind. Die Stationen in den Zellen *a* und *b* dagegen müssen unterschiedliche Kanäle verwenden (f_1 in Zelle *b*), da sie sich sonst gegenseitig stören.

Der bestimmende Parameter, der anzeigt, ob eine Kanalwiederverwendung möglich ist, ist das Signal-Interferenz-Verhältnis der Empfangsleistung (*Carrier to Interference Ratio*, CIR). Die betrachtete Interferenzleistung ist hierbei die sogenannte Gleichkanalinterferenz (*cochannel interference*), da Störer und Nutzer denselben Kanal verwenden. Deshalb wird in diesem Fall das CIR auch als Gleichkanalstörabstand bezeichnet.

Im Beispiel ist für die Mobilstation in Zelle *a* das von der Feststation in Zelle *a* empfangene Signal das Nutzsignal (mit der Nutzleistung *C*) und das von der Feststation aus Zelle *c* empfangene Signal das Störsignal (mit der Interferenzleistung *I*). Da die Entfernung - und damit die Dämpfung - zwischen der Feststation in Zelle *c* und der Mobilstation in Zelle *a* groß genug ist, bleibt das Signal-Interferenz-Verhältnis CIR=*C/I* ebenfalls groß genug, so daß beide Mobilstationen in Zelle *a* und *c* denselben Kanal verwenden können. Im GSM z. B. ist ein minimales Signal-Interferenz-Verhältnis von 9 dB nötig, um das Signal noch richtig dekodieren zu können.

2.3.2 Nachbarkanalinterferenz

Aufgrund des Bestrebens, die zur Verfügung stehenden Funkfrequenzen gut auszunutzen, werden die Frequenzkanäle möglichst dicht nebeneinander gelegt. Dabei kommt es, wie in allen bandbegrenzten Übertragungssystemen, zu Nachbarkanalinterferenz (*adjacent channel interference*). Aufgrund der Tatsache, daß Sende- und Empfangsfilter im realen System keine idealen Bandpässe sein können, wird die Signalleistung des Nachbarkanals immer störend auf den eigenen Kanal einwirken (siehe Bild 2-7). Durch geeignete Modulationsverfahren und möglichst steilflankige Filter wird versucht, den Störanteil möglichst gering zu halten [130]. Im

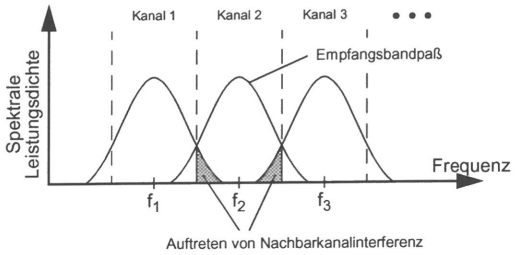


Bild 2-7: Nachbarkanalinterferenz

zellularen Mobilfunk kann auch mit Hilfe der Kanalvergabe (siehe Kapitel 2.3.4) dafür gesorgt werden, daß benachbarte Mobilfunkfrequenzen nicht in benachbarten Zellen gleichzeitig benutzt werden.

2.3.3 Interferenzbegrenzte und rauschbegrenzte Systeme

Jede Art von drahtloser Kommunikation ist rauschbehaftet. Das Rauschen setzt sich dabei aus thermischem und technischem Rauschen zusammen. Letzteres ist im Mobilfunk vor allem das Eigenrauschen der Verstärker sowie das durch die elektrischen Systeme im Auto verursachte Rauschen. Diese Art von Rauschen trägt normalerweise den größten Anteil zur Gesamtrauschleistung bei. Findet die Kommunikation nur zwischen wenigen Teilnehmern, im Extremfall nur zwischen einem Sender und einem Empfänger statt, ist die Empfangsqualität vor allem vom sogenannten Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal to Noise Ratio*, SNR=S/N) abhängig. Nur wenn dieses groß genug ist, können Daten fehlerfrei übertragen werden. Die Rauschleistung begrenzt also die Systemqualität. Es wird dann von einem rauschbegrenzten System gesprochen.

Wenn viele Funkverbindungen in einem begrenzten Frequenzband betrieben werden, kommt zu dem Rauschen noch die Interferenz (Gleichkanal- und Nachbarkanalinterferenz) als zusätzliche Signalstörung hinzu. Als Parameter zur Beurteilung der Empfangsqualität bietet sich dann das sogenannte Signal-zu-Interferenz-und-Rausch-Verhältnis (*Carrier to Noise and Interference Ratio*, CINR=$C/(I+N)$) an.

Aufgrund der Kanalwiederverwendung im zellularen Mobilfunk ist die entstehende Gleichkanalinterferenz (zumindest bei hoher Verkehrslast) der Parameter mit dem höchsten Einfluß auf die Systemleistung. Es wird deshalb von einem interferenzbegrenzten System gesprochen. Als Parameter zur Leistungsbewertung reicht dann das Signal-Interferenz-Verhältnis CIR aus, da $I \gg N$ gilt.

2.3.4 Ressourcenmanagement im zellularen Mobilfunk

Aufgrund der Knappheit an für den Mobilfunk zur Verfügung stehenden Radiofrequenzen kommt dem Ressourcenmanagement an der Luftschnittstelle eine entscheidende Rolle zu. Dessen Ziel ist, mit einer begrenzten Anzahl an Ressourcen („Frequenzen") möglichst viele Teilnehmer mit ausreichender Qualität versorgen zu können.

Das Ressourcenmanagement setzt sich aus der Kanalvergabe beim Verbindungsaufbau und der Steuerung von Zellübertritten und einem damit eventuell verbundenen Wechsel der Ressource (*handover*) zusammen. Es steht in engem Zusammenhang mit der Verbindungsannahmesteuerung (Bild 2-8).

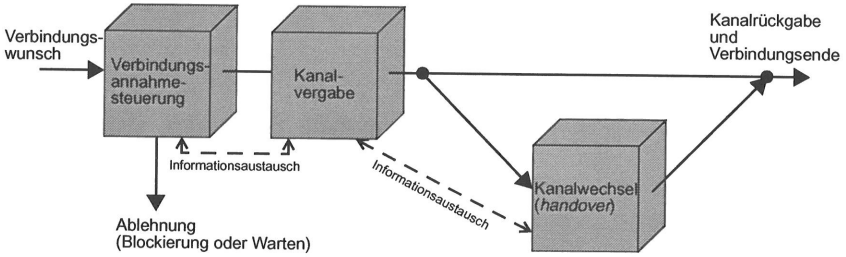


Bild 2-8: Ressourcenmanagement an der Luftschnittstelle

Die Verbindungsannahmesteuerung entscheidet aufgrund des Zustandes der Ressourcen („frei/belegt", „benutzbar/unbenutzbar") und der möglicherweise entstehenden Qualitätsbeeinträchtigung bereits aktiver Verbindungen, ob einem neuen Verbindungswunsch stattgegeben werden kann oder nicht. Ist keine Ressource verfügbar, oder würde durch die Aufnahme eines neuen Teilnehmers die Qualität anderer Verbindungen in einem unverträglichen Maße beeinträchtigt werden, so muß der Verbindungswunsch abgewiesen (blockiert) oder in eine Warteschlange eingereiht werden. In ihre Entscheidung kann die Verbindungsannahmesteuerung Ergebnisse aus den Algorithmen der Kanalvergabe miteinbeziehen.

Die Kanalvergabe weist einem neuen Verbindungswunsch einen Kanal zu, so daß der gewünschte Dienst in der notwendigen Qualität erbracht werden kann. Die feste Kanalvergabe erreicht dies durch Frequenzplanung vor Aufnahme des Betriebes des Mobilfunknetzes. Die dynamische Kanalvergabe dagegen vergibt die Kanäle im laufenden Betrieb des Systems entsprechend den momentan vorherrschenden Signal-Interferenz-Verhältnissen.

Das Handover-Verfahren (Weitergabe einer Verbindung) sorgt dafür, daß eine sich bewegende Mobilstation bei einem Zellwechsel oder bei einer Verschlechterung des Kanalzustandes einen neuen Kanal zugewiesen bekommt.

Im folgenden werden die Verfahren des Ressourcenmanagements in einem zellularen Mobilfunksystem nun im einzelnen betrachtet.

2.3.4.1 Feste Kanalvergabe

Die feste Kanalvergabe (*Fixed Channel Assignment*, FCA) ordnet die Zellen des gesamten Mobilfunksystems zu Zellgruppen (*cluster*). Jede Zellgruppe kann über den Gesamtvorrat an Frequenzen (Kanälen)[3] verfügen. Einer einzelnen Zelle in einer Gruppe steht jedoch nur ein Teil der Frequenzen zur Verfügung. Bild 2-9 verdeutlicht dies mit einer Zellgruppengröße (*cluster size*) von sieben.

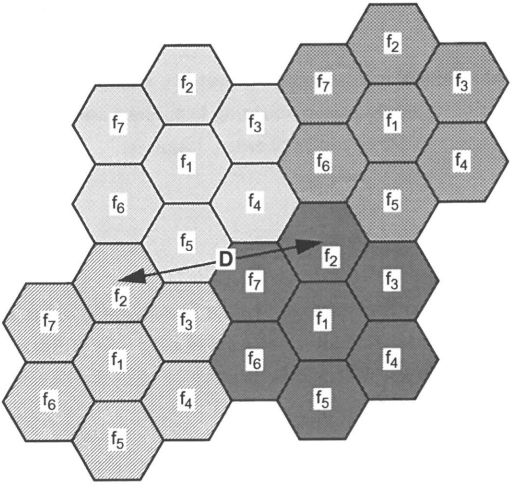


Bild 2-9: Zellgruppen und Wiederverwendungsabstand

Der Gesamtvorrat an Frequenzen wird in sieben (z. B. gleichgroße) Frequenzgruppen $f_1, f_2, \ldots f_7$ aufgeteilt. Jede Frequenzgruppe wird einer Zelle in einem 7-er Cluster (im Bild unterschiedlich schraffiert) zugeteilt. Jede Zelle darf nur Frequenzen aus ihrer Gruppe benutzen, somit kann sie keine Verbindung in ihren sechs Nachbarzellen stören. Gleichkanalstörungen kann es nur zwischen den Zellen unterschiedlicher Cluster geben, denen dieselben Frequenzgruppen zugeteilt sind. Die kleinste Entfernung zwischen zwei Zellen mit gleicher Frequenzgruppe ist die Entfernung D (siehe Bild 2-9). D wird auch als Wiederverwendungsdistanz (*reuse distance*) bezeichnet.

Neben der im Bild 2-9 gezeigten Clustergröße von sieben ergeben sich weitere Clustergrößen aus der hexagonalen Geometrie zu

3. In einem FDMA-System entsprechen die Kanäle den Trägerfrequenzen, in einem TDMA- oder CDMA-System werden die Frequenzen zusätzlich durch Zeitschlitze bzw. Codes in einzelne Kanäle unterteilt.

$$N = i^2 + ij + j^2, \quad \text{mit } i \in \{0, 1, 2, 3, \ldots\}, j \in \{1, 2, 3, \ldots\} \tag{2-22}.$$

Damit sind Clustergrößen von N=1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, ... möglich. Ebenfalls aus Geometrieüberlegungen ergibt sich damit für hexagonale Zellen mit Zellradius R die Wiederverwendungsdistanz D zu

$$D = R\sqrt{3N} \tag{2-23}$$

und die auf den Zellradius normalisierte Wiederverwendungsdistanz, der sogenannte Wiederverwendungsfaktor (*cochannel reuse factor*), zu

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \tag{2-24}.$$

Die Wiederverwendungsdistanz muß so gewählt werden, daß das nötige Signal-Interferenz-Verhältnis *CIR* gewährleistet ist. In erster Näherung kann dazu nur die entfernungsabhängige Dämpfung nach Gleichung (2-16) betrachtet werden. Damit ist

$$CIR = \frac{x^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{S} d_k^{-\gamma}} \tag{2-25}.$$

x ist hierbei die Entfernung der Mobilstation von der Feststation, mit der sie eine Verbindung unterhält. γ ist der Dämpfungskoeffizient (siehe Kapitel 2.2.3), S die Anzahl der Feststationen, die dieselbe Frequenz in ihrer jeweiligen Zelle benutzen und d_k die Distanz zu diesen Feststationen.

Wenn nur die sechs nächstgelegenen Feststationen als aktive Störer betrachtet werden und die Sendeleistung aller Stationen gleich ist, ergibt sich für eine Mobilstation in Entfernung x von ihrer Feststation:

$$CIR = \frac{1}{6}\left(\frac{x}{D}\right)^{-\gamma}, \text{ für } x << D \tag{2-26}.$$

Dabei wurde die Distanz zwischen den umliegenden sechs Feststationen und der Mobilstation mit D angenähert. Dies ist möglich, wenn $x << D$ ist.

Eine genauere Näherung läßt sich aus Bild 2-10 herleiten. Es wird dabei der Fall betrachtet, daß sich die Mobilstation am Zellrand (x=R) befindet. Aufgrund der entfernungsabhängigen Dämpfung ist dort die empfangene Nutzleistung am geringsten, so daß dies als schlimmster Fall (*worst case*) angesehen werden kann. Nach Bild 2-10 ist folgende Näherung möglich: d_1=d_4=D, d_2=d_3=D-R, d_5=d_6=D+R [35]. Damit ergibt sich

$$CIR = \frac{R^{-\gamma}}{2(D-R)^{-\gamma} + 2(D+R)^{-\gamma} + 2D^{-\gamma}} \tag{2-27}$$

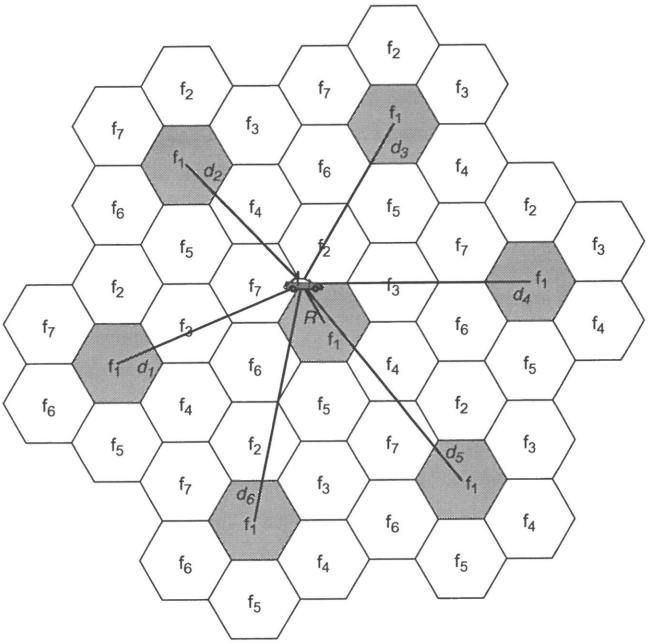


Bild 2-10: Interferenzverhältnisse bei einer Clustergröße von 7

oder mit Gleichung (2-24)

$$CIR = \frac{1}{2(Q-1)^{-\gamma} + 2(Q+1)^{-\gamma} + 2Q^{-\gamma}} \qquad (2\text{-}28).$$

Für alle anderen Clustergrößen N können die Distanzen der nächsten sechs Störer ähnlich dem Vorgehen in Bild 2-10 gefunden werden. Die Gleichungen (2-27) und (2-28) gelten dann ebenfalls.

Mit diesen Gleichungen und dem Wissen, welches CIR mindestens erforderlich ist, um eine Verbindung aufrecht erhalten zu können, kann die kleinstmögliche Clustergröße eines Mobilfunksystems bestimmt werden. Für das GSM z. B. ist ein minimales Signal-Interferenz-Verhältnis CIR_{min} von 9 dB nötig. Für γ=4 ergibt sich nach Reihenentwicklung von Gleichung (2-28) für Q ein Wert von 3.13 und mit Gleichung (2-24) ein N von 3.25. Nach dieser Abschätzung ist also mindestens eine Clustergröße von 4 zu wählen.

Damit eine möglichst hohe Anzahl an Frequenzen pro Zelle zur Verfügung gestellt werden kann und somit eine hohe Teilnehmerkapazität (siehe Kapitel 2.3.4.4) im System ermöglicht wird, wird die Clustergröße so klein wie möglich gewählt. Allerdings muß in einem realen System noch der Einfluß der Signaldämpfung aufgrund der Brechung, Beugung und Abschat-

tung des Signals miteingeplant werden. Wie wichtig die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Dämpfung ist, zeigt Tabelle 2-1. Sie gibt für alle Clustergrößen von 1 bis 12 die CIR-Werte in Dezibel an. Die beiden Näherungen nach Gleichung (2-24) und (2-26) ergeben für große Clustergrößen ähnliche Resultate. Dies liegt daran, daß die Näherungen sich umso ähnlicher sind, je größer der Wiederverwendungsabstand D gegenüber dem Zellradius R ist. Der Unterschied zu den CIR-Werten, die in 90% der Fälle mit Abschattung erreicht werden, ist generell beträchtlich. Dies muß also bei der Planung der Clustergröße berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur einfachen Abschätzung oben ist nun für das nötige CIR_{min} von 9 dB in GSM eine Clustergröße von 9 zu wählen. Dies ist eine Dimensionierung für den schlimmsten Fall, bei dem sich die Mobilstation immer am Zellrand befindet. Im realen System muß jedoch nicht für diesen schlimmsten Fall dimensioniert werden, wenn sich die Mobilstationen aufgrund der Zellgröße und -lage die meiste Zeit im Zellinneren aufhalten. Die im praktischen Einsatz günstigen Clustergrößen werden deswegen oft durch Messungen oder Computer-Simulationen ermittelt.

Die Berechnungsmethode der hier aufgeführten Tabellenwerte für den Fall der Abschattung sowie ergänzende Bemerkungen finden sich in Anhang A.

Clustergröße N	1	3	4	7	9	12
Wiederverwendungsfaktor Q nach Gl. (2-24)	1,73	3	3,46	4,58	5,20	6
CIR in dB nach Gl. (2-26) (x=R)	-*	11,30	13,80	18,66	20,85	23,34
CIR in dB nach Gl. (2-28)	-8,59	8,03	11,36	17,27	19,77	22,54
Minimales CIR in dB in 90% der Fälle bei Abschattung mit Standardabweichung σ=6 dB (s. Anhang A)	-*	-0,32	2,18	7,04	9,22	11,72
*Näherung nicht anwendbar						

Tabelle 2-1: Gleichkanal Signal-Interferenz-Verhältnis für Dämpfungskoeffizient γ=4

Die Clustergröße 1 stellt in gewisser Weise einen Sonderfall dar. Wie aus Tabelle 2-1 ersichtlich ist, ergeben sich dafür negative CIR-Werte (für den Fall der Abschattung gilt dies auch für Clustergröße 3). In einem FDMA- oder TDMA-System ist diese Clustergröße nicht einsetzbar, da ein Signal mit negativem CIR nicht dekodiert werden kann. In CDMA-Systemen, in denen sich alle Nutzer dasselbe Band mit Hilfe unterschiedlicher Codes teilen, ist dies jedoch möglich. Durch das Prinzip der Bandspreizung läßt sich das Nutzsignal aus der Summe der Interferenzen wiedergewinnen [97].

2.3.4.2 Dynamische Kanalvergabe

Im Gegensatz zur festen Kanalvergabe geht der dynamischen Kanalvergabe (*Dynamic Channel Assignment*, DCA) keine umfangreiche Frequenzplanung voraus. Die Grundidee ist es, alle Kanäle an allen Feststationen zur Verfügung zu stellen und während des Betriebes darauf zu achten, daß die Kanäle so vergeben werden, daß die nötigen Signal-Interferenz-Verhältnisse beachtet werden. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die bessere Ausnutzung der Kanäle vor allem bei inhomogener Lastverteilung. Dies läßt sich an einem Beispiel einfach belegen. Sind in einem FCA-System alle Kanäle einer Zelle belegt, werden neue Rufe in dieser Zelle abgewiesen, auch wenn in der Nachbarzelle noch Kanäle frei sind. Mit einem DCA-Verfahren können in der ursprünglich voll belegten Zelle zusätzlich die Kanäle verwendet werden, die in der Nachbarzelle (und innerhalb des Wiederverwendungsabstandes) noch nicht belegt sind. Somit kann die Teilnehmerkapazität in der ursprünglich voll belegten Zelle und damit im gesamten System erhöht werden.

Die dynamische Kanalvergabe kann also die Effizienz eines Mobilfunksystems erhöhen, indem sie die tatsächliche Verkehrs- und Interferenzverteilung berücksichtigt. Sie ist nicht so restriktiv wie die feste Kanalvergabe, die immer für den schlimmsten Interferenzfall ausgelegt wird (Kapitel 2.3.4.1).

Der komplexeste Algorithmus zur dynamischen Kanalvergabe ist die Strategie, die Kanäle möglichst dicht zu packen (*maximum packing*) [51]. Die Kanäle werden mit einer minimalen Wiederverwendungsdistanz vergeben. Immer, wenn ein neuer Verbindungswunsch in das System kommt, werden alle Möglichkeiten der Umordnung bestehender Kanäle in Betracht gezogen, um einen freien Kanal, der keine der bereits aktiven Verbindungen stört, für die neue Verbindung zu finden. Dieses Vorgehen verlangt vollständiges Wissen über die Verwendung der Kanäle im gesamten System und der Interferenzverhältnisse. Die Anzahl der erzwungenen Kanalwechsel zur Aufnahme eines neuen Teilnehmers in das System kann sehr groß werden. Eine einfachere Variante dieser Strategie verhindert das Umordnen der Kanäle (*maximum packing without re-arrangement*) [170]. Auch hier werden die Kanäle möglichst eng wiederverwendet, bereits bestehende Verbindungen werden jedoch nicht angetastet.

Da die Maximum-Packing-Strategie alle Kanäle prinzipiell überall zur Verfügung stellt, also alle Kanäle mit allen Zellen teilt (*complete channel sharing*), ist sie das genaue Gegenteil zur festen Kanalvergabe. Diese teilt alle Kanäle fest auf die Zellen auf (*complete channel partitioning*). Zwischen beiden Extremen gibt es eine Vielzahl von Algorithmen, die die Vor- und Nachteile beider Strategien (Komplexität gegen Adaptivität) auszugleichen suchen: Beim *Channel Borrowing* sind die Kanäle den Zellen am Anfang zwar fest zugeteilt, jedoch kann sich eine Zelle bei hoher Nachfrage einen Kanal von einer ihrer Nachbarzellen „borgen", sofern sie damit keine aktive Verbindung stört [32]. Eine hybride Kanalvergabe benutzt zum

Beispiel FCA für einen Großteil der Kanäle und ordnet den Rest je nach Bedarf den einzelnen Zellen dynamisch zu [82]. Eine gute Übersicht über die in der Literatur zahlreich vorgestellten dynamischen und hybriden Kanalvergabeverfahren geben [81,148].

Generell läßt sich sagen, daß die dynamische Kanalvergabe vor allem bei kleinen Zellgrößen und Systemen, in denen eine hohe Kapazität mit räumlich stark unterschiedlicher Verkehrsdichte gefragt ist, der festen Kanalvergabe überlegen ist. Die hohe Flexibilität der DCA-Verfahren wird jedoch mit einer höheren Komplexität bezahlt.

Die dynamische Kanalvergabe in einem zellularen System kann zentralisiert, lokal zentralisiert (teilweise verteilt) oder völlig verteilt erfolgen. Ein zentralisierter DCA-Algorithmus hat den Vorteil, daß er über sämtliche Kanalzustände und Kanalmessungen im gesamten System verfügen kann und somit ein globales Optimum erzielen kann. Bei großen Systemen wird die Zentraleinheit (*central unit*) allerdings schnell zum Flaschenhals, da sie alle Entscheidungen treffen muß. Vollständig verteilte DCA-Algorithmen haben den Nachteil, daß sie kein globales Optimum bezüglich der Systemkapazität erreichen können. Eine gute Alternative sind daher lokal zentralisierte oder teilweise verteilt arbeitende Algorithmen [170]. Sie wurden aus den zentralisierten DCA-Algorithmen für mikro- und pikozellulare Systeme abgeleitet [38,168] und werden heute zur Anwendung im zukünftigen UMTS als „DCA-Algorithmen für *Bunched Cells*“ vorgeschlagen [15,104,125,174]. Dabei werden die Kanäle für ein lokales „Bündel“ von Zellen dynamisch vergeben. Diese Strategie ist vor allem für Systeme, in denen an bestimmten Stellen zeitweise hohe Verkehrslasten auftreten, wie zum Beispiel in Innenstädten, Messezentren oder Campusnetzwerken, geeignet.

2.3.4.3 Handover

Wenn ein mobiler Teilnehmer das Versorgungsgebiet der Feststation verläßt, mit der er gerade eine Funkverbindung unterhält, muß die Verbindung über eine andere Feststation weitergeführt werden. Dieser Vorgang des Weiterreichens der Verbindung wird im Englischen als *handover* (amerikanisch auch *handoff*) bezeichnet. Im Idealfall bemerkt der Teilnehmer nichts von diesem Vorgang. Dann wird auch von *seamless handover* gesprochen. Um ein Handover zu ermöglichen, muß in der Zelle, in die sich der Teilnehmer hineinbewegt, ein freier Kanal gefunden werden, auf dem die Verbindung weitergeführt werden kann. Bei dynamischer Kanalvergabe kann eventuell derselbe Kanal mit der neuen Feststation weiter verwendet werden, was die Realisierung des *seamless handover* erleichtert. Bei fester Kanalvergabe muß zwangsweise auf einen anderen Kanal gewechselt werden, da Nachbarzellen nie dieselben Frequenzen zur Verfügung haben (mit Ausnahme der Clustergröße 1, s. Kapitel 2.3.4.1).

Je nach Realisierung der Verbindungsweitergabe wird zwischen *hard* und *soft handover* unterschieden. Beim „harten“ Handover wird die Verbindung mit der alten Feststation unterbrochen, bevor die mit der neuen Feststation benutzt wird. Somit ist immer nur eine Verbindung

aktiv. Beim „weichen" Handover wird die Verbindung mit der alten Feststation gehalten, während bereits mit der neuen kommuniziert wird. Damit sind zwei (oder auch mehr) Verbindungen gleichzeitig aktiv. Da die übermittelten Informationen dann über mehr als einen Funkweg zwischen Mobilstation und Festnetz ausgetauscht werden, müssen sowohl in der Mobilstation als auch im Festnetz geeignete Methoden der Verteilung und Kombination dieser Informationen vorgesehen werden. Das weiche Handover benutzt die Technik der Makrodiversität, auf die in Kapitel 3 detailliert eingegangen wird.

Aus Gründen der Vollständigkeit sei noch erwähnt, daß in speziellem Kontext auch der Begriff *softer handover* gebraucht wird [83,95]. Damit wird in einem sektorisierten System[4] ein weiches Handover zwischen den verschiedenen Sektoren einer Feststation bezeichnet. Bei seiner Durchführung werden zwei oder mehrere Verbindungen gleichzeitig in unterschiedlichen Sektoren an derselben Feststation unterhalten. Da die Demodulation und Dekodierung der auf der Aufwärtsstrecke empfangenen Signale am selben Ort stattfindet, können die digitalen Informationen Bit für Bit kombiniert werden. Dies ist prinzipiell auch beim *soft handover* möglich (auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der Signalkombination wird in Kapitel 3 noch ausführlich eingegangen). *Softer handover* ist deshalb keine prinzipiell andere Methode. Aus diesen Gründen genügt es, zwischen *hard* und *soft handover*, das heißt zwischen dem Bestehen einer oder mehrerer gleichzeitig aktiver Nutzverbindungen, zu unterscheiden.

Bei jedem Handover-Vorgang muß das Kanalzuweisungsverfahren aktiviert werden, um entweder einen neuen Kanal in der neuen Zelle zu finden oder um zu überprüfen, ob der alte Kanal behalten werden kann (nur bei DCA-Verfahren). Sollte kein nutzbarer Kanal in der neuen Zelle vorhanden sein, wird die Verbindung typischerweise unterbrochen[5]. Da dies den Mobilfunknutzer gewöhnlich mehr irritiert, als wenn er beim neuen Aufsetzen eines Rufes abgewiesen wird, bzw. dabei etwas länger warten muß, werden Handover-Anforderungen häufig gegenüber der Neuzulassung von Teilnehmern bevorzugt. So wird dafür gesorgt, daß die Unterbrechungswahrscheinlichkeit (*dropping probability*) einer Verbindung niedriger ist als die Blockierwahrscheinlichkeit (*blocking probability*) des Systems. Ein einfaches Verfahren dazu ist, bei der Kanalvergabe manche Kanäle ausschließlich für Handover zu reservieren und sie nicht neuen Teilnehmern zur Verfügung zu stellen (*guard channel concept* [68,148]).

4. Ein sektorisiertes System unterteilt jede Zelle durch das Verwenden von Richtantennen (üblich sind 60- und 120-Grad Öffnungswinkel, s. Bild 2-4) zusätzlich in Sektoren.

5. Bei Datenanwendung ohne Zeitlimit könnten die Daten eventuell auch gepuffert werden, bis kurzfristig wieder ein Kanal zur Verfügung steht. Bei Telefonierufen oder Echtzeit-Datenanwendungen ist das in der Regel nicht möglich.

Ein Handover-Vorgang muß nicht nur ausgelöst werden, wenn ein Teilnehmer sich in eine andere Zelle bewegt. Ein DCA-Algorithmus kann auch für einen statischen Teilnehmer veranlassen, daß er Kanal und Feststation wechselt, wenn dadurch weitere Teilnehmer im System aufgenommen werden können. Die Maximum-Packing-Strategie macht zum Beispiel davon Gebrauch (siehe Kapitel 2.3.4.2).

2.3.4.4 System- und Teilnehmerkapazität

Für ein zellulares System mit fester Frequenzplanung kann aus der Clustergröße die Kapazität des Systems bestimmt werden. Dazu wird die Erlang-Verlustformel angewandt. Sie setzt voraus, daß der Ankunftsprozeß der Mobilfunkrufe als Poisson-Prozeß beschrieben werden kann und daß, bei Belegung aller Frequenzen, ein Ruf sofort abgewiesen wird (M/M/n-Verlustsystem) [86]. Die Blockierwahrscheinlichkeit P_B läßt sich nach Erlang wie folgt berechnen:

$$P_B = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{A^i}{i!}} \qquad (2\text{-}29).$$

Dabei ist A das Verkehrsangebot und n die Anzahl der Kanäle pro Zelle. Sie ergibt sich in einem FDMA/TDMA-System wie zum Beispiel das GSM aus der Anzahl der Frequenzen multipliziert mit der Anzahl der Zeitschlitze z pro Frequenz. Bei gleichmäßiger Aufteilung der Frequenzen auf alle Zellen ergibt sich n aus der Clustergröße N zu

$$n = \frac{z \cdot M_f}{N} \qquad (2\text{-}30),$$

mit M_f der Gesamtzahl der Frequenzen, die einem Mobilfunkbetreiber zur Verfügung steht. In Abhängigkeit von der Blockierwahrscheinlichkeit läßt sich dann der vom System zu bewältigende Verkehr Y berechnen als

$$Y = A(1 - P_B) \qquad (2\text{-}31).$$

Y wird auch als Verkehrswert bezeichnet. Mit seiner Hilfe läßt sich für eine vorgegebene Blockierwahrscheinlichkeit eine Kapazitätsgrenze für das System, die Systemkapazität in Erlang, angeben.

Die Teilnehmerkapazität wird dann als Quotient aus der Systemkapazität und dem Verkehrsangebot eines Teilnehmers angegeben. Das Verkehrsangebot eines Telefonieteilnehmers kann zum Beispiel bei einer Ankunftsrate von λ=0,8 Anrufen pro Stunde und einer mittleren Gesprächsdauer von $1/\varepsilon$=100 s zu $A=\lambda/\varepsilon$=22 mErl. angegeben werden.

Die Systemkapazität bei dynamischer Kanalvergabe ist nicht so leicht berechenbar wie bei fester Kanalvergabe. Da die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle pro Zelle vom DCA-Algorithmus, von der räumlichen Verkehrsverteilung und von den Ausbreitungsbedingungen abhängt, sind Computersimulationen meist die einzige Möglichkeit zur Kapazitätsbestimmung. Ist die Systemkapazität dann bekannt, kann die Teilnehmerkapazität wie oben berechnet werden.

Auch in dieser Arbeit wird die Systemkapazität des makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystems mit DCA-Algorithmus durch Simulation ermittelt (Kapitel 6).

2.4 Mobilitätsverwaltung

Eine wichtige Aufgabe in einem Mobilfunknetz ist es, die mobilen Teilnehmer zu lokalisieren, um ihnen eingehende Rufe zustellen zu können. Auch müssen bestehende Verbindungen aufrecht erhalten werden, wenn Teilnehmer in ein neues Dienstgebiet wechseln. Beide Fälle sind Aufgaben der Mobilitätsverwaltung (*mobility management*).

Mobilitätsverwaltung wird im Festnetzteil des Mobilfunk-Zugangsnetzes durchgeführt. Sie ist für jedes Netz unverzichtbar, in dem Endgeräte, wie Mobiltelefone oder portable Rechner, beweglich sind (*terminal mobility*) oder in dem Personen an unterschiedlichen Endgeräten unter ihrer eigenen Identität Zugang zu demselben Dienst erlangen wollen (*personal mobility*). Beispiele für ersteres sind Mobiltelefonie und mobiles Internet (*mobile IP*). Zweiteres ist nötig für die Realisierung der persönlichen Rufnummer oder der virtuellen Heimat-Umgebung (*virtual home environment*) [124].

Die Mobilitätsverwaltung läßt sich in die Verwaltung des Aufenthaltsortes (*location management*) und in das Weiterreichen von Verbindungen (Handover-Verwaltung, *handover management*) gliedern [5].

2.4.1 Handover-Verwaltung

Ein Handover-Vorgang beeinflußt die Ressourcenverwaltung auf der Luftschnittstelle (s. Kapitel 2.3.4.3) und im Festnetz. Wird beim Handover-Vorgang nämlich die Feststation gewechselt, muß die bestehende Ende-zu-Ende-Verbindung über eine neue Wegstrecke im Festnetz geführt bzw. eine neue Verbindung aufgebaut werden. Je nach Netztechnologie müssen eventuell Betriebsmittel reserviert werden, um die bisher bestehende Dienstqualität aufrechterhalten zu können. Weiterhin muß die Verbindung zur alten Feststation abgebaut werden, um nicht benötigte Ressourcen wieder freizugeben.

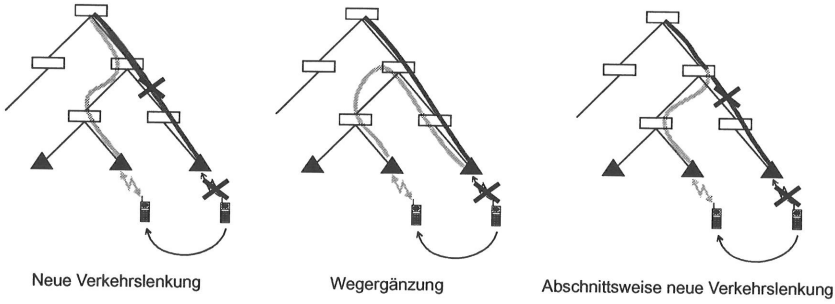


Bild 2-11: Mögliche Verkehrslenkung bei Handover

Bild 2-11 stellt die drei prinzipiellen Möglichkeiten dar, das netzseitige Handover zu bewerkstelligen. Die bestehende Wegführung ist dabei dunkelgrau gekennzeichnet, die neue nach dem Handover hellgrau. Die erste Möglichkeit besteht darin, eine vollständig neue Ende-zu-Ende-Verbindung aufzubauen, die dieselbe Dienstqualität wie die alte Verbindung bieten kann (Bild 2-11 links). Bei einem harten Handover muß dies sehr schnell geschehen, damit der Teilnehmer nichts davon merkt. Bei einem weichen Handover mit Makrodiversität können die übrigen Verbindungen während der Dauer des Umschaltens einer einzelnen Verbindung den Informationstransport alleine übernehmen. Wenn die neue Verbindung steht, kann die alte Ende-zu-Ende-Verbindung abgebaut werden. Die zweite Möglichkeit ergänzt die vor dem Handover bestehende Verbindung um einen Teilpfad von der alten zur neuen Feststation (Bild 2-11 Mitte). Dies kann häufig schneller erfolgen, als eine komplett neue Verbindung aufzubauen. Wenn jedoch sehr viele Handover während einer Verbindung stattfinden, wird dieses Verfahren ineffizient. Es muß dann rechtzeitig eine komplett neue Verbindung aufgebaut werden, da sonst zu viele Wegergänzungen zu großer Netzbelastung und hohen Verzögerungen führen würden. Das dritte Verfahren ist ein Mittelweg der beiden anderen. Es kann die bestehende Verbindung bis zu einer bestimmten Hierarchieebene im Netz aufrechterhalten und ab dieser eine neue Teilverbindung bis zum Ziel aufbauen (Bild 2-11 rechts).

Nach letzterem Verfahren wird das Handover im GSM durchgeführt. Die bestehende Verbindung bleibt mindestens bis zu der Mobil-Vermittlungsstelle (*mobile switching centre*, MSC) bestehen, von der der Rufaufbau erfolgt ist (sog. Anker-MSC). Wechselt die Mobilstation an eine Basisstation, die an eine andere MSC angeschlossen ist, wird die alte Verbindung ab der ersten MSC dorthin weitergeleitet [40,109].

Die Unterschiede der in Bild 2-11 abgebildeten Verfahren werden zur Zeit vor allem im Rahmen der Forschungsaktivitäten für das zukünftige mobile ATM untersucht [11]. Eine gute Übersicht über die Vor- und Nachteile der Verfahren sowie eine Erweiterung für die Gruppenkommunikation finden sich in [5].

2.4.2 Verwaltung des Aufenthaltsortes

Die Verwaltung des Aufenthaltsortes unterscheidet sich in der praktischen Realisierung je nach Festnetztechnologie. Viele zugrundeliegende Prinzipien sind aber für alle Netztypen gleich. Eine gute Übersicht über das Themenfeld sowie eine Leistungsbewertung verschiedener Konzepte findet sich in [139].

Hier soll kurz in die Mobilitätsverwaltung am Beispiel der zellularen Mobilfunknetze IS-41 [41] und GSM [45] eingeführt werden. Für das mobile Internet wird auf [122] verwiesen, für mobiles ATM auf [132]. Für spezielle Aspekte der Mobilitätsverwaltung in der dritten Generation zellularer Mobilfunknetze (UMTS, IMT-2000) wird auf [117] verwiesen.

Die Verwaltung des Aufenthaltsortes muß vor allem zwei wichtige Funktionen erfüllen. Sie muß bei Anmeldung eines Teilnehmers im Netz seinen Aufenthaltsort ermitteln und diesen entweder in regelmäßigen Abständen oder bei jeder Ortsveränderung erneuern. Gleichzeitig muß sie bei einem Anruf einen Teilnehmer lokalisieren, um ihm den Ruf zuzustellen.

Die heutigen Mobilfunknetze verwenden zur Verwaltung des Aufenthaltsortes eine zweistufige Datenbankhierarchie. Bild 2-12 zeigt eine vereinfache Darstellung der Netztopologie mit der Nomenklatur aus dem GSM und dem Signalisiersystem Nr. 7 (SS#7).

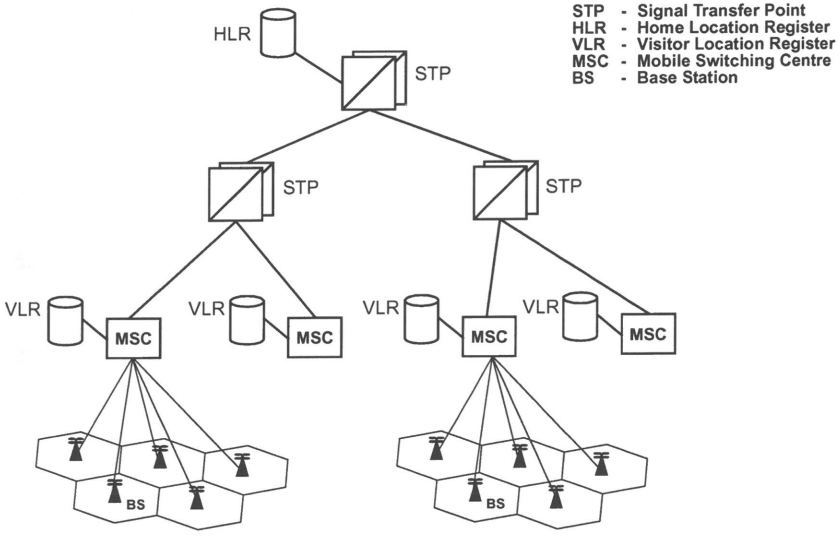


Bild 2-12: Datenbankhierarchie

Die Heimat-Datenbank (*home location register*, HLR) speichert Benutzerdaten für jeden abonnierten Mobilfunkteilnehmer. Der Datensatz enthält unter anderem die Identität des Benutzers, die abonnierten Dienste und einen Verweis auf seinen Aufenthaltsort. Prinzipiell muß es nur ein HLR pro Mobilfunknetz geben, aus praktischen Gründen (Lastteilung, mehrere Diensteanbieter u. a.) gibt es jedoch häufig mehrere. Eine Besucherdatenbank (*visitor location register*, VLR) speichert Daten nur über die Benutzer, die sich in dem ihr zugeordneten Aufenthaltsbereich (*location area*, LA) aufhalten. Ein Aufenthaltsbereich setzt sich aus mehreren benachbarten Zellen zusammen. Der Datensatz im VLR enthält Teile der Daten aus dem HLR als Kopie, um einen schnelleren Datenzugriff zu ermöglichen. Desweiteren speichert das VLR sogenannte lokale Daten, zum Beispiel den momentanen Aufenthaltsbereich der Mobilstation. Die Anzahl der VLRs ist von Netz zu Netz unterschiedlich. Die Zuordnung von je einem VLR zu einer MSC in Bild 2-12 ist nur ein mögliches Beispiel. Die lokalen Daten im VLR werden für den Rufaufbau eines Teilnehmers und zur Rufzustellung verwendet.

Zur Rufzustellung an eine Mobilstation im Mobilfunknetz sendet die MSC, an der der Ruf ankommt (sei es von einer anderen Mobilstation oder aus dem Festnetz[6]), eine Anfrage an das HLR des gerufenen Teilnehmers. Das HLR kennt das VLR, an dem der Teilnehmer zur Zeit registriert ist, welches wiederum weiß, welche MSC den gerufenen Teilnehmer bedient, in welchem Aufenthaltsbereich er sich also befindet. Im einfachsten Fall wird dann von allen Basisstationen in diesem Aufenthaltsbereich eine Suchmeldung (*paging message*) abgestrahlt, um die betreffende Mobilstation zu rufen. Sobald sie sich auf diesen Anruf hin meldet, kann aus ihrer Antwort die Aufenthaltszelle bestimmt und so der Ruf zugestellt werden.

Um eine Mobilstation immer finden zu können, muß diese ihren Aufenthaltsort dem Netz mitteilen (*location registration*). Dies geschieht beim Einschalten des Mobilfunkgeräts durch die Anmeldeprozedur. Wenn die Station sich danach in einen neuen Aufenthaltsbereich bewegt, muß diese Information erneuert werden (*location update*). Gehört der neue Aufenthaltsbereich zum selben VLR, muß nur dessen Eintrag geändert werden. Gehört er jedoch zu einem anderen VLR, muß die Mobilstation bei diesem neuen VLR angemeldet, der Verweis im HLR auf das neue VLR geändert und die Mobilstation am alten VLR abgemeldet werden.

Bei den Prozeduren der Registrierung, der Aufenthaltsortserneuerung sowie beim Verbindungsaufbau wird jedes Mal eine Teilnehmer-Authentifizierung durchgeführt, um einen Mißbrauch des Mobilfunknetzes zu verhindern.

Um die Signalisierlast durch das Paging auf der Luftschnittstelle gering zu halten, darf der Aufenthaltsbereich nicht zu weiträumig gewählt werden. Damit die Anzahl der Aufenthaltsortserneuerungen nicht zu hoch wird, darf der Aufenthaltsbereich aber auch nicht zu klein

6. Im letzteren Fall handelt es sich um eine Gateway-MSC.

gewählt werden. Die richtige Anzahl an Zellen, die zu einem Aufenthaltsbereich zusammengefaßt werden sollen, muß der Netzbetreiber ermitteln. Auch kann er verbesserte Pagingstrategien einsetzen, um die Signalisierlast auf der Luftschnittstelle zu vermindern [5].

Die oben beschriebene Aufenthaltsortsverwaltung kann bei hoher Mobilität der Teilnehmer zu einer hohen Signalisierlast im Mobilfunknetz führen. Aufgrund der hierarchischen Struktur kann außerdem das HLR zum Flaschenhals werden. Deswegen wurden andere Strukturen, basierend auf verteilten Datenbanken, vorgeschlagen.

Verteilte Datenbanken ersetzen die zweistufige Datenbankhierarchie aus HLR und VLR durch viele kleinere Datenbanken, die möglichst vielen Netzknoten beigeordnet sein sollten. So wird in [159] eine vollständig verteilte Struktur vorgeschlagen, die in einer Baumstruktur angeordnet ist (Bild 2-13).

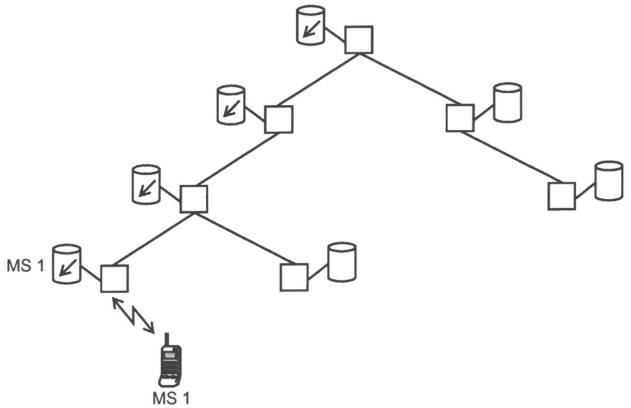


Bild 2-13: Verteilte Datenbank in Baum-Struktur

Jede Datenbank vom Kopf des Baumes an enthält einen Verweis auf die Mobilstationen, die sich in ihrem untergeordneten Zweig befinden. Mit dieser Struktur kann die Distanz, die die Signalisiermeldungen zurücklegen, im Vergleich zum HLR basierten Verfahren stark vermindert werden. Jedoch erhöht diese Struktur die Anzahl an Anfragen und Aktualisierungen an die Datenbanken. Unter Umständen kann dies zu Verzögerungen beim Verbindungsaufbau führen.

Neue Forschungsansätze zur Aufenthaltsortverwaltung versuchen durch einen hybriden Ansatz die hier beschriebenen Vorteile der zentralisierten und der verteilten Architektur bestmöglich zu nutzen und ihre jeweiligen Nachteile zu meiden. Eine Übersicht über diese Studien findet sich in [5].

Kapitel 3

Makrodiversität im zellularen Mobilfunk

Um dem durch den Funkkanal verursachten Signalschwund entgegenzutreten, bietet sich das Mittel der Diversität an. Durch geeignete Techniken wird dafür gesorgt, daß anstelle eines Signals am Empfänger, zwei oder mehr Empfangssignale zur Verfügung stehen. Die Nachricht, die mit Hilfe der Signale übermittelt wird, ist jeweils dieselbe. Die Dämpfung, der die Signale auf ihrem Übertragungsweg unterliegen, ist bei jedem Signal unterschiedlich. Durch geeignete Auswahl oder Kombination der „diversen" Signale ist es dem Empfänger möglich, den Einfluß des Übertragungskanals auf die Originalinformation zu minimieren.

3.1 Diversitätstechniken

Im Mobilfunk lassen sich mehrere Diversitätstechniken unterscheiden. Eine mögliche Klassifizierung zeigt Bild 3-1.

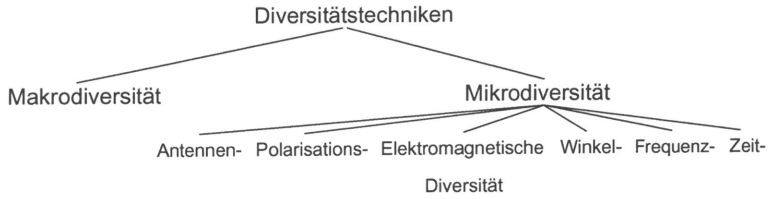


Bild 3-1: Diversitätstechniken im Mobilfunk

Die verschiedenen Diversitätstechniken werden hierbei nach dem Ort ihres Einsatzes unterschieden [97]. Makrodiversität (*macroscopic diversity*) wird an unterschiedlichen Feststationsstandorten, Mikrodiversität (*microscopic diversity*) dagegen an ein und demselben Feststationsstandort angewandt. Während die Makrodiversität vor allem gegen das Problem der Abschattung eingesetzt wird, wird mit Hilfe der Mikrodiversität der schnelle Schwund (siehe Kapitel 2.2) bekämpft [137].

Antennendiversität ist die am häufigsten eingesetzte Form der Mikrodiversität. Dazu werden zwei oder mehrere Antennen im Abstand von einer halben Wellenlänge aufgestellt. Die Signale der Antennen werden im Empfänger kombiniert. Üblicherweise wird Antennendiversität nur auf der Seite der Feststation eingesetzt. An der Mobilstation verbietet sich die Installation mehrerer Antennen häufig aus Platzgründen und aus ökonomischen Überlegungen. Um diese Limitierung des Einsatzes der Antennendiversität zu umgehen, gibt es Untersuchungen, Antennendiversität auch sendeseitig an der Feststation zu benutzen (*transmit antenna diversity*). Die dabei erzielbaren Gewinne sind etwas geringer als bei der empfangsseitigen Diversität [6,131,171].

Wenn Signale mit unterschiedlicher Polarisation übertragen werden, ist der schnelle Schwund, den sie erfahren, unkorreliert [76,97,42]. Für diese sogenannte Polarisationsdiversität sind zwei unterschiedlich polarisierte Antennen an der Fest- und an der Mobilstation nötig. Der Nachteil ist, daß die Sendeleistung um 3 dB gesenkt wird, da das Signal auf die beiden Antennen aufgeteilt wird. Da es nur zwei orthogonale Polarisationsrichtungen gibt, ist nur eine zweifache Diversität möglich.

Eine dreifache Diversität kann durch Trennung der elektromagnetischen Feldkomponenten erreicht werden (elektromagnetische Diversität). Bei der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle ist das H-Feld fest mit dem E-Feld assoziiert. Beide tragen dieselbe Nachricht. Die Reflexionsmechanismen für E- und H-Feld sind jedoch unterschiedlich, so daß aufgrund der Mehrwegausbreitung im Mobilfunk die drei Feldkomponenten E_z, H_x und H_y am Empfänger unkorreliert sind [97]. Die elektromagnetische Diversität ist vor allem für tiefe Frequenzen (<100 MHz) eine Alternative zur Antennendiversität, bei der die räumliche Trennung der Antennen wegen der großen Wellenlänge in der Praxis schwer realisierbar ist.

Bei Winkeldiversität werden direktionale Antennen auf unterschiedliche Empfangswinkel eingestellt. Da das gesendete Signal den Empfänger auf unterschiedlichen Wegen erreicht (s. Kapitel 2.2.1), können so die verschiedenen Weganteile aufgelöst werden.

Der schnelle Schwund ist auch unkorreliert, wenn die Signale auf zwei ausreichend voneinander getrennt liegenden Frequenzen übertragen werden. Der Abstand zwischen den beiden Frequenzen sollte im Mobilfunk in städtischem Gebiet bei mindestens 50 kHz und in vorstädtischem Gebiet bei mindestens 300 kHz liegen [97]. Der Nachteil der Frequenzdiversität liegt in ihrem erhöhten Bandbreitenbedarf.

Zur Ausnutzung der Zeitdiversität wird dieselbe Nachricht zu verschiedenen Zeitpunkten (z. B. in zwei oder mehreren unterschiedlichen Zeitschlitzen) übertragen. In einem TDMA-System werden hierzu mehrere Kanäle für ein und dieselbe Nachrichtenübertragung belegt [110,123]. Somit ist auch diese Technik, wie die Frequenzdiversität, nicht sehr ökonomisch bezüglich der Bandbreite.

Allgemein gilt, daß die verschiedenen Diversitätstechniken getrennt oder gemeinsam eingesetzt werden können. Vor allem eine Kombination von Makrodiversität mit einer der Techniken der Mikrodiversität ist sinnvoll, da sie unterschiedliche Phänomene auf dem Funkkanal, nämlich die Abschattung und den schnellen Schwund, bekämpfen [23,153]. Aus demselben Grund können beide Techniken auch unabhängig voneinander untersucht werden. Diese Arbeit beschäftigt sich im folgenden ausschließlich mit der Makrodiversität.

3.2 Makrodiversität

Das Prinzip der Makrodiversität ist es, mehrere gleichzeitig nutzbare Funkverbindungen zwischen der Mobilstation und dem Festnetz zu ermöglichen. Somit werden die Signale zwischen dem Festnetz und der Mobilstation auf der Luftschnittstelle über mehrere, räumlich getrennte Pfade übertragen. Wie es Bild 3-2 andeutet, wird dabei die Mobilstation durch mehrere Feststationen versorgt, die räumlich weit (einige 10 Meter bis wenige Kilometer) auseinanderliegen.

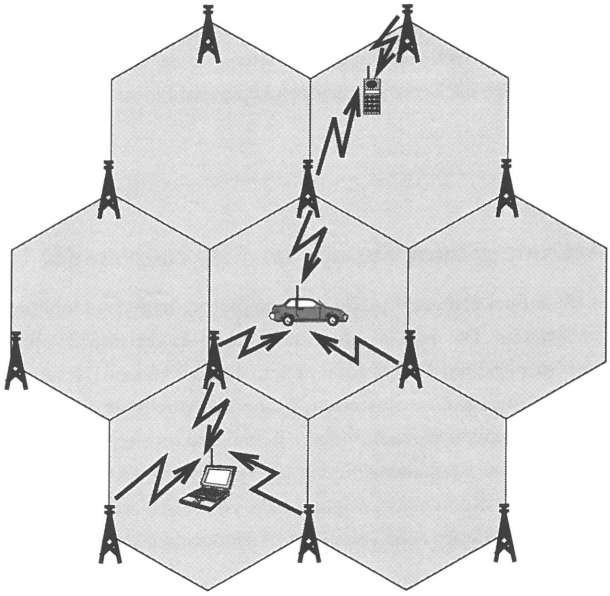


Bild 3-2: Makrodiversität im zellularen System

Die großen Entfernungen der Feststationen erklären die Vorsilbe im Wort „Makrodiversität" und gleichzeitig den Unterschied zur Mikro- bzw. Antennendiversität. Bei letzterer beträgt der Antennenabstand je nach Wellenlänge nur einige Millimeter bis Zentimeter.

Da bei Makrodiversität die Informationen über verschiedene Ausbreitungswege ihr Ziel erreichen, ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung der Gesamtverbindung geringer als bei Ausnutzung nur eines Ausbreitungswegs.

Makrodiversität kann als Sende- und auch als Empfangsdiversität eingesetzt werden. Sendediversität wird erreicht, wenn auf der Abwärtsstrecke (*downlink*, von der Fest- zur Mobilstation) von mehreren Feststationen dieselben Informationen versendet werden. Dazu vervielfacht ein Verteilpunkt im Festnetz die Informationen und leitet sie an mehrere Feststationen weiter. Entweder sendet dann die Feststation mit der momentan besten Verbindung zur Mobilstation (Auswahl-Makrodiversität) oder mehrere Feststationen senden das Funksignal in einem engen Zeitrahmen quasi gleichzeitig an die Mobilstation (Gleichwellenbetrieb). Die Aufgabe der Mobilstation ist es dann, die eingehenden Signale geeignet zu kombinieren.

Empfangsdiversität ergibt sich, wenn das von der Mobilstation auf der Aufwärtsstrecke (*uplink*, von der Mobil- zu Feststation) gesendete Signal von mehreren Feststationen empfangen wird. Die Empfänger in den jeweiligen Feststationen fügen dann zu den empfangenen Dateneinheiten Qualitätsinformationen hinzu und leiten sie an die Kombinationseinheit im Festnetz weiter. Dort werden die Daten zu einer resultierenden Einheit kombiniert und schließlich weitervermittelt.

3.3 Voraussetzungen zum Einsatz der Makrodiversität

Um Makrodiversität auf der Luftschnittstelle zu ermöglichen, muß das Mobilfunksystem entsprechend ausgerüstet sein. Die zellulare Architektur muß es den Mobilstationen erlauben, Radioverbindungen zu mehreren Feststationen unterhalten zu können. Desweiteren muß das Zugangsnetzwerk die Möglichkeit unterstützen, die an die Mobilstation zu sendenden Informationen an mehrere Feststationen gleichzeitig zu liefern und im Gegenzug die Informationen der beteiligten Feststationen zusammenzuführen. Zusätzlich müssen im Zugangsnetz und in der Mobilstation geeignete Kombinationsalgorithmen vorhanden sein, die die über mehrere Wege eintreffenden Informationen zum Vorteil der Gesamtqualität kombinieren können.

3.3.1 Makrodiversitätsfähige zellulare Architekturen

Der Einsatz der Makrodiversität im Mobilfunksystem bedingt spezielle zellulare Architekturen in Bezug auf die Position der Feststationen. Sie müssen so plaziert sein, daß es den Mobilstationen möglich ist, zu mehr als einer Feststation eine Verbindung zu unterhalten. Verschiedene solcher Feststationsanordnungen sind in Bild 3-3 aufgezeigt.

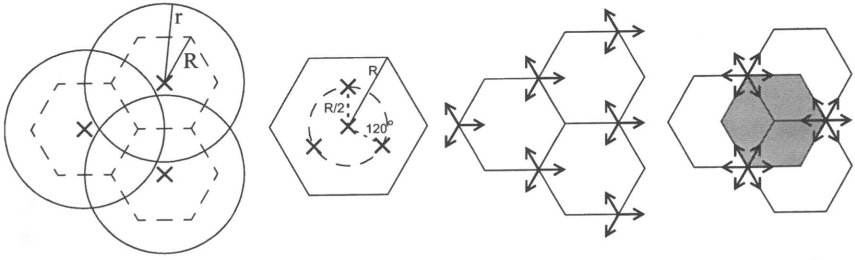


Bild 3-3: Zellulare Architekturen zur Realisierung der Makrodiversität

Anordnung 1 läßt sich aus dem konventionellen Layout zellularer Mobilfunksysteme ableiten. Die Feststationen sind in der Zellmitte plaziert und verwenden omnidirektionale Antennen. Makrodiversität läßt sich realisieren, indem durch ausreichende Sendeleistung für eine Überlappung der Abdeckungsgebiete gesorgt wird. Die Anzahl der Feststationen, die jede Mobilstation erreichen kann, wird durch den Überlappungsfaktor (Verhältnis des Abdeckungsradius r zum Zellradius R) bestimmt [168,170].

Anordnung 2 ergänzt das konventionelle Layout durch drei zusätzliche Feststationen mit omnidirektionalen Antennen im Abstand des halben Zellradius um die mittlere Feststation [84]. Auch mehrere Feststationen auf weiteren konzentrischen Kreisen um die zentrale Feststation sind auf diese Weise denkbar [175].

Auch aus sektorisierten Systemen mit 120-Grad-Richtantennen läßt sich eine makrodiversitätsfähige Architektur entwickeln (Anordnung 3). An jeder zweiten Ecke der Zelle steht eine Feststation mit jeweils drei Richtantennen. Durch Kopplung der drei Feststationen über eine Makrodiversitäts-Einheit im Zugangsnetz kann jede Zelle von mindestens drei Stationen versorgt werden [96,97,58].

Für Systeme mit fester Kanalvergabe wurde die Anordnung 4 vorgeschlagen [120,176,177]. Sie besteht aus zwei übereinandergelegten Clustern hexagonaler Zellen. An jeder zweiten Zellecke befinden sich je sechs 120 Grad-Richtantennen. Durch das bewußte Überlappen der Öffnungswinkel der einzelnen Richtantennen ist Makrodiversität an jedem Ort der Zelle möglich.

Eine Verallgemeinerung der Anordnung 4 sind die sogenannten hierarchischen Systeme [89,101]. In ihnen werden im allgemeinen mehrere Zellcluster mit gleich oder unterschiedlich großen Zellen übereinander angeordnet. Die meist diskutierte Form der hierarchischen Systeme besteht aus zwei Lagen von Zellen: eine Lage Makrozellen mit Durchmessern von mehreren Kilometern und eine untergeordnete Lage von Mikrozellen mit Durchmessern von einigen hundert Metern oder wenigen Kilometern. Um die Anzahl der Zellwechsel, und damit die Handover-Rate, gering zu halten, muß das Ressourcenmanagement dafür sorgen, daß sich schnell bewegende Mobilfunkteilnehmer (Autofahrer) von den Feststationen der Makrozellen und sich langsam bewegende Teilnehmer (Fußgänger) von denen der Mikrozellen versorgt werden. Um in diesen Systemen Makrodiversität anzubieten, wird ein Teilnehmer sowohl von der Feststation einer Mikrozelle als auch von der Feststation der übergeordneten Makrozelle versorgt.

Über die zellularen Architekturen mit hexagonaler Geometrie hinaus, sind auch andere Anordnungen der Feststationen denkbar. So werden in [17] neben sechseckigen auch dreieckige und viereckige Zellformen vorgeschlagen. Die Feststationen werden immer in der Zellmitte plaziert und verwenden omnidirektionale Antennen. Hierbei wird Makrodiversität wie in Anordnung 1 durch das Überlappen der Abdeckungsgebiete der einzelnen Feststationen ermöglicht.

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit werden schwerpunktmäßig die Anordnungen 1 und 3 nach Bild 3-3 betrachtet. Sie verdeutlichen, wie das allgemeine Prinzip der Makrodiversität mit Hilfe von omnidirektionalen Antennen und Richtantennen ermöglicht werden kann. Beide Anordnungen sind unabhängig von der Größe des Dienstgebietes anwendbar, da sie sich unendlich symmetrisch fortsetzen lassen. Der hexagonalen Zellform wird der Vorrang vor anderen Vielecken gegeben, da sie die am besten geeignete Annäherung an die Kreisform ist [99]. Sie wird aus diesem Grund seit Ende der siebziger Jahre in nahezu allen Leistungsuntersuchungen zellularer Systeme verwendet.

Die Anordnung 2 und 4 können als Spezialfälle aus den Anordnungen 1 und 3 abgeleitet werden. Hierarchische Systeme als Verallgemeinerung der Anordnung 4 werden im weiteren nicht explizit betrachtet. Die prinzipiellen Aussagen dieser Arbeit zur Leistungsfähigkeit der Makrodiversität gelten jedoch auch für diese Systeme.

Ein großer Vorteil der Anordnungen 1 und 3 gegenüber den anderen Anordnungen ist, daß sie aus bereits bestehenden Architekturen konventioneller oder sektorisierter Mobilfunksysteme aufgebaut werden können. So können diese Makrodiversität einsetzen, ohne daß neue Standorte für Feststationen gefunden werden müssen oder die Anzahl der Feststationen erhöht werden muß. Nur im Zugangsnetz müssen entsprechende Änderungen zur Unterstützung der Makrodiversität vorgenommen werden.

Auf die nötige Funktionalität des Zugangsnetzes eines makrodiversitätsfähigen Mobilkommunikationssystems wird im folgenden eingegangen.

3.3.2 Architektur eines makrodiversitätsfähigen Zugangsnetzes

Das Zugangsnetzwerk eines makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystems muß vor allem die Aufgabe des Verteilens der Informationen an die an der Kommunikation beteiligten Feststationen übernehmen. Außerdem muß es in der Gegenrichtung die Informationen, die an den Feststationen empfangen werden, kombinieren [105]. Für diese Aufgaben ist eine Makrodiversitätseinheit (*macrodiversity unit,* MDU) nötig. Ihre Anordnung im Zugangsnetz ist in Bild 3-4 dargestellt.

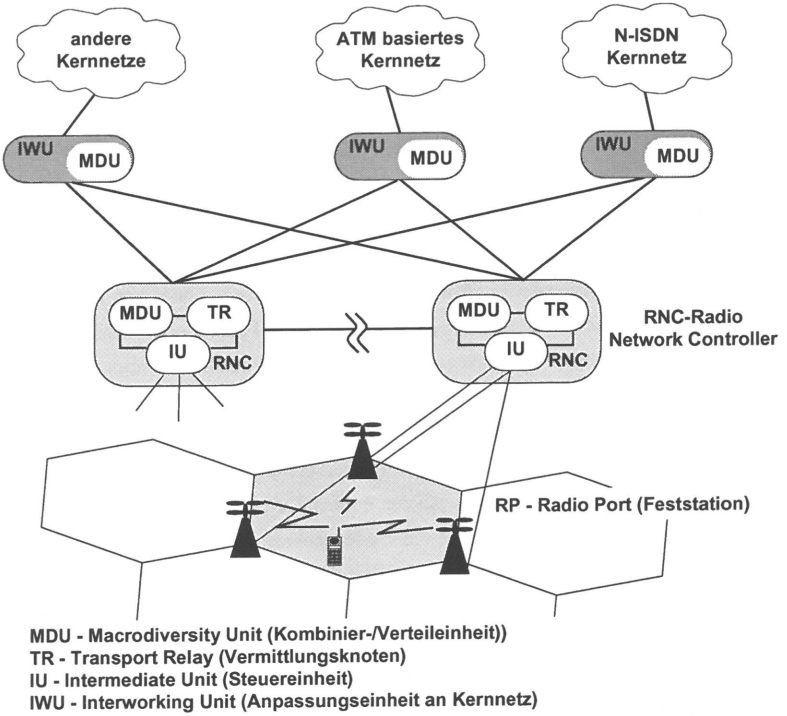


Bild 3-4: Makrodiversitätsfähige Zugangsnetzarchitektur

Die hier zugrundegelegte Architektur für ein makrodiversitätsfähiges Zugangsnetz basiert auf den von ETSI für UMTS vorgeschlagenen funktionalen Elementen [44]. Die MDU ist im *Radio Network Controller* (RNC) angeordnet. Damit kann sie Makrodiversität zwischen allen

am selben RNC angeschlossenen Feststationen ermöglichen. Sollte Makrodiversität zwischen Feststationen, die von verschiedenen RNCs gesteuert werden, möglich sein, gibt es zwei Möglichkeiten: Erstens können weitere MDUs in den Übergangspunkten (*InterWorking Units*, IWUs) zum Festnetz installiert werden, die dann als hierarisch übergeordnete Einheiten die Makrodiversität ermöglichen. Zweitens können sich die MDUs in den beteiligten RNCs auf einen „Master" einigen, der für die Dauer einer Verbindung das Kombinieren und Verteilen der Informationen übernimmt. Die andere MDU leitet dann die Informationen nur an die „Master-MDU" weiter [165].

Ein RNC beinhaltet außer der MDU noch eine *Intermediate Unit* (IU) und ein *Transport Relay* (TR). Die IU beinhaltet die notwendigen Steuerfunktionen für die Funkübertragung. Sie kümmert sich um den Medienzugriff (MAC-Protokoll) und die Funkverbindungssteuerung (*Radio Link Control*, RLC). Außerdem kann sie auch Funktionen des Mobilitätsmanagements übernehmen. Das TR enthält die Vermittlungsfunktion (*switching*). Falls das Zugangsnetzwerk nicht auf derselben Netztechnologie beruht wie das Kernnetz, übernehmen spezialisierte IWUs den Übergang von einer Technologie auf die andere.

Die Feststationen in diesem makrodiversitätsfähigen Mobilfunknetz können eine den heutigen Systemen (GSM [62], IS-95 [149] u. a.) ähnliche Funktionalität enthalten. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn die Stationen der aktuellen Netzgeneration in einem neuen makrodiversitätsfähigen Netz weiterverwendet werden sollen. In Gebieten mit sehr hohen Mobilfunkteilnehmerdichten (Innenstadt, Messegelände, u. a.) können die Feststationen auch als einfache Sende- und Empfangseinrichtungen mit geringer Komplexität realisiert werden. Aufgrund der geringeren Stückkosten ist es somit möglich, eine hohe Zahl von Feststationen mit kleinen Abdeckungsgebieten zu installieren (sogenannte Mikro- oder Pikozellen). Kleine Zellen ermöglichen aufgrund des erzielbaren geringen Wiederverwendungsabstandes der Ressourcen eine hohe Systemkapazität [96]. Eine solche einfache Feststation kann aus nur einem optisch/elektrischen Signalumsetzer sowie einer oder mehreren Antennen bestehen. Die aufwendigeren Funktionen der Signalverarbeitung (Detektion, Dekodierung, Kombination, etc.) werden im Festnetz, zum Beispiel in der IU, ausgeführt. Solche Anordnungen werden typischerweise als abgesetzte Feststationen (FS), *Remote Antenna Units* (RAUs) oder *Radio (Access) Ports* (RAPs bzw. RPs) bezeichnet [170,10,60,75]. In Anlehnung an [67] und [57] stellt Bild 3-5 dieses Konzept vereinfacht dar.

Die an den Antennen empfangenen Daten werden auf der Radiofrequenz in optische Signale umgewandelt und an den RNC gesendet. Dort übernimmt ein zweiter Wandler die Wiederherstellung des Radiosignals. Die Detektierung erfolgt in einer eigenen IU für jeden Zweig separat. Weitere Aufgaben, wie Mehrfachzugriff und Verbindungssteuerung, können je nach

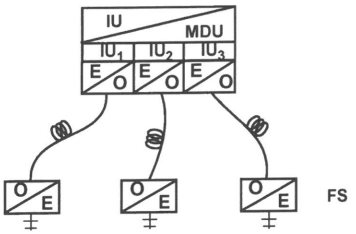


Bild 3-5: Das Konzept der abgesetzten Feststation (FS)

Notwendigkeit in einer gemeinsamen IU erledigt werden. Die Makrodiversitätseinheit kann auf die detektierten Informationen der einzelnen Feststationen zum Kombinieren zugreifen. In der Senderichtung funktioniert dieses Konzept entsprechend.

Eine auf ATM-Transporttechnologie beruhende Realisierung dieser hier allgemein vorgestellten Zugangsnetzarchitektur wird in [21] beschrieben. Dort werden die verschiedenen Realisierungen des RNC und der Feststationen berücksichtigt, jeweils angepaßt an ländliche Gebiete mit geringer Mobilfunkteilnehmerdichte und an städtische Gebiete mit einer hohen Anzahl an Mobilfunkteilnehmern. Zur Sprachübertragung über ATM wird AAL-2 [12] eingesetzt, die Makrodiversitäts-Kombination erfolgt auf der Ebene der Minizellen (AAL-2 *Common Part Sublayer Packets* [73]).

3.3.3 Signalkombination und -verteilung

Wenn bei einer Funkverbindung mit Makrodiversität die Signale der Mobilstation von mehreren Feststationen aufgefangen werden, müssen sie in der Kombinationseinheit geeignet zusammengeführt werden. Genauso muß die Mobilstation auf der Abwärtsstrecke mit den Signalen, die sie von den beteiligten Feststationen empfängt, geeignet umgehen können. Das angestrebte Ziel ist es, nach Kombination am Empfänger eine höhere Qualität der Information zu erhalten, als dies im allgemeinen ohne Anwendung der Makrodiversität möglich ist.

3.3.3.1 Aufwärtsstrecke (*Uplink*)

Je nach Aufwand, der in den Empfänger und in das Festnetz investiert werden kann, können verschiedene Kombinationstechniken verwendet werden. Es lassen sich Signale, Bits oder Informationsblöcke (Pakete) kombinieren. Alle zusammen werden im folgenden als zu kombinierende „Einheiten" bezeichnet [169]. Zur Qualitätsbeurteilung können das Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal to Noise Ratio*, SNR), die Bitfehlerrate (*Bit Error Rate,* BER), das Signal-Interferenz-Verhältnis (*Carrier to Interference Ratio*, CIR) oder Kombinationen dieser Werte

herangezogen werden. Die Kombinationstechniken lassen sich bezüglich zweier Eigenschaften unterscheiden: bezüglich des Kombinationsverfahrens und bezüglich des Zeitpunktes der Kombination [121,145].

I) Kombinationsverfahren:

- Absuchen, Auslese, Umschalten:

  Beim Absuchen (*scanning combining*) werden alle empfangenen Signale durchsucht, bis eines gefunden wird, dessen Qualität über einem gegebenen Grenzwert liegt. Dieses Signal wird weitergeleitet, die anderen Signale werden ignoriert. Fällt die Qualität des Signals unter den Grenzwert, wird ein neues Signal gesucht, das die Kriterien erfüllt.
  Werden anstelle von Signalen, Informationsblöcke (Datenpakete oder Bits) kombiniert, wird von Auslese (*selective combining*) gesprochen. Hierbei wird der erste Block, dessen Qualität einen gegebenen Grenzwert übertrifft, weitergeleitet. Blöcke, die dieselben Informationen tragen, aber später ankommen, werden ignoriert. Der Vorteil ist, daß so keine unnötigen Paket-Verzögerungen entstehen.
  Ein Spezialfall des Absuchens für zwei Signalpfade ist das Umschalten (*switch and stay combining*). Sobald das momentan ausgewählte Signal unter das gegebene Qualitätskriterium fällt, wird auf das andere Signal umgeschaltet, ohne zu prüfen, ob dieses wirklich besser ist [2]. Der Vorteil dieser Methode ist ihre einfache Realisierung [121].

- Auswählen (*selection combining*):

  Werden zu jedem Zeitpunkt alle empfangenen Signale betrachtet, lassen sich höhere Kombinationsgewinne erzielen. Bei der Auswahl-Methode wird jeder Einheit eine Qualitätsinformation zugeordnet, die ein Maß für die Korrektheit der übertragenen Information darstellt. Unter allen Einheiten wird die mit der besten Qualität ausgewählt. Bei dieser Art der Kombination kann eine im Einzelfall unnötige Verzögerung durch das Warten auf nacheinander eintreffende Einheiten entstehen.

- Konstruktives Kombinieren (*constructive combining*):

  Auch beim konstruktiven Kombinieren werden alle empfangenen Einheiten berücksichtigt. Mittels der jeder Einheit zugeordneten Qualitätsinformation wird mit einem geeigneten Algorithmus eine möglichst korrekte Einheit berechnet, die dann weitergeleitet wird.
  Auf Signalebene sind die folgenden Verfahren im Einsatz [130]:

  - *maximal ratio combining*:
    Die Einzelsignale werden entsprechend ihrem Signal-Rausch-Verhältnis gewichtet und dann addiert.
  - *equal gain combining:*
    Die Einzelsignale werden gleichgewichtet (mit Faktor 1) und dann addiert. Dieses Verfahren erfordert nicht den hohen Rechenaufwand wie das *maximal ratio combining* und erzielt nur geringfügig schlechtere Ergebnisse.

Konstruktive Verfahren können auch für die bit- oder blockweise Kombination verwendet werden, wenn ein gewichteter Qualitätsparameter, der aus dem SNR oder CIR ermittelt wird, an die kombinierende Einheit weitergeleitet wird.

II) Kombinationszeitpunkt:

Es kann entweder vor der Detektion (*pre-detection combining*) oder nach der Detektion (*post-detection combining*) kombiniert werden. Diese Unterscheidung kommt noch aus der Analogtechnik, in der die Signaldetektion mit der Demodulation gleichzusetzen war. In der Digitaltechnik gibt es mehrere Stellen im Empfänger, an denen kombiniert werden kann. Zum Beispiel werden in [118] für das GSM drei Möglichkeiten der Kombination unterschieden: im Entzerrer (Basisbandsignale), im Kanaldecodierer (Brutto-Bitstrom) und im Sprachdecodierer (Netto-Bitstrom).

Bei Anwendung von Makrodiversität auf der Aufwärtsstrecke liegt die Kombinationseinheit (MDU) im Festnetz. Alle zur Kombination nötigen Informationen müssen von den einzelnen Feststationen zu ihr transportiert werden.

Werden bei der Bitdetektion weiche Entscheidungen (*soft decisions*) getroffen, können zur Kombination die Likelihood-Werte mitherangezogen und so ein größerer Kombinationsgewinn erreicht werden. Allerdings muß ein großer Anteil von Zusatzinformationen über jedes Bit an die Kombinationseinheit weitergeleitet werden (zum Beispiel vier zusätzliche Bits pro entschiedenes Bit [102]). Da sich diese im Zugangsnetz (in der MDU) befindet, wird so eine sehr große Bandbreite im Festnetz beansprucht. Wird die Detektion jedoch, wie beim Prinzip der abgesetzten Feststation (Kapitel 3.3.2), in einer kombinierten IU/MDU durchgeführt, kann diese Art des Kombinierens auch für die Aufwärtsstrecke einfach angewendet werden. Dieses Kombinieren auf Bitebene unter Zuhilfenahme der Likelihood-Werte wird häufig auch als „weiches Kombinieren" (*soft combining*) bezeichnet.

Nach der Detektion kann sinnvollerweise auf Blockebene kombiniert werden. Ein Block kann zum Beispiel ein Burst oder ein Luftschnittstellen-Datenrahmen (Datenpaket) sein. Bei diesem Verfahren muß nur eine Qualitätsinformation pro Block (und nicht pro Bit) mitgeliefert werden. Somit ist die durch die Qualitätsinformation zusätzlich beanspruchte Übertragungsbandbreite im Zugangsnetz geringer. Im Unterschied zum weichen Kombinieren wird dies auch als „hartes Kombinieren" (*hard combining*) bezeichnet. In dem in [21] vorgestellten Zugangsnetz für UMTS werden Daten- oder Sprachpakete, die über mehrere Feststationen empfangen werden, auf AAL-2-Minizellebene (Pakete variabler Länge mit Qualitätsinformationen) hart kombiniert.

Prinzipiell hängt es von der Wahl des Kombinationszeitpunkts und des -verfahrens ab, wie groß der mit Makrodiversität zu realisierende Gewinn sein kann. Es gilt allgemein, daß der Gewinn umso höher ist, je genauer die Informationen sind, die zur Kombination zur Verfügung

stehen. Ein Maximal-Ratio-Combining-Algorithmus vor der Signaldetektion ist also dem Selection-Combining auf Blockebene überlegen. Ersteres Verfahren erfordert größeren Aufwand in der Signalverarbeitung [130] und die schon angesprochene hohe zusätzliche Übertragungsbandbreite im Festnetz. In [119] und [120] wird ein kombiniertes Verfahren aus hartem und weichem Kombinieren vorgeschlagen, das die notwendige Übertragungsbandbreite im Zugangsnetz gering hält und trotzdem gute Kombinationsgewinne erlaubt. Weiches Kombinieren wird dabei für Funkverbindungen angewandt, die vom gleichen RNC verwaltet werden, hartes Kombinieren dagegen für Verbindungen, die über einen anderen RNC geführt werden.

3.3.3.2 Abwärtsstrecke (*Downlink*)

Für die Abwärtsstrecke ergeben sich bereits beim Senden von den Feststationen zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Es kann entweder zu jedem Zeitpunkt von nur einer Feststation oder von mehreren Feststationen gleichzeitig gesendet werden.

Auswahl-Makrodiversität

Bei der sendeseitigen Auswahl-Makrodiversität (*transmit selection diversity*) wird immer von der Feststation gesendet, die die momentan beste Verbindung zur Mobilstation gewährleistet. Während an allen an der Makrodiversität beteiligten Stationen immer die nötige Sendeinformation vorhanden sein muß, ist zu jedem Zeitpunkt nur eine Feststation aktiv. Als Kriterium zur Bestimmung der sendenden Station bietet sich die Signaldämpfung, die mittlere Empfangsleistung, die Bitfehlerrate oder das Signal-Interferenz-Verhältnis (CIR) an. Diese Kriterien können entweder an der Mobilstation gemessen und regelmäßig an die Feststationen übertragen werden oder aus den Empfangssignalen auf der Aufwärtsstrecke ermittelt werden [8]. Wird die Empfangsleistung als Auswahlkriterium herangezogen, ergibt sich die realisierte Empfangsleistung P_r an der Mobilstation als Maximum der Empfangsleistungen P_{r_i}, die die einzelnen Feststationen i erzielen könnten, zu

$$P_r = \underset{\forall i \in M}{\text{Max}}\{P_{r_i}\} \qquad (3\text{-}1).$$

Hierbei ist M die Menge der an der Makrodiversität beteiligten Feststationen.

Gleichwellenbetrieb

Der Fall des gleichzeitigen Sendens von mehreren Feststationen wird als Gleichwellenbetrieb (*simulcast*) bezeichnet [4,31,36,59]. Der Gleichwellenbetrieb ist ebenso wie die Auswahl-Makrodiversität prinzipiell in jeder makrodiversitätsfähigen zellularen Architektur möglich. Da beim Gleichwellenbetrieb immer alle beteiligten Feststationen aktiv sind, wird die Problematik der Auswahldiversität, sehr schnell die optimale Feststation auswählen zu müssen, vermieden.

Aus Sicht der Mobilstation wird durch das Senden von mehreren Feststationen gleichzeitig die Mehrwegausbreitung des Signals künstlich erhöht. Mit Hilfe von Entzerrern oder Rake-Empfängern in den Mobilstationen kann positiver Nutzen aus den mehrfach einfallenden Signalen gezogen werden. Für CDMA-Systeme sollte der Zeitunterschied der einfallenden Signale kleiner als 0,1 ms sein, damit der Rake-Empfänger ihn noch ausgleichen kann [102]. Für die Entzerrer in TDMA-Systemen ist dies möglich, solange die Zeitunterschiede aufgrund der Wegdifferenzen im Entzerrfenster liegen [130]. Da in den Mobilstationen der heutigen Mobilfunksysteme bereits Rake-Empfänger bzw. entsprechende Entzerrer verwendet werden, ist der Einsatz des Gleichwellenbetriebs in mikro- und picozellularen Systemen mit geringen Distanzen zwischen den Feststationen ohne Änderung der mobilen Empfänger möglich [10,60,115,118].

Als Beispiel sei das GSM angeführt. Die typischerweise verwendeten Entzerrer können Signalanteile innerhalb von fünf Bitdauern berücksichtigen, was einem Entzerrerfenster von 18,5 µs entspricht (3,693 µs pro Bit). Die Leistung aller Signale, die mit einem maximalen Wegunterschied von ungefähr 5,5 km an der Mobilstation einfallen, kann also als Nutzleistung verwertet werden [108].

In Systemen mit Gleichwellenbetrieb, in denen die Distanzen zwischen den Feststationen in dem oben genannten Rahmen liegen, ergibt sich die Gesamt-Empfangsleistung P_r als Summe der Einzelleistungen P_{r_i} nach

$$P_r = \sum_{i \in M} P_{r_i} \qquad (3\text{-}2).$$

Hierbei ist M die Menge der am Gleichwellenbetrieb beteiligten Feststationen.

Messungen in einem bestehenden Mobilfunksystem bestätigen, daß Gleichung (3-2) bereits beim Einsatz heutiger Endgeräte anwendbar ist [58]. Theoretische Untersuchungen lassen vermuten, daß mit leistungsfähigeren Endgeräten noch höhere Kombinationsgewinne im Gleichwellenbetrieb erreicht werden können [114,115].

3.4 Anwendung von Makrodiversität zur Erhöhung der Gebietsabdeckung, Systemkapazität und Verbindungsqualität

In dieser Arbeit wird der Einfluß der Anwendung der Makrodiversität auf die Gebietsabdekkung, Systemkapazität und die Verbindungsqualität in einem zellularen Mobilfunksystem untersucht. Es werden die Vor- und Nachteile der Makrodiversitätstechniken bei ihrem Einsatz

in mikro- und pikozellularen Systemen grundsätzlich erarbeitet. Es wird vorausgesetzt, daß die zellulare Architektur, das Zugangsnetz und die Endgeräte so ausgelegt sind, daß sie nach den Vorgaben in den Kapiteln 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 makrodiversitätsfähig sind.

In früheren Arbeiten wird Makrodiversität häufig nur im Sinne von Auswahl-Makrodiversität begriffen [3,17,22,97,173,84]. Studien zum Gleichwellenbetrieb sind, obwohl schon zur Zeit der Analogtechnik bekannt [4,14], seltener. Erst mit der Digitaltechnik und den damit verwendbaren Entzerrern und Rake-Empfängern wird der Gleichwellenbetrieb für den Einsatz in zellularen Mobilfunksystemen interessant [58,175].

In [17,18,19,20] wird der Einsatz von Auswahl-Makrodiversität in zellularen Systemen mit fester Kanalvergabe untersucht. Durch den Einsatz omnidirektionaler Antennen, die symmetrisch über das Dienstgebiet verteilt sind, wird eine höhere Gebietsabdeckung und ein geringerer Frequenz-Wiederverwendungsabstand erreicht. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die beste symmetrische Aufteilung der Feststationen im Dienstgebiet zu ermitteln. Gleichwellenbetrieb wird nicht untersucht.

Spezielle Untersuchungen zur Anwendung von Makrodiversität in GSM-Netzen haben ergeben, daß das Senden von nur einer Basisstation mit Hinblick auf die Optimierung der Kapazität des GSM-Netzes dem Gleichwellenbetrieb vorzuziehen ist [58]. Auch in [175] ergeben sich für Systeme mit fester Kanalvergabe die besten Interferenzverhältnisse, wenn jeweils die Feststation mit der momentan geringsten Dämpfung zur Mobilstation sendet. Eine spezielle Leistungsregelung mit fließender Aufteilung der Sendeleistungen im Gleichwellenbetrieb weist jedoch nur geringe Verluste gegenüber dem Idealfall des sofortigen Umschaltens auf. Diese Untersuchungen beziehen sich nur auf Systeme mit fester Kanalvergabe. Hier ist die Kapazität eindeutig durch die Anzahl vorhandener Frequenzen und der fest einzustellenden Clustergröße vorgegeben.

In mikro- und pikozellularen Systemen kommt es aufgrund der komplizierten Ausbreitungsverhältnisse zu starken Überlappungen der Abdeckungsgebiete der Feststationen [60]. Zellgrenzen können nicht mehr eindeutig festgelegt werden. Eine Frequenzplanung mit fester Kanalvergabe gestaltet sich in diesen Systemen sehr schwierig. Um die Frequenzplanung zu umgehen und um hohe Systemkapazitäten erzielen und örtlich und zeitlich schwankende Verkehrsdichten unterstützen zu können, werden in diesen Netzen Verfahren mit dynamischer anstelle von fester Kanalvergabe eingesetzt [80,81,174]. Das mit diesen Verfahren realisierbare flexible Ressourcenmanagement kann die Makrodiversität auf der Luftschnittstelle stark unterstützen [167,169].

Der gemeinsame Einsatz von Makrodiversität und dynamischer Kanalvergabe wurde bisher erst in [38,170] und [92,93,94] angedacht. Erstere zwei Veröffentlichungen stellen fest, daß die Anwendung der Auswahl-Makrodiversität geringere Wiederbenutzungsabstände für die Auf-

wärtsstrecke ermöglicht. Hauptaugenmerk letzterer Veröffentlichungen ist die Unterstützung der Mobilität durch möglichst wenig Handover-Vorgänge in einem makrodiversitätsfähigen zellularen System. Leistungsuntersuchungen bezüglich der realisierbaren Systemkapazität oder Verbindungsqualität sind jedoch in keiner Veröffentlichung zu finden.

In CDMA-basierten Mobilfunksystemen (z. B. IS-95 [149]) wird Makrodiversität bereits in eingeschränktem Maße, nämlich zur Realisierung eines *soft handover* eingesetzt (Kapitel 2.3.4.3). Befindet sich eine Mobilstation in dem Überlappungsgebiet angrenzender Zellen, kann sie, zum Zwecke eines fließenden Übergangs von einer zur nächsten Basisstation, kurzzeitig eine Verbindung mit zwei Basisstationen aufbauen [157]. Eine Kombinationseinheit im Festnetz (häufig im MSC - *mobile switching centre* - angebracht) entscheidet, welches Signal auf der Aufwärtsstrecke weitergeleitet wird (Auswahl-Makrodiversität). Auf der Abwärtsstrecke wird von beiden Basisstationen gleichzeitig gesendet. Die Basisstationen sind dazu zeitlich synchronisiert. Der Rake-Empfänger in der Mobilstation kann die zeitverzögerten Signale kombinieren.

Soft handover ist eine Möglichkeit der Realisierung eines *seamless handover* (Kapitel 3.2). Das Prinzip an sich ist nicht auf CDMA-Systeme beschränkt, eine Anwendung ist in jedem Mobilfunksystem denkbar. Für *soft handover* wird Makrodiversität zeitlich und örtlich begrenzt eingesetzt, das heißt sie ist auf den Moment des Zellübertritts und auf die Zellgrenzflächen beschränkt.

Um weitere Kapazitäts- und Qualitätsgewinne in Mobilfunksystemen zu erreichen, muß der Einsatz der Makrodiversität prinzipiell jederzeit und überall möglich sein (siehe Kapitel 3.3). Derart ausgelegte Systeme können hohe Gebietsabdeckung, hohe Systemkapazität, hohe Verbindungsqualität und/oder eine geringe Anzahl an Handover-Vorgängen ermöglichen. Ob und inwieweit diese Gewinne alleine oder gleichzeitig in einem zellularen System realisierbar sind, wird im folgenden untersucht.

Kapitel 4

Modellierung und Simulation

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines makrodiversitätsfähigen zellularen Mobilfunksystems muß dieses mittels eines geeigneten Modells beschrieben werden. Die Modellierung soll bezüglich der zu untersuchenden Aspekte so genau wie nötig, bezüglich des Aufwandes für die Untersuchung jedoch so einfach wie möglich sein.

Eine geeignete Modellierung eines zellularen Systems muß folgendes beinhalten: eine Beschreibung des Dienstgebietes mit der Möglichkeit zur eindeutigen Positionierung der Fest- und Mobilstationen, ein oder mehrere Wellenausbreitungsmodelle, die Modellierung des Nachrichtenverkehrs, ein oder mehrere Mobilitätsmodelle sowie Modelle der zu untersuchenden Protokolle.

Zur Leistungsuntersuchung selbst wird in dieser Arbeit die Methodik der ereignisgesteuerten Simulation eingesetzt. Sie ist in [87] und [85] ausführlich beschrieben. Im folgenden soll deshalb nur auf die Besonderheiten des in dieser Arbeit verwendeten Systemmodells und einiger Spezifika bei der Umsetzung in ein Simulationsprogramm eingegangen werden.

4.1 Modellierung des Dienstgebietes

Eine flexible Modellierung des Dienstgebietes, die einfach in eine Simulation auf einem digitalen Rechner umzusetzen ist, ist das Prinzip der „digitalen Karte".

Ein zweidimensionales Gebiet wird dabei in diskrete Punkte (x_i,y_i), $x_i \in [X_{min}, X_{max}], y_i \in [Y_{min}, Y_{max}]$ aufgelöst. Die Genauigkeit der Diskretisierung kann über die Einheiten U_x bzw. U_y in x- und y-Richtung des Rasters eingestellt werden. Diese Einheiten geben die Abbildung der Distanzen des Modellrasters in reale Längenmaße (zum Beispiel in Meter) an (Bild 4-1).

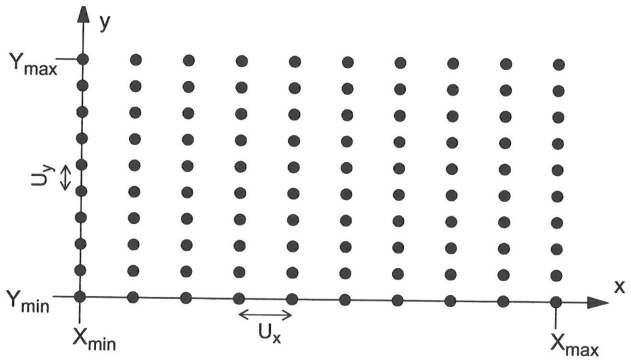


Bild 4-1: Prinzip der digitalen Karte

Die einzelnen Rasterpunkte der Karte können je nach modelliertem Dienstgebiet verschieden interpretiert werden. Sie können mögliche Aufenthaltsorte für Mobilstationen, Feststationsstandorte oder sogenannte „verbotene Punkte" repräsentieren. Verbotene Punkte werden dazu benutzt, nicht-rechteckförmige Gebiete zu modellieren. Auf ihnen darf sich keine Mobil- oder Feststation befinden. Damit können sie bei der Simulation ignoriert werden.

In dieser Arbeit wird das Dienstgebiet in regelmäßige Sechsecke unterteilt, in deren Mitte oder an deren Ecken die Feststationen plaziert werden. Dies entspricht der in Kapitel 2.3 vorgestellten Modellierung eines zellularen Systems. Die hexagonale Struktur gibt dabei nur die Plazierung der Feststationen vor, eine Zuordnung von Punkten zu Feststationen (Zellen) wird dabei nicht vorgenommen. Diese Zuordnung ist im allgemeinen abhängig von den Ausbreitungsbedingungen und dem Kanalvergabeverfahren.

Ein Beispiel für das Modellraster mit hexagonaler Struktur zeigt Bild 4-2. Die Sechsecke sind dabei aus gleichseitigen Dreiecken aufgebaut. Die Schwerpunkte dieser Dreiecke sind mögliche Aufenthaltspositionen der Mobilstationen (schwarze Punkte in Bild 4-2). Jede Mobilstationsposition hat somit den exakt gleichen Abstand zu ihren drei nächsten Nachbarpositionen. Dies ist von Vorteil für das später erläuterte Mobilitätsmodell.

Bei dieser Modellierung des zellularen Systems ergibt sich die y-Einheit aus der x-Einheit zu

$$U_y = \frac{U_x}{\sqrt{3}} \tag{4-1}.$$

Jede Mobilstationsposition repräsentiert eine Fläche von der Größe des regelmäßigen Dreiecks mit dem Flächeninhalt

$$A_\Delta = 3U_xU_y = \sqrt{3}U_x^2 \tag{4-2}.$$

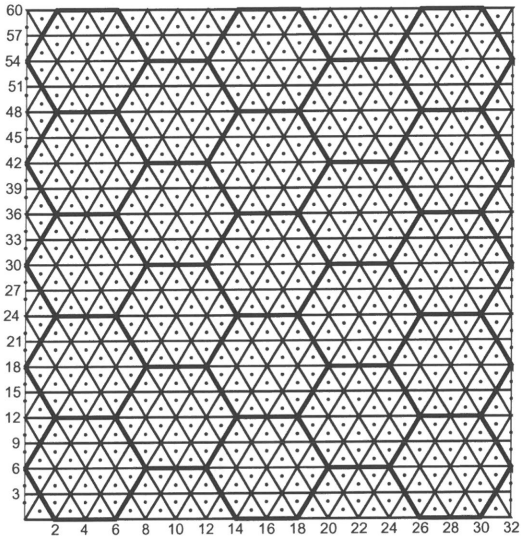


Bild 4-2: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 24 Mobilstationspositionen pro Sechseck

Eine feinere Auflösung des Gebiets ergibt sich durch Erhöhung der Anzahl der Dreiecke, aus denen eine sechseckige Zelle zusammengesetzt ist. Dasselbe Dienstgebiet mit je 96 beziehungsweise 216 Mobilstationspositionen pro Zelle zeigen die Bilder 4-3 und 4-4. Diese beiden Raster umfassen mehr diskrete Punkte als in Bild 4-2, bilden jedoch das gleiche Dienstgebiet ab, wenn der reale Zellradius[1] konstant gehalten wird.

Wird der auf die Anzahl der Dreiecksseiten normierte Zellradius als R_n bezeichnet, ergeben sich die Rastereinheiten in Abhängigkeit vom realen, fest gewählten Zellradius R (in Meter) als

$$U_x = \frac{R}{2R_n} \tag{4-3}$$

und

$$U_y = \frac{R}{2\sqrt{3}R_n} \tag{4-4}.$$

Allgemein berechnet sich die Anzahl Z der regelmäßigen Dreiecke, aus denen sechseckige Zellen mit dem Radius R aufgebaut werden können, zu

1. Bei einer regelmäßigen sechseckigen Zelle entspricht der Zellradius der Seitenlänge des Sechsecks (s. Kapitel 2.3).

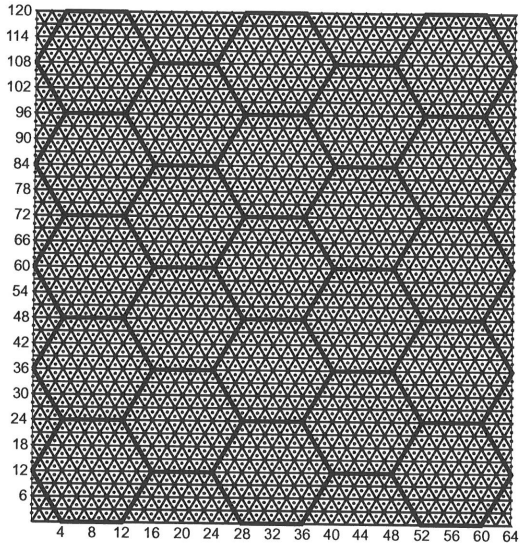


Bild 4-3: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 96 Mobilstationspositionen pro Sechseck

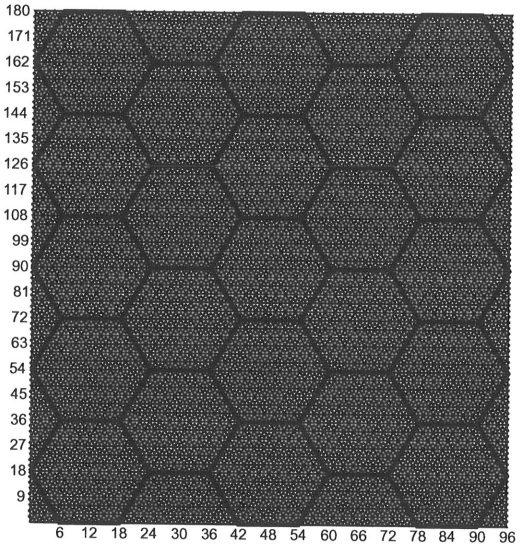


Bild 4-4: Zellulare Struktur im Rasterbild mit 216 Mobilstationspositionen pro Sechseck

$$Z = 6R_n^2 \quad \text{mit } R_n \in \mathbf{N}^+ \tag{4-5}.$$

In Bild 4-2 ist R_n=2 und Z= 24, in Bild 4-3 ist R_n=4 und Z=96 und in Bild 4-4 ist R_n=6 und Z=216.

Die vorgestellte Art der Modellierung mittels einer digitalen Karte ist sehr flexibel. Sie läßt sich nicht nur zur Abbildung hexagonaler Zellstrukturen verwenden. Mit ihrer Hilfe wurde in [9] ein Gebiet nach dem Vorbild Manhattans modelliert. Wie Bild 4-5 veranschaulicht, wurden dabei rechtwinklige Straßenzüge und rechteckige Gebäude nachgebildet.

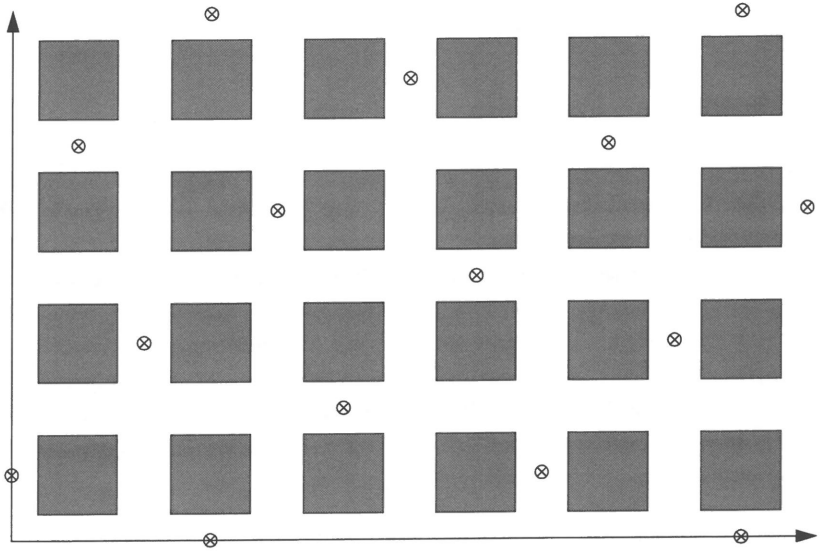


Bild 4-5: Modellierung eines Gebietes nach dem Vorbild Manhattans

Die Feststationen wurden in diesem Beispiel in diagonalen Linien gleichen Abstands über das Dienstgebiet verteilt [49]. Da Bewegungen in den Gebäuden nicht modelliert werden sollten, wurden Positionen für die Mobilstationen nur auf den Straßen vorgesehen und die Gebäudeflächen selbst als verbotene Punkte markiert.

In derselben Art und Weise lassen sich mit dem Prinzip der digitalen Karte auch Mobilfunknetze innerhalb von Gebäuden (Büroräume oder Messehallen) modellieren.

In dieser Arbeit wird im folgenden die oben beschriebene hexagonale Zellstruktur basierend auf gleichseitigen Dreiecken eingesetzt.

Soll mit dem Prinzip der digitalen Karte kein reales, beschränktes, sondern ein theoretisches, unendlich ausgedehntes Dienstgebiet modelliert werden, müssen die an den Rändern des Rasters auftretenden Effekte berücksichtigt werden. Ein solcher Randeffekt ist zum Beispiel,

daß Mobilstationen am Rand des Rasters von weniger Feststationen umgeben sind als im Zentrum des Rasters. Dadurch wird bei diesen Mobilstationen bei einer hohen Auslastung des Systems ein besseres Gleichkanal-Interferenz-Verhältnis (CIR) gemessen als bei Stationen im Zentrum des Dienstgebietes. Ist dieser Einfluß der Rasterränder unerwünscht, kann er durch eine geeignete Auswahl des Meßgebiets innerhalb des Rasters eliminiert werden. Dazu werden die relevanten Meßstatistiken des Simulationsprogramms nur im zentralen Teil des Rasters und nicht an den Rändern genommen.

4.2 Modellierung der Wellenausbreitung

Das Prinzip der digitalen Karte ermöglicht den Einsatz sowohl empirischer als auch deterministischer Wellenausbreitungsmodelle. Letztere berechnen mittels Strahlwegsuche oder Strahlwegverfolgung (*ray tracing* bzw. *ray launching*) sehr exakt die Ausbreitung der Funkwellen in einem gegebenen Szenario [91]. Für jeden berechneten Punkt werden relevante Parameter, wie zum Beispiel die mittlere Empfangsleistung, abgespeichert. Wird eine Übereinstimmung zwischen der berechneten Fläche und der Beschreibung des Dienstgebietes nach Kapitel 4.1 geschaffen, lassen sich die Ergebnisse der deterministischen Ausbreitungsberechnungen in der Simulation nutzen. Die benötigte Rechendauer dieser Verfahren ist sehr hoch. Für sehr schnelle Berechnungen sich verändernder Ausbreitungsbedingungen in mehrzelligen Dienstgebieten sind sie deshalb nur bedingt geeignet.

Empirische Ausbreitungsmodelle versuchen mittels einfacher mathematischer Gleichungen die Effekte der Funkwellenausbreitung auf wichtige Leistungsgrößen, wie zum Beispiel die Empfangsleistung, nachzubilden [97]. In dieser Arbeit werden dazu die in Kapitel 2.2 vorgestellten Modelle angewendet. Die mittlere Empfangsleistung wird mit dem Modell der distanzabhängigen Dämpfung nach Gleichung (2-16), dem allgemeinen Modell der Abschattung nach den Gleichungen (2-14) und (2-16), sowie dem Wendepunkt-Modell nach den Gleichungen (2-14) und (2-17) berechnet. Der Vorteil der empirischen Modelle ist, daß sich die Ausbreitungsbedingungen sehr schnell berechnen lassen und so innerhalb einer Simulation oft verändert werden können. Desweiteren haben diese Modelle einen universellen Charakter. Sie beschreiben die Ausbreitungsbedingungen wie sie in den meisten Gebieten der Welt anzutreffen sind. Deshalb sind die Ergebnisse der Leistungsuntersuchungen mit diesen Modellen unabhängig von einem speziellen Einsatzort und somit für viele Mobilfunknetzplaner interessant.

In dem hier verwendeten Simulationsprogramm wird mittels der erwähnten empirischen Modelle die Gesamtdämpfung (distanzabhängige Dämpfung und Abschattung) zwischen den Feststationen und jeder möglichen Mobilstationsposition berechnet. Für einen schnellen

Zugriff können die Ergebnisse der Berechnungen vor Beginn einer Simulation abgespeichert werden. Zur Modellierung sich ändernder Ausbreitungsbedingungen können die Berechnungen jederzeit während der Simulation neu durchgeführt werden.

Für die Simulationen zur Untersuchung der Systemkapazität in Kapitel 6 gilt die einer Mobilstationsposition zugeordnete Dämpfung für die gesamte Fläche des regelmäßigen Dreiecks. Die Ausbreitungsverhältnisse in der Dreiecksfläche werden als im Mittel homogen angesehen. Dies kann als gute Annäherung an die Realität gesehen werden, da die berechneten Leistungswerte keine Momentanwerte, sondern immer örtlich bezogene Mittelwerte sind (*local mean power* [97,145]).

In einem makrodiversitästfähigen System muß die Entscheidung, welche Feststationen an der Makrodiversität beteiligt sind, immer aufgrund der Mittelwerte der gemessenen Leistungen (oder - gleichbedeutend - aufgrund der mittleren Empfangspegel) getroffen werden. Die Momentanwerte wechseln bedingt durch das *fast fading* zu schnell, als daß sie als ausschlaggebende Parameter eingesetzt werden könnten (siehe Kapitel 2.2). Das *fast fading* hat dann keinen Einfluß mehr auf die relevanten Parameter bei der Leistungsuntersuchung der Makrodiversität und muß deshalb nicht in die Modellierung der Ausbreitungsbedingungen mit einbezogen werden [162,163].

4.3 Modellierung des Nachrichtenverkehrs

Für die Untersuchungen der Systemkapazität und Verbindungsqualität in Kapitel 6 wird Nachrichtenverkehr zufällig, bestimmten stochastischen Prozessen gehorchend, erzeugt.

Mobilstationen betreten das Mobilfunksystem, wenn sie eine Verbindung aufbauen möchten. Jede Mobilstation erzeugt genau einen Verbindungswunsch und verläßt nach Ende der Verbindung oder nach Abweisung des Wunsches das System. Die Plazierung der Mobilstation im Dienstgebiet erfolgt unmittelbar zu Beginn des versuchten Verbindungsaufbaus. Sie folgt dabei einer vorgegebenen räumlichen Verteilung. Ist der Verbindungsaufbau erfolgreich, belegt die Mobilstation eine oder mehrere Ressourcen (Kanäle) im System. Am Ende der Verbindung (oder bei Abbruch der Verbindung aufgrund sich ändernder Ausbreitungsbedingungen oder Kanalbelegungen bei sich bewegenden Mobilstationen) werden die Ressourcen zurückgegeben und stehen somit anderen Teilnehmern zur Verfügung.

4.3.1 Zeitliche Verkehrserzeugung

Die Erzeugung der Verbindungswünsche (und damit implizit der Eintritt der Mobilstationen in das System) folgt einem Poisson-Prozeß. Dies bedeutet, daß die Zwischenankunftszeit T_{IAT} (*inter arrival time*) der Verbindungswünsche negativ-exponentiell verteilt ist. Ihre Verteilungsfunktion ist

$$F_{IAT}(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \tag{4-6}.$$

Der Parameter λ ist die Ankunftsrate der Verbindungswünsche und ergibt sich aus dem Erwartungswert $E[T_{IAT}]$ zu

$$\lambda = \frac{1}{E[T_{IAT}]} \tag{4-7}.$$

Die Dauer T_D einer Verbindung wird als negativ-exponentiell verteilte Zufallsvariable modelliert. Ihre Verteilung ist gegeben als

$$F_D(t) = 1 - \exp(-\varepsilon t) \tag{4-8}.$$

mit ε als Enderate. Sie ergibt sich anlog zur Ankunftsrate aus dem Erwartungswert der Verbindungsdauer $E[T_D]$:

$$\varepsilon = \frac{1}{E[T_D]} \tag{4-9}.$$

Diese Verkehrsmodellierung entspricht der üblichen Modellierung von Telefonverkehr [35,56,151].

Das Verkehrsangebot A im System kann bei fest gewählter mittlerer Verbindungsdauer $E[T_D]=\overline{T}_D$ über den Parameter λ beziehungsweise den gewünschten mittleren Ankunftsabstand $E[T_{IAT}]=\overline{T}_{IAT}$ eingestellt werden.

Das Verkehrsangebot im Mobilfunksystem ergibt sich dann zu

$$A = \frac{\lambda}{\varepsilon} = \frac{\overline{T}_D}{\overline{T}_{IAT}} \tag{4-10}.$$

Bei dieser Modellierung ist eine Mobilsstation nur so lange im System, wie sie eine Verbindung unterhält. Der Fall, daß eine Mobilstation mehrere Verbindungen zeitlich nacheinander am selben oder an verschiedenen Orten beginnt, ist aus Systemsicht unerheblich, da eine Unterscheidung der Mobilstationen nicht von Nöten ist. Wiederholversuche bei Blockierung eines Verbindungswunsches (*repeated call attempts*) werden nicht betrachtet.

4.3.2 Räumliche Verkehrserzeugung

Die erstmalige Plazierung der Mobilstation bei einem neuen Verbindungswunsch erfolgt nach einer frei wählbaren räumlichen Verteilung. Um eine möglichst hohe Flexibilität zu ermöglichen, wird die Position der Mobilstation im Dienstgebiet mit Hilfe von Polarkoordinaten festgelegt. Die Position wird, ausgehend vom Mittelpunkt des Gebiets, exakt durch den Winkel α und den Radius r bestimmt (Bild 4-6).

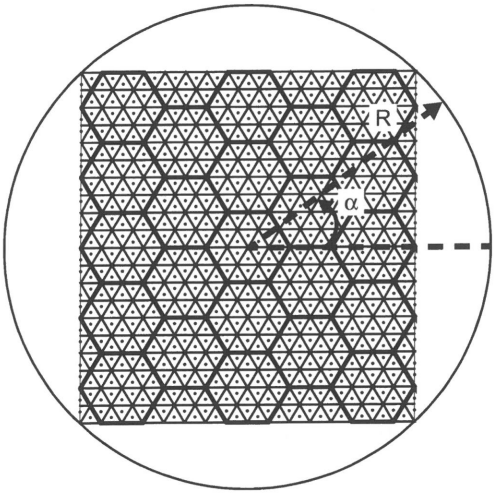


Bild 4-6: Bestimmung der Mobilstationspositionen in Polarkoordinaten

Im folgenden wird die Methodik beschrieben, nach der die Position jeder Mobilstation bei ihrem Eintritt in das System ermittelt wird. Es wird dabei eine gleichmäßige Verteilung der Mobilstationen über das gesamte Dienstgebiet angestrebt [37,170]. Andere Verteilungen lassen sich auf dieselbe Art und Weise erzeugen. Ein Beispiel hierzu findet sich in Anhang B.

Allgemein gilt, daß die räumliche Verteilungsdichte p_A (Flächendichte) der Mobilstationen der Normierungsbedingung gehorchen muß. Diese ist in Polarkoordinaten:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} p_A(r, \alpha) r dr d\alpha = 1 \qquad (4\text{-}11).$$

Für das konzentrische Szenario nach Bild 4-6 kann der Winkel α als gleichverteilte Zufallsvariable zwischen 0 und 2π gewählt werden. Damit ist die Verteilung der Mobilstationen nicht mehr von α abhängig. Gleichung (4-11) vereinfacht sich zu

$$\int_0^\infty 2\pi p_A(r) r dr = 1 \qquad (4\text{-}12).$$

Um eine gleichmäßige Verteilung der Mobilstationen im Dienstgebiet zu erzeugen, muß die Flächendichte p_A im Bereich des Dienstgebietes konstant gewählt werden:

$$p_A(r) = \begin{cases} \frac{k}{2\pi} & \text{für } 0 \le r \le R \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad (4\text{-}13).$$

Dies verdeutlicht Bild 4-7.

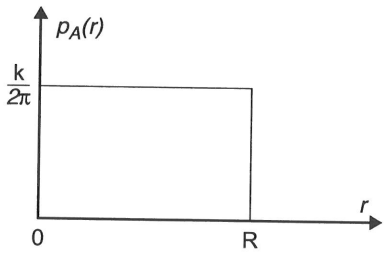


Bild 4-7: Konstante Verteilungsdichte der Mobilstationen in [0,R]

Um diese p_A zu erreichen, muß der Radius r bei jeder neu zu plazierenden Mobilstation nach einer speziellen Verteilung ausgewürfelt werden. Wird die Verteilungsdichtefunktion p_r des Radius definiert als

$$p_r(r) = 2\pi p_A(r) r \qquad (4\text{-}14),$$

ergibt sie sich für den Fall der konstanten Flächenverteilung nach Bild 4-7 zu

$$p_r(r) = \begin{cases} kr & \text{für } 0 \le r \le R \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad (4\text{-}15).$$

Die Konstante k läßt sich aus folgender Normalisierungsbedingung errechnen:

$$\int_0^\infty p_r(r) dr = 1 \qquad (4\text{-}16).$$

Es ergibt sich dann

$$k = \frac{2}{R^2} \qquad (4\text{-}17)$$

und $p_r(r)$ wie in Bild 4-8 gezeigt.

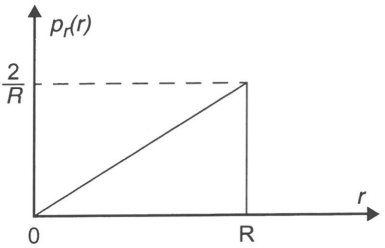


Bild 4-8: Verteilungsdichte des Radius r

Eine gleichmäßige Verteilung der Mobilstationen im Dienstgebiet kann also erzeugt werden, wenn bei der Plazierung jeder neu ins System eintretenden Station ihre Position mit dem Winkel α gleichverteilt zwischen 0 und 2π und mit dem Radius r verteilt nach p_r nach Gleichung (4-15) und (4-17) ausgewürfelt wird. Verschiedene Computeralgorithmen zur Erzeugung von Zufallszahlen, die einer speziellen Verteilung genügen müssen, sind in [86] und [128] beschrieben.

Da die in dieser Arbeit verwendete digitale Karte nicht rund, sondern rechteckig ist, können nach obiger Methode Positionen ermittelt werden, die außerhalb des gewünschten Gebietes liegen. Diese können verworfen werden. Es wird solange eine neue Position ausgewürfelt, bis sie im Dienstgebiet liegt.

Eine andere, nicht gleichmäßige räumliche Verteilung der Mobilstationen läßt sich auf dieselbe Art und Weise erzeugen. Es kann jede gewünschte Flächenverteilungsdichte p_A vorgegeben werden und dann p_r nach der hier vorgestellten Methode berechnet werden. Dies wird beispielhaft für ein sogenanntes „Hot-Spot"-Szenario in Anhang B gezeigt.

4.4 Mobilitätsmodell

Zur Modellierung der Bewegung der Mobilfunkteilnehmer wird ein stochastisches, auf Aufenthaltszonen basierendes Mobilitätsmodell eingesetzt [74, 98].

Die Bewegung eines Teilnehmers wird durch die Dauer T_i des Aufenthalts in der Zone i und der Wahrscheinlichkeit p_{ij}, mit der er nach seinem Aufenthalt in die Nachbarzone j übergeht, beschrieben. Die Größe einer Zone sowie die Anzahl der Nachbarzonen kann prinzipiell beliebig gewählt werden. In einem Dienstgebiet mit einer hexagonalen Zellstruktur nach

Kapitel 4.1 entsprechen die Zonen zweckmäßigerweise den regelmäßigen Dreiecken, aus denen die Zelle aufgebaut ist. Als Nachbarn werden die drei Dreiecke definiert, mit denen die Ausgangszone gemeinsame Seiten hat (Bild 4-9).

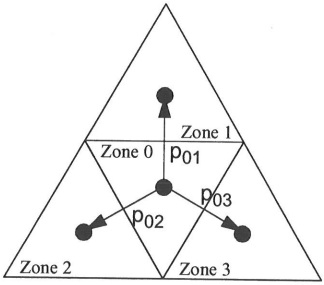


Bild 4-9: Nachbarschaftsbeziehungen im zonenbasierten System

Soll eine gleichförmige Bewegung in alle Richtungen simuliert werden, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten p_{ij} auf den Kehrwert der Anzahl der Nachbarn (hier: ein Drittel) gesetzt. Soll dagegen eine Straße modelliert werden, müssen die Übergangswahrscheinlichkeiten entlang der Straße auf eins gesetzt werden. An einer Kreuzung können die abzweigenden Straßen mit einem der Abbiegewahrscheinlichkeit entsprechenden Wert berücksichtigt werden.

Die Aufenthaltsdauer in einer Zone wird als Zufallsvariable modelliert. Ihre Verteilung ist prinzipiell beliebig wählbar. Zur Analyse von Handover-Vorgängen wird häufig eine negativ-exponentiell verteilte Aufenthaltsdauer gewählt [89]. Für eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ist die Aufenthaltsdauer deterministisch verteilt (konstant), wobei die Zufallsabhängigkeit entfällt. Ihr Mittelwert entspricht der Dauer, mit der ein Teilnehmer die Distanz zur Nachbarzone zurücklegt. Hierbei ist es von Vorteil, wenn alle Nachbarn in gleicher Entfernung liegen. Dies ist bei der Modellierung der Aufenthaltszonen mit regelmäßigen Dreiecken nach Bild 4-9 der Fall.

4.5 Ressourcenmanagement an der Luftschnittstelle

Für die Leistungsuntersuchungen zur Systemkapazität und Verbindungsqualität in Kapitel 6 wird ein dynamisches, adaptives Ressourcenmanagement eingesetzt. Es ist geeignet, die volle Flexibilität des makrodiversitätsfähigen Netzes zur Optimierung der Systemkapazität und der Verbindungsqualität auszunutzen.

Das eingesetzte Kanalvergabeverfahren gehört zur Gruppe der dynamischen, lokal zentralisierten Verfahren. Der Ressourcenmanager hat jederzeit den vollen Überblick über die von ihm verwalteten Ressourcen. Er wird deshalb sinnvollerweise im *Radio Network Controller* (RNC) des Zugangsnetzes nach Kapitel 3.3.2 (Bild 3-4) implementiert. Im Zusammenspiel mit der *Macrodiversity Unit* (MDU) kann es sämtliche Feststationen, die am selben RNC angeschlossen sind, verwalten. Ebenso wie die Makrodiversität kann auch die dynamische Kanalvergabe über mehrere RNCs hinweg nur durch die Ernennung eines „Master-Managers" oder durch eine hierarchisch übergeordnete Instanz erfolgen.

Das Prinzip der lokal zentralisierten Kanalvergabe hat ihre Leistungsfähigkeit zur Kapazitätserhöhung in mikro- und pikozellularen Netzen ohne Berücksichtigung des Aspekts der Makrodiversität bereits in [38,168,170] unter Beweis gestellt. Spätere Untersuchungen zu ihrem Einsatz in „gebündelten" Zellstrukturen (*bunched systems*) bestätigen die Leistungsfähigkeit dieser Algorithmen [15,104]. Aufgrund der Möglichkeit mit diesem dynamischen Verfahren Ressourcen je nach Ausbreitungs- und Verkehrsverhältnissen flexibel den Feststationen zuordnen zu können, bietet sich ihr Einsatz in makrodiversitätsfähigen mikro- und pikozellularen Systemen an.

Für die lokal zentralisierte Kanalvergabe wird in dieser Arbeit ein speziell zur Unterstützung der Makrodiversität entwickeltes Verfahren eingesetzt. Um eine möglichst hohe Systemkapazität (s. Kapitel 2.3.4.4) zu erreichen, wird versucht, die knappen Ressourcen des Mobilfunksystems möglichst eng wiederzuverwenden. Dabei muß jedoch für alle Verbindungen eine minimale Verbindungsqualität, definiert durch ein minimales Gleichkanal-Interferenz-Verhältnis CIR_{min}, garantiert werden. Dies läßt sich durch dynamische Kanalvergabe gepaart mit einer geeigneten Verbindungsannahmesteuerung erreichen.

Dem verwendeten Kanalvergabeverfahren stehen alle Systemressourcen (in einem FDMA/TDMA-System sind dies zum Beispiel die Zeitschlitze für die Nutzdaten) an jeder Feststation zur Verfügung. Die Ressourcen werden so wiederverwendet, daß jeder aktiven Verbindung ein minimales CIR_{min} und eine minimale Empfangsleistung $P_{r,min}$ garantiert wird. Bei Einsatz der Makrodiversität auf der Abwärtsstrecke kommt zur Wahl der geeigneten Ressourcen noch die Wahl der geeigneten Feststation (oder der geeigneten Feststationen) hinzu. Erfüllen mehrere Kombinationen aus Feststationen und Ressourcen die genannten Anforderungen, wird unter ihnen entweder zufällig oder nach einem festzulegenden Optimierungsziel ausgewählt. Mögliche Optimierungsziele sind beispielsweise die Maximierung der Empfangsleistung, des Signal-Interferenz-Verhältnisses oder der Summe aus Empfangs- und Interferenzleistung. Weitere Ziele werden in Kapitel 6 vorgestellt.

Die Aufgabe der Verbindungsannahmesteuerung ist es, die Kanalvergabe so zu unterstützen, daß die beiden Parameter $P_{r,min}$ und CIR_{min} sowohl für aktive als auch für neue Verbindungen eingehalten werden. Ein Ablaufplan für das Vorgehen bei einem neuen Verbindungswunsch zeigt Bild 4-10.

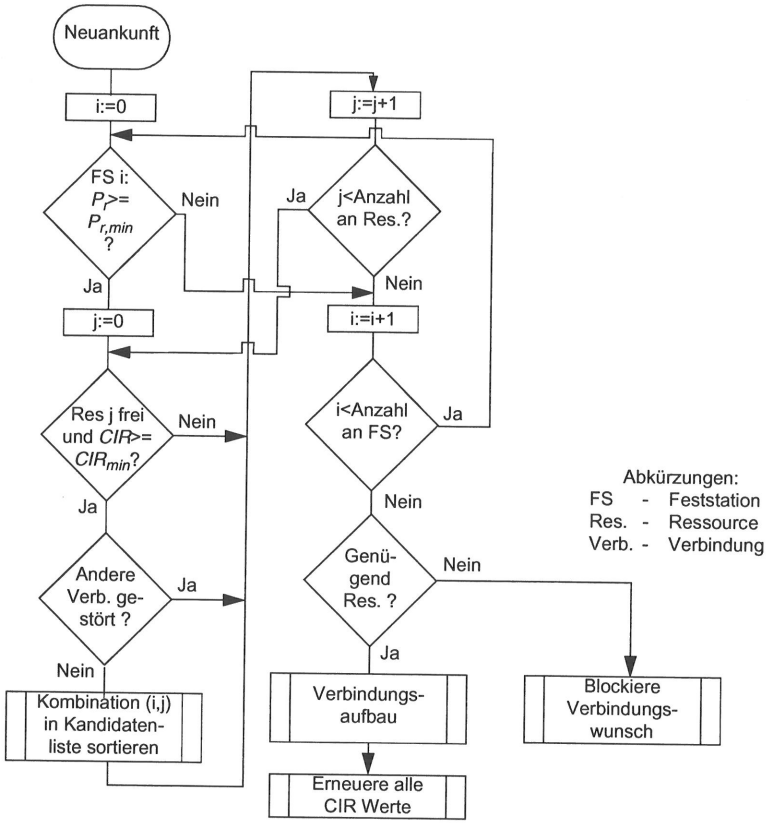


Bild 4-10: Kanalvergabe bei neuem Verbindungswunsch

Es wird zuerst geprüft, welche Feststationen i für eine Verbindung mit der Mobilstation in Frage kommen. An diesen Feststationen werden alle Ressourcen j, die an der jeweiligen Feststation nicht bereits belegt sind, auf das realisierbare CIR getestet. Liegt es über dem Minimalwert und stört die Verwendung dieser Ressource keine andere Verbindung, kann die Ressource an dieser Feststation verwendet werden. Alle verwendbaren Kombinationen (i,j) aus Feststation und Ressource werden nach dem gewünschten Optimierungskriterium in eine Kandidatenliste sortiert. Sind für den Verbindungswunsch der Mobilstation genügend Ressourcen

vorhanden, wird der Verbindungswunsch zugelassen und die beste (oder die besten) Kombination(en) aus Feststation und Ressource für die Verbindung belegt. Steht für einen neuen Verbindungswunsch nicht die gewünschte Anzahl an Ressourcen an keiner möglichen Feststation zur Verfügung, wird der Verbindungswunsch von der Verbindungsannahmesteuerung blokkiert.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Modelle des Dienstgebietes, der Wellenausbreitung, der Mobilität und der Protokolle wurden in ein objektorientiertes Simulationswerkzeug umgesetzt. Es ist flexibel parametrisierbar und zur Untersuchung weiterer Protokollaspekte zellularer Mobilfunksysteme ausbaubar. Es enthält eine Vielzahl an Meßwertstatistiken zur Erfassung und Auswertung der Simulationsergebnisse. Mit Hilfe dieses Werkzeugs wurden die Leistungsuntersuchungen in den folgenden Kapiteln durchgeführt.

Kapitel 5

Untersuchung der Gebietsabdeckung bei Anwendung von Makrodiversität

Das Ziel eines Mobilfunknetzes ist es, Kommunikation jederzeit und an jedem Ort im Dienstgebiet zu ermöglichen. Je nach Netzbetreiber kann das Dienstgebiet dabei die ganze Welt, ein Land, ein Stadtzentrum oder auch ein Firmengelände sein. Ein Netzbetreiber ist bestrebt, eine möglichst hohe Gebietsabdeckung in seinem zellularen Netz zu erreichen. Als „abgedeckt" werden dabei die Orte einer Zelle bezeichnet, an denen eine Kommunikation zwischen Mobilstation und Feststation möglich ist. Dazu muß die Empfangsleistung über einem minimalen Wert liegen, der gerade noch ausreicht, um das Signal dekodieren zu können. Anders ausgedrückt bedeutet das, daß die Dämpfung des Signals zwischen Sender und Empfänger nicht zu groß sein darf.

In diesem Kapitel wird der Möglichkeit nachgegangen, die Gebietsabdeckung in einem zellularen System mit Hilfe von Makrodiversität zu erhöhen. Mit Hilfe von Computersimulationen werden die in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren, Auswahl-Makrodiversität und Gleichwellenbetrieb mit unterschiedlicher Anzahl an beteiligten Feststationen, untersucht und bewertet. Als Vergleich dient der Fall ohne Makrodiversität, bei dem eine Mobilstation eine Verbindung zur geographisch am nächsten liegenden Feststation unterhält. Dieses Verfahren orientiert sich am idealen Zellplanungsprozeß, bei dem alle Punkte einer Zelle der „eigenen" Feststation zugeordnet werden [166].

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf die Abwärtsstrecke (*downlink*). Die Aufwärtsstrecke (*uplink*) läßt sich bezüglich der Auswahl-Makrodiversität prinzipiell genauso behandeln. Werden dieselben Parameter gewählt (Antennengewinne, Trägerfrequenz und Kombinationsverfahren), ergeben sich aufgrund des reziproken Verhaltens der Ausbreitungsmodelle dieselben Ergebnisse für Auf- und Abwärtsstrecke [172]. Bei FDD-Systemen (*Frequency Division Duplex*) arbeiten Auf- und Abwärtsstrecke in unterschiedlichen Frequenzbändern. Hierbei können die Dämpfungen in den beiden Übertragungsrichtungen unterschiedlich sein (Kapitel 2.2). Dies beeinflußt aber nicht die im folgenden untersuchten relativen Gewinne der Auswahl-Makrodiversität.

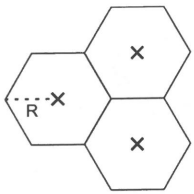
Zur Modellierung des Funkkanals werden die beiden Ausbreitungsmodelle nach Kapitel 2.2 verwendet: das allgemeine Ausbreitungsmodell, das häufig zur Betrachtung ländlicher und vorstädtischer Gebiete verwendet wird, und das Wendepunkt-Modell, das zur Betrachtung städtischer Gebiete herangezogen wird.

Die Sendeleistung aller Feststationen wird als gleich groß und fest angenommen. Alle Mobilstationen verwenden omnidirektionale Antennen. Als Vergleichswert der Verfahren wird die Gesamtdämpfung herangezogen, die sich aus der entfernungsabhängigen Dämpfung nach der allgemeinen Formel (2-16) bzw. der Wendepunktformel (2-17) und der log-normal verteilten Abschattungskomponente nach Gleichung (2-15) zusammensetzt. Bei Auswahl-Makrodiversität wird immer die Feststation gewählt, die die höchste Empfangsleistung am Ort der Mobilstation realisieren kann. Dies entspricht der Feststation, auf deren Ausbreitungspfad zur Mobilstation die geringste Dämpfung auftritt. Beim Gleichwellenbetrieb werden die am Ort der Mobilstation empfangenen Leistungen einer festen Anzahl von Feststationen summiert (siehe Kapitel 3). Dabei werden die Feststationen gewählt, die die höchsten Empfangsleistungen realisieren können. Die summierte Leistung wird auf die (feste) Sendeleistung und die Antennengewinne normiert. Es ergibt sich somit als Vergleichswert eine äquivalente Gesamtdämpfung. Nach Wandlung in den Dezibel-Maßstab wird die Gesamtdämpfung im folgenden als L_{dB} notiert. Da im linearen Maßstab $L<1$ gilt, ist L_{dB} negativ (negativer Gewinn).

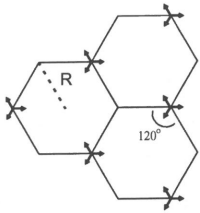
Durch die reine Betrachtung der Dämpfung sind die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse von der tatsächlichen Sendeleistung und den Antennengewinnen unabhängig. Bezüglich der gerichteten Feststationsantennen wurde nur berücksichtigt, daß zu ihnen erst eine Verbindung unterhalten werden kann, wenn die Mobilstation sich im Öffnungswinkel der Antenne befindet. Um aus den präsentierten Ergebnissen der Dämpfung die Empfangsleistung in dBm zu berechnen, reicht es unter diesen Voraussetzungen aus, die verwendete Sendeleistung in dBm und etwaige Antennengewinne in dB zu addieren.

Der Leistungsübertragungsfaktor g_0 in Gleichung (2-16) wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit zu eins gewählt. In der Wendepunkt-Gleichung (2-17) wird c_0 dann so gewählt, daß sich in der Distanzeinheit dieselbe Leistung ergibt wie beim allgemeinen Modell. Die Distanzeinheit d_0 wird generell auf 1 m festgesetzt.

Die betrachteten zellularen Architekturen folgen den in Kapitel 3.3.1 (Bild 3-3) vorgestellten Anordnungen 1 und 3. Bild 5-1 zeigt exemplarisch die Anordnung der Feststationen. Die linke Architektur ordnet die Feststationen in der Mitte gleichseitiger Sechsecke an. Sie tragen omnidirektionale Antennen (Bild 5-1 links). Die rechte Architektur setzt die Feststationen an jede zweite Ecke des symmetrischen Sechsecks und verwendet drei ideale 120-Grad-Richtantennen (Bild 5-1 rechts). Das simulierte zellulare Gebiet besteht aus mindestens 25 Zellen. Um Randeffekte auszuschließen, wird für die Statistiken nur die zentrale Zelle ausgewertet. Vergleichende Simulationen größerer Dienstgebiete liefern dieselben Ergebnisse und zeigen somit,



Architektur mit omnidirektionalen Antennen



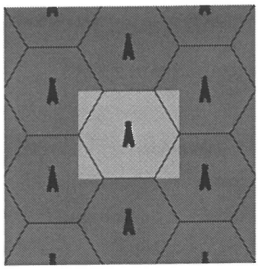
Architektur mit 120-Grad-Richtantennen

Bild 5-1: Die betrachteten zellularen Architekturen

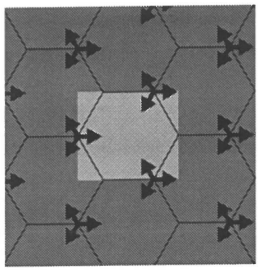
daß die Randeffekte erfolgreich eliminiert werden. In einem unendlich ausgedehnten Dienstgebiet gelten die folgenden Ergebnisse aus Symmetriegründen auch für alle anderen Zellen. Der Zellradius aller Zellen wird zu 800 m gewählt. Es wird angenommen, daß das Zugangsnetz so ausgelegt ist, daß Makrodiversität zwischen allen Feststationen im System möglich ist (siehe Kapitel 3.3.2).

5.1 Qualitative Betrachtung des Abdeckungsproblems

Zur Darstellung des Problems der Gebietsabdeckung zeigen die folgenden Bilder das Zentrum des Mobilfunksystems zu einem beliebigen, aber festen Zeitpunkt. Das hier beispielhaft betrachtete Gebiet ist das Rechteck, das die mittlere Zelle einschließt (in Bild 5-2 hell unterlegt).



Architektur mit omnidirektionalen Antennen



Architektur mit 120-Grad-Richtantennen

Bild 5-2: Beobachtungsgebiet im Zentrum des Mobilfunksystems (Ausschnitt)

Bei rein entfernungsabhängiger Dämpfung ohne Betrachtung der Abschattung nimmt die Dämpfung in konzentrischen Kreisen um die Feststation zu (in negativen Werten nimmt sie ab). Dies stellt Bild 5-3 durch Konturgrafiken der Dämpfung nach Gleichung (2-16) mit unterschiedlichen Grauwerten dar: je dunkler der Wert desto größer die Dämpfung (desto kleiner der negative Wert in dB). Die Zahlenangaben an den Achsen bezeichnen die Entfernung vom

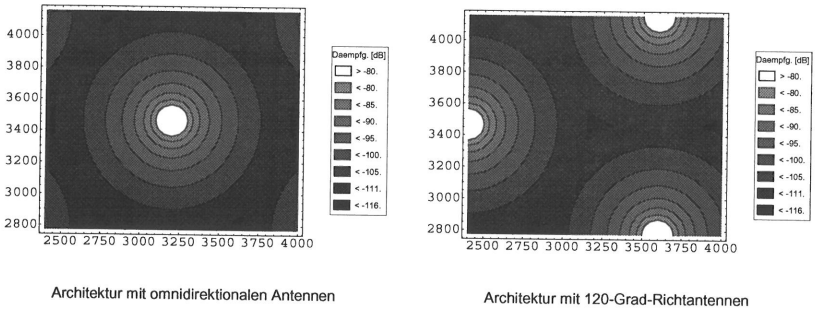


Bild 5-3: Entfernungsabhängige Dämpfung ohne Abschattung (Gl. (2-16) mit γ=4)

Ursprung des Koordinatensystems in Meter. In beiden Bildern ist die Dämpfung direkt an den Feststationen am geringsten (weißer Kreis). Bei der Architektur mit omnidirektionalen Antennen in der Zellmitte (links) ist die Dämpfung am Zellrand, bei der Architektur mit den 120-Grad-Antennen (rechts) ist die Dämpfung in der Zellmitte am größten. Allgemein gesagt ist die Dämpfung an den Punkten der Zelle am größten, die am weitesten von der nächsten Feststation entfernt liegen.

Wird nun zusätzlich die im realen System vorkommende Abschattung betrachtet, ergeben sich zu einem beliebigen, festen Zeitpunkt die Konturgrafiken nach Bild 5-4.

Der entfernungsabhängigen Dämpfung nach Gleichung (2-16) ist hier die log-normal verteilte Zufallsvariable der Abschattung nach Gleichung (2-15) mit σ=10 dB überlagert. Die Darstellung der Gesamtdämpfung als Konturgrafiken offenbart, wie zerklüftet die Abdeckung des Zellgebiets zu einem Zeitpunkt sein kann.

Wie vorher sind in diesen Bildern dunklere Flächen schlechter abgedeckt als hellere. Problemzonen der Abdeckung (dunkle Flächen) sind verstreut über das ganze Gebiet zu erkennen. In der Architektur mit omnidirektionalen Antennen sind sie verstärkt am Zellrand, in der Architektur mit den 120-Grad-Antennen verstärkt in der Zellmitte zu erkennen. Dies rührt wie bereits oben beobachtet vom entfernungsabhängigen Teil der Dämpfung her. Jetzt finden sich aber auch in vielen anderen Zonen der Zelle Gebiete, in denen die Dämpfung sehr groß ist. Dies ist eine anschauliche Darstellung des Phänomens der Abschattung.

In Bild 5-4 ist die Dämpfung für beide Architekturen nicht nur für den Fall ohne Makrodiversität aufgetragen, sondern auch für die Fälle der Auswahl-Makrodiversität beziehungsweise des Gleichwellenbetriebs mit 3 Feststationen (FS). Dabei wird das System immer zum genau gleichen Zeitpunkt beobachtet. Durch Vergleich der Bilder ist zu erkennen, daß sich viele dunkle Zonen im Fall ohne Makrodiversität durch Auswahl-Makrodiversität „aufhellen“ lassen. Eine

weitere Verbesserung ist durch das Anwenden des Gleichwellenbetriebs möglich. Dies ist gleichermaßen für beide Architekturen zu beobachten. So ist bereits anhand dieser Konturgrafiken erkennbar, daß Makrodiversität die Gebietsabdeckung erhöhen kann.

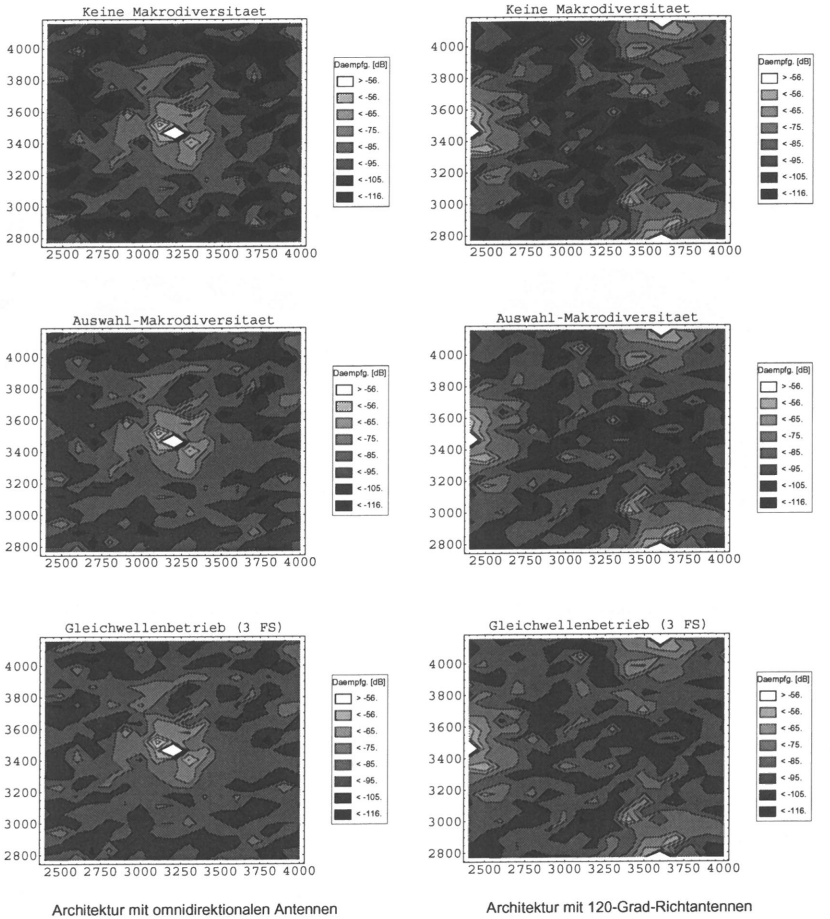


Bild 5-4: Momentaufnahme der Gesamtdämpfung beider zellularer Architekturen

5.2 Methode zur quantitativen Bestimmung der Abdeckungsunterschiede

Der qualitativen Betrachtung des Abdeckungsproblems im vorhergehenden Kapitel soll nun eine Methode zur quantitativen Feststellung der durch Makrodiversität erzielbaren Gewinne angeschlossen werden.

Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation werden die Ausbreitungsbedingungen im Dienstgebiet simuliert. Pro Zelle werden hierzu 96 äquidistante Punkte betrachtet (für die Aufteilung der Zelle in Punkte siehe Kapitel 4). Dabei werden unter Anwendung der unterschiedlichen Makrodiversitätsverfahren die Verteilungsfunktionen der Gesamtdämpfung über die Fläche der zentralen Zelle (in Bild 5-5 hell unterlegt) gebildet.

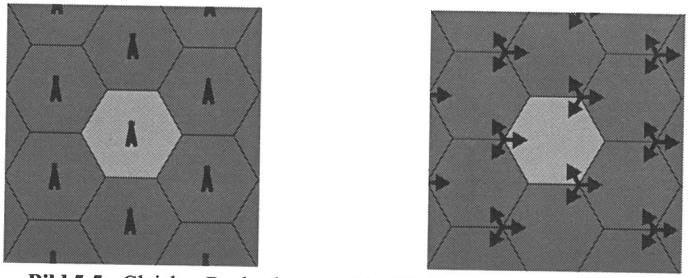


Bild 5-5: Gleiches Beobachtungsgebiet für die Verteilungsfunktionen

Die Verteilungsfunktionen geben die Wahrscheinlichkeit $P\{L_{dB} \leq x\}$ an, daß die Dämpfung betrachtet über der Zellfläche kleiner oder gleich einem bestimmten Wert ist. Die (statistische) Abdeckungswahrscheinlichkeit ergibt sich dann zu $1 - P\{L_{dB} \leq x\}$. Die Ausbreitungsbedingungen werden solange simuliert, bis die 95%-Vertrauensintervalle der Verteilungsfunktionen ausreichend klein sind.

Bild 5-6 zeigt die Verteilungsfunktionen der Dämpfung für das allgemeine Ausbreitungsmodell nach Gleichung (2-15) und (2-16) mit γ=4 und σ=10 dB.

Der Vergleich der Makrodiversitätsverfahren anhand der Verteilungsfunktionen kann entweder bei einer festen Dämpfung oder bei einer festen Abdeckungswahrscheinlichkeit erfolgen. Wird in Bild 5-6 beispielsweise -115 dB als maximal erlaubte Dämpfung festgelegt[1], so wird ohne Makrodiversität nur eine Abdeckung von 76,2% der Zellfläche erreicht. Unter Anwendung von Auswahl-Makrodiversität läßt sich dieser Wert auf 94,5% steigern. Mit Gleichwellenbetrieb läßt sich die Abdeckung durch Einsatz von 2 Feststationen (FS) auf 97,8%, durch 3 Fest-

1. Beispielhaft entspricht dies einer nötigen Empfangsleistung von -105 dBm bei Antennengewinnen von eins und einer festen Sendeleistung von 10 mW.

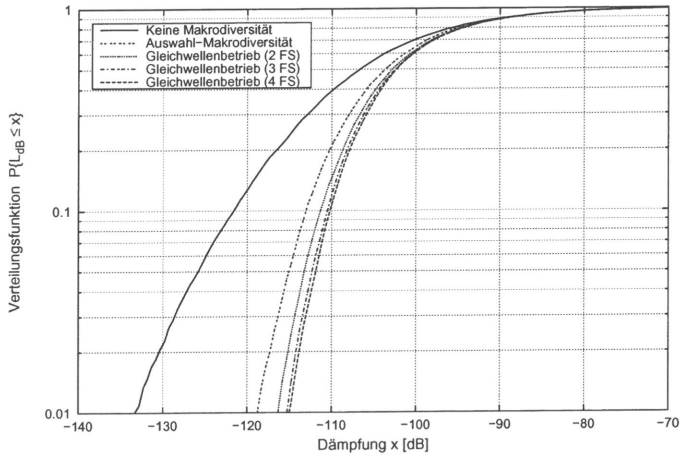


Bild 5-6: Verteilungsfunktionen der Dämpfung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=10 dB)

stationen auf 98,8% und durch 4 Feststationen auf 99% erhöhen. Durch Auswahl-Makrodiversität und Gleichwellenbetrieb ist also eine beträchtliche Erhöhung der Gebietsabdeckung einer Zelle möglich.

Werden die Verteilungsfunktionen bei einer vorgegebenen Abdeckungswahrscheinlichkeit verglichen, kann der Gewinn in Dezibel angegeben werden. Zum Beispiel läßt sich bei einer gewünschten Abdeckung der Zellfläche von im Mittel 90% mit Auswahl-Makrodiversität ein Gewinn von 8,54 dB und mit Gleichwellenbetrieb mit 2, 3 bzw. 4 Feststationen ein Gewinn von 10,25 dB, 11,18 dB bzw. 11,42 dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität erzielen. Die Absenkung der Gesamtdämpfung um diese Werte ist ein direkter Gewinn in der Empfangsleistung (siehe Gleichung (2-14)). Im makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystem läßt sich dieser Gewinn zum Beispiel durch eine bessere Empfangsqualität, eine geringere Feststationsdichte oder durch das Verwenden geringerer Sendeleistungen realisieren.

5.3 Abdeckungsgewinn durch Makrodiversität

Die in Bild 5-6 gezeigten Verteilungsfunktionen gelten sowohl für die Architektur mit omnidirektionalen Antennen in der Zellmitte als auch für die Architektur mit 120-Grad-Antennen am Zellrand. Bei der Betrachtung von Bild 5-5 wird deutlich, warum dies so ist: drei ideale 120-Grad-Antennen mit Antennengewinn eins im Öffnungswinkel (und null sonst) decken ein Gebiet ebenso ab wie eine ideale omnidirektionale Antenne. Aufgrund der hexagonalen Symmetrie ist die Gebietsabdeckung deswegen für die sechseckige Zellfläche in beiden Architektu-

ren gleich. Einen Vorteil einer der beiden Architekturen bei Einsatz der Makrodiversität zur Erhöhung der Gebietsabdeckung gibt es nicht. Alle folgenden Untersuchungsergebnisse gelten gleichermaßen für beide Architekturen.

5.3.1 Makrodiversitätsgewinn in Abhängigkeit von der Abdeckungswahrscheinlichkeit

Bei der Betrachtung von Bild 5-6 fällt auf, daß sich der relative Abdeckungsgewinn durch Makrodiversität mit der gewünschten Gebietsabdeckung ändert. Je nachdem bei welchem Wert der prozentualen Abdeckung der Gewinn abgelesen wird, ergeben sich andere Gewinne. Tabelle 5-1 und Bild 5-7 verdeutlichen diesen Zusammenhang. Sie stellen für verschiedene Werte der Gebietsabdeckung die Gewinne der Makrodiversitätsverfahren tabellarisch und graphisch dar.

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität	gemessen bei einer Abdeckung von						
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	99%
Auswahl-Makrodiversität	2,99	3,89	4,89	6,29	8,54	10,64	14,47
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	3,79	5,00	6,19	7,82	10,25	12,56	16,89
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	4,22	5,36	6,63	8,35	11,18	13,45	17,97
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	4,29	5,64	6,98	8,66	11,42	13,90	18,24

Tabelle 5-1: Gebietsabdeckungsgewinn in Abhängigkeit der abgedeckten Fläche

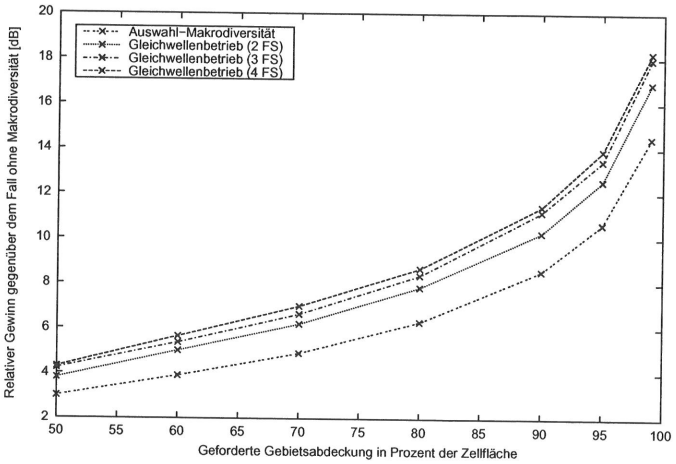


Bild 5-7: Gebietsabdeckungsgewinn in Abhängigkeit der abgedeckten Fläche

Je größer die geforderte Abdeckungswahrscheinlichkeit ist, desto höher ist auch der Gewinn der Makrodiversitätsverfahren. Dabei steigt der Gewinn für höhere gewünschte Abdeckungen stärker als für kleinere. Der Einsatz der Makrodiversität lohnt sich also umso mehr, je höher die Gebietsabdeckung im Mobilfunksystem sein soll.

5.3.2 Makrodiversitätsgewinn für das allgemeine Ausbreitungsmodell

Die untersuchten Makrodiversitätsverfahren erzielen die beobachteten Gebietsabdeckungsgewinne, indem sie das Empfangssignal (die Empfangssignale) der Feststation auswählen (der Feststationen kombinieren), zu der (denen) momentan die geringste Dämpfung herrscht. Deshalb wird auch gesagt, Makrodiversität „bekämpft" die Abschattung [17,97].

Es ist aus diesem Grund nicht verwunderlich, daß der erzielte Abdeckungsgewinn der Makrodiversität von den Parametern des Dämpfungsmodells abhängt. Für das allgemeine Modell nach Gleichungen (2-15) und (2-16) sind diese Parameter der Dämpfungskoeffizient γ der entfernungsabhängigen Dämpfung und die Standardabweichung σ der Abschattung.

Bild 5-8 zeigt die auf dieselbe Art und Weise wie in Kapitel 5.2 gewonnenen Verteilungsfunktionen der Gebietsabdeckung, jetzt jedoch mit γ=4.0, σ=4 dB.

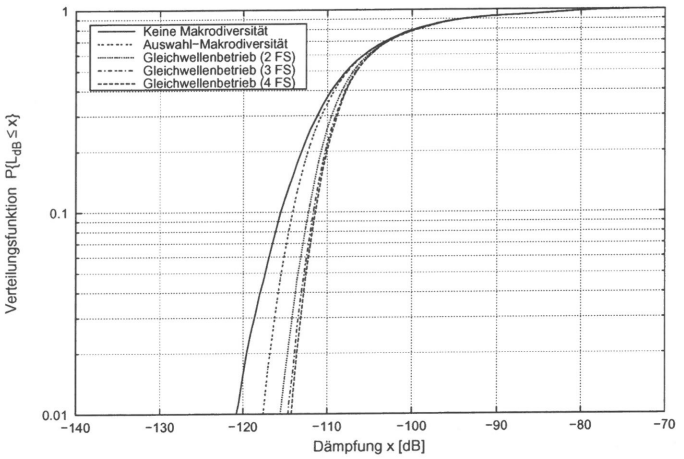


Bild 5-8: Verteilungsfunktionen der Dämpfung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=4 dB)

Es ist zu erkennen, daß die Kurven enger beieinander liegen als in Bild 5-6. Somit fällt der Gewinn der Makrodiversität bei jeder Gebietsabdeckung geringer aus. Tabelle 5-2 und Bild 5-9 verdeutlichen dies bei einer geforderten Gebietsabdeckung von 90%.

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	Standardabweichung σ der Abschattung in dB						
	2	4	6	8	10	12	14
Auswahl-Makrodiversität	0,19	1,42	3,02	5,53	8,54	12,36	16,52
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	2,42	3,29	4,82	7,16	10,25	14,01	17,94
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	2,84	3,82	5,40	8,00	11,18	14,92	19,01
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	2,98	4,09	5,83	8,24	11,42	15,13	19,18

Tabelle 5-2: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene σ (bei konstantem γ=4)

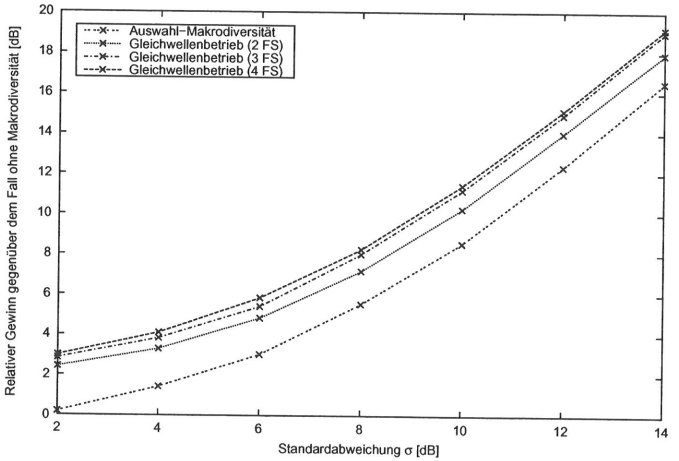


Bild 5-9: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene σ (bei konstantem γ=4.0)

Es läßt sich feststellen, daß der Abdeckungsgewinn durch Makrodiversität umso höher ausfällt, je höher σ ist. Je größer also das Problem der Abschattung ist, desto mehr lohnt sich der Einsatz von Makrodiversität zur Abdeckungserhöhung.

Tabelle 5-3 und Bild 5-10 zeigen die Veränderung des Abdeckungsgewinns mit dem Parameter γ.

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	Dämpfungskoeffizient γ						
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Auswahl-Makrodiversität	15,36	13,09	11,35	9,95	8,54	7,49	6,90
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	17,47	15,08	13,18	11,75	10,25	9,19	8,39
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	18,33	16,08	14,20	12,54	11,18	10,00	9,08
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	18,91	16,46	14,64	12,90	11,42	10,23	9,33

Tabelle 5-3: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene γ (bei konstantem σ=10 dB)

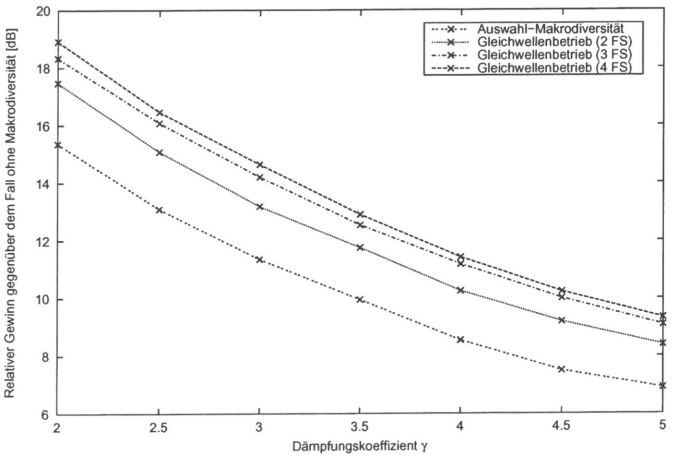


Bild 5-10: Gebietsabdeckungsgewinn für verschiedene γ (bei konstantem σ=10 dB)

Je höher der Dämpfungskoeffizient γ, je stärker also die entfernungsabhängige Dämpfung ist, desto geringer fällt der durch Makrodiversität zu erzielende Gewinn aus.

5.3.3 Makrodiversitätsgewinn für das Wendepunkt-Modell

In innerstädtischen Gebieten wird die entfernungsabhängige Dämpfung häufig auch durch das Wendepunkt-Modell beschrieben (Kapitel 2.2.2.5). Deshalb wird im folgenden der Makrodiversitätsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells nach Gleichung (2-17) mit überlagerter Abschattung nach Gleichung (2-15) untersucht.

Bild 5-11 zeigt die Verteilungsfunktionen der Gesamtdämpfung für einen Wendepunkt g von 50 m, den Dämpfungskoeffizienten α=β=2 und der Standardabweichung σ der Abschattung von 10 dB. Dies sind übliche, in der Praxis vorkommende Werte [129].

Im Vergleich zu den Verteilungsfunktionen mit dem allgemeinen Modell fällt auf, daß die Dämpfungswerte generell niedriger sind als in Bild 5-6. Dies liegt daran, daß bis zu einer Entfernung von g=50 m ein Dämpfungskoeffizient von α=2 vorherrscht und erst in größerer Entfernung der Koeffizient von $\alpha+\beta$=4 wirksam wird (siehe auch Diskussion des Wendepunkt-Modells in Kapitel 2.2.2.5). Gemittelt über die Zellfläche ist deshalb die Gesamtdämpfung niedriger.

Daraus wird auch schon deutlich, daß die Lage des Wendepunktes einen starken Einfluß auf die Ergebnisse des Abdeckungsgewinns der Makrodiversität beim Wendepunkt-Modell hat. Tabelle 5-4 stellt die Gewinne bei einer gewünschten Gebietsabdeckung von 90% in Abhängigkeit des Wendepunktes g dar.

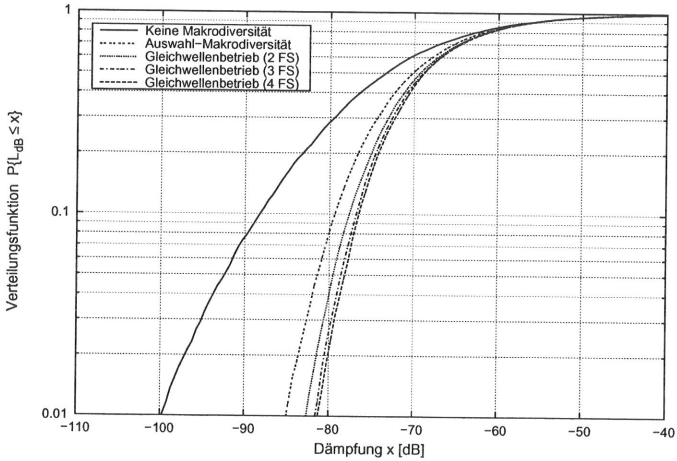


Bild 5-11: Gebietsabdeckung mit Wendepunkt-Modell (g=50 m, α=β=2, σ=10 dB)

Mit zunehmendem Wendepunkt nimmt auch der relative Gewinn aller Makrodiversitätsverfahren zu. Die anschauliche Begründung dieser Tatsache liegt wieder in der Wirkungsweise des Wendepunkt-Modells. Je weiter der Wendepunkt *g* von der Feststation entfernt ist, desto größer ist das Gebiet um die Feststation, in welchem der Dämpfungskoeffizient α anstatt des Gesamtkoeffizienten $\alpha+\beta$ wirkt. Je größer *g* ist, umso kleiner ist der Dämpfungskoeffizient im Zellmittel und folglich umso größer der Gewinn der Makrodiversität. Diese Beobachtung entspricht der Beobachtung in Kapitel 5.3.2: Je kleiner dort der Dämpfungskoeffizient γ ist, desto größer ist der Makrodiversitätsgewinn.

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	Wendepunkt g (in m)						
	50	100	150	200	300	400	500
Auswahl-Makrodiversität	8,81	9,00	9,19	9,43	9,78	10,07	10,40
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	10,50	10,71	11,02	11,17	11,56	11,86	12,20
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	11,34	11,6	11,78	12,01	12,40	12,71	13,11
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	11,65	11,89	12,22	12,46	12,78	13,10	13,42

Tabelle 5-4: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene *g* (bei konstantem α=2.0, β=2.0, σ=10 dB)

Mit derselben Anschauung läßt sich auch die Änderung des Makrodiversitätsgewinns bei Variation der Dämpfungskoeffizienten α und β erklären. Wird α erhöht, so fällt der relative Gewinn der Makrodiversität (Tabelle 5-5).

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	Basis-Dämpfungskoeffizient α				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Auswahl-Makrodiversität	11,68	10,05	8,81	7,87	7,04
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	13,46	11,88	10,50	9,44	8,51
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	14,50	12,83	11,34	10,13	9,20
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	14,90	13,20	11,65	10,51	9,39

Tabelle 5-5: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene α (bei konstantem β=2.0, g=50 m, σ=10 dB)

Es steigt wiederum im Zellmittel die Gesamtdämpfung und somit nimmt der Gewinn (wie oben schon beobachtet) ab.

Derselbe Effekt stellt sich ein, wenn β erhöht wird (Tabelle 5-6).

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	zusätzlicher Dämpfungskoeffizient β				
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Auswahl-Makrodiversität	11,56	10,05	8,81	7,87	7,12
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	13,38	11,79	10,50	9,44	8,59
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	14,42	12,70	11,34	10,16	9,33
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	14,71	13,10	11,65	10,45	9,49

Tabelle 5-6: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene β (bei konstantem α=2.0, g=50 m, σ=10 dB)

Auch hier sinkt der durch die Makrodiversität erzielbare Abdeckungsgewinn. Nach den Tabellen 5-5 und 5-6 ergeben sich sogar ungefähr die gleichen relativen Gewinne, unabhängig davon, ob α oder β verändert wird. Im Zellmittel ist der Einfluß der beiden Parameter auf die Gesamtdämpfung also gleich.

Als letzter Parameter wird noch die Standardabweichung σ der Abschattung variiert. Für 90% Gebietsabdeckung ergeben sich die Makrodiversitätsgewinne nach Tabelle 5-7.

Relativer Gewinn in dB gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität (gemessen bei 90% Gebietsabdeckung)	Standardabweichung σ der Abschattung in dB						
	2	4	6	8	10	12	14
Auswahl-Makrodiversität	0,18	1,42	3,12	5,56	8,81	12,61	16,85
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	2,22	3,29	4,96	7,34	10,50	14,17	18,40
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	2,86	3,91	5,60	8,12	11,34	15,10	19,31
Gleichwellenbetrieb mit 4 Feststationen	3,04	4,20	5,97	8,41	11,65	15,26	19,46

Tabelle 5-7: Gebietsabdeckungsgewinn bei Anwendung des Wendepunkt-Modells für verschiedene σ (bei konstantem α=2.0, β=2.0, g=50m)

Mit steigendem σ steigen auch die Gewinne aller Verfahren. Dies entspricht dem Verhalten, das auch bei Anwendung des allgemeinen Modells beobachtet wird. Dies ist verständlich, da dasselbe Abschattungsmodell verwendet wird. Interessant ist die Beobachtung, daß sich die Werte von Tabelle 5-7 und 5-2 stark gleichen. Daraus läßt sich schließen, daß bei kleinem Wendepunkt (hier g=50 m) im Vergleich zum Zellradius (hier R=800 m) und vergleichbaren Dämpfungskoeffizienten $\alpha + \beta \cong \gamma$ die Wahl des Ausbreitungsmodells keinen Einfluß auf den Gewinn der Makrodiversitätsverfahren hat.

Allgemeiner gesagt, bewirkt das Verändern der Parameter α, $\alpha+\beta$ oder g beim Wendepunkt-Modell eine Änderung der Dämpfung im Zellmittel. Dasselbe gilt beim allgemeinen Ausbreitungsmodell für eine Änderung von γ. Eine Veränderung des Dämpfungskoeffizienten im Zellmittel bewirkt bei beiden Modellen dasselbe. Steigt er, dann fällt der relative Gewinn der Makrodiversitätsverfahren und umgekehrt.

Die durch Makrodiversität zu erzielenden Abdeckungsgewinne sind nicht vom Ausbreitungsmodell an sich abhängig, sondern nur von den einzelnen Parametern. Mit Makrodiversität läßt sich ein Abdeckungsgewinn sowohl in ländlichem, vorstädtischem als auch in städtischem Gebiet erzielen.

Unabhängig vom Ausbreitungsmodell und sogar von den Ausbreitungsparametern läßt sich an allen gezeigten Ergebnissen eine weitere Beobachtung machen. Der relative Abdeckungsgewinn des Gleichwellenbetriebs erhöht sich beim Einsatz von immer mehr Feststationen nur noch unmerklich. Bereits die Kurven für vier Feststationen weichen nur geringfügig von denen für drei ab. Für noch mehr Feststationen sind die Gewinnzuwächse noch geringer. Der Einsatz von mehr als drei Feststationen im Gleichwellenbetrieb lohnt sich demnach aufgrund der geringen Gewinnzunahme kaum.

5.4 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb

Bei den bisherigen Betrachtungen in diesem Kapitel war die Sendeleistung P_t von allen Feststationen fest gewählt. Im Gleichwellenbetrieb mit n beteiligten Feststationen bedeutet dies, daß alle n Feststationen mit der Sendeleistung P_t senden. Dies erhöht das Interferenzniveau für andere Mobilstationen, die denselben Kanal wiederverwenden (siehe Kapitel 2.3.1)[2]. Ein Versuch, dies zu korrigieren, ist die umgekehrt proportionale Anpassung der Sendeleistung an die Anzahl der gleichzeitig sendenden Feststationen. Werden also n Stationen im Gleichwellenbetrieb benutzt, wird die Sendeleistung jeder Station auf P_t / n gesenkt.

2. Die genaue Erhöhung der Gleichkanalinterferenzleistung hängt von der Lage der sendenden Feststationen sowie der gestörten Mobilstation ab (siehe Kapitel 6).

Bild 5-12 zeigt die sich ergebenden Verteilungsfunktionen der unterschiedlichen Makrodiversitätsverfahren mit und ohne diese Leistungsanpassung im Überblick. Es wurden dasselbe Ausbreitungsmodell und dieselben Parameter gewählt wie in Bild 5-6.

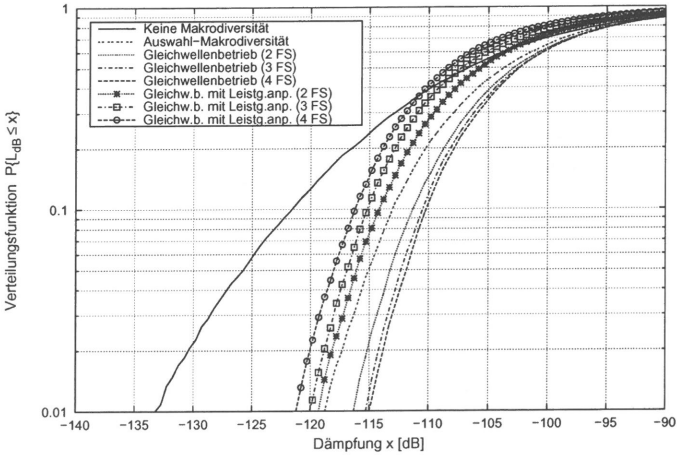


Bild 5-12: Verteilungsfunktionen der Dämpfung für Gleichwellenbetrieb mit Leistungsanpassung (allg. Ausbreitungsmodell: γ=4, σ=10 dB)

Es zeigt sich, daß die Leistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb zu einer schlechteren Gebietsabdeckung führt als bei Gleichwellenbetrieb ohne Leistungsanpassung. Die Gebietsabdeckung ist sogar geringer als bei Anwendung von Auswahl-Makrodiversität. Dies liegt daran, daß im Gleichwellenbetrieb der größte Anteil der Empfangsleistung von der Feststation kommt, zu der die geringste Dämpfung vorliegt (die „beste" Feststation). Dies ist die Feststation, die auch bei Auswahl-Makrodiversität gewählt wird. Der Anteil der anderen Feststationen an der Empfangsleistung ist gering, da die Dämpfung auf dem Weg von ihnen zur Mobilstation sehr viel größer ist. Damit reduziert das Vermindern der Sendeleistung an der bestempfangenen Feststation die gesamte Empfangsleistung stärker als dies durch die anderen Feststationen kompensiert werden kann. Die Gebietsabdeckung sinkt.

Unter dem Gesichtspunkt der Gebietsabdeckung ist jede Leistungsregelung unsinnig, die die Sendeleistung an der „besten" Feststation reduziert. Vielmehr sollte von ihr immer mit der maximal nötigen Leistung gesendet werden, da auf dem Weg von ihr zur Mobilstation die geringsten Verluste auftreten. Dies entspricht dem Grundprinzip der Auswahl-Makrodiversität.

Soll über den Gewinn der Auswahl-Makrodiversität ein höherer Gebietsabdeckungsgewinn erzielt werden, kann der Gleichwellenbetrieb eingesetzt werden. Die Ergebnisse in diesem Kapitel zeigen die erreichbaren Gewinne für den Fall auf, daß an allen beteiligten Feststatio-

nen die gleiche Sendeleistung angelegt wird wie an der „besten" Feststation. Werden diese Leistungen reduziert, vermindert sich entsprechend der relative Gewinn des Gleichwellenbetriebs gegenüber dem der Auswahl-Makrodiversität.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurde qualitativ und quantitativ der Einfluß verschiedener Makrodiversitätsverfahren auf die Gebietsabdeckung eines zellularen Mobilfunksystems untersucht. Allgemein läßt sich feststellen, daß die Anwendung von Makrodiversität große Abdeckungsgewinne realisieren kann.

Die durchgeführten Untersuchungen speziell zur Auswahl-Makrodiversität bestätigen die Ergebnisse von Bernhardt [17], daß die erzielbaren Abdeckungsgewinne abhängig von der gewünschten Abdeckungswahrscheinlichkeit und vom Grad der Abschattung sind. Je höher die gewünschte Gebietsabdeckung sein soll und je größer das Problem der Abschattung ist, desto mehr lohnt sich der Einsatz der Makrodiversität.

Ergänzende Erkenntnisse sind durch weitere Studien bezüglich der Auswahl-Makrodiversität und vor allem des Gleichwellenbetriebs mit unterschiedlicher Anzahl an Feststationen erbracht worden. Die zu erzielenden Gebietsabdeckungsgewinne hängen nicht davon ab, ob Makrodiversität in einer konventionellen oder in einer sektorisierten Architektur angewandt wird. Es ergeben sich für eine Architektur mit omnidirektionalen Antennen in der Zellmitte und für eine Architektur mit idealen 120-Grad-Richtantennen dieselben Gewinne.

Die Gewinne hängen prinzipiell nicht vom Ausbreitungsmodell ab. Es lassen sich hohe Makrodiversitätsgewinne sowohl für ein allgemeines Ausbreitungsmodell als auch für das Wendepunkt-Modell nachweisen. Über die hier gezeigten Abdeckungsgewinne für ein zellulares System mit regelmäßiger sechseckiger Anordnung der Feststationen hinaus, ergeben sich Gewinne in derselben Größenordnung auch für ein zellulares System nach dem Manhattan-Muster (siehe Kapitel 4.1). Detaillierte Untersuchungen hierzu sind in [9] aufgeführt.

Aus diesen Ergebnissen läßt sich schließen, daß Makrodiversität sowohl in ländlichem als auch in vorstädtischem und städtischem Gebiet eine interessante Technik zur Erhöhung der Gebietsabdeckung ist. Für alle Umgebungen zeigt sich jedoch, daß die quantitativen Gewinne der Makrodiversität stark von den Parametern des gewählten Ausbreitungsmodells abhängen. So ist der Gewinn am höchsten, wenn der Dämpfungskoeffizient niedrig und die Standardabweichung der Abschattung hoch ist.

In rauschbegrenzten Systemen erweist sich der Einsatz von Makrodiversität somit als lohnend, um die Empfangsleistung zu erhöhen und die Abschattungsproblematik zu mildern.

Generell erlaubt der Gleichwellenbetrieb, bei dem von mehreren Feststationen mit der gleichen Leistung gesendet wird, höhere Abdeckungsgewinne als die Auswahl-Makrodiversität. Der Einsatz von mehr als drei gleichzeitig sendenden Feststationen lohnt sich jedoch kaum, da der Gewinnzuwachs mit der Anzahl der Feststationen sinkt. Den höchsten Anteil an der Empfangsleistung trägt immer die Feststation bei, zu der die geringste Dämpfung herrscht. Dies ist dieselbe Station, die bei Auswahl-Makrodiversität gewählt wird.

Im Gleichwellenbetrieb senden die beteiligten Feststationen auf dem Nutzkanal insgesamt mit höherer Leistung als bei Auswahl-Makrodiversität. Bei Wiederverwendung desselben Kanals durch andere Mobilstationen kann dies zu erhöhter Gleichkanal-Interferenz führen. Dies könnte durch eine Anpassung der Sendeleistung an den beteiligten Feststationen mit Hilfe einer Leistungsregelung verhindert werden. Jedoch führt jede Sendeleistungsregelung, die zur Verminderung der Gesamtsendeleistung die Leistung der „besten" Feststation vermindert, zu einer schlechteren Gebietsabdeckung als bei Auswahl-Makrodiversität. Somit ist eine Leistungsregelung unter diesem Gesichtspunkt wenig sinnvoll.

Inwieweit sich die Anwendung des Gleichwellenbetriebs mit festen Sendeleistungen auf das Interferenzniveau und damit auf die Verbindungsqualität und Systemkapazität auswirkt, wird im nächsten Kapitel untersucht.

Kapitel 6

Systemkapazität und Verbindungsqualität in einem makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystem mit dynamischem Ressourcenmanagement

In diesem Kapitel wird der Einfluß der Makrodiversität auf die Systemkapazität und Verbindungsqualität eines interferenzbegrenzten Mobilfunksystems untersucht. Mit Hilfe von Systemsimulationen werden die in Kapitel 3 vorgestellten Makrodiversitätsverfahren untereinander verglichen. Dabei wird der Frage nachgegangen, mit welchem Verfahren die Systemkapazität und Verbindungsqualität im zellularen Mobilfunk am besten gesteigert werden können.

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf die Abwärtsstrecke des Mobilfunksystems, also auf den Übertragungsweg von den Feststationen zu den Mobilstationen. Die angewandte Methodik läßt sich jedoch auch für die Aufwärtsstrecke einsetzen.

Die Abwärtsstrecke ist die „schwächere" Richtung im makrodiversitätsfähigen Mobilfunksystem und bestimmt damit dessen Gesamtleistung [38,53,168,170]. Auf der Aufwärtsstrecke läßt sich der Gewinn der Makrodiversität durch eine entsprechende Ausrüstung des Zugangsnetzes erzielen (Kapitel 3.3.2). Auf der Luftschnittstelle müssen keine Änderungen erbracht werden oder Einschränkungen in Kauf genommen werden, da eine Mobilstation ihre Signale in alle Richtungen abstrahlt. Durch die Möglichkeit, diese Signale an mehreren Feststationen aufzufangen und leistungsstarke Kombinationsalgorithmen im *Radio Network Controller* zu verwenden, lassen sich hohe Gewinne erzielen, ohne andere Verbindungen zu beeinflussen (siehe Kapitel 3.3.3).

Auf der Abwärtsstrecke sind die Vor- und Nachteile der Makrodiversität, vor allem beim Gleichwellenbetrieb, nicht ohne detaillierte Untersuchungen anzugeben. Da im Gleichwellenbetrieb auf demselben Kanal von mehreren Feststationen gesendet wird, nimmt zwar die Empfangsleistung an der Mobilstation zu (siehe Kapitel 5), jedoch steigt auch gleichzeitig die

mögliche Interferenz für andere Verbindungen [164]. Welche Auswirkungen dies in einem interferenzbegrenzten System auf den Wiederverwendungsabstand der Ressourcen und damit auf die Systemkapazität hat und wie die Verbindungsqualität beeinflußt wird, wird im folgenden untersucht.

6.1 Parameter zur Leistungsbewertung

Die Systemkapazität wird, wie in Kapitel 2.3.4.4 beschrieben, als Verkehrswert (*carried load*) bestimmt. Die Kapazität wird in der Einheit „Erlang" (abgekürzt: Erl.) bezogen auf eine Mobilfunkzelle angegeben. Alle Mobilfunkteilnehmer erzeugen je eine Verbindung, deren Dauer negativ-exponentiell verteilt ist, mit einem Mittelwert von 100 s. Der Ankunftsprozeß ist ein Poisson-Prozeß mit einer Ankunftsrate in Abhängigkeit des angebotenen Verkehrs (Gleichung (4-10)). Eine Verbindung, der keine Ressource zur Verfügung gestellt werden kann, wird blockiert. Wiederholversuche blockierter Teilnehmer werden nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 4.3).

Zur Beschreibung des Dienstgebietes des Mobilfunksystems werden die Zellen als Hexagone nach Kapitel 4.1 modelliert. Es wird ein System mit 56 hexagonalen Zellen untersucht. Die Anzahl der Ressourcen im gesamten System ist 16. Eine höhere Ressourcenzahl führt zu geringeren Blockierwahrscheinlichkeiten für alle untersuchten Verfahren. Die relativen Unterschiede der Verfahren bleiben davon unberührt. Um Randeffekte zu vermeiden, werden alle Statistiken nur im Zentrum des Dienstgebietes gemessen. Es werden mindestens drei Ringe von Störern berücksichtigt. Eine höhere Anzahl von umgebenden Störzellen bewirkt keine Veränderung der Ergebnisse. Die Interferenz von weiter entfernt liegenden Störern ist so klein, daß sie vernachlässigt werden kann (siehe auch [173]).

Die Sendeleistung der Feststationen ist, mit Ausnahme der Algorithmen mit Leistungsanpassung, konstant und für alle Stationen gleich. Eine Sendeleistungsregelung, die sich an die Ausbreitungsverhältnisse anpaßt, wird nicht betrachtet. Die Untersuchungen beziehen sich einzig auf einen Vergleich der verschiedenen Makrodiversitätstechniken. Als Ausbreitungsmodell wird das allgemeine Modell nach Gleichung (2-15) und (2-16) mit γ=4 und σ=10 dB verwendet.

Die Verbindungsannahmesteuerung und der Kanalvergabealgorithmus sowie die zeitliche und räumliche Verkehrserzeugung folgen der in Kapitel 4 beschriebenen Modellierung. Der DCA-Algorithmus versucht durch enge Wiederverwendung der Ressourcen eine hohe Systemkapazität zu erzielen und gleichzeitig eine Mindestqualität für jede Verbindung zu garantieren (Kapitel 4.5). Die Schwellwerte, die alle neu hinzukommenden und bereits aktiven Verbindungen einhalten müssen, sind zu $P_{r,min}$=-105 dBm und CIR_{min}=9 dB gewählt. Die Minimierung

des Wiederverwendungsabstands der Ressourcen führt zu einem interferenzbegrenzten System (Kapitel 2.3.3). Einen Vergleich der resultierenden Kapazität des DCA-Systems mit der eines konventionellen FCA-Systems gibt Anhang C.

Die Qualität einer Verbindung wird mit Hilfe des Signal-Interferenz-Verhältnisses CIR bewertet. Je besser das CIR ist, desto besser ist die Qualität der Verbindung. Da sich das CIR einer Verbindung während ihres Bestehens durch die Aktivierung und Deaktivierung anderer Sender, die mit derselben Ressource andere Teilnehmer bedienen, ändern kann, wird zur Qualitätsmessung jeder CIR-Wert mit der Dauer seines Anliegens gewichtet. Zur Bestimmung der Gesamtqualität im System werden alle so gewichteten CIR-Werte der relevanten Verbindungen in eine Verteilungsstatistik eingetragen. Die resultierende Verteilungsfunktion $P\{CIR \leq cir\}$ gibt die gewichteten CIR-Werte aller aktiven Verbindungen im System an und ist somit ein Maß für die systemweite Verbindungsqualität.

6.2 Systemkapazität im statischen System

In diesem Kapitel wird die Kapazität des statischen Systems betrachtet. Die Mobilstationen werden zu Beginn des Verbindungswunsches gleichmäßig im Dienstgebiet verteilt (siehe Kapitel 4.3). Jede Station fordert genau eine Ressource zur Abwicklung ihrer Verbindung an. Die Stationen bewegen sich nicht. Nach Verbindungsannahme bleiben sie bis zur Beendigung der Verbindung auf ihrer einmal eingenommenen Position.

6.2.1 Architektur mit omnidirektionalen Antennen

Für die zellulare Architektur mit omnidirektionalen Antennen an den Feststationen, die jeweils in der Mitte einer hexagonalen Zelle plaziert sind, vergleicht Bild 6-1 die Blockierwahrscheinlichkeit für die in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren: **keine Makrodiversität**, **Auswahl-Makrodiversität** und **Gleichwellenbetrieb** mit zwei beziehungsweise drei aktiven Feststationen.[1]

Die niedrigste Blockierwahrscheinlichkeit in Bild 6-1 erzielt für jedes Verkehrsangebot das Verfahren der Auswahl-Makrodiversität. Die höchste Blockierwahrscheinlichkeit stellt sich bei Gleichwellenbetrieb mit drei Feststationen ein. Im Gleichwellenbetrieb mit zwei Feststationen ergibt sich für niederes bis mittleres Angebot eine geringere Blockierwahrscheinlichkeit

1. Die Fehlerbalken an den Kurven, die durch Simulation gewonnen wurden, geben hier, wie in allen Schaubildern dieses Kapitels, das 95%-Vertrauensintervall an.

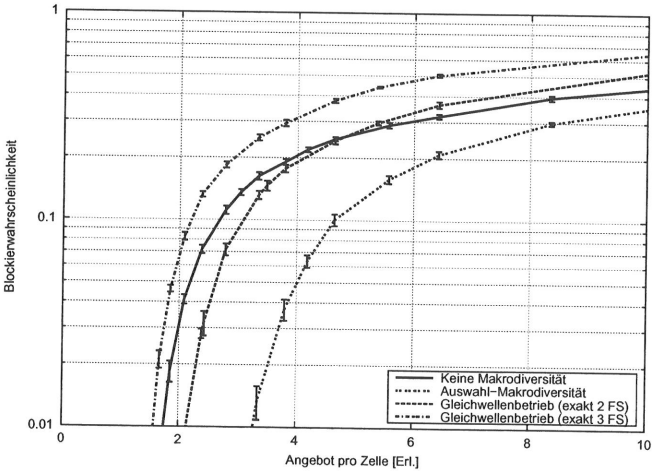


Bild 6-1: Blockierwahrscheinlichkeit im System mit omnidirektionalen Antennen

als ohne Anwendung von Makrodiversität. Für ein hohes Angebot jedoch ergibt sich eine etwas höhere Blockierwahrscheinlichkeit. Generell ist die Blockierwahrscheinlichkeit niedriger als beim Einsatz von drei Feststationen und höher als bei Auswahl-Makrodiversität.

Wird die Systemkapazität der Makrodiversitätsverfahren für einen festen Arbeitspunkt von 3% Blockierwahrscheinlichkeit verglichen, ergibt sich ein Angebot von 1,77 Erl. für den Gleichwellenbetrieb mit drei Feststationen, 2,00 Erl. für den Fall ohne Makrodiversität, 2,40 Erl. für den Gleichwellenbetrieb mit zwei Feststationen und 3,72 Erl. für die Auswahl-Makrodiversität. Die entsprechenden Verkehrswerte ergeben sich zu 1,72 Erl., 1,94 Erl., 2,33 Erl. und 3,61 Erl. . Im Vergleich mit dem Fall ohne Makrodiversität errechnet sich somit ein Kapazitätsgewinn von 86% für den Fall der Auswahl-Makrodiversität und ein Verlust von 11% für den Gleichwellenbetrieb mit drei Feststationen. Am selben Arbeitspunkt gewinnt der Gleichwellenbetrieb mit zwei Feststationen 20% gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität, verliert aber 35% gegenüber der Auswahl-Makrodiversität (Tabelle 6-1).

Blockierwahrscheinlichkeit=3%	Angebot A_x [Erl.]	Verkehrswert Y_x [Erl.]	Gewinn G_1 gegen Fall a) $G_1=(Y_x-Y_a)/Y_a$	Gewinn G_2 gegen Fall b) $G_2=(Y_x-Y_b)/Y_b$
a) Keine Makrodiversität	2,00	1,94	0	-46%
b) Auswahl-Makrodiversität	3,72	3,61	86%	0
c) Gleichwellenbetrieb mit 2 FS	2,40	2,33	20%	-35%
d) Gleichwellenbetrieb mit 3 FS	1,77	1,72	-11%	-52%

Tabelle 6-1: Verkehrswerte bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (System mit omnidir. Ant.)

Zur Maximierung der Systemkapazität ist die Auswahl-Makrodiversität anzuwenden. Sie wählt immer die Feststation, die momentan mit der höchsten Leistung empfangen wird, um für sich selbst ein möglichst hohes Signal-Interferenz-Verhältnis CIR zu erzielen. Da nur eine Feststation aktiv ist, wird die Interferenz für andere Mobilstationen auf das Nötigste beschränkt.

Im Gleichwellenbetrieb dagegen wird zwar die Empfangsleistung $P_r=C$ durch das Aufsummieren der Leistungen von mehreren Feststationen maximiert, jedoch wird auch durch das mehrfache Abstrahlen des Signals die Interferenz I für alle anderen aktiven Mobilstationen größer. Dies verschlechtert die CIR-Werte so, daß viele Verbindungen die vorgegebene Schranke CIR_{min} nicht mehr erfüllen können und deshalb blockiert werden.[2]

Im Fall ohne Anwendung von Makrodiversität ist die für andere aktive Stationen erzeugte Interferenz gleich groß wie im Fall der Auswahl-Makrodiversität. Im Gegensatz zu letzterer kann jedoch die Empfangsleistung nicht optimiert werden, da die Verbindung immer über die nächstliegende Feststation geführt wird. Je nach den Abschattungsverhältnissen kann dies zu einer sehr geringen Empfangsleistung führen. Sollte sie zu niedrig sein, kann die Verbindung aufgrund des zu niedrigen CIR-Wertes nicht zustande kommen.

Bei starker Abschattung an einem Ort der Zelle kann es ohne Anwendung von Makrodiversität dazu kommen, daß die Bedingung der minimalen Empfangsleistung ($P_r \geq P_{r,\,min}$, siehe Kapitel 4.5) nicht mehr erfüllt wird. Sollte dann die Summe der Empfangsleistungen mehrerer Feststationen den Schwellwert der benötigten Empfangsleistung überschreiten, nicht jedoch die Leistung, die von einer einzelnen Feststation empfangen werden kann, ist die Blockierwahrscheinlichkeit des Gleichwellenbetriebs natürlich geringer als bei Auswahl-Makrodiversität oder im Fall ohne Makrodiversität. Dieser Gewinn ist aber genau der Gewinn, der von der besseren Gebietsabdeckung herrührt. Er ist bereits in Kapitel 5 ausführlich besprochen worden.

In diesem Kapitel wurde deshalb der Fall der Blockierung aufgrund von ungenügender Empfangsleistung durch die geeignete Wahl der Sendeleistung vermieden, da ein rein interferenzbegrenztes System untersucht werden soll. Neue Verbindungswünsche werden nur blokkiert, wenn sie selbst eine zu hohe Interferenz erfahren oder wenn sie andere Verbindungen zu stark stören würden.

6.2.1.1 Strategien zur Ressourcenevaluierung

Um einem Verbindungswunsch eines neu hinzukommenden Mobilfunkteilnehmers zu entsprechen, hat der hier eingesetzte DCA-Algorithmus mit Makrodiversität prinzipiell die Wahl unter allen Feststationen und allen Ressourcen im System. Diese freie Wahl wird bezüglich der Fest-

2. Die mittlere Empfangleistung wird in dieser Arbeit durchgängig mit P_r bezeichnet. Bei Betrachtung des Wertes $CIR=C/I$ ist C eben diese mittlere Empfangleistung (s. Kapitel 2), also $CIR=C/I=P_r/I$.

stationen durch die zu realisierende minimale Empfangsleistung $P_{r,min}$ und bezüglich der Ressourcen durch die zu garantierende minimale Qualität eingeschränkt. Für eine ausreichende Qualität muß der Wert CIR_{min} sowohl für die neue Verbindung als auch für alle bereits aktiven Verbindungen eingehalten werden (siehe Kapitel 4.5). Weiterhin muß der Ressourcenzuteilungsalgorithmus beachten, daß jede Ressource nur einmal an einer Feststation verwendet werden kann, da nur eine Sende- und Empfangseinrichtung pro Ressource zur Verfügung steht. Bleibt nach diesen Einschränkungen beim Verbindungsaufbau noch eine Wahl zwischen mehreren Ressourcen und mehreren potentiellen Feststationen übrig, kann durch einen Evaluierungsalgorithmus die bestmögliche Ressource, die der neuen Verbindung zugeteilt wird, bestimmt werden.

Als mögliche Evaluierungsparameter können die Empfangsleistung P_r, das Signal-Interferenz-Verhältnis *CIR* oder die Summe aus der Nutz- und Interferenzleistung (*C+I*) herangezogen werden. Weitere Parameter wie zum Beispiel die Bitfehlerrate sind ebenfalls denkbar, werden in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde sowohl bei Auswahl-Makrodiversität als auch im Gleichwellenbetrieb immer die Ressource und die Konstellation von Feststationen gewählt, die die höchste Empfangsleistung P_r an der Mobilstation realisieren kann. Hierzu muß die Mobilstation in der Lage sein, P_r möglichst genau zu messen. Dazu muß sie bei der Messung zwischen Nutz- und Empfangsleistung unterscheiden können. Eine andere Möglichkeit ist es, die Summe der Nutz- und Interferenzleistung (*C+I*) des empfangenen Signals zu messen. Hierzu müssen Nutz- und Interferenzleistung nicht getrennt werden [94].

Als weitere Möglichkeit ist es denkbar, das Signal-Interferenz-Verhältnis CIR zu messen. Dies ist in der Praxis ein aufwendiges Verfahren. Einfache Verfahren liefern häufig ungenaue Meßwerte [24]. In [8] wird jedoch ein Verfahren vorgeschlagen, das es beispielsweise im GSM-System ermöglicht, das CIR bis auf 2 dB genau innerhalb von 4,6 ms (innerhalb eines TDMA-Rahmens) und bis auf 0,3 dB genau innerhalb von 60 ms zu messen. Verweise auf weitere vielversprechende Verfahren zur genauen Messung des CIR finden sich ebenfalls in [8].

Basierend auf der Messung der drei möglichen Parameter P_r, (*C+I*) und *CIR* stellt Bild 6-2 einen Vergleich der Blockierwahrscheinlichkeit im System mit Auswahl-Makrodiversität dar. Bei der Ressourcenzuweisung und der Wahl der Feststation wird entweder die Empfangsleistung P_r, das *CIR* oder die Summe (*C+I*) maximiert.

Die geringste Blockierwahrscheinlichkeit ergibt sich, wenn die Ressource und die Feststation bevorzugt werden, die die Empfangsleistung an der Mobilstation maximieren. Danach folgt das Verfahren zur Maximierung der Summe (*C+I*). Die höchste Blockierwahrscheinlichkeit ergibt sich, wenn bei jeder Ressourcenzuteilung ein maximales Signal-Interferenz-Verhältnis für die betreffende Mobilstation angestrebt wird.

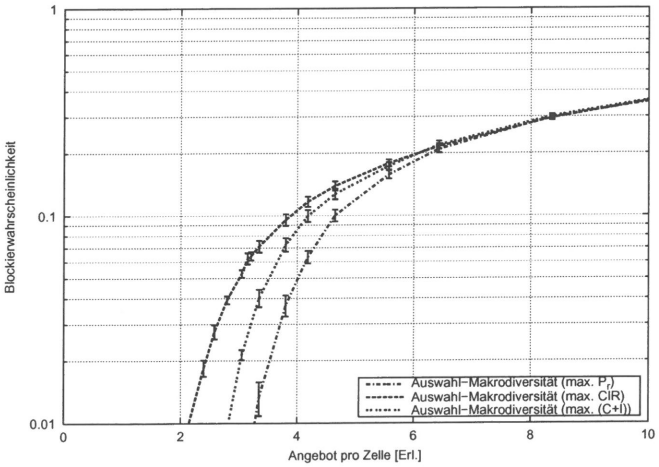


Bild 6-2: Ressourcenevaluierung bei Auswahl-Makrodiversität

Die Maximierung des CIR für jede neu hinzukommende Mobilstation ist bezüglich der Systemkapazität also nicht empfehlenswert. Ein hoher CIR-Wert kann sich nämlich außer durch eine hohe Empfangsleistung P_r=C auch durch ein niedriges I ergeben. Das Bevorzugen einer Ressource, die gering durch Interferenz belastet ist, führt jedoch nicht zu einer engen Wiederverwendung aller Ressourcen im System. Dadurch erzielt die Strategie zur Maximierung des CIR der einzelnen Verbindung eine geringe Systemkapazität.

Bei der Strategie zur Maximierung des Wertes (C+I) einer neuen Verbindung kann eine Ressource mit großem C, großem I oder beidem groß gewählt werden. Es ist unwahrscheinlicher als im Fall der Maximierung des CIR, daß eine Ressource mit sehr kleinem I gewählt wird. Deshalb schneidet diese Strategie besser ab als die zur Maximierung des CIR.

Bei der Strategie zu Maximierung von P_r ist die momentane Interferenz kein Evaluierungskriterium. Es wird nur nach dem Wert von P_r entschieden. Dadurch wird mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Feststation in der Nähe der Mobilstation gewählt. Die erzeugte Interferenz ist deshalb auch in dieser Nähe am größten. Dasselbe gilt für die nächste Mobilstation, die dieselbe Ressource wiederverwendet. Dies führt im Mittel zu einer engeren Wiederverwendung aller Ressourcen und zu einer höheren Systemkapazität als im Fall der Maximierung von (C+I).

Für den Gleichwellenbetrieb vergleicht Bild 6-3 die Blockierwahrscheinlichkeiten bei Einsatz der drei verschiedenen Ressourcenevaluierungsverfahren.

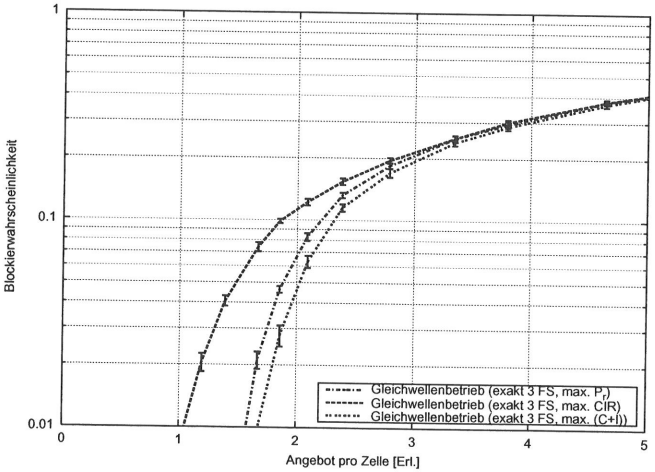


Bild 6-3: Ressourcenevaluierung im Gleichwellenbetrieb

Wie bei der Auswahl-Makrodiversität ergibt sich die höchste Blockierwahrscheinlichkeit, und damit die niedrigste Systemkapazität, für die Strategie zur Maximierung des CIR. Die höchste Systemkapazität erzielt jedoch, im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Auswahl-Makrodiversität, die Strategie zur Maximierung der Summe (*C+I*). Im Gleichwellenbetrieb sind bei Maximierung von P_r an jeder Verbindung zusätzlich zu der Feststation, die mit der höchsten Leistung empfangen wird, die beiden Feststationen beteiligt, die mit zweit- und dritthöchster Leistung empfangen werden. Dies können je nach Abschattungsverhältnissen auch von der Mobilstation weit entfernte Feststationen sein. Es wird dann in diesen entfernten Regionen ebenfalls Interferenz erzeugt, was zu einer Vergrößerung des Wiederverwendungsabstandes der Ressourcen führt. Wird hingegen die Summe (*C+I*) maximiert, stellt sich ein ausgewogeneres räumliches Verhältnis zwischen maximierter Empfangsleistung und Interferenz ein, so daß eine bessere räumliche Ausnutzung der Ressourcen erzielt wird. Dies kommt der Systemkapazität zu Gute.

6.2.1.2 Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen

Um die Vorteile des Gleichwellenbetriebs bezüglich der Erhöhung der Gebietsabdeckung (siehe Kapitel 5) zu ermöglichen, jedoch aufgrund der Interferenzbedingung nicht zu viele Verbindungswünsche zu blockieren, wird eine neue Strategie untersucht. Sie versucht die Anzahl der am Gleichwellenbetrieb beteiligten Feststationen (die Anzahl der Makrodiversitätszweige) bis zu einer festen Höchstgrenze M zu maximieren. Sie lehnt jedoch eine Verbindung nicht ab, wenn die Benutzung von M Makrodiversitätszweigen bei der momentanen Interferenzlage nicht möglich ist. Sie versucht stattdessen, der Verbindung weniger als M

Zweige zuzuteilen, also zuerst M-1, dann M-2, dann M-3 usw. . Sollte selbst ein Zweig nicht zugeteilt werden können, wird der Verbindungswunsch blockiert. Das Ziel der Strategie ist also die Maximierung der Makrodiversitätszweige, wobei ein bis M Zweige erlaubt sind.

Bild 6-4 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit bei Anwendung dieser Strategie für maximal drei Makrodiversitätszweige (M=3) im Vergleich zu den bereits vorgestellten Makrodiversitätsverfahren.

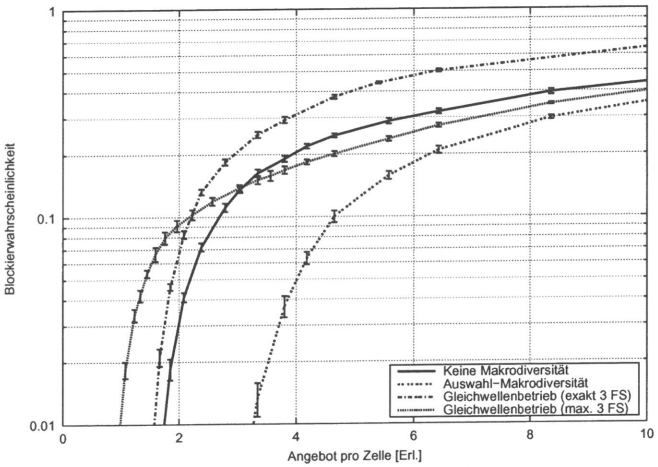


Bild 6-4: Gleichwellenbetrieb mit maximal drei Feststationen

Für ein hohes Verkehrsangebot erzielt die Strategie eine geringere Blockierwahrscheinlichkeit als der Gleichwellenbetrieb mit exakt drei Zweigen. Viele Verbindungswünsche, die beim Gleichwellenbetrieb mit exakt drei Zweigen abgelehnt werden müssen, können bei dieser Strategie noch angenommen werden; allerdings mit der Einschränkung, daß sie nur zwei oder einen Zweig benutzen können. Dies senkt die Blockierwahrscheinlichkeit.

Für ein steigendes Angebot und damit für eine steigende Verkehrslast nähert sich die Blockierwahrscheinlichkeit dieser Strategie asymptotisch der der Auswahl-Makrodiversität an. Bei hoher Last ist die Wahrscheinlichkeit, mehr als einen Zweig benutzen zu können ohne andere Verbindungen zu stören, gering. Deshalb wird in den meisten Fällen wie bei der Auswahl-Makrodiversität nur ein Makrodiversitätszweig benutzt.

Für ein geringes Angebot ist die Blockierwahrscheinlichkeit im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen höher als im Gleichwellenbetriebs mit exakt drei Feststationen. Dies ist durch die Wahl des Algorithmus zur Ressourcenzuteilung begründet.

Während im Gleichwellenbetrieb mit exakt M Zweigen alle verfügbaren Ressourcen nach der Summe der Empfangsleistungen evaluiert werden (Kapitel 6.2.1.1), wird im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen zufällig eine Ressource und eine Kombination von Feststationen ausgewählt, an der M, M-1, ..., 1 Verbindung möglich ist. Eine explizite Ressourcenevaluierung wie in Kapitel 6.2.1.1 findet nicht statt.

Die zufällige Wahl der Ressource und der beteiligten Feststationen aus der Menge der möglichen Kombinationen führt zu nicht optimalen CIR-Verhältnissen. Sobald eine Mehrzahl der Verbindungen im System über mehr als einen Zweig geführt wird (was bei niedrigem Angebot der Fall ist), schneidet diese Strategie schlechter ab als der Gleichwellenbetrieb mit exakt M Feststationen und Maximierung der Empfangsleistung P_r.

Bild 6-5 vergleicht diese Strategie mit der des Gleichwellenbetriebs mit exakt drei Feststationen bei Anwendung der Ressourcenevaluierung zur Maximierung des CIR.

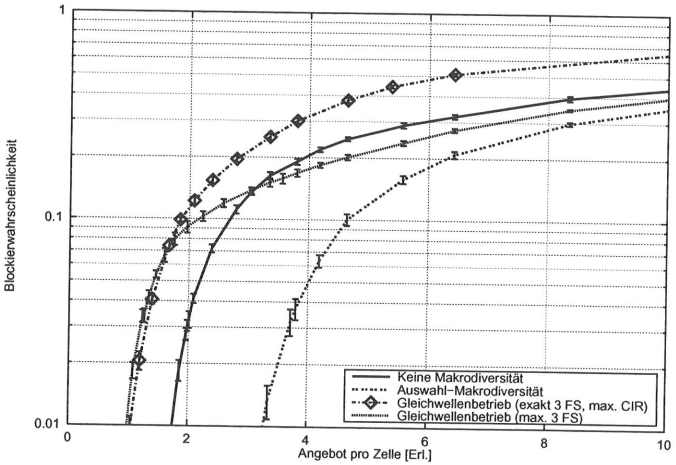


Bild 6-5: Gleichwellenbetrieb mit variabler und fester Anzahl an Feststationen

Dies war in Kapitel 6.2.1.1 die schlechteste Evaluierungsstrategie. Nun ist die Blockierwahrscheinlichkeit nur noch etwas geringer als bei der zufälligen Wahl der Ressourcen. Würde im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl beteiligter Feststationen dieselbe Ressourcenevaluierung angewandt, könnte die Blockierwahrscheinlichkeit bei geringem Angebot auf das Niveau des Gleichwellenbetriebs mit exakt M Feststationen gesenkt werden. Für ein hohes Angebot bleibt die Annäherung an den Fall der Auswahl-Makrodiversität erhalten.

Der Grund, warum beim Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen auf die Evaluierung der Ressourcen verzichtet wird, liegt in der notwendigen Komplexität eines solchen Evaluierungsalgorithmus. Da der Algorithmus zu Beginn des Verbindungsauf-

baus die Anzahl der verwendbaren Zweige nicht kennen kann, müssen sehr viele Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Die Ressourcenevaluierung würde bei jedem Verbindungsaufbau sehr viel Rechenzeit benötigen. Bereits in der Simulation dieses Verfahrens ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Rechenzeit. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt unwahrscheinlich, daß die nötige Rechenleistung, die die Ressourcenevaluierung in Echtzeit vornehmen kann, in einem Mobilfunksystem zur Verfügung gestellt werden kann. Kostengründe sprechen dagegen. Durch den Verzicht auf die Ressourcenevaluierung wird die Auswahl der Ressource und der beteiligten Feststationen stark beschleunigt. Bei niedrigem Angebot leidet darunter die Systemkapazität. Mit hohem Aufwand ließe sich jedoch dieselbe Leistung wie beim Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an beteiligten Feststationen erreichen.

Bild 6-6 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeiten für den Fall, daß maximal zwei Makrodiversitätszweige erlaubt sind. Die Kurven verhalten sich analog zu dem Fall für maximal drei Zweige. Generell ist die Blockierwahrscheinlichkeit bei zwei beteiligten Feststationen niedriger als bei drei beteiligten Stationen. Dies entspricht den Ergebnissen in Bild 6-1.

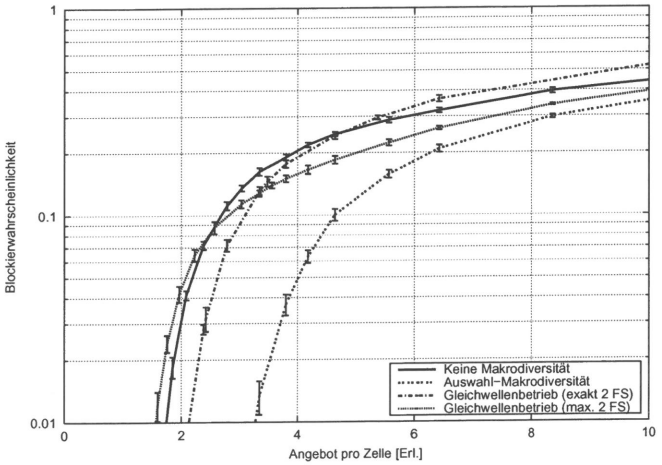


Bild 6-6: Gleichwellenbetrieb mit maximal zwei Feststationen

6.2.1.3 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb

In Kapitel 5.4 wurde eine Sendeleistungsanpassung für den Gleichwellenbetrieb vorgestellt, die mit Hinblick auf die Minimierung der Interferenz die Sendeleistung der Feststationen reduziert. Die Sendeleistung wird dabei auf den Kehrwert der am Gleichwellenbetrieb beteiligten Feststationen reduziert. Bei drei aktiven Makrodiversitätszweigen sendet also jede beteiligte Station nur mit einem Drittel der ursprünglichen Sendeleistung.

Hier wird nun der Einfluß dieser Sendeleistungsanpassung auf die Systemkapazität untersucht. Bild 6-7 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeiten der beiden Verfahren des Gleichwellenbetriebs mit und ohne Leistungsanpassung. Für den Fall des Gleichwellenbetriebs mit exakt drei beteiligten Feststationen sind die Kurven exakt gleich. Dies ist darin begründet, daß im rein interferenzbegrenzten System nicht die absolute Höhe der Sendeleistung, sondern die Höhe des Signal-Interferenz-Verhältnisses CIR die Blockierwahrscheinlichkeit bestimmt. Da jede Verbindung im System über genau drei Feststationen geführt wird, ändern sich die CIR-Verhältnisse im System nicht, wenn die Sendeleistung aller Feststationen gleichmäßig geändert wird. Das gilt natürlich nur, solange an jedem Punkt der Zelle eine minimale Empfangsleistung ($P_r \geq P_{r,\,min}$) vorhanden ist, also kein „Empfangsloch" besteht. Dies wurde, wie bereits oben erwähnt, für diese Studien vorausgesetzt.

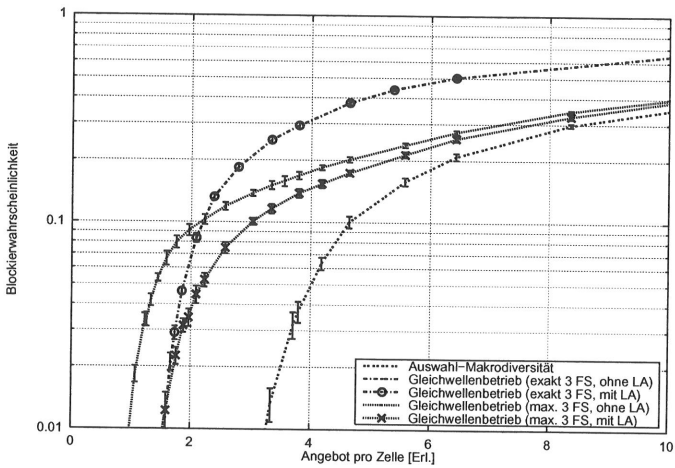


Bild 6-7: Blockierwahrscheinlichkeit im Gleichwellenbetrieb mit Leistungsanpassung

Anders verhält es sich im Fall des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen pro Verbindung. Hier senkt die Leistungsanpassung die Blockierwahrscheinlichkeit des Systems deutlich. Benutzt eine Verbindung drei oder zwei Makrodiversitätszweige, wird die Sendeleistung auf ein Drittel bzw. die Hälfte erniedrigt. Da manche Verbindungen im System drei, andere zwei und wieder andere nur einen Zweig benutzen, wirkt sich die Sendeleistungsanpassung positiv aus. Sie führt zu einer Absenkung der Interferenz, die von Verbindungen, die mehrere Zweige benutzen, erzeugt wird. Dies führt dazu, daß mehr Verbindungen zugelassen werden können. Insgesamt sinkt somit die Blockierwahrscheinlichkeit im System. Begrenzt wird die Blockierwahrscheinlichkeit bei hohem Angebot wieder durch die der Auswahl-Makrodiversität, da im Grenzfall alle Verbindungen wie bei der Auswahl-Makrodiversität nur einen Zweig benutzen.

6.2.2 Architektur mit 120-Grad-Richtantennen

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der Makrodiversität im zellularen System mit 120-Grad-Richtantennen untersucht. Die Feststationen sind wie in Kapitel 5, Bild 5-1 (rechts), gezeigt an den Ecken der hexagonalen Zellen plaziert.

Bild 6-8 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit bei Anwendung der verschiedenen Makrodiversitätsverfahren in dieser Architektur.

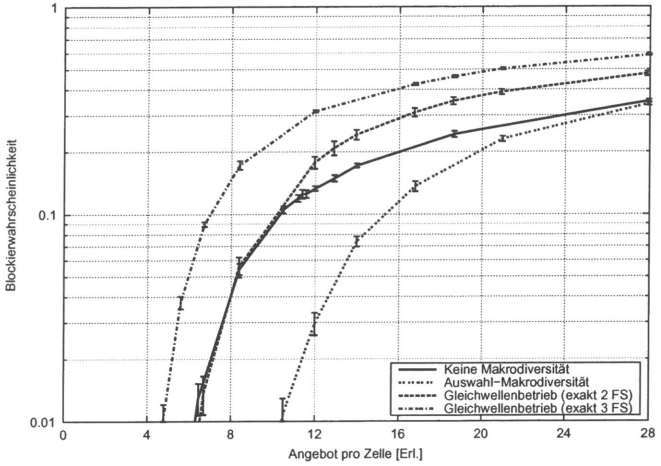


Bild 6-8: Blockierwahrscheinlichkeit im System mit 120-Grad-Richtantennen

Wie im System mit omnidirektionalen Antennen erzielt die Auswahl-Makrodiversität die niedrigste und der Gleichwellenbetrieb mit drei Feststationen die höchste Blockierwahrscheinlichkeit. Das relative Blockierverhalten der vier Strategien in Bild 6-8 entspricht dem Verhalten im System mit omnidirektionalen Antennen. Bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit ist der Gewinn G_1 der drei Makrodiversitätsverfahren gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität etwas geringer als im System mit omnidirektionalen Antennen. Der Gewinnabstand G_2 der anderen Verfahren zur Auswahl-Makrodiversität ist ungefähr gleich (Tabelle 6-2). Der absolute Verkehrswert, und damit die Systemkapazität, ist für alle Verfahren höher als im System mit omnidirektionalen Antennen. Die Verkehrswerte bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit sind um etwas mehr als das Dreifache höher.

Die höheren Verkehrswerte ergeben sich aus der Tatsache, daß eine Verbindung, die über eine 120-Grad-Antenne geführt wird, aufgrund der Leistungsunterdrückung außerhalb des Abstrahlwinkels keine Interferenz für andere Verbindungen erzeugt (siehe Bild 2-4, Kapitel 2.2). Damit wird die Wiederverwendung derselben Ressource in unterschiedlichen Antennensektoren ermöglicht. Dies ist das Prinzip des räumlichen Multiplex im Mobilfunk

Blockierwahrscheinlichkeit=3%	Angebot A_x [Erl.]	Verkehrswert Y_x [Erl.]	Gewinn G_1 gegen Fall a) $G_1=(Y_x-Y_a)/Y_a$	Gewinn G_2 gegen Fall b) $G_2=(Y_x-Y_b)/Y_b$
a) Keine Makrodiversität	7,6	7,37	0	-37%
b) Auswahl-Makrodiversität	12	11,64	58%	0
c) Gleichwellenbetrieb mit 2 FS	7,6	7,37	0	-37%
d) Gleichwellenbetrieb mit 3 FS	5,4	5,24	-29%	-55%

Tabelle 6-2: Verkehrswerte bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (System mit 120-Grad-Ant.)

(*Space Division Multiple Access*, SDMA). Es wird bereits in heutigen sektorisierten Systemen eingesetzt und bildet die Grundlage für den Einsatz adaptiver Antennen zur Kapazitätserhöhung in zellularen Systemen [27,161].

Für alle Untersuchungen dieser Arbeit ist das Mobilfunksystem so ausgelegt, daß an jeder Antenne ausreichend Sende- und Empfangseinrichtungen zur Verfügung stehen. Die Anzahl der Einrichtungen pro Antenne ist also so groß wie die Anzahl der Ressourcen im System. Wird unter dieser Voraussetzung ein Szenario betrachtet, in dem es keine Abschattungseffekte gibt, dann erhöht sich die Kapazität aufgrund der räumlichen Dreiteilung des Dienstgebietes durch die idealen 120-Grad-Richtantennen um das Dreifache. In einem Szenario mit Abschattung kann die Systemkapazität aufgrund des Bündelungsgewinns bei der Auswahl der Sende- und Empfangsanlage die Kapazität des Systems mit omnidirektionalen Antennen um mehr als das Dreifache übersteigen.

Dies veranschaulicht Bild 6-9 anhand einer Mobilfunkzelle. Im System mit omnidirektionalen Antennen kann die Mobilstation MS 1 eine Ressource aus der Gesamtzahl von J Ressourcen für ihre Verbindung auswählen (im Beispiel J=16). Sie belegt damit eine Sende- und Empfangseinrichtung an der Feststation FS 1. Dasselbe gilt für die Mobilstation MS 2. Sie belegt eine weitere Sende- und Empfangseinrichtung an FS 1.

Im System mit 120-Grad-Richtantennen und Makrodiversität kann die Mobilstation MS 1 eine Ressource und eine Sende- und Empfangseinrichtung an jeder der drei Feststationen FS 1 bis 3 belegen. Ist nun die Abschattung zwischen der gewählten Feststation und der Mobilstation MS 2 groß (z. B. bauliche Trennung), kann MS 2 dieselbe Ressource wie MS 1 verwenden. Sie hat dabei die Auswahl zwischen den zwei anderen Feststationen und damit zwischen $T = 2 \times J = 32$ Sende- und Empfangseinrichtungen. Beide Verbindungen belegen nur eine Ressource, jede jedoch eine eigene Sende- und Empfangseinrichtung an einer anderen Feststation. Alternativ könnte auch eine andere freie Ressource gewählt und eine Auswahl unter allen freien Sende- und Empfangseinrichtungen aller drei Feststationen getroffen werden (im Beispiel maximal 47). Die Auswahl an Sende- und Empfangseinrichtungen für eine Mobilstation ist in einem System mit Makrodiversität und 120-Grad-Richtantennen größer als im System

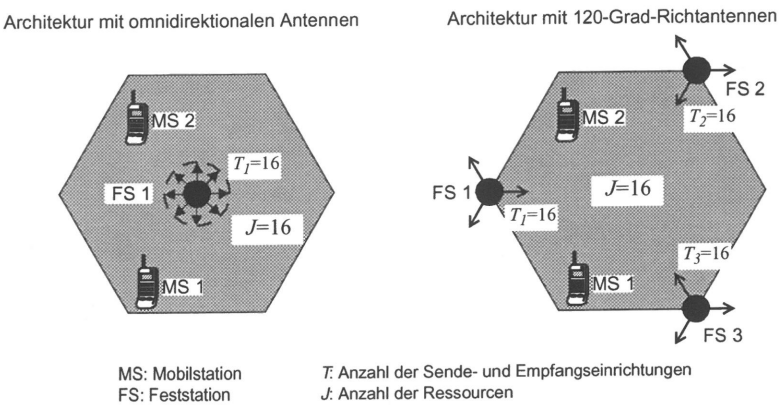


Bild 6-9: Kapazitätsvergleich der beiden Architekturen

mit omnidirektionalen Antennen. Dadurch wird zusätzlich zur Interferenzreduzierung ein Bündelungsgewinn erzielt, der die Kapazität des Systems mit 120-Grad-Richtantennen um mehr als das Dreifache anwachsen läßt.

Für den in Bild 6-9 (rechts) gezeigten Spezialfall ist auch im System ohne Makrodiversität ein mehr als dreifacher Kapazitätsgewinn erzielbar. Bei ausreichender Abschattung zwischen den beiden Stationen kann auch in diesem Fall dieselbe Ressource an unterschiedlichen Feststationen genutzt werden (MS 2 an FS 1 und MS 1 an FS 3). Da die Verbindung immer über die nächstgelegene Feststation geführt wird, kann jede Mobilstation jedoch nur aus den 16 Sende- und Empfangseinrichtungen dieser jeweiligen Feststation auswählen. Somit ist der Bündelungsgewinn insgesamt geringer als im Fall mit Makrodiversität. Im System mit omnidirektionalen Antennen ohne Makrodiversität muß jede Mobilstation ihre Verbindung mit einer anderen Ressource über zwei unterschiedliche Sende- und Empfangseinrichtungen derselben Festation FS 1 abwickeln.

Um in allen Fällen den Bündelungsgewinn voll nutzen zu können, müssen im System mit 120-Grad-Richtantennen dreimal soviel Sende- und Empfangseinrichtungen wie im System mit omnidirektionalen Antennen bereitgehalten werden. Bei voller Auslastung benötigt jede Feststation für jeden 120-Grad-Sektor je eine Einrichtung pro Ressource. Wenn aus Kostengründen nur ein Bruchteil der $T = 3 \times J$ Sende- und Empfangseinrichtungen bereitgehalten wird, sinkt der Bündelungsgewinn entsprechend.

6.2.2.1 Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen

Für die Anwendung des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen im System mit 120-Grad-Richtantennen stellen die Bilder 6-10 und 6-11 die Blockierwahrscheinlichkeiten dar.

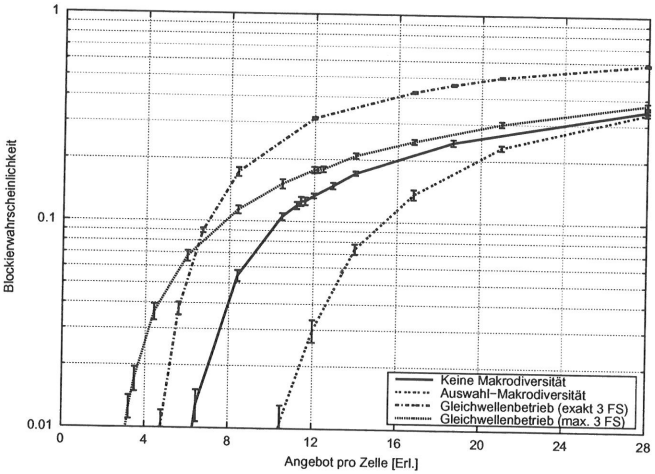


Bild 6-10: Variable Anzahl an Makrodiversitätszweigen (120-Grad-Antennen, 3 Zweige)

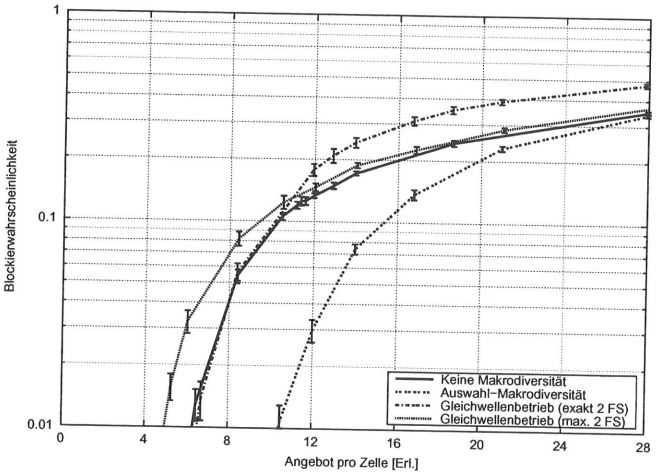


Bild 6-11: Variable Anzahl an Makrodiversitätszweigen (120-Grad-Antennen, 2 Zweige)

Der Verlauf der Kurven im Fall des Gleichwellenbetriebs mit maximal drei beziehungsweise maximal zwei Feststationen ist dem des Systems mit omnidirektionalen Antennen vergleichbar. Für ein hohes Verkehrsangebot nähern sich die Kurven der der Auswahl-Makrodiversität. Die Blockierwahrscheinlichkeit bleibt dabei niedriger als im Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Makrodiversitätszweigen. Bei geringem Verkehrsangebot dagegegen übersteigt die Blockierwahrscheinlichkeit die des Gleichwellenbetriebs mit fester Anzahl an Makrodiversitätszweigen. Wie in Kapitel 6.2.1.2 liegt dies daran, daß im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Feststationen der Ressourcenwahl keine explizite Evaluierung vorausgeht.

6.2.2.2 Sendeleistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb

Bei Anpassung der Sendeleistung umgekehrt proportional zur Anzahl der am Gleichwellenbetrieb beteiligten Feststationen zeigt Bild 6-12 die sich ergebenden Blockierwahrscheinlichkeiten für das System mit 120-Grad-Richtantennen.

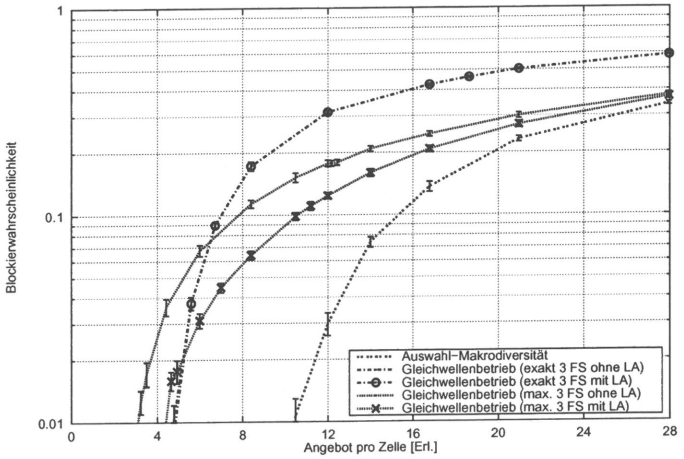


Bild 6-12: Gleichwellenbetrieb mit Leistungsanpassung (120-Grad-Antennen)

Im Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Makrodiversitätszweigen sind die Blockierwahrscheinlichkeiten exakt gleich. Wie auch im System mit omnidirektionalen Antennen wird die Systemkapazität nur durch das Signal-Interferenz-Verhältnis und nicht durch den Absolutwert der Sendeleistung bestimmt.

Im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen dagegen, läßt sich die Blockierwahrscheinlichkeit durch die Sendeleistungsanpassung senken. Durch Reduzierung der Sendeleistung für die Verbindungen, die über mehrere Feststationen geführt werden, sinkt die Interferenz im System (siehe Kapitel 6.2.1.3). Dadurch läßt sich eine höhere

Kapazität erzielen. Die Blockierwahrscheinlichkeit liegt immer über der der Auswahl-Makrodiversität und nähert sich dieser für ein hohes Verkehrsangebot an, da dann für beinahe jede Verbindung nur ein Makrodiversitätszweig verwendet wird.

Im System mit 120-Grad-Antennen können dieselben Ressourcenevaluierungsstrategien angewandt werden wie im System mit omnidirektionalen Antennen. Ein Kapazitätsvergleich der Strategien liefert für dieses System die gleichen Ergebnisse, wie sie bereits aus Kapitel 6.2.1.1 bekannt sind. Auf eine Darstellung der Kurven wird deshalb hier verzichtet.

6.3 Verbindungsqualität im statischen System

6.3.1 Architektur mit omnidirektionalen Antennen

Zur Beurteilung der Verbindungsqualität im System wird, wie eingangs erwähnt, der mit der Dauer seines Anliegens gewichtete CIR-Wert aller aktiven Verbindungen an einem bestimmten Arbeitspunkt im System herangezogen.

6.3.1.1 Verbindungsqualität bei konstanter Blockierwahrscheinlichkeit

Hier soll zuerst derselbe Arbeitspunkt betrachtet werden, der zur Bestimmung der Systemkapazität benutzt wurde. Dies ist der Arbeitspunkt bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit. Die sich an diesem Arbeitspunkt ergebende Verbindungsqualität stellen die Bilder 6-13 und 6-14 mit Hilfe der Verteilungsfunktionen des CIR für die verschiedenen Makrodiversitätsverfahren dar.[3]

Wie deutlich zu erkennen ist, wird eine minimale Verbindungsqualität durch den Wert CIR_{min}=9 dB in allen Fällen garantiert ($P\{\mathrm{CIR} \leq 9\ \mathrm{dB}\} = 0$). Dies verlangt die verwendete Ressourcenvergabe und die Verbindungsannahmesteuerung (siehe Kapitel 4.5). Wird der Wert CIR_{min} bei der Ressourcenvergabe und der Verbindungsannahmesteuerung angehoben, verschieben sich alle Kurven nach rechts. Dies würde für alle Verbindungen im System eine höhere Qualität garantieren. Allerdings stiege auch die Blockierwahrscheinlichkeit für alle Strategien an. Die Systemkapazität würde sinken.

Eine Absenkung des Parameters CIR_{min} würde genau das Gegenteil bewirken. Die Systemkapazität stiege (zu Lasten der Verbindungsqualität) an. Mit Hilfe des Parameters CIR_{min} kann so die Systemkapazität gegen die Verbindungsqualität des interferenzbegrenzten Mobilfunksystems abgewogen werden.

3. Alle Kurven dieses Kapitels wurden wie in den vorigen Kapiteln einschließlich ihrer 95%-Vertrauensintervalle bestimmt. Auf die Darstellung der Intervalle wird im folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Intervallgröße entspricht maximal der doppelten Strichstärke der Kurven.

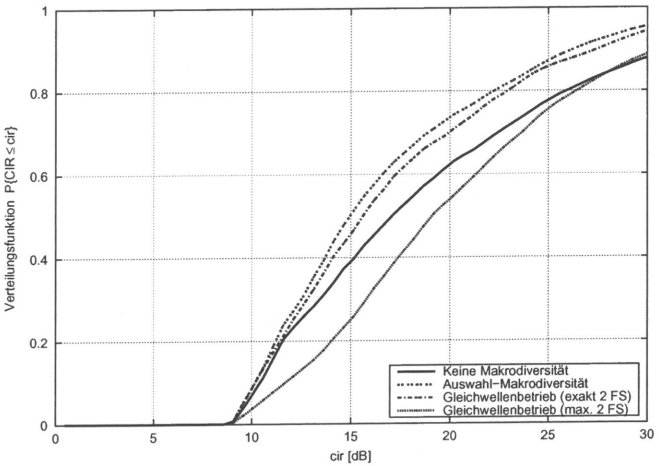


Bild 6-13: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (2 Zweige)

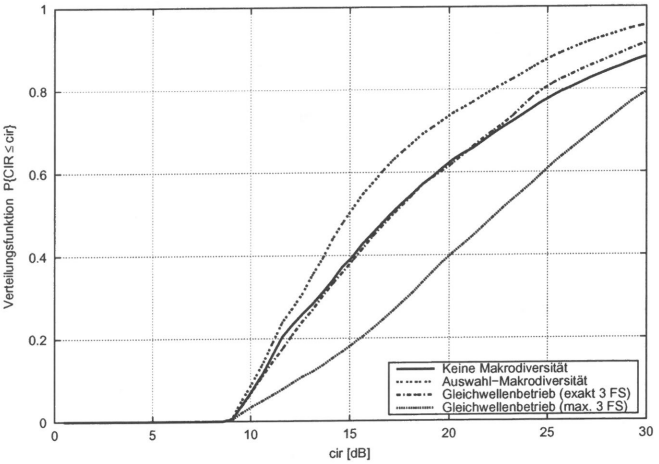


Bild 6-14: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit (3 Zweige)

An einem kurzen Beispiel soll gezeigt werden, wie die CIR-Kurven in Bild 6-13 und allen folgenden Bildern dieses Kapitels miteinander verglichen werden. Dazu müssen die Verteilungsfunktionen bei einem (oder mehreren) festen Wert auf der Abszisse abgelesen werden.

Wird in Bild 6-13 beispielweise der CIR-Wert von 15 dB betrachtet, ergibt dies folgendes Ergebnis: Im Fall des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen (maximal zwei) ist die Wahrscheinlichkeit, daß der CIR-Wert im System unter 15 dB liegt, ungefähr 25%. Die Wahrscheinlichkeit, daß er über 15 dB liegt, ist also 75% ($P\{\mathrm{CIR} \leq 15\ \mathrm{dB}\} = 1 - P\{\mathrm{CIR} > 15\ \mathrm{dB}\}$). Für die Auswahl-Makrodiversität dagegen beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß der CIR-Wert über 15 dB liegt nur 50%. Die Kurven, die im Schaubild weiter rechts liegen, zeigen also ein bezüglich der Verbindungsqualität besseres Verfahren an.

Für die CIR-Verteilungsfunktionen in Bild 6-13 ergibt sich das durchweg beste Signal-Interferenz-Verhältnis für das Verfahren des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen (maximal zwei Feststationen). Danach folgt das Verfahren ohne Anwendung von Makrodiversität, dann der Gleichwellenbetrieb mit exakt zwei beteiligten Feststationen und der Auswahl-Makrodiversität. Vergleichbare Verhältnisse finden sich auch in Bild 6-14 bei Anwendung des Gleichwellenbetriebs mit drei beteiligten Feststationen.

Die großen Unterschiede bezüglich des CIR lassen sich aus der Wahl des Arbeitspunktes erklären. Bei einer Blockierung von 3% erreicht die Auswahl-Makrodiversität den höchsten Verkehrswert im System (siehe Bilder 6-1 und 6-4). Dies bedeutet, daß bei dieser Strategie im Mittel am meisten Verbindungen gleichzeitig aktiv sind. Daraus ergibt sich, daß insgesamt ein hoher Interferenzpegel herrscht, der zu geringen CIR-Werten führt.

Wird diese Betrachtung der Verkehrswerte für alle Verfahren fortgeführt, erklärt sich daraus auch die Lage der anderen Kurven. Zum Beispiel erreicht der Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen (maximal drei) bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit den geringsten Verkehrswert (Bild 6-4) und so mit höherer Wahrscheinlichkeit bessere CIR-Werte (Bild 6-14).

6.3.1.2 Verbindungsqualität bei konstantem Verkehrswert

Um den Einfluß unterschiedlicher Systemlast auszuschließen, wird die Verbindungsqualität im folgenden bei einem konstanten Verkehrswert Y verglichen. Im Mittel sind dann bei allen Makrodiversitätsverfahren gleich viele Verbindungen aktiv. Unterschiede in der Qualität können nur aufgrund der unterschiedlichen Makrodiversitätsverfahren auftreten.

Bild 6-15 stellt die Verteilungsfunktionen des CIR-Wertes für die Verfahren ohne Makrodiversität, Auswahl-Makrodiversität, Gleichwellenbetrieb mit exakt drei und mit maximal drei beteiligten Feststationen bei einem konstanten Verkehrswert von Y=3 Erl. dar.

Die größte Wahrscheinlichkeit sehr hohe CIR-Werte im System bereitzustellen, liefert das Verfahren des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen. Es erreicht im Systemmittel die weitaus beste Verbindungsqualität. Erst für einen sehr hohen Wert des

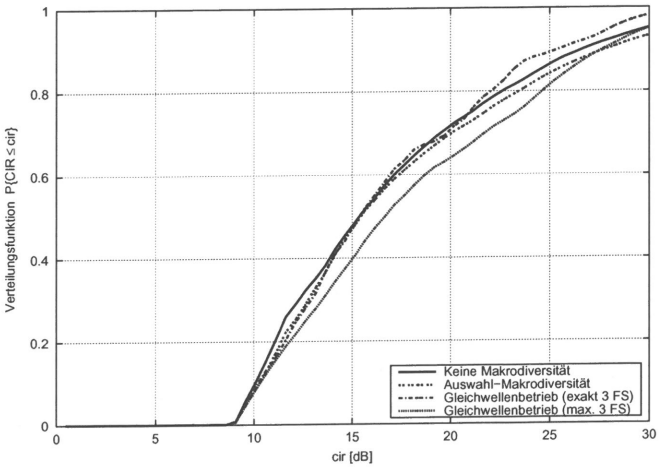


Bild 6-15: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 3 Erl. (3-fach MD)

Signal-Interferenz-Verhältnisses von 27 dB schneidet die CIR-Verteilungsfunktion die Kurven der anderen Verfahren. In diesem Bereich sind die CIR-Werte jedoch bereits so hoch, daß die Qualität in allen Systemen sehr gut ist.

Die Auswahl-Makrodiversität erzielt noch einen geringen Gewinn in der Verbindungsqualität gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität. Der Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Feststationen dagegen erzielt keinen Gewinn gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität.

Die gleichen Ergebnisse zeigen sich auch für den Gleichwellenbetrieb mit nur zwei beteiligten Feststationen (Bild 6-16).

Der Verkehrswert Y=3 Erl. wurde hier als Vergleichspunkt gewählt, da er für alle untersuchten Verfahren eingestellt werden kann. Die Blockierwahrscheinlichkeiten liegen in der Spanne von 0,4% für die Auswahl-Makrodiversität bis zu 44% im Fall des Gleichwellenbetriebs mit exakt drei Feststationen (Bild 6-1). Einen niedrigeren Verkehrswert läßt sich für die Auswahl-Makrodiversität nicht mehr ermitteln. Für die anderen Verfahren vergleicht Bild 6-17 die Verbindungsqualität bei einem Verkehrswert von Y=2 Erl. Die Blockierwahrscheinlichkeiten liegen hier im Bereich von 4% (keine Makrodiversität) bis 13% (Gleichwellenbetrieb mit exakt drei Feststationen, Bild 6-1). Insgeamt verlaufen alle Kurven in Bild 6-17 etwas flacher als in Bild 6-15. Es werden höhere CIR-Werte mit einer größeren Wahrscheinlichkeit erreicht. Dies erklärt sich aus dem niedrigeren Verkehrswert, also einer niedrigeren mittleren Anzahl aktiver Verbindungen im System. Hierbei wird im Mittel weniger Interferenz erzeugt und folglich werden bessere CIR-Verhältnisse ermöglicht. Die relative Lage der Kurven der einzelnen Makrodiversitätsverfahren zueinander bleibt unverändert. Die beste Verbindungsqualität bei

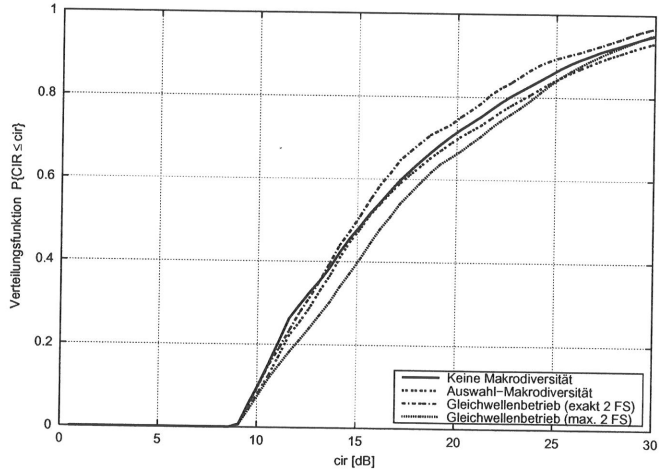


Bild 6-16: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 3 Erl. (2-fach MD)

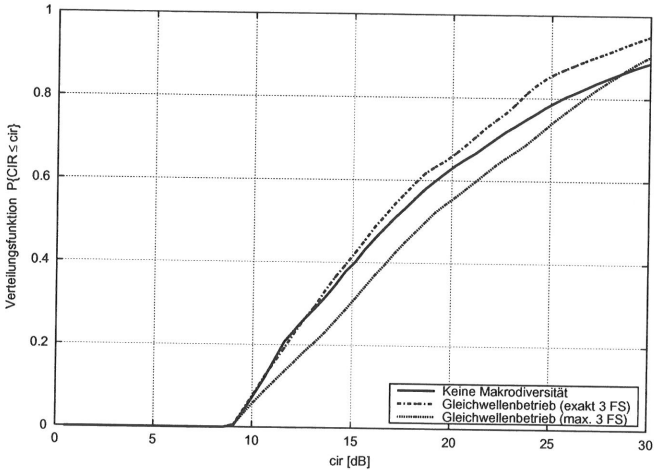


Bild 6-17: Verteilungsfunktion des CIR-Wertes bei festem Verkehrswert 2 Erl.

konstantem Verkehrswert erzielt der Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an beteiligten Feststationen, gefolgt vom Fall ohne Makrodiversität und dem Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Feststationen.

6.3.1.3 Verbindungsqualität in Abhängigkeit der Strategien zur Ressourcenevaluierung im Gleichwellenbetrieb

Einen Vergleich der Ressourcenevaluierungsverfahren nach Kapitel 6.2.1.1 bezüglich der Verbindungsqualität im System geben die Bilder 6-18 und 6-19 wieder. Sie stellen die CIR-Verteilungsfunktionen für Auswahl-Makrodiversität und den Gleichwellenbetrieb bei den festen Verkehrswerten Y=3 Erl. bzw. Y=2 Erl. dar.

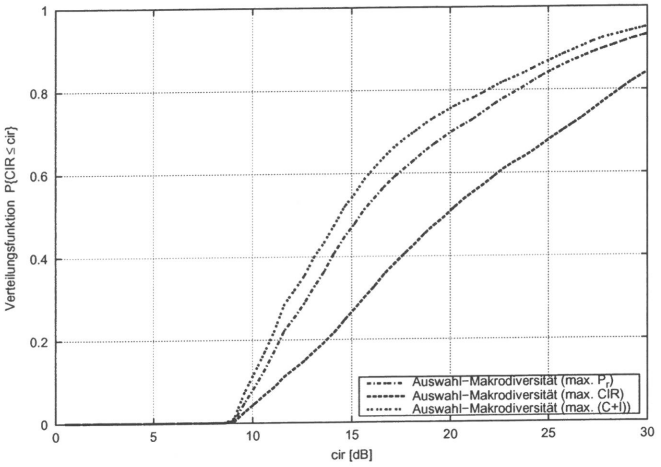


Bild 6-18: Verbindungsqualität der Evaluierungsstrategien bei Auswahl-Makrodiversität

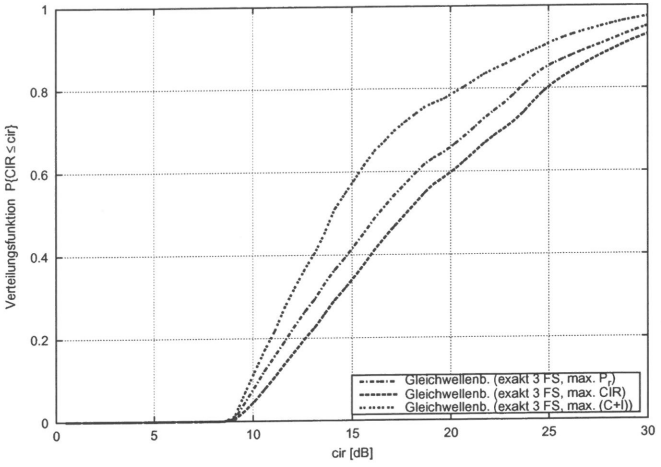


Bild 6-19: Verbindungsqualität der Evaluierungsstrategien im Gleichwellenbetrieb

In beiden Fällen erzielt das Evaluierungsverfahren, das neuen Verbindungen diejenigen Ressourcen bevorzugt zuteilt, die das CIR-Verhältnis der Verbindung maximieren, die beste Verbindungsqualität. Darauf folgt das Verfahren, das die Empfangsleistung P_r maximiert, dann das, welches die Summe $(C+I)$ maximiert.

Dies ist nicht überraschend. Um eine maximale Verbindungsqualität bezüglich des CIR zu erreichen, ist die beste Strategie natürlich die Maximierung des CIR-Wertes bei der Ressourcenvergabe. Der Nachteil dieser Strategie wurde bereits in Kapitel 6.2.1.1 gezeigt. Sowohl für die Auswahl-Makrodiversität als auch für den Gleichwellenbetrieb erzielt sie die geringste Systemkapazität. Es kann also mit den Ressourcenevaluierungsstrategien entweder die Verbindungsqualität oder die Kapazität im System erhöht werden, nie beides gleichzeitig.

6.3.1.4 Verbindungsqualität bei Leistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb

Wird bei Anwendung des Gleichwellenbetriebs eine Anpassung der Sendeleistung umgekehrt proportional zur Anzahl der beteiligten Feststationen durchgeführt, ergeben sich für Y=2 Erl. die Verteilungsfunktionen des CIR-Wertes nach Bild 6-20.

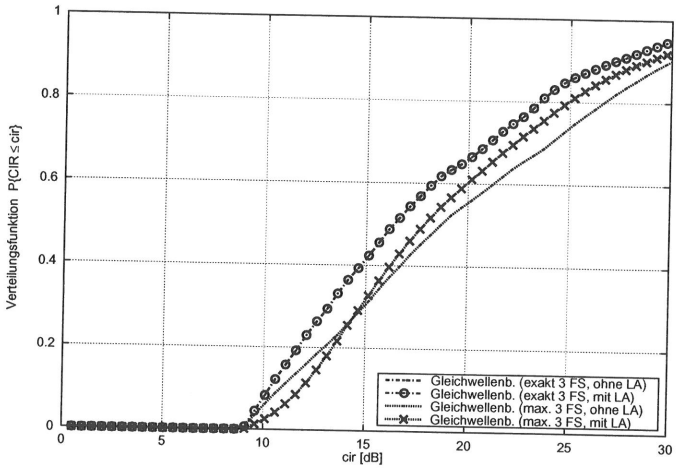


Bild 6-20: Leistungsanpassung im Gleichwellenbetrieb

Für den Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an beteiligten Feststationen ergibt sich bei Anwendung der Leistungsanpassung kein Unterschied in der Verbindungsqualität. Die CIR-Verteilungsfunktionen sind deckungsgleich. Die Erklärung hierfür ist dieselbe wie bei der Betrachtung der Systemkapazität in Kapitel 6.2.1.3. Im rein interferenzbegrenzten System ist nur das Verhältnis der Leistungen zueinander relevant, nicht die absolute Sendeleistung.

Im Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen dagegen ändert sich die Verbindungsqualität bei Einsatz der Leistungsanpassung. Der Grund dafür ist, daß jede Verbindung je nach Anzahl beteiligter Feststationen mit einer unterschiedlichen Gesamtleistung versorgt wird.

Für geringe CIR-Werte von 9 dB bis 14 dB verbessert sich die Verbindungsqualität im System, während sie sich für höhere CIR-Werte verschlechtert. Für geringe CIR-Werte ist der Effekt der Interferenzminimierung durch die Leistungsanpassung der ausschlaggebende Effekt. Er verbessert im Mittel die Verbindungsqualität. Für hohe Werte des CIR ist dagegen der bereits in Kapitel 5.4 bei der Betrachtung der Gebietsabdeckung bemerkte Effekt vorherrschend. Wird die Sendeleistung aller Feststationen, also auch die, der am Ort der Mobilstation bestempfangenen Station, gesenkt, so sind hohe Empfangsleistungen kaum zu realisieren. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, sehr hohe CIR-Werte im System zu realisieren, geringer als im System ohne Leistungsanpassung.

Über die gesamte Verteilungsfunktion betrachtet, ist die Verbindungsqualität bei Anwendung des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen besser als bei Anwendung des Gleichwellenbetriebs mit fester Anzahl an Zweigen. Dies gilt unabhängig davon, ob die Leistungsanpassung angewandt wird oder nicht.

6.3.2 Architektur mit 120-Grad-Richtantennen

Bild 6-21 vergleicht die Verbindungsqualität am Arbeitspunkt von 3% Blockierwahrscheinlichkeit im System mit omnidirektionalen Antennen und im System mit 120-Grad-Richtantennen am Beispiel der Auswahl-Makrodiversität.

Ein Vorteil einer der beiden Architekturen bezüglich der Verbindungsqualität ist nicht zu erkennen. Wie in Kapitel 6.2.2 festgestellt wurde, wird im System mit 120-Grad-Antennen stets ein höherer Verkehrswert erreicht als im System mit omnidirektionalen Antennen. Dies gilt auch für den hier betrachteten Arbeitspunkt von 3% Blockierwahrscheinlichkeit. Dabei ist die Verbindungsqualität, die sich aus dem Verhältnis der Signal- zur Interferenzleistung ergibt, in beiden Systemen gleich. Die höhere Kapazität aufgrund der Leistungsunterdrückung außerhalb des 120-Grad-Antennensektors kann also erzielt werden, ohne die Verbindungsqualität im System negativ zu beeinflussen. Dieselben Resultate ergeben sich auch im Gleichwellenbetrieb.

Werden die verschiedenen Makrodiversitätsstrategien im System mit 120-Grad-Antennen analog zu Kapitel 6.3.1 bei einem festen Verkehrswert verglichen, ergeben sich folgerichtig dieselben relativen Verhältnisse wie im System mit omnidirektionalen Antennen. Der Unterschied der Makrodiversitätsverfahren ist unabhängig von der gewählten zellularen Architektur.

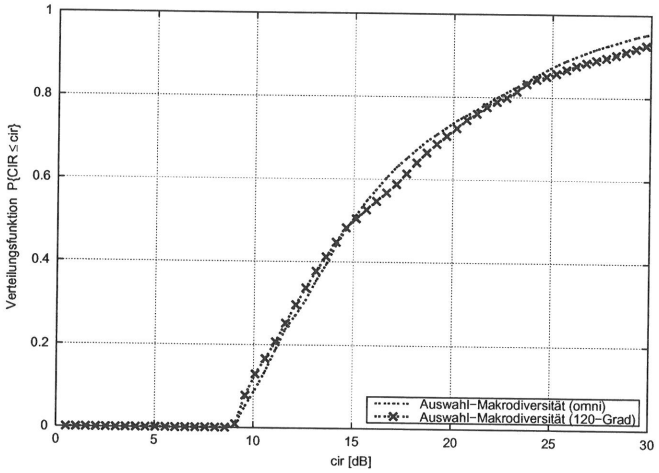


Bild 6-21: Verbindungsqualität bei 3% Blockierwahrscheinlichkeit in beiden Architekturen

6.4 Untersuchungen bei Mobilität

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen der Makrodiversitätsverfahren auf sich bewegende Teilnehmer ausgedehnt. Wie bei den statischen Untersuchungen werden die Mobilstationen bei eintretendem Verbindungswunsch gleichmäßig im Dienstgebiet verteilt. Nun behalten sie jedoch die einmal zugeteilte Position nicht inne, sondern bewegen sich nach dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Mobilitätsmodell im gesamten Dienstgebiet.

Die Bewegung der Teilnehmer wird als zufällig angenommen (*random walk*), d. h. sie ist nicht gerichtet. An jedem Ort entscheidet die Mobilstation zu welchem Nachbarort sie weitergeht. Alle Nachbarn werden dabei mit der gleichen Wahrscheinlichkeit besucht. Im hexagonalen System nach Kapitel 4.1, hat jeder Ort, d. h. jede Aufenthaltszone, drei Nachbarorte (Nachbarzonen), zu denen die Mobilstation sich jeweils mit der Wahrscheinlichkeit von einem Drittel bewegt.

Die Aufenthaltszeit in einer Zone wird nach einer vorgegebenen Verteilungsfunktion ermittelt. Gewählt wurde hier die deterministische Verteilungsfunktion und die negativ-exponentielle Verteilungsfunktion.

Der Mittelwert der deterministischen Verteilungsfunktion $\overline{T}_k$ ergibt sich aus der konstanten Geschwindigkeit v der Mobilstation und dem Abstand a zum Nachbarort zu

$$\bar{T}_k = \frac{a}{v} \tag{6-1}.$$

Mit der Modellierung der Zellen als gleichmäßige Sechsecke aus Kapitel 4.2 ist

$$a = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R}{R_n} \tag{6-2},$$

mit R dem Zellradius in Metern und R_n dem normierten Zellradius.

Der Mittelwert $\bar{T}_e$ der negativ-exponentiellen Verteilungsfunktion kann nach [90] mit Hilfe der Gesetze der Flüssigkeitsmechanik angenähert werden zu

$$\bar{T}_e = \frac{\pi S}{v_m O} \tag{6-3},$$

mit v_m der mittleren Geschwindigkeit der Mobilstationen, O dem Umfang der Aufenthaltszone und S ihrer Fläche.

Im Modell der sechseckigen Zellen nach Kapitel 4.2 ergeben sich O und S zu

$$O = 3 \frac{R}{R_n} \tag{6-4}$$

und

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{R^2}{R_n^2} \tag{6-5},$$

mit R dem Zellradius in Metern und R_n dem normierten Zellradius.

Während die deterministische Verteilungsfunktion exakt die Bewegungen von Teilnehmern, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, nachbildet, wird die negativ-exponentielle Verteilungsfunktion häufig zu analytischen Untersuchungen herangezogen [90,103,127,147].

Einen zufälligen Bewegungsablauf einer Mobilstation während einer Verbindungsdauer veranschaulicht beispielhaft Bild 6-22.

Die Simulationsresultate dieses Unterkapitels wurden alle im Mobilfunksystem mit omnidirektionalen Antennen gewonnen. Wie in Kapitel 6.2 gezeigt, gibt es mit Ausnahme der Höhe der Systemkapazität keinen prinzipiellen Unterschied zum System mit 120-Grad-Richtantennen. Die hier gewonnenen Resultate gelten deshalb im allgemeinen auch für das System mit 120-Grad-Antennen.

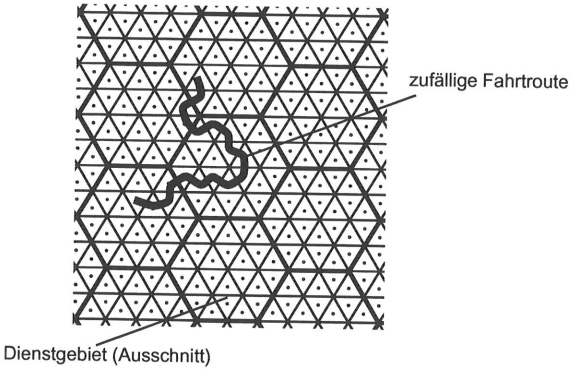


Bild 6-22: Beispiel für die zufällige Bewegung einer Mobilstation im Dienstgebiet

6.4.1 Zusätzliche Parameter zur Beurteilung der Systemkapazität bei mobilen Teilnehmern

Zusätzlich zur **Blockierwahrscheinlichkeit** P_B (*blocking probability*), die im statischen System zur Ermittlung der Systemkapazität herangezogen wurde (Kapitel 6.2), ist bei sich bewegenden Teilnehmern die **Unterbrechungswahrscheinlichkeit** P_D (*dropping probability*) zu berücksichtigen. Die sich im Dienstgebiet bewegenden Mobilstationen können ihre Verbindung nicht während der gesamten Verbindungsdauer über dieselbe Feststation führen. Sind sie zu weit von der Feststation entfernt oder ist die Abschattung zu groß, d. h. die Empfangsleistung zu gering, muß ein Handover durchgeführt werden. Ein Handover kann auch nötig sein, wenn die Störung der eigenen Verbindung aufgrund von Interferenz durch andere Teilnehmer zu groß wird, oder ein anderer Teilnehmer durch die eigene Verbindung zu stark gestört wird (Kapitel 2.3.4.3).

Bei jedem Handover-Vorgang muß für die bestehende Verbindung entweder eine neue Ressource, eine neue Feststation oder beides gefunden werden, über die die Verbindung weitergeführt werden kann. Sollte dies nicht möglich sein, wird die Verbindung unterbrochen. Die Unterbrechungswahrscheinlichkeit gibt den Wahrscheinlichkeitsgrad an, mit der bei einem Handover-Vorgang die Verbindung ungewollt unterbrochen wird. Sie wird in den folgenden Untersuchungen aus der relativen Häufigkeit fehlgeschlagener Handover-Vorgänge bezogen auf die Anzahl aller ausgelösten Handover-Vorgänge im System ermittelt. Die Blockierwahrscheinlichkeit wird analog dazu aus der relativen Häufigkeit der Anzahl abgewiesener Neuankünfte bezogen auf die Anzahl aller Neuankünfte im System ermittelt.

Ergänzend wird hier noch die gemeinsame Wahrscheinlichkeit für **Blockierung oder Unterbrechung** P_{BD} ermittelt. Sie gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Verbindungswunsch blockiert wird oder eine Verbindung während ihres Bestehens unterbrochen wird. Sie ist ein

Maßstab dafür, wie wahrscheinlich es ist, daß ein Verbindungswunsch nicht wie gewünscht befriedigt werden kann (Mißerfolgswahrscheinlichkeit). Sie wird aus der relativen Häufigkeit der Summe aller abgewiesenen Neuankünfte und fehlgeschlagenen Handover-Vorgänge bezogen auf die Summe aller Neuankünfte und aller Handover-Vorgänge ermittelt. Mit ihrer Hilfe kann im System mit sich bewegenden Teilnehmern die Kapazität analog zum statischen System bei einem festen Verkehrswert Y definiert werden. Y errechnet sich mit dem Angebot A zu

$$Y = A(1 - P_{BD}) \tag{6-6}.$$

Im Hinblick auf diese Beurteilungsgrößen werden im folgenden verschiedene Handover-Verfahren für die unterschiedlichen Makrodiversitätsverfahren untersucht.

6.4.2 Geographisches Handover im Fall ohne Makrodiversität

Für den Fall, daß keine Makrodiversität angewandt wird, d. h. jede Mobilstation ihre Verbindung immer über die geographisch nächstgelegene Feststation abwickelt, führt das Verfahren des geographischen Handover eine neue Ressourcenzuweisung durch, sobald die Mobilstation die Zelle wechselt[4]. Ein Zellwechsel bedeutet, daß sich die nächstgelegene Feststation ändert und somit die Verbindung über die neue Feststation geführt werden muß. Dabei kann nach dem Handover je nach Interferenzlage dieselbe oder eine andere Ressource verwendet werden.

Bei diesem Verfahren des geographischen Handover behält eine Mobilstation die einmal zugeteilte Ressource bei, solange sie sich in derselben Zelle aufhält. Da sich jedoch bei jeder Bewegung die Empfangsleistung aufgrund der sich von Ort zu Ort wechselnden Abschattung ändern kann, kann sich das Signal-Interferenz-Verhältnis CIR der Mobilstation ändern. Ein minimales CIR_{min} von 9 dB kann so nicht mehr über die gesamte Verbindungsdauer garantiert werden.

Bei der Ressourcenzuweisung am Verbindungsanfang oder bei einem Handover-Vorgang wird derselbe DCA-Algorithmus wie im statischen System (Kapitel 6.2) angewandt. Hierbei werden die Mindestwerte für die Empfangleistung $P_{r,min}$=-105 dBm und das Signal-Interferenz-Verhältnis CIR_{min}=9 dB eingehalten.

Bild 6-23 zeigt die Blockier- und Unterbrechungswahrscheinlichkeit des geographischen Handover-Verfahrens im Vergleich zur Blockierwahrscheinlichkeit im statischen Fall. Die Mobilstationen bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h (Gleichung (6-1)).

4. Im System mit 120-Grad-Antennen entspricht der Wechsel der Zelle dem Wechsel des Antennensektors.

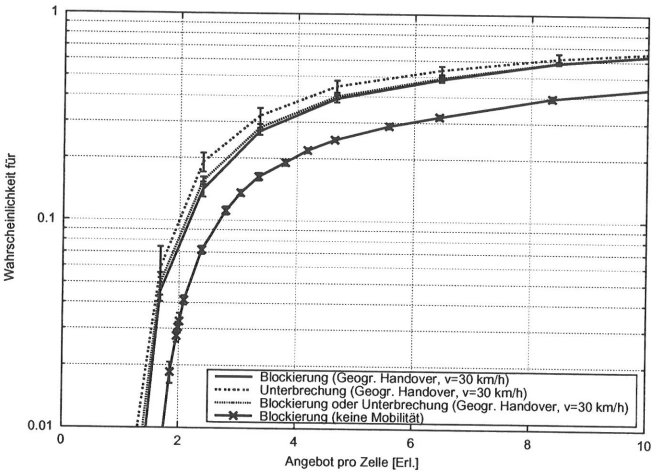


Bild 6-23: Geographisches Handover bei konstant 30 km/h

Die Blockier- und Unterbrechungswahrscheinlichkeit bei geographischem Handover sind annähernd gleich groß. Dies ist zu erwarten, da Handover-Vorgänge nicht vor neu hinzukommenden Verbindungswünschen priorisiert werden. Alle Ressourcenzuweisungen, ob bei einem neuen Verbindungswunsch oder bei einem Handover, werden gleich behandelt.

Anstelle einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit (Gleichung (6-3)), wird nun das Mobilitätsmodell mit negativ-exponentiell verteilter Aufenthaltszeit betrachtet. Bild 6-24 zeigt die Blockier- und Unterbrechungswahrscheinlichkeit des geographischen Handover-Verfahrens für dieses Mobilitätsmodell.

Der Verlauf der Kurven unterscheidet sich kaum vom Szenario mit konstanter Geschwindigkeit. Die Blockier- und die Unterbrechungswahrscheinlichkeit sind im Szenario mit konstanter Geschwindigkeit minimal geringer. In diesem Fall bewegen sich die Mobilstationen mit exakt 30 km/h. Für den Fall der negativ-exponentiell verteilten Aufenthaltszeit an einem Ort kann die Geschwindigkeit von 30 km/h nur nach Gleichung (6-3) angenähert werden. Die geringe Abweichung der Kurven erklärt sich durch den Geschwindigkeitsunterschied der Mobilstationen in beiden Modellen (siehe auch Kapitel 6.4.4). Auch in den weiteren Handover-Untersuchungen dieses Kapitels wurden für beide Modelle keine größeren Abweichungen festgestellt. Es werden deshalb im folgenden nur die Bilder für eine konstante Bewegung der Mobilstationen präsentiert.

In den Bildern 6-23 und 6-24 liegt die Wahrscheinlichkeit P_{BD} für Blockierung oder Unterbrechung in ihrer Höhe zwischen den Einzelwahrscheinlichkeiten P_B und P_D. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit für eine mißlungene Ressourcenzuweisung gemeinsam für neue

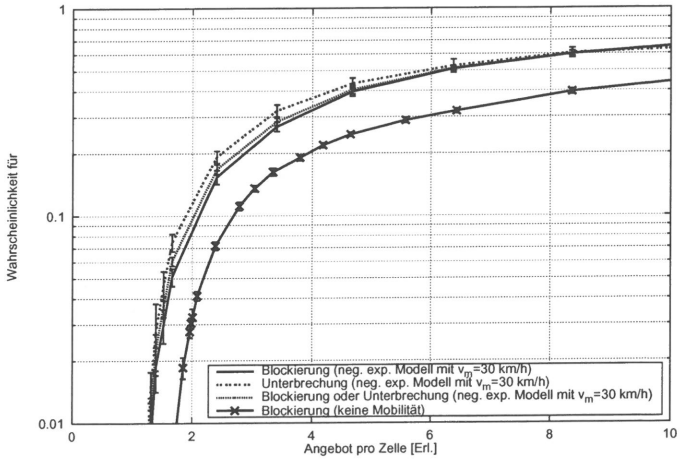


Bild 6-24: Geographisches Handover für das neg. exp. Modell (v_m=30 km/h)

Verbindungswünsche und Handover an. Aus ihr läßt sich die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Ressourcenzuweisung mit 1-P_{BD} errechnen und dann die Systemkapazität für jeden gewünschten Arbeitspunkt nach Gleichung (6-6) angeben.

Die geringfügig höhere Unterbrechungswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Tatsache, daß Handover-Vorgänge nur am Zellrand auftreten, während Neuankünfte gleichmäßig über die Zellfläche verteilt sind. Am Zellrand ist die Wahrscheinlichkeit, eine geringe Empfangsleistung und ein geringes CIR zu erzielen, höher als in der Zellmitte (Kapitel 5). Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, das minimale CIR_{min} von 9 dB nicht zu erreichen, am Zellrand höher als im Zellinneren. Die Abweisung des Wunsches nach Ressourcenzuteilung ist deshalb am Zellrand wahrscheinlicher.

Sowohl die Blockier- als auch die Unterbrechungswahrscheinlichkeit sind beim geographischen Handover-Verfahren höher als die Blockierwahrscheinlichkeit im statischen Fall (Bild 6-23). Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Verbindung erfolgreich ist, ist geringer als im statischen Fall.

Bild 6-25 zeigt die Verbindungsqualität im System bei einem Verkehrswert von Y=3 Erl. im Vergleich zum statischen System.

Wie bereits erwähnt, kann aufgrund der unterschiedlichen Abschattungsverhältnisse im Zellinneren das CIR unterhalb von CIR_{min}=9 dB liegen. Wird gefordert, daß der Wert CIR_{min} niemals unterschritten werden darf, kann dies auf zwei Arten realisiert werden. Erstens könnten die Verbindungen, die nach einem Ortswechsel innerhalb der Zelle ein Signal-Interferenz-Verhältnis unterhalb der Grenze CIR_{min}=9 dB haben, unterbrochen werden. Dies würde die Unter-

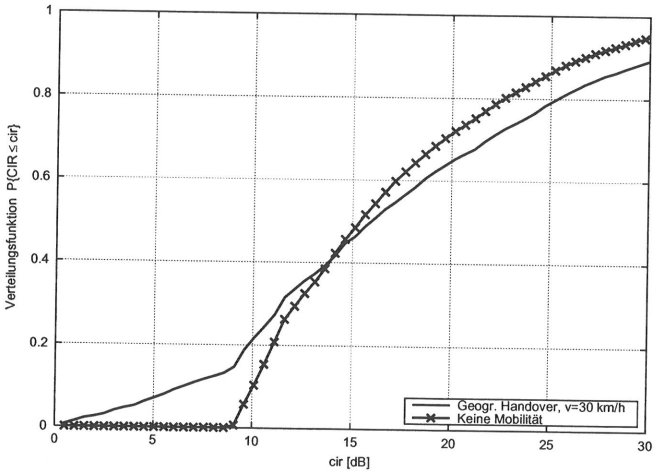


Bild 6-25: Verbindungsqualität bei geographischem Handover

brechungswahrscheinlichkeit im System weiter erhöhen und damit die Systemkapazität senken. Zweitens könnten zusätzlich zum Handover bei Zellwechsel weitere, interferenzgetriebene Handover-Vorgänge ermöglicht werden. Das würde den Mobilstationen erlauben, ihre Ressource auch im Zellinneren an derselben Feststation zu wechseln. Dies wird in Kapitel 6.4.4 untersucht.

Mit dem rein geographischen Handover läßt sich das Prinzip, eine Verbindung zwischen Mobilstation und Festnetz immer über die nächstliegende Feststation zu führen, für den Fall sich bewegender Mobilstationen umsetzen. Gegenüber dem statischen Fall sinkt jedoch die Systemkapazität.

6.4.3 Empfangsleistungsbasiertes Handover bei Auswahl-Makrodiversität

Für den Fall der Auswahl-Makrodiversität wird hier ein Handover-Verfahren untersucht, das auf der Auswertung der mittleren Empfangsleistung an der Mobilstation basiert. Das Verfahren entspricht in seiner Konzeption dem aus dem GSM bekannten *power budget handover* [40]. Es mißt die mittlere Empfangsleistung an der Mobilstation, die sich bei jeder Bewegung des Teilnehmers aufgrund geänderter Abschattungsverhältnisse ändern kann. Es entscheidet sich für die Ausführung eines Handover, falls eine neue Feststation mit höherer Leistung empfangen wird als die der Feststation, über die die Verbindung gerade geführt wird.

Um die Anzahl der Handover-Vorgänge zu begrenzen, wird eine Handover-Schwelle m_{dB} (*handover margin*) eingeführt. Damit ein Handover ausgelöst wird, muß die Empfangsleistung $P_{r,\,neu_{dBm}}$ der neuen Feststation die Empfangsleistung $P_{r,\,alt_{dBm}}$ der alten Feststation um den Betrag m_{dB} übertreffen. Ein Handover-Vorgang wird also eingeleitet, wenn folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$P_{r,\,alt_{dBm}} + m_{dB} < P_{r,\,neu_{dBm}} \tag{6-7}.$$

Die Dimensionierung der Handover-Schwelle ist in Mobilfunksystemen eine schwierige Angelegenheit, die jeder Netzbetreiber speziell für sein Netz auszuführen hat [133]. Wird sie zu hoch gewählt, kann eine Verbindung aufgrund zu geringer Qualität vor dem Auslösen des Handover unbrauchbar werden. Wird sie zu niedrig gewählt, sind häufige Handover-Vorgänge die Folge. Gefürchtet ist vor allem das sogenannte „Ping-Pong-Handover", der ständige Wechsel der Verbindung zwischen zwei Feststationen [109].

Bei Anwendung der Makrodiversität ist der Aufwand des Feststationswechsels nicht so aufwendig wie im System ohne Makrodiversität. Eine kurze Signalisiermeldung zum Umschalten der sendenden Feststation genügt, eine aufwendige Änderung des Informationsflusses in den Vermittlungsstellen ist nicht nötig, da die zu sendenden Informationen an den beteiligten Feststationen bereits anliegen (Kapitel 3). Ein schneller Wechsel der Feststation ist deshalb möglich, selbst ein „Ping-Pong-Handover" ist weit weniger systembelastend.

Bild 6-26 zeigt die Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung im Fall des empfangsleistungsbasierten Handover für verschiedene Handover-Schwellen m_{dB}. Die Mobilstationen bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h.

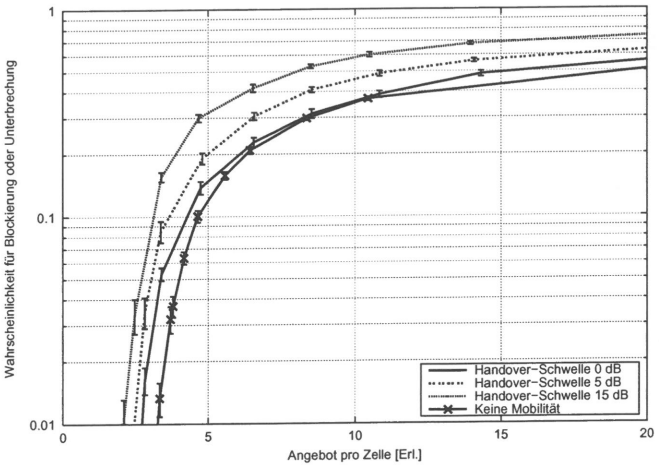


Bild 6-26: Empfangsleistungsbasiertes Handover bei Auswahl-Makrodiversität

Die Einzelwahrscheinlichkeiten für Blockierung und Unterbrechung werden nicht gesondert dargestellt. Sie sind gleich groß wie die dargestellte Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung. Die Begründung hierfür liegt wie in Kapitel 6.4.2 in der Gleichbehandlung von neuen Verbindungswünschen und Handover. Da bei diesem Verfahren Handover-Vorgänge nicht nur am Zellrand, sondern an jedem Punkt der Zelle ausgelöst werden können, ist der Unterschied der Blockier- und Unterbrechungswahrscheinlichkeit noch wesentlich geringer als im Fall des geographischen Handover. Ergänzend zeigt Bild 6-26 noch die Blockierwahrscheinlichkeit des statischen Falls.

Die Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung ist umso größer, je höher die Handover-Schwelle gewählt wird. Für eine Handover-Schwelle von 0 dB ist sie am niedrigsten. Sie liegt dann sehr nahe der Blockierwahrscheinlichkeit des stationären Falls. Eine Schwelle von 0 dB bedeutet die Auslösung eines Handover sobald eine Feststation empfangen wird, deren Empfangsleistung höher ist als die der Feststation, über die die Verbindung momentan geführt wird. Dies ist die ideale Umsetzung der Idee der Auswahl-Makrodiversität. Zu jedem Zeitpunkt soll die Verbindung über die Feststation geführt werden, die mit der höchsten Leistung empfangen wird (Kapitel 3). Diese Strategie ergibt auch die höchste Systemkapazität. Wird die Handover-Schwelle erhöht, sinkt die Systemkapazität.

Die Verbindungsqualität im System bei einem Verkehrswert von Y=3 Erl. zeigt Bild 6-27.

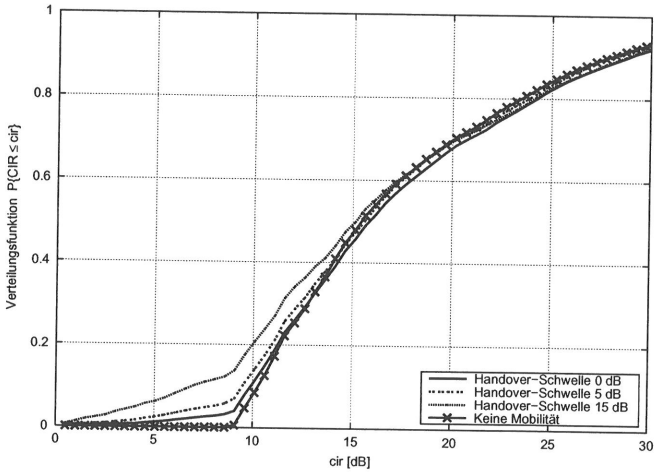


Bild 6-27: Verbindungsqualität bei Y=3 Erl. bei Auswahl-Makrodiversität

Für hohe CIR-Werte ist die Verbindungsqualität nahezu für alle Handover-Verfahren gleich, unabhängig von der Handover-Schwelle. Sie entspricht ebenfalls der Qualität, die im statischen Fall erreicht wird. Für niedrige Werte des CIR ist die Verbindungsqualität umso geringer, je höher die Handover-Schwelle gewählt wird. Je seltener also ein Handover-Vorgang ausgelöst wird, desto geringer wird die Qualität im System.

Wie im Fall des geographischen Handover wird auch hier akzeptiert, daß eine Mobilstation bei Bewegung ihre Ressource beibehält, solange kein Handover ausgelöst wird. Dies kann aufgrund der Abschattung zu CIR-Werten kleiner als CIR_{min}=9 dB führen. Würden die Verbindungen, die nach einer Bewegung einen CIR-Wert kleiner als CIR_{min} haben, unterbrochen, ohne ein interferenzbedingtes Handover durchzuführen, stiege die Unterbrechungswahrscheinlichkeit im System an. Die Systemkapazität wäre entsprechend geringer. Weitere Untersuchungen hierzu finden sich in [142].

Der Preis, der bei einem empfangsleistungsbasierten Handover für eine hohe Systemkapazität, also das Anwenden einer niedrigen Handover-Schwelle, bezahlt werden muß, ist, wie bereits erwähnt, die Anzahl der Handover-Vorgänge. Bild 6-28 gibt die mittlere relative Anzahl der erfolgreichen Handover-Vorgänge bezogen auf die mittlere Anzahl der Ortswechsel der Mobilstationen wieder.

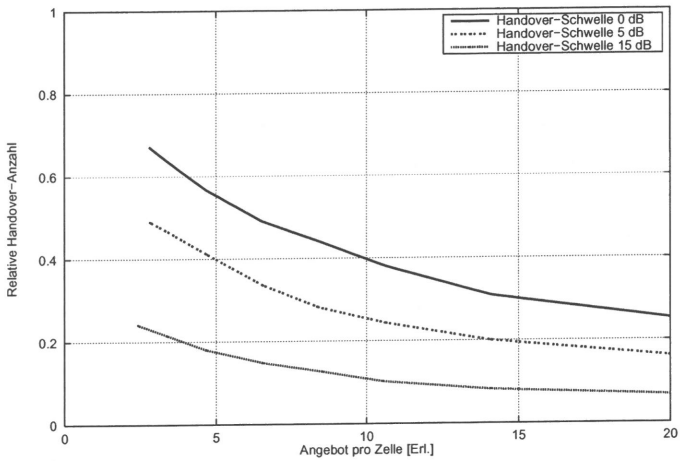


Bild 6-28: Relative Handover-Anzahl bei empfangsleistungsbasiertem Handover

Wie zu erwarten, ist die relative Handover-Anzahl für eine Schwelle von 0 dB am höchsten. Für höhere Schwellen liegt sie beträchtlich niedriger. So ist beispielsweise bei einem Angebot von 3 Erl. die relative Handover-Anzahl bei einer Schwelle von 10 dB um ca. 25% höher als bei einer Schwelle von 15 dB. Bei einer Handover-Schwelle von 0 dB ist sie dann noch einmal

um 20% höher. Für ein hohes Verkehrsangebot sinkt die relative Handover-Anzahl für alle Kurven, da die Unterbrechungswahrscheinlichkeit steigt und nur die erfolgreichen Handover-Vorgänge gezählt werden.

Bei Anwendung des empfangsleistungsbasierten Handover mit einer Handover-Schwelle von 0 dB kann auch im Fall sich bewegender Mobilfunkteilnehmer dieselbe hohe Systemkapazität und Verbindungsqualität wie im statischen System erzielt werden. Das empfangsleistungsbasierte Handover mit Schwelle 0 dB entspricht dabei dem Fall der idealen Auswahl-Makrodiversität. Jede Verbindung wird immer über die Feststation geführt, die die beste Empfangsleistung realisieren kann. Wird dieses Prinzip durch höhere Handover-Schwellen eingeschränkt, sinken sowohl die Systemkapazität als auch die Verbindungsqualität. Im Gegensatz zu Systemen ohne Makrodiversität ist der häufige und schnelle Wechsel der Feststation im System mit Makrodiversität möglich, da das Zugangsnetz entsprechend ausgerüstet ist (Kapitel 3).

6.4.4 Verbindungsprüfung bei jedem Ortswechsel

Eine neue Handover-Strategie führt bei jedem Ortswechsel der Mobilstation, also bei jeder Änderung der Empfangsleistung und des Signal-Interferenz-Verhältnisses aufgrund geänderter Abschattungsverhältnisse, eine Überprüfung der zugewiesenen Ressource und Feststation (bzw. Feststationen)[5] durch, über die die Verbindung momentan geführt wird. Sollte bei dieser Überprüfung eine bessere Kombination von Ressource und Feststation(en) gefunden werden, wird ein Handover durchgeführt. Wenn die Ressource und/oder die Feststation gewechselt wird, handelt es sich um ein *Hard Handover*, weil dann während des Handover keine durchgehende Signalisierverbindung aufrecht erhalten werden kann (Kapitel 2.3). Es gibt einen kurzen Moment, in dem die Verbindung umgeschaltet wird. Dagegen handelt es sich um ein *Soft Handover*, wenn mindestens eine Ressource und eine Feststation während und nach dem Umschalten weiterhin an der Verbindung beteiligt sind. Das bedeutet, daß mindestens eine Verbindungsstrecke zwischen Mobilstation und Festnetz nicht umgeschaltet werden muß und somit durchgängig zur Verfügung steht. *Soft Handover* ist nur bei Anwendung des Gleichwellenbetriebs möglich.

Die Kriterien, nach denen die Verbindungsprüfung durchgeführt wird, sind dieselben wie beim Verbindungsaufbau. Es wird dieselbe Verbindungsannahmesteuerung und derselbe DCA-Algorithmus auch bei der neuen Ressourcenzuweisung beim Handover eingesetzt.

5. Nur im Gleichwellenbetrieb sind mehrere Feststationen an einer Verbindung beteiligt.

Der Einsatz der Verbindungsannahmesteuerung auch beim Handover garantiert, daß alle Verbindungen zu jedem Zeitpunkt die vorgegebene Mindestqualität von CIR_{min}=9 dB erfüllen. Eine Verschlechterung des CIR unter diesen Wert kann somit nicht eintreten, da vorher ein Handover zu einer anderen Ressource oder Feststation ausgeführt wird. Sollte dies nicht gelingen, da alle Ressourcen belegt sind, wird die Verbindung unterbrochen.

Die Bilder 6-29 und 6-30 zeigen die Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung für Mobilstationen, die sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h bewegen. Auch bei diesem Handover-Verfahren werden neuankommende Verbindungswünsche und neue Ressourcenzuweisungen bedingt durch Handover-Vorgänge gleich behandelt. Daher sind die Blockierwahrscheinlichkeit und die Unterbrechungswahrscheinlichkeit gleich groß. Die Bilder zeigen deshalb nur die Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung, die Mißerfolgswahrscheinlichkeit, einer Verbindung. Sie kann stellvertretend für beide Einzelwahrscheinlichkeiten betrachtet werden.

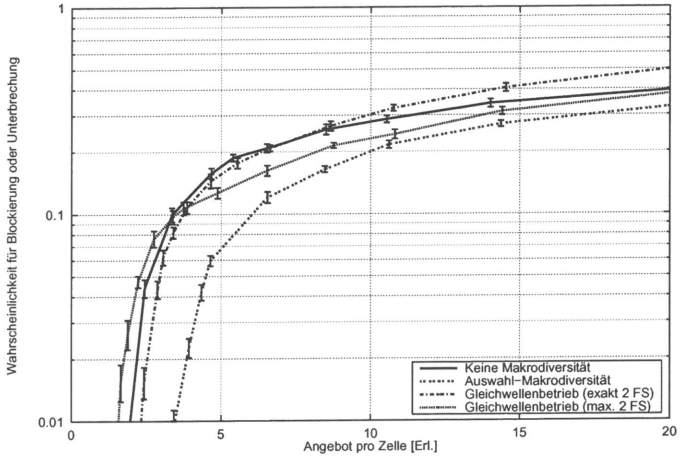


Bild 6-29: Blockierwahrscheinlichkeit bei konstant 30 km/h (2 Zweige)

Das Verhalten der Kurven entspricht dem des statischen Systems (Kapitel 6.2). Die höchste Systemkapazität erreicht die Auswahl-Makrodiversität. Für niedrige Blockier- oder Unterbrechungswahrscheinlichkeiten folgt der Gleichwellenbetrieb mit exakt zwei Feststationen, dann der Fall ohne Makrodiversität und der Gleichwellenbetrieb mit exakt drei Feststationen. Die Verfahren mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen erzielen für ein geringes Angebot die geringste Systemkapazität und nähern sich für ein hohes Angebot der Auswahl-Makrodiversität an. Auch die relativen Kapazitätsgewinne der Makrodiversitätsverfahren entsprechen bei sich bewegenden Teilnehmern denen im statischen System nach Tabelle 6-1.

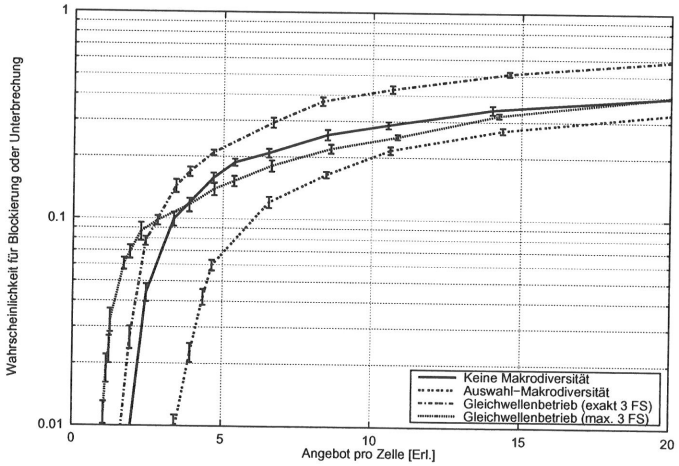


Bild 6-30: Blockierwahrscheinlichkeit bei konstant 30 km/h (3 Zweige)

Werden die Bilder 6-29 und 6-30 in ihren absoluten Werten mit den Ergebnissen am statischen System verglichen (z. B. Bild 6-1), fällt auf, daß die Blockier- oder Unterbrechungswahrscheinlichkeit bei Mobilität geringer ist als die Blockierwahrscheinlichkeit des statischen Systems.

Bild 6-31 verdeutlicht diesen Sachverhalt, der für alle Makrodiversitätsverfahren gleichermaßen festzustellen ist, am Beispiel der Auswahl-Makrodiversität mit verschiedenen Geschwindigkeiten der Mobilstationen.

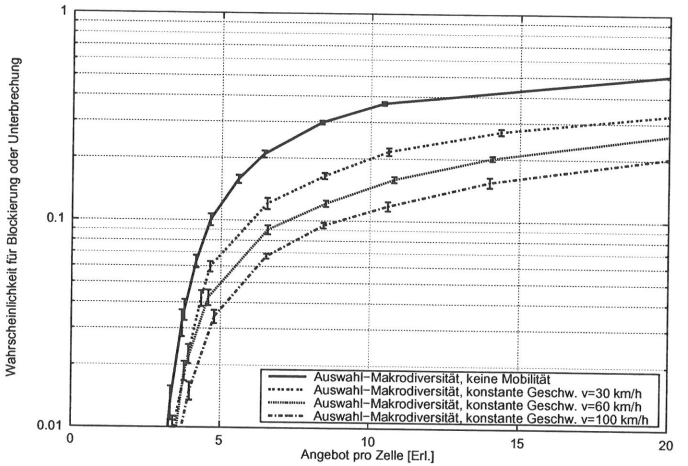


Bild 6-31: Auswahl-Makrodiversität bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten

Je höher die Geschwindigkeit der Mobilstationen ist, desto niedriger ist die Wahrscheinlichkeit für Blockierung oder Unterbrechung. Der Grund hierfür liegt im Handover-Verfahren.

Bei jedem Ortswechsel einer Mobilstation wird eine Prüfung ihrer Verbindung vorgenommen. Falls sich die Abschattungs- oder Interferenzverhältnisse verändert haben, wird eine neue Ressource und/oder Feststation anstelle der alten zugeteilt. Systemweit gesehen optimiert der DCA-Algorithmus so die Wiederverwendung der Ressourcen im Dienstgebiet. Je schneller sich die Mobilstationen bewegen, desto häufiger wird die Ressourcenbenutzung durch den DCA-Algorithmus optimiert. Dadurch läßt sich eine höhere Systemkapazität erzielen.

Das Handover-Verfahren bedient sich somit einer ähnlichen, aber weniger komplexen Strategie wie ein DCA-Algorithmus mit *re-arrangement*. Dieser überprüft und ändert alle Verbindungen im System, sobald sich die Verhältnisse für nur eine Verbindung ändern (siehe Kapitel 2.3.4.2). Das hier verwendete Handover-Verfahren überprüft und ändert die Zuteilung einer Ressource und der Feststation(en) zu einer Verbindung nur für die sich bewegende Mobilstation. Bei häufigen Ortswechseln ergibt sich dadurch eine bessere Wiederverwendung aller Ressourcen als im statischen System.

Bezahlt werden muß die Erhöhung der Systemkapazität mit der Anzahl der nötigen Neuzuweisungen der Ressource, d. h. mit einer hohen Anzahl an Handover-Vorgängen. Bild 6-32 zeigt die Anzahl an *Hard Handover* der verschiedenen Makrodiversitätsverfahren.

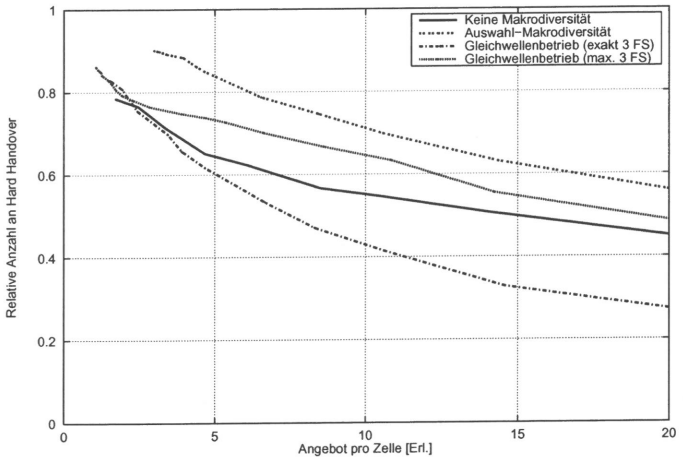


Bild 6-32: Relative Anzahl an *Hard Handover*

Die höchste relative Anzahl an *Hard Handover* benötigt die Auswahl-Makrodiversität. Sie erreicht auch die höchste Systemkapazität (Bild 6-30). Darauf folgt der Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen, das Verfahren ohne Makrodiversität und der

Gleichwellenbetrieb mit exakt drei beteiligten Feststationen. Ohne Anwendung der Makrodiversität kann, wie beim Verbindungsaufbau, auch beim Handover immer nur die nächstliegende Feststation gewählt werden. Ein Wechsel der Feststation im Zellinneren zur Verbesserung der Empfangsleistung wie er bei Auswahl-Makrodiversität stattfinden kann, ist ohne Anwendung von Makrodiversität nicht möglich. Dadurch benötigt dieses Verfahren weniger Handover-Vorgänge, erzielt aber auch eine geringere Systemkapazität.

Die beiden Verfahren des Gleichwellenbetriebs führen nicht nur *Hard Handover*, sondern auch *Soft Handover* durch. Deren relative Anzahl zeigt Bild 6-33.

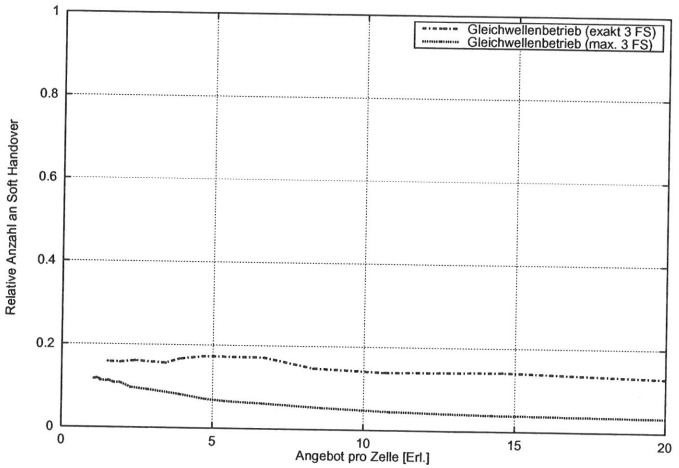


Bild 6-33: Relative Anzahl an *Soft Handover*

Die relative Anzahl an *Soft Handover* liegt beim Gleichwellenbetrieb mit exakt drei beteiligten Feststationen höher als beim Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen. Da bei ersterem Verfahren immer drei Zweige für eine Verbindung verwendet werden, ist die Wahrscheinlichkeit bei einem Ortswechsel mindestens einen davon weiterverwenden zu können höher. Umgekehrt müssen aus diesem Grund bei letzterem Verfahren mehr *Hard Handover* durchgeführt werden (Bild 6-32).

Da in den Bildern 6-32 und 6-33 die mittlere Anzahl an erfolgreichen Handover-Vorgängen bezogen auf die mittlere Anzahl an Ortswechseln gezeigt werden, nimmt die relative Anzahl mit zunehmendem Angebot ab. Bei zunehmendem Angebot steigt bei allen Verfahren die Unterbrechungswahrscheinlichkeit (Bild 6-30). Bei niedrigem Angebot, also geringer Unterbrechungswahrscheinlichkeit, liegt die relative Anzahl an *Hard Handover* für alle Verfahren bei 80% oder darüber. Dies verdeutlicht noch einmal den Preis, der bei Anwendung dieses Handover-Verfahrens für die erreichte hohe Systemkapazität bezahlt werden muß.

Für dieses Handover-Verfahren stellt Bild 6-34 analog zum statischen System die Verteilungsfunktion des CIR bei einem Verkehrswert von Y=3 Erl. dar.

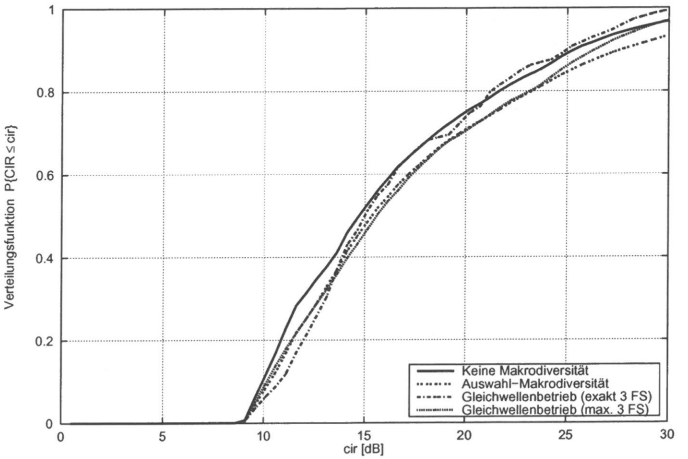


Bild 6-34: Verbindungsqualität bei konstant 30 km/h

Bezüglich der systemweiten Verbindungsqualität ergeben sich nur geringe Veränderungen gegenüber dem statischen System (Bild 6-15). Der Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen büßt etwas an Verbindungsqualität ein. Er liegt nun nahe bei der Auswahl-Makrodiversität. Die Auswahl-Makrodiversität profitiert etwas stärker von den Handover-Vorgängen, da sie durch häufige Neuzuweisungen der Ressourcen deren räumliche Wiederverwendung verbessern kann. Wie im statischen System kann mit diesem Handover-Verfahren eine minimale Verbindungsqualität von CIR_{min}=9 dB für alle Teilnehmer garantiert werden.

Das hier vorgestellte Handover-Verfahren, das alle Makrodiversitätsverfahren gleich behandelt, zeigt, daß die Mobilität der Teilnehmer die generelle Beurteilung der einzelnen Makrodiversitätsverfahren nicht beeinflußt. Die hohe Systemkapazität, die bei großer Geschwindigkeit mit diesem Handover-Verfahren erreicht werden kann, wird durch eine hohe Anzahl an Handover-Vorgängen bezahlt. Der Grund für die höhere Kapazität bei größerer Geschwindigkeit der Teilnehmer liegt in der Verbesserung der räumlichen Wiederverwendung der Ressourcen und ist deshalb einem DCA-Algorithmus mit Neuanordnung (*re-arrangement*) der Ressourcen vergleichbar. Dieser Effekt tritt für alle Makrodiversitätsverfahren gleichermaßen ein.

Spezielle Verfahren, die Handover-Vorgänge gegenüber neuen Verbindungswünschen priorisieren, um die Unterbrechungswahrscheinlichkeit zu senken, sind nicht Thema dieser Arbeit. Eine gute Übersicht über die möglichen Verfahren gibt [152]. Sie sind ohne Einschränkung für alle Makrodiversitätsverfahren anwendbar.

Ergänzende Untersuchungen zu den Handover-Verfahren im Zusammenhang mit Makrodiversität und Erweiterungen zur Priorisierung von *Soft Handover* gegenüber *Hard Handover* finden sich in [142].

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden die Verfahren der Auswahl-Makrodiversität und des Gleichwellenbetriebs mit fester und variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen bezüglich der erreichbaren Kapazität und Verbindungsqualität in einem interferenzbegrenzten Mobilfunksystem verglichen. Als Referenzsystem diente ein zellulares System ohne Anwendung von Makrodiversität.

Die Ressourcenvergabe im System erfolgt mit einem DCA-Algorithmus, der zur flexiblen Anwendung der Makrodiversität alle Ressourcen an allen beteiligten Feststationen verfügbar machen kann. Gegenüber einem FCA-System erzielt dieser Algorithmus bereits ohne Anwendung der Makrodiversität eine ungefähr vierfache Systemkapazität. Eine minimale Verbindungsqualität wird vom DCA-Algorithmus in Kombination mit einer Verbindungsannahmesteuerung garantiert. Wird dieser Minimalwert herabgesetzt, steigt für alle Makrodiversitätsverfahren die Kapazität. Wird er erhöht, sinkt die Kapazität entsprechend. Mit diesem Parameter kann somit die Systemkapazität gegen die Verbindungsqualität des interferenzbegrenzten Mobilfunksystems abgewogen werden.

Verglichen wurden alle Makrodiversitätsverfahren sowohl im System mit omnidirektionalen Antennen in der Zellmitte als auch im System mit 120-Grad-Richtantennen an den Zellecken. Generell läßt sich im System mit 120-Grad-Antennen eine mehr als dreimal so hohe Systemkapazität erzielen, wenn genügend Sende- und Empfangseinrichtungen an den Feststationen zur Verfügung gestellt werden. Die Verbindungsqualität ist dabei in beiden Systemen gleich gut. Die relativen Kapazitäts- und Qualitätsunterschiede der Makrodiversitätsverfahren bleiben von der Wahl der zellularen Architektur unbeeinflußt.

Die höchste Systemkapazität wird bei Einsatz der Auswahl-Makrodiversität erzielt. Aus Systemsicht erweist es sich am günstigsten für die Kapazität, die Verbindung immer über die Feststation zu führen, die mit der höchsten mittleren Leistung empfangen wird. Die Bevorzugung der Feststation und der Ressource, die anstelle der höchsten Empfangsleistung das höch-

ste Signal-Interferenz-Verhältnis erzielen, optimiert dagegen die Verbindungsqualität. Systemkapazität und Verbindungsqualität können nicht gleichzeitig optimiert werden, sondern nur eine auf Kosten der anderen.

Im Gleichwellenbetrieb ist die erreichte Systemkapazität wesentlich geringer als bei Auswahl-Makrodiversität. Die Kapazität sinkt, je mehr Feststationen sich am Gleichwellenbetrieb beteiligen. Der Effekt der zusätzlich erzeugten Interferenz für andere Verbindungen ist aus Kapazitätsgesichtspunkten negativer zu werten als die Erhöhung der Empfangsleistung an den Mobilstationen. Wird bei der Ressourcenzuweisung eine Evaluierung durchgeführt, kann die Systemkapazität im Gleichwellenbetrieb erhöht werden, wenn die Verbindung im Unterschied zur Auswahl-Makrodiversität über die Ressourcen und Feststationen geführt wird, die die höchste Summe aus Empfangs- und Interferenzleistung erzielen. Für die höchste Verbindungsqualität sollte aber wie bei der Auswahl-Makrodiversität das höchste Signal-Interferenz-Verhältnis angestrebt werden. Auch im Gleichwellenbetrieb können nur entweder die Systemkapazität oder die Verbindungsqualität optimiert werden.

Ein Verfahren, das im Gleichwellenbetrieb die Anzahl der verwendeten Makrodiversitätszweige variabel hält, erzielt eine höhere Verbindungsqualität als der Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Makrodiversitätszweigen. Dieses Verfahren versucht die Anzahl der Zweige zu maximieren, berücksichtigt dabei jedoch die aktuellen Interferenzverhältnisse im System. Bezüglich der Systemkapazität nähert es sich bei hoher Last der Auswahl-Makrodiversität an, kann sie jedoch nicht übertreffen. Für geringe Last unterschreitet es die Kapazität, die im Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Makrodiversitätszweigen erzielt wird, falls keine Ressourcenevaluierung stattfindet. Die Ressourcenevaluierung kann nicht angewandt werden, da sie zu rechenintensiv ist. Die Systemkapazität dieses Verfahrens kann mit einer Sendeleistungsanpassung umgekehrt proportional zur Anzahl sendender Feststationen erhöht werden. Sie kompensiert damit den Abstand zum Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Zweigen. Gleichzeitig wird eine höhere Verbindungsqualität erzielt.

Die absolut beste Verbindungsqualität ergibt sich bei Anwendung der Auswahl-Makrodiversität mit Ressourcenevaluierung zur Maximierung des Signal-Interferenz-Verhältnisses. Die so erreichte Qualität übertrifft die des Gleichwellenbetriebs mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen und Leistungsanpassung, die des Gleichwellenbetriebs mit fester Anzahl an Zweigen und die des Verfahrens ohne Makrodiversität. Gegenüber der Auswahl-Makrodiversität mit Ressourcenevaluierung zur Maximierung der Empfangsleistung bedeutet dies jedoch eine starke Verminderung der Systemkapazität.

Die Unterschiede, die sich für die Makrodiversitätsverfahren bezüglich der Systemkapazität und der Verbindungsqualität ergeben, sind unabhängig davon, ob sich die Mobilstationen im System bewegen oder nicht. Die absoluten Werte, die bei jedem Verfahren für diese beiden Beurteilungsgrößen erreicht werden, hängen jedoch vom verwendeten Handover-Verfahren ab.

Die besten Ergebnisse erzielt das Handover-Verfahren, das bei jedem Ortswechsel eine Verbindungsüberprüfung vornimmt und bei sich verschlechternden Bedingungen ein Handover mit neuer Ressourcenzuweisung gemäß dem jeweiligen Makrodiversitätsverfahren durchführt.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendung von Makrodiversität in der Mobilkommunikation untersucht. Die verschiedenen Ausprägungen der Makrodiversität wurden aufgezeigt und ihr Verhalten im zellularen Mobilfunksystem studiert. Der Hauptteil der Arbeit befaßte sich mit den Vor- und Nachteilen der Makrodiversitätsverfahren an der Luftschnittstelle. Ergänzend wurde eine Architektur für ein makrodiversitätsfähiges Festnetz vorgestellt. Detaillierte Studien wurden durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Makrodiversität zur Erhöhung der Gebietsabdeckung, der Systemkapazität und der systemweiten Verbindungsqualität zu ermitteln.

Zu Beginn der Arbeit wurde eine Übersicht über existierende Mobilfunksysteme und -standards gegeben. Die heutigen Systeme wurden nach ihren Einsatzgebieten kategorisiert und ihre Weiterentwicklung aufgezeigt. Ein Ausblick wurde gegeben auf zukünftige Systeme, die nahezu alle Dienste, die heute bereits aus dem Festnetz bekannt sind, mobilen Teilnehmern zur Verfügung stellen sollen.

Im weiteren wurde die für die Mobilkommunikation wichtige Problematik der Wellenausbreitung auf dem Funkkanal aufgezeigt. Es wurde dabei auf die Mehrwegausbreitung der Funkwellen, die distanzabhängige Dämpfung und die Abschattung eingegangen. Für die in dieser Arbeit relevanten Eigenschaften des Funkkanals wurde eine geeignete Modellierung angeführt. Sie berücksichtigt die distanzabhängige Dämpfung und die Abschattung der Funkwellen (langsamer Schwund). Der schnelle Schwund kann bei der Modellierung außer acht gelassen werden, da für alle Verfahren der Makrodiversität nur Meßwerte aus der mittleren Empfangsleistung herangezogen werden.

Zur Einführung in den zellularen Mobilfunk wurden die wichtigsten Aspekte eines Mobilkommunikationssystems erläutert. Da Kapazität und Qualität eines Mobilfunksystems maßgeblich durch das Funkzugangsnetz bestimmt werden, standen die Verfahren des Ressourcenmanagements an der Luftschnittstelle im Vordergrund. Es wurden die Unterschiede der festen und dynamischen Kanalvergabe, sowie die Handover-Problematik und die Mobilitätsverwaltung in einem Mobilfunksystem aufgezeigt.

Nach einer Klassifizierung der Diversitätsverfahren im Mobilfunk wurden die Voraussetzungen zum Einsatz der Makrodiversität in einem zellularen System dargelegt. Aus mehreren, in der Praxis und Literatur bekannten zellularen Architekturen wurden zwei Architekturen ausgewählt, die sich zur Anwendung der Makrodiversität umrüsten lassen. Es handelt sich dabei um eine Architektur, die sich aus konventionellen Mobilfunksystemen ableiten läßt, und eine, die auf sektorisierten Systemen aufbaut. Erstere verwendet omnidirektionale Antennen an den Feststationen, die in der Mitte einer hexagonalen Zelle plaziert sind. Letztere verwendet je drei ideale 120-Grad-Richtantennen pro Feststation. Die Feststationen stehen an jeder zweiten Ecke der hexagonalen Zelle.

Es wurde die notwendige Funktionalität des makrodiversitätsfähigen Zugangsnetzes vorgestellt. Anhand einer möglichen Architektur, basierend auf den von ETSI vorgeschlagenen funktionalen Elementen für UMTS, wurde vor allem die *Macrodiversity Unit* als wichtigstes neues Element des Zugangsnetzes ermittelt. Die zur Durchführung der Makrodiversität nötigen Verfahren der Signalkombination wurden nach dem Kombinationsverfahren und dem Kombinationszeitpunkt kategorisiert.

In einer Literaturstudie und anschließenden Diskussion wurden mehrere Verfahren der Makrodiversität für die Aufwärts- und Abwärtsstrecke im Mobilfunk unterschieden. In Aufwärtsrichtung läßt sich ein Gewinn mit der Makrodiversität allein durch eine entsprechende Ausrüstung des Festnetzes erzielen. Da die Mobilstationen mit einer omnidirektionalen Antenne senden, genügt es, die Signale an mehreren Feststationen aufzufangen, die Qualität der empfangenen Informationen zu bewerten und an die Kombinationseinheit im Festnetz weiterzuleiten. Der Gewinn kann umso höher ausfallen, je detaillierter die Qualitätsinformationen sind, die die Kombiniereinheit erhält.

In Abwärtsrichtung wurden zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren der Makrodiversität vorgestellt, die Auswahl-Makrodiversität und der Gleichwellenbetrieb. Im Gleichwellenbetrieb senden mehrere Feststationen gleichzeitig an die Mobilstation, während bei Auswahl-Makrodiversität immer nur eine Station aktiv ist. Im Gleichwellenbetrieb kann die Mobilstation die einfallenden Signale so kombinieren, daß sich die Empfangsleistungen addieren. Dies ist möglich, solange die Feststationen nicht zu weit voneinander entfernt plaziert sind, was für die in dieser Arbeit untersuchten kleinzellularen Netzen vorausgesetzt wird.

Als Vergleichsfall zu den Verfahren der Makrodiversität wurde ein System ohne Makrodiversität herangezogen, in dem die Verbindung zu einer Mobilstation immer über die geographisch nächstgelegene Feststation geführt wird. Eine Auswahl zwischen mehreren Feststationen besteht hier nicht.

Die Leistungsuntersuchung der Makrodiversität wurde mit Hilfe der ereignisgesteuerten Simulationstechnik durchgeführt. Dazu wurde ein Modell des Mobilfunksystems gebildet und ein Computerprogramm entwickelt. Das Modell setzt sich aus einer flexiblen Abbildung des Dienstgebietes mittels einer digitalen Karte, aus der oben erwähnten Modellierung des Funkkanals, aus einer Modellierung des Nachrichtenverkehrs, aus einem Mobilitätsmodell und aus den Algorithmen zur Verbindungsannahmesteuerung und Kanalvergabe zusammen. Alle Teilmodelle werden modular zu einem Gesamtmodell zusammengesetzt. Einzelne Teilmodelle können einfach ausgewechselt und durch andere ersetzt werden. Somit ist das Modell für ergänzende Untersuchungen gut vorbereitet.

Die Ergebnisse der Leistungsuntersuchung der Makrodiversität sind hier noch einmal kurz zusammengefaßt:

Im Vergleich zu einem System ohne Makrodiversität läßt sich die Gebietsabdeckung bei Anwendung der Auswahl-Makrodiversität beträchtlich erhöhen. Eine nochmalige Steigerung ergibt sich bei Einsatz des Gleichwellenbetriebs. Die Steigerung ist umso höher, je mehr Feststationen am Gleichwellenbetrieb beteiligt sind, jedoch nimmt der relative Gewinn mit der Erhöhung der Anzahl gleichzeitig sendender Feststationen ab. Der Einsatz von mehr als drei aktiven Feststationen im Gleichwellenbetrieb lohnt daher kaum.

Für alle Makrodiversitätsverfahren gilt, daß ihr Einsatz umso gewinnträchtiger ist, je größer das Problem der Abschattung aufgrund der natürlichen und baulichen Beschaffenheit des zu versorgenden Gebiets ist. Zusätzlich lohnt sich ihr Einsatz umso mehr, je höher der Netzbetreiber die Abdeckungswahrscheinlichkeit des Dienstgebietes wählt.

Im Gleichwellenbetrieb wird bei mehreren gleichzeitig sendenden Feststationen insgesamt mehr Sendeleistung abgestrahlt als bei Auswahl-Makrodiversität oder im Fall ohne Makrodiversität. Wird die Sendeleistung aller beteiligten Stationen reduziert, um dieselbe Gesamtleistung zu erreichen, geht der Abdeckungsgewinn des Gleichwellenbetriebs verloren. Eine Reduzierung der Sendeleistung der Feststation, die mit der höchsten Leistung an der Mobilstation empfangen wird, ist deshalb bezüglich des Abdeckungsgewinns nicht sinnvoll.

Für die zwei untersuchten zellularen Architekturen ergeben sich bei Anwendung der Makrodiversität keine Unterschiede bezüglich des Abdeckungsgewinns. Die erwähnten Gewinne der Makrodiversitätsverfahren lassen sich in beiden Architekturen gleichermaßen erzielen.

Die höchste Kapazität im interferenzbegrenzten Mobilfunksystem läßt sich bei Anwendung der Auswahl-Makrodiversität erzielen. Die im Gleichwellenbetrieb erreichte Systemkapazität ist wesentlich niedriger als bei Auswahl-Makrodiversität. Bei Einsatz von drei aktiven Feststationen sinkt sie sogar unter die des Vergleichssystems ohne Makrodiversität.

Die durch den Gleichwellenbetrieb erzeugte höhere Interferenz für andere Verbindungen ist die Erklärung für die niedrige erzielte Systemkapazität. Auch durch eine Leistungsanpassung aller Feststationen umgekehrt proportional zur Anzahl der Makrodiversitätszweige läßt sich die Kapazität nicht erhöhen. Die Kapazität wird durch das Signal-Interferenz-Verhältnis und nicht durch die absolute Sendeleistung bestimmt.

Ein Verfahren, das je nach Interferenzlage die Anzahl der Makrodiversitätszweige im Gleichwellenbetrieb variiert, hat das Potential, eine höhere Systemkapazität als der Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Zweigen zu erzielen. Da bei diesem Verfahren aber aufgrund zu aufwendiger Berechnungen keine Optimierung der Ressourcenwahl durchgeführt werden kann, wird es im interessanten Bereich der Blockierwahrscheinlichkeit von unter 10% durch den Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Zweigen und geeigneter Ressourcenevaluierung übertroffen.

Eine Ressourcenevaluierung, die diejenige Ressource an den Feststationen bevorzugt, die die höchste Summe aus Nutz- und Interferenzleistung erzielt, liefert im Gleichwellenbetrieb die höchste Systemkapazität. Bei Auswahl-Makrodiversität dagegen wird die höchste Systemkapazität mit einer Ressourcenevaluierung zur Maximierung der Empfangsleistung erzielt. Sie übertrifft in jedem Fall die des Gleichwellenbetriebs.

Eine entsprechende Ausrüstung mit Sende- und Empfangseinrichtungen vorausgesetzt, ist die Systemkapazität in der zellularen Architektur mit idealen 120-Grad-Richtantennen um mehr als das Dreifache höher als im System mit omnidirektionalen Antennen. Dies wird durch die Interferenzunterdrückung außerhalb des 120-Grad-Antennensektors bewirkt und gilt für alle Makrodiversitätsverfahren gleichermaßen. Die relativen Unterschiede der Verfahren werden durch die Wahl der Architektur nicht beeinflußt.

Um eine möglichst hohe Verbindungsqualität zu erzielen, sollte sowohl im Gleichwellenbetrieb als auch bei Auswahl-Makrodiversität die Ressourcenevaluierung zur Maximierung des Signal-Interferenz-Verhältnisses gewählt werden. Jedoch müssen dann wiederum Abstriche an der Systemkapazität gemacht werden. Eine gleichzeitige Maximierung von Systemkapazität und Verbindungsqualität ist nicht möglich.

Wird die Reduzierung der Systemkapazität in Kauf genommen, kann die höchste Verbindungsqualität durch die Auswahl-Makrodiversität mit Ressourcenevaluierung zur Maximierung des Signal-Interferenz-Verhältnisses erreicht werden. An zweiter Stelle folgt der Gleichwellenbetrieb mit variabler Anzahl an Makrodiversitätszweigen und Leistungsanpassung, dann der Gleichwellenbetrieb mit fester Anzahl an Zweigen und Ressourcenevaluierung zur Maximierung des Signal-Interferenz-Verhältnisses.

Gegenüber der Auswahl-Makrodiversität hat der Gleichwellenbetrieb bei Handover-Vorgängen einen Vorteil. Ein *Soft Handover* kann nur auf diese Weise realisiert werden. Während eines Handover-Vorgangs kann mindestens eine Verbindung zu einer alten Feststation aufrechterhalten werden. Eine Funkverbindung steht somit ununterbrochen zur Verfügung. Der Moment des Umschaltens, den es bei Auswahl-Makrodiversität gibt, entfällt. Allerdings kann auch im Gleichwellenbetrieb nicht immer ein *Soft Handover* durchgeführt werden, da bei ungünstigen Abschattungsverhältnissen auch alle Funkverbindungen abreißen können. Es ist dann ein *Hard Handover* für alle Makrodiversitätszweige nötig. Da ein *Soft Handover* nur mit Anwendung des Gleichwellenbetriebs realisierbar ist, vermindert es die Systemkapazität im Vergleich zur Auswahl-Makrodiversität.

Prinzipiell beeinflußt die Bewegung der Teilnehmer und der damit verbundene Handover-Vorgang nicht die relativen Gewinne der Makrodiversitätsverfahren untereinander. Die höchste Systemkapazität wird immer mit Auswahl-Makrodiversität erreicht. Bei einem empfangsleistungsbasierten Handover-Verfahren für die Auswahl-Makrodiversität kann dieselbe Kapazität wie im statischen System nur bei einer Handover-Schwelle von 0 dB erzielt werden. Jede Erhöhung der Schwelle reduziert zwar die Anzahl der nötigen Handover-Vorgänge, vermindert aber die Systemkapazität und die Verbindungsqualität. Ein spezielles Handover-Verfahren, das eine Verbindungsüberprüfung bei jedem Ortswechsel der Mobilstationen durchführt und ein Handover mit Ressourcenzuweisung gemäß dem jeweiligen Makrodiversitätsverfahren auslöst, kann die Systemkapazität für alle Handover-Verfahren gleichermaßen erhöhen. Dies resultiert aus der Kombination des Handover-Verfahrens mit dem Algorithmus der dynamischen Kanalvergabe, der durch jede Neuzuweisung der Ressourcen eine räumlich engere Wiederverwendung erzielt.

Zusammenfassend läßt sich folgendes feststellen: Der Gleichwellenbetrieb ist besonders geeignet, die Gebietsabdeckung eines zellularen Mobilfunksystems zu erhöhen, während die Auswahl-Makrodiversität die Kapazität des interferenzbegrenzten Systems maximiert. Eine akzeptable Verbindungsqualität kann bei jedem Makrodiversitätsverfahren durch die hier vorgestellten Algorithmen der Verbindungsannahmesteuerung und der dynamischen Kanalvergabe gewährleistet werden. Eine Erhöhung der Verbindungsqualität geht immer zu Lasten der Systemkapazität.

In weiteren Forschungsarbeiten könnten die hier vorgestellten Verfahren der Makrodiversität in realen Umgebungen angewandt werden. Zum Beispiel könnten gemessene Wellenausbreitungsdaten eines Stadtgebiets oder Daten, die über Gebäudedatenbanken mittels Verfahren der Strahlwegsuche erzeugt werden, als digitale Karte in das hier entwickelte Modell eingefügt werden. Mittels der in dieser Arbeit dargelegten Methodik könnte so der erzielbare Makro-

diversitätsgewinn für ein spezielles, abzudeckendes Dienstgebiet exakt ermittelt werden. Der Netzbetreiber kann dann im Einzelfall entscheiden, ob sich bei den vorliegenden Verhältnissen der Einsatz der Makrodiversität trotz höherer Kosten lohnt.

Beim Aufbau eines zellularen Mobilfunknetzes ergibt sich häufig die Problematik der Positionierung der Feststationen. Sie können aus baulichen oder rechtlichen Gründen nicht immer an den Ort gestellt werden, den die gewünschte zellulare Architektur vorgibt. In weiteren Forschungsarbeiten könnten Methoden und Algorithmen zur optimalen Positionierung der Feststationen unter Berücksichtigung der Wellenausbreitung, der Systemkapazität, der Verbindungsqualität und der baulichen und rechtlichen Vorschriften gefunden werden.

Auch im Bereich der Kombination verschiedener Verfahren zur Leistungssteigerung zellularer Mobilfunknetze sind ergänzende Forschungsanstrengungen erfolgsversprechend. Zum Beispiel läßt sich die bereits in der Untersuchung der Architektur mit idealen 120-Grad-Antennen deutlich gewordene hohe Systemkapazität durch Anwendung von adaptiven Antennen noch weiter erhöhen. Eine gemeinsame Anwendung des Verfahrens des räumlichen Multiplex (*space division multiple access*) mit der Technik der Makrodiversität läßt somit eine weitere Leistungssteigerung zellularer Mobilfunksysteme erwarten.

Literatur

[1] Abu-Dayya, A. A.; Beaulieu, N. C. „Outage Probabilities in the Presence of Correlated Lognormal Interferers“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 1, February 1994, pp. 164-173

[2] Abu-Dayya, Adnan A.; Beaulieu, Norman C. „Analysis of Switched Diversity Systems on Generalized-Fading Channels“, IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 11, November 1994, pp. 2959-2966

[3] Abu-Dayya, Adnan A.; Beaulieu, Norman C. „Micro- and macrodiversity NCFSK (DPSK) on shadowed Nakagami-fading channels“, IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 9, September 1994, pp. 2693-2702

[4] Ade, John E. „Some Aspects of the Theory of Simulcast“, Proc. of 32nd IEEE Vehicular Technology Conference, San Diego, CA, USA, May 1982, pp. 133-163

[5] Akyildiz, I. F.; McNair, J.; Ho, J. S. M.; Uzunalioglu, H.; Wang, W. „Mobility Management in Next-Generation Wireless Systems“, Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 8, August 1999, pp. 1347-1384

[6] Alamouti, Siavash M. „A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 16., no. 8, October 1998, pp. 1451-1458

[7] Aldinger, M.; Franz, W.; Held, A.; Kroth, R.; Schreyögg, C.; Sigle, R.; Sinner, C.; Wolf, M. „Wireless ATM LANs in Industrial Environments“, Proc. of ACTS-MCS '97 - Mobile Communications Summit 1997, Aalborg, Denmark, October 7-10, 1997, pp. 363-368

[8] Andersin, Michael „Real-time Estimation of the Signal to Interference Ratio in Cellular Radio Systems“, Proc. of VTC 97 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, Arizona, USA, May 4-7, 1997, pp. 1089-1093

[9] Andreu Vazquez, Monica „Untersuchung der Gebietsabdeckung im zellularen Mobilfunk bei Einsatz der Makrodiversität“, Studienarbeit am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1999

[10] Ariyavisitakul, Sirikiat; Darcie, Thomas E.; Greenstein, Larry J.; Phillips, Mary R.; Shankaranarayanan, N. K. „Performance of simulcast wireless techniques for personal communication systems“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 4, May 1996, pp. 632-643

[11] ATM Forum Technical Committee „Draft baseline text for Wireless ATM Capability Set 1 Specification", ATM Forum BTD-WATM-01.09, Editor: Ravi Raj Bhat, October 19, 1998

[12] Baldwin, J. H.; Bharucha, B. H., Doshi, B. T. „AAL-2 -- A New ATM Adaptation Layer for Small Packet Encapsulation and Multiplexing", Bell Labs Technical Journal, vol. 2, no. 2, Spring 1997, pp. 111-131

[13] Beaulieu, Norman C.; Abu-Dayya, Adnan A.; McLane, Peter J. „Estimating the Distribution of a Sum of Independent Lognormal Random Variables", IEEE Transactions on Communications, vol. 43, no. 12, December 1995, pp. 2869-2873

[14] Bendorf, Holm; Schindele, Friedrich; Heynisch, Bernd; Schaller, Wolfgang „Gleichwellennetz mit Empfängerauswahl für beweglichen Sprech- und Datenfunk", Elektrizitätswirtschaft, vol. 84, no. 13, June 24, 1985, pp. 507-511

[15] Berg, M.; Pettersson, S.; Zander, J. „A Radio Resource Management Concept for „Bunched" Personal Communication Systems", Proc. of MMT 97 - 3rd Workshop on Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Melbourne, Australia, December 1997, pp. 259-271

[16] Berg, Jan-Erik; Bownds, Randall; Lotse, Fredrik „Path Loss and Fading Models for Microcells at 900 MHz", Proc. of VTC 92 - IEEE Vehicular Technology Conference, Denver, CO, USA, May 11-13, 1992, pp. 666-671

[17] Bernhardt, Richard C. „Macroscopic Diversity in Frequency Reuse Radio Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, no. 5, June 1987, pp. 862-870

[18] Bernhardt, Richard C. „RF Performance of Macroscopic Diversity in Universal Digital Portable Radio Communications: Frequency Reuse Considerations", Proc. of. ICC 86 - the 1986 IEEE International Conference on Communications, Toronto, Canada, 1986, pp. 65-71

[19] Bernhardt, Richard C. „RF Performance of Macroscopic Diversity in Universal Digital Portable Radio Communications: Signal Strength Considerations", Proc. of GLOBECOM 85 - the 1985 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, 1985, pp. 1002-1007

[20] Bernhardt, Richard C. Porter, Philip T. „Cost Comparisons of Macroscopic Diversity Architectures for Universal Digital Portable Communications", Proc. of GLOBECOM 85 - the 1985 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, 1985, pp. 1008-1012

[21] Boldt, Marco; Weiss, Ulrich; Sigle, Rolf; Dropmann, Ulrich „Modeling an ATM-Based Access Network for 3rd Generation Mobile Communication Networks", Proc. of VTC'98 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, 18.-21.5.1998, pp. 2590-2593

[22] Borgonovo, Flaminio; Zorzi, Michele; Fratta, Luigi „Slow shadowing and macrodiversity in the Capture-Division Packet Access (CDPA)“, Wireless Networks, vol. 3, no. 2, May 1997, pp. 113-120

[23] Bornkamp, Barbara; Kegel, Adriaan; Prasad, Ramjee „Macro and micro diversity in land-mobile cellular radio telephony networks with discontinuous voice transmission“, Proc. of ICUPC 95 - the 1995 4th IEEE Internat. Conf. on Universal Personal Communications, Tokyo, Japan, November 6-10, 1995, pp. 590-594

[24] Brandao, A. L.; Lopez, L. B.; McLernon, D. C. „Cochannel Interference Estimation for M-ary PSK Modulated Signals“, Wireless Personal Communications, vol. 1, no. 1, pp. 23-32, 1994

[25] Brasche, Götz; Walke, Bernhard „Concepts, Services, and Protocols of the New GSM Phase 2+ General Packet Radio Service“, IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 8, August 1997, pp. 94-104

[26] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A. „Taschenbuch der Mathematik“, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 24. Auflage, 1989, ISBN 3-87144-492-8

[27] Buracchini, Enrico; Muratore, Flavio; Palestini, Valerio; Sinibaldi, Marco „Space Division Multiple Access (SDMA) in mobile radio systems“, CSELT - Technical Reports, vol. XXIV, no. 1, February 1996, pp. 131-148

[28] Cai, Jian; Goodman, David J. „General Packet Radio Service in GSM“, IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 10, October 1997, pp. 122-131

[29] Chia, Stanley „The Universal Mobile Telecommunication System“, IEEE Communications Magazine, December 1992, pp. 54-62

[30] COST-231 European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST 231, „Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands“, Revision 2, The Hague, September 1991

[31] Dallmann, H.; Langermann, H.-J. „Gleichwellenfunknetze“, Funkschau, vol. 1997, no. 9, 1997, pp. 60-63

[32] Das, Sajal K.; Sen, Sanjoy K.; Jayaram, Rajeev „A dynamic load balancing strategy for channel assignment using selective borrowing in cellular mobile environment“, Wireless Networks, vol. 3, no. 5, October 1997, pp. 333-347

[33] Da Silva, Joao Schwarz; Fernandes, Bosco E. „The European Research Program for Advanced Mobile Systems“, IEEE Personal Communications, February 1995, pp. 14-19

[34] Damosso, Eraldo; De Brito, Georges „COST 231 Achievements as a Support to the Development of UMTS: A Look into the Future“, IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 2, February 1996, pp. 90-96

[35] David, K.; Benkner, T. „Digitale Mobilfunksysteme“, B.G. Teubner Verlag Stuttgart, 1996, ISBN 3.-519-06181-3

[36] Donaldson, R. W.; Beasley, A. S. „Wireless CATV Network Access for Personal Communications Using Simulcasting“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 3, August 1994, pp. 666-671

[37] Dropmann, Ulrich „Allocation des ressources dans des systèmes radiomobiles à réservation par paquets“, Thèse, ENST 96 E 012, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 23.05.1996

[38] Dropmann, Ulrich; Lamare, Christian; Lagrange, Xavier; Godlewski, Philippe „Dynamic Channel Allocation for a Micro- and Picocellular System with Overlapping Coverage“, Proc. of Mobile Kommunikation (ITG-Fachtagung) 1995, Neu Ulm, Germany, 26-28.9.95, Editor(s): VDE-Verlag, pp. 173-180

[39] Durwen, Ernst J. „UMTS - Stand und Perspektiven für Europa“, ITG-Fachtagung „Auf dem Weg zur modernen Informations-Infrastruktur“, 18.-19.2.1997, Stuttgart, Germany, ITG-Fachbericht 141, VDE-Verlag, pp. 157-168

[40] Eberspächer, Jörg; Vögel, Hans-Jörg „GSM Global System for Mobile Communication“, 1997, B. G. Teubner Stuttgart, ISBN 3-519-06192-9

[41] EIA/TIA (Electronic/Telephone Industry Association) „Cellular radio-telecommunications intersystem operations“, EIA/TIA, Technical Report IS-41 Rev. C, 1995

[42] Emmer, D.; Humburg, E.; Weber, P.; Weckerle, M. "Measurements of base station two-branch space and polarization diversity reception and a comparison of the diversity gain based on the CDF of signal level and simulations of BER in a GSM system", Proc. of VTC 98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 18-21, 1998, pp. 5-10

[43] ETSI Special Mobile Group (SMG) „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Objectives and overview (UMTS 01.01)“, ETR 271 ed.1 (1996-02), Reference: DTR/SMG-050101U , SMG5 , 19 Pages

[44] ETSI, Special Mobile Group (SMG) „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Network principles“, UMTS 23.05, draft version 0.6.0, February 27, 1997

[45] ETSI, Special Mobile Group 3 (SMG3) „Digital cellular telecommunications system (Phase 2); Mobile Application Part (MAP) specification (GSM 09.02 version 4.17.1), Reference: RE/SMG-030902PR7, ETS 300 599 ed.7 (1998-01), 1998

[46] ETSI „Radio Equipment and Systems (RES); HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 1“, ETS 300 652 ed.1 (1996-10) , Reference: DE/RES-10-01 , Source: RES10 , European Standard, 1996

[47] ETSI, Broadband Radio Access Networks (BRAN) „HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 1; Functional specification“, EN 300 652 V1.2.1 (1998-07), European Standard, 1998

[48] ETSI „Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common Interface (CI); Part 1: Overview", ETS 300 175-1 ed.2 (1996-09), Reference: RE/RES-03027-1, Source: RES3

[49] ETSI „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the chocie of radio transmission technologies of the UMTS (UMTS 30.03 version 3.0.0)", ETSI SMG-5 UMTS 30.03 V3.0.0 (1997-05) DTR/SMG-50402 (3pc0032s.PDF), May 1997

[50] Evans, Jamie S.; Everitt, David „On the Teletraffic Capacity of CDMA Cellular Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 1, January 1999, pp. 153-165

[51] Everitt, D.; Manfield, D. „Performance analysis of cellular mobile communication systems with dynamic channel assignment", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 7, no.8, October 1989, pp. 1172-1180

[52] Fenton, Lawrence F. „The Sum of Log-Normal Probability Distributions in Scatter Transmission Systems", IRE Transactions on Communications Systems, vol. CS-8, no. 1, March 1960, pp. 57-67

[53] Ferrús, Ramon; Díaz, Pilar „On hard/soft handoff and macrodiversity in a CDMA mobile system", Proc. of PIMRC 99 - 10th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Osaka, Japan, September 12-15, 1999, pp. 327-331

[54] Franz, Walter; Younes, Khaled Ben; Sinner, Christian; Sigle, Rolf „Drahtlose ATM-Netze auf dem Weg zum Standard", ntz, vol. 1997, no. 7, July 1997, pp. 54-56

[55] Franz, Walter; Younes, Khaled Ben; Sinner, Christian; Sigle, Rolf „Drahtlose ATM-Systeme", ntz, vol. 1997, no. 6, June 1997, pp. 52-55

[56] Gloss, Bernd; Sigle, Rolf; Weiss, Ulrich „On the Stability of the Contention Mechanism of PRMA++", Proc. of ITC-16 - the 16th International Teletraffic Congress, Edinburgh, UK, June 7-11, 1999, Elsevier Science, Amsterdam, ISBN 0-444-50268-8, pp. 1061-1071

[57] González, A. G.; Aragón, P. R.; Roa, M. G. „Radio on optical fibre repeaters for cellular mobile communications", Comunicaciones de Telefónica I+D, vol. 1999, no. 17, June 1999, pp. 26-34

[58] Graf, F.; Fischer, P.; Humburg, E.; Lüders, C. „Technical Potential and Economic Efficiency of Macro Diversity in a GSM Mobile Radio Network", Proc. of EPMCC 97 - 2nd European Personal Mobile Communications Conference / 3. ITG-Fachtagung „Mobile Kommunikation", Bonn, Germany, 30.9.-2.10.1997, Editor(s): ITG-Fachbericht 145, and VDE-Verlag GmbH, Berlin, pp. 127-134

[59] Gray, Gary David „The Simulcasting Technique: An Approach to Total-Area Radio Coverage", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-28, no. 2, May 1979

[60] Greenstein, Larry J. et al. „Microcells in Personal Communications Systems“, IEEE Communications Magazine, December 1992, pp. 76-88

[61] Grimlund, Olle; Gudmundson, Björn „Handoff strategies in microcellular systems“, Proc. of VTC 91 - the 41st IEEE Vehicular Technology Conference, St.Louis, MO, USA, May 19-22, 1991, pp. 505-510

[62] GSM Technical Specifications, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Sophia Antipolis, 1995

[63] Gudmundson, M. „Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems“, Electronics Letters, vol. 27, no. 23, November 7th, 1991, pp. 2145-2146

[64] Harley, Philip „Short Distance Attenuation Measurements at 900 MHz and 1.8 GHz Using Low Antenna Heights for Microcells“, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 7, no. 1, January 1989, pp. 5-11

[65] Hata, M. „Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-29, no.3, pp. 317-325, August 1980

[66] Hess, Garry C. „Handbook of Land-Mobile Radio System Coverage“, 1998, Artech House, Inc., Boston, New York, ISBN 0-89006-945-x

[67] Heidemann, R.; Hofstetter, R.; Schmuck, H.; Lane, P. „Remoting of UMTS- and MBS-antennae by fibre optic technology“, Proc. of RACE 94 - RACE Mobile Telecommunications Workshop, Amsterdam, Netherlands, May 17-19, 1994, pp. 103-110

[68] Hong, D.; Rappaport, S. S. „Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-35, no. 3, August 1986, pp. 77-92

[69] IEEE 802.11-1999 Approved Draft (Revisions to IEEE Std 802.11-1997) Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Draft Standard, 1999

[70] IEEE 802.11-1997 Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: „Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications“, IEEE Standard, 1997

[71] IMT-2000 „Standards Efforts of the ITU“, Special Issue on IMT-2000, IEEE Personal Communications Magazine, vol. 4, no. 4, August 1997

[72] ITU-R „International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)“, ITU-R Recommendation M.687-2, 1998

[73] ITU-T Recommendation I.363.2 „B-ISDN ATM Adaptation Layer Type 2 Specification“, Ed.: Pietro Schicker, draft version, February 1997

[74] Jabbari, B.; Zhou, Y.; Hillier, F. „Random Walk Modeling of Mobility in Wireless Networks", Proc. of VTC 98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 18-21, 1998, pp. 639-643

[75] Jaffré, P.; Pénard, E.; Blondeau, O. „Intégration de services DECT dans le réseau de distribution optique : analyse du déport optique", L'écho des RECHERCHES, CNET, ENST, France Telecom, vol. 1997, no. 168-169, 2e & 3e trimestres 1997, pp. 13-22

[76] Jakes, William C. „Microwave mobile communications", John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-43720, 1974

[77] Jamalipour, Abbas „Low earth orbital satellites for personal communication networks", 1998, Artech House, Inc., ISBN 0-89006-955-7

[78] Jessen, Doris „Mobilkommunikation verändert Wirtschaft und Gesellschaft", Datacom, vol. 15, no. 1, Januar 1998, pp. 52-54

[79] Jimenez Delgado, J.; Moreno Camacho, J.; Moreno Gonzalez, J. A.; Alonso Frech, E. „Evolution in mobile services: The UMTS", Comunicaciones de Telefonica I+D, vol. 8, no. 1&2, January-December 1997, pp. 14-29

[80] Jones, Brendan C. „Cochannel Reuse Distributions in DCA Microcellular Systems with In-Cell Reuse Constraint", Proc. of MMT 97 - 3rd Workshop on Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Melbourne, Asutralia, December 1997, pp. 233-246

[81] Jordan, Scott „Resource allocation in wireless networks", Journal of High Speed Networks, vol. 1996, no. 5, 1996, pp. 23-34

[82] Kahwa, Tomson Joe; Georganas, Nicolaos D. „A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale Cellular-Structured Mobile Communication Systems", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-26, no. 4, April 1978, pp. 432-438

[83] Karlsson, Magnus; Guerin, Nicolas; Laaksonen, Niina; Ostermayer, Gerald „Evaluation of Handover Algoritms for Packet Transmissions in WCDMA", Proc. of VTC 99 - IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, TX, USA, May 16-19, 1999

[84] Klein, Anja; Steiner, Bernd; Steil, Andreas „Known and novel diversity approaches as a powerful means to enhance the performance of cellular mobile radio systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 9, December 1996, pp. 1784-1795

[85] Kröner, H. „Verkehrssteuerung in ATM-Netzen - Verfahren und verkehrstheoretische Analyse zur Zellpriorisierung und Verbindungsannahme", 62. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart 1995

[86] Kühn, P. J. „Nachrichtenverkehrstheorie", Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Paul J. Kühn, Universität Stuttgart, Ausgabe 1995/96

[87] Kühn, P. J.; Raith, T.; Tran-Gia, P. „Methodik der stationären Systemsimulation", Unterlagen zur Vorlesung, in [86]

[88] Kuri, Jürgen „Wellensalat - 11 Lösungen für drahtlose Netze im Test", c't - Magazin für Computertechnik, Heft 6, 15.3.-28.3.1999, pp. 240-255

[89] Lagrange, Xavier „Multitier cell design", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 8, August 1997, pp. 60-64

[90] Lagrange, Xavier „Teletraffic analysis of a hierarchical cellular network", Technical Report 95D001, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Département Réseaux, ENST Paris, 1995

[91] Landstorfer, F. M. „Wave Propagation Models for the Planning of Mobile Communication Networks", Proc. of the 29th European Microwave Conference (EuMC), Munich, Germany, October 4-8, 1999, pp. 1-6

[92] Lea, Chin-Tau „A new network architecture for wireless communications", Proc. of PIMRC 96 - IEEE Personal, Indoor, and Mobile Communications Conference, Oct 15-18, 1996, Editor(s): IEEE, Taipei, Taiwan

[93] Lea, Chin-Tau „Cellular devices, systems and methods using intercell macro-diversity and dynamic channel allocation", US Patent US5586170, Georgia Tech Research Corporation, Atlanta, GA, December 17, 1996

[94] Lea, Chin-Tau; Wang, Li-Chun „A New Network Architecture For Wireless Communications", International Journal of Wireless Information Networks, vol. 5, no. 1, January 1998, Plenum Publishing Company, New York

[95] Lee, Chin-Chun; Steele, Raymond „Effect of Soft and Softer Handoffs on CDMA System Capacity", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 47, no. 3, August 1998, pp. 830-841

[96] Lee, William C. Y. „Smaller Cells for Greater Performance", IEEE Communications Magazine, November 1991, pp. 19-23

[97] Lee, William C. Y. „Mobile communications design fundamentals", 1993, Editor(s): John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-57446-5

[98] Leung, Kin K.; Massey, William A.; Whitt, Ward „Traffic Models for Wireless Communication Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, no. 8, October 1994, pp. 1353-1364

[99] Mac Donald, V. H. „The Cellular Concept", Bell System Technical Journal, vol. 58, no. 1, January 1979, pp. 15-41

[100] Mademann, Frank „General Packet Radio Service - a Packet Mode Service within the GSM", Proc. of the XVth Internat. Switching Symposium ISS'95, Berlin, Germany, 23.-28.4.1995, Editor(s): VDE Verlag, pp. 36-40

[101] Madfors, Magnus; Wallstedt, Kenneth; Magnusson, Sverker; Olofsson, Hakan; Backman, Per-Ola; Engstrom, Stefan „High capacity with limited spectrum in cellular systems", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 8, August 1997, pp. 38-45

[102] Marchent, Brian G.; McTiffin, M. J. „Handover and Macro Diversity for 3rd Generation Mobile Systems within ATM Fixed Networks", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 96, London, England, 18.-22.11.1996, IEEE 0-7803-3336-5/96

[103] McMillan, David „Traffic Modelling and Analysis for Cellular Mobile Networks", Proc. of ITC-13 - the 13th International Teletraffic Congress, Copenhagen, Denmark, 1991, pp. 627-632

[104] Mihailescu, C.; Lagrange, X.; Godlewski, Ph.; Acx, A. G. „Dynamic Resource Allocation in Locally Centralized Cellular Systems", Proc. of VTC 98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 18-21, 1998, pp. 1695-1699

[105] Mitts, Hakan „Implications of Macro Diversity on UMTS / B-ISDN Integration", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 96, London, England, 18.-22.11.1996, IEEE 0-7803-3336-5/96

[106] „Data Bank", Mobile Communications International, September 1998

[107] „Data Bank", Mobile Communications International, December/January 1999/2000

[108] Mouly, Michel; Pautet, Marie-Bernadette „Current Evolution of the GSM System", IEEE Personal Communications, October 1995, pp. 9-19

[109] Mouly, Michel; Pautet, Marie-Bernadette „The GSM System for Mobile Communications", 1992, Editor(s): Mouly,M.; Pautet, M.-B., ISBN 2-9507190-0-7, 49, rue Louisie Bruneau, F-91120 Palaiseau, pp. 701

[110] Mui, Shou Y. „A simulcast UHF terrestrial radio network", IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 2/3/4, Feb/March/April 1994, pp. 1460-1464

[111] Nasell, Ingemar „Some Properties of Power Sums of Truncated Normal Random Variables", Bell System Technical Journal, November 1967, pp. 2091-2110

[112] Ojanperä, Tero „Overview of reserach activities for third generation mobile communication", Wireless Communications - TDMA vs. CDMA (Invited talks of PIMRC'97), 1997, Editor(s): Glisic, S.G., and Leppänen, P.A., Kluwer Academic Publishers, pp. 415-446

[113] Okumura, T.; Ohmori, E.; Fukuda, K. „Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service", Review Electrical Communication Laboratory, vol. 16, no. 9-10, pp. 825-873, September-October 1968

[114] Östling, Per-Erik „Handover with simulcasting", Proc. of VTC 92 - 42nd IEEE Vehicular Technology Conference, Denver, USA, May 1992, pp. 823-826

[115] Östling, Per-Erik „Performance of MMSE linear equalizer and decision feedback equalizer in single-frequency simulcast environment", Proc. of VTC 93 - 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, Secaucus, NJ, USA, May 18-20, 1993, pp. 629-632

[116] Padgett, Jay E. „Overview of Wireless Personal Communications", IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 28-41

[117] Pandya, Raj; Grillo, Davide; Lycksell, Edgar; Mieybegue, Philippe; Okinaka, Hideo; Yabusaki, Masami „IMT-2000 standards: Network aspects", IEEE Personal Communications, vol. 4, no. 4, August 1997, pp. 20-29

[118] Papen, Wolfgang „Makrodiversität und Signalkombination in zellularen digitalen Mobilfunksystemen", Dissertation IND-Aachen, Aachener Beiträge zu Digitalen Nachrichtensystemen, Band 4, Januar 1996, Editor(s): Prof. Dr.-Ing. Peter Vary, Inst. f. Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung, RWTH Aachen, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Pontstr. 96, D-52062 Aachen, ISBN 3-86073-433-3

[119] Papen, Wolfgang „Improved soft handoff and macro-diversity for mobile radio", Proc. of ICC 95 - the 1995 IEEE Internat. Conf. on Communications, Seattle, USA, June 18-22, 1995, pp. 1828-1833

[120] Papen, Wolfgang „Uplink performance of a new macro-diversity cellular mobile radio architecture", Proc. of PIMRC 95 - the 1995 6th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Toronto, Canada, 1995, pp. 1118-1122

[121] Parsons, J. D.; Gardiner, J. G. „Mobile Communication Systems", 1989, Editor(s): Blackie (London) and Halsted Press (USA), ISBN 0-216-92261-5

[122] Perkins, C. E. „Mobile IP", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 5, May 1997, pp. 84-99

[123] Persson, Bengt; Eriksson, Hangkan; Bodin, Roland „System and method for providing macrodiversity TDMA radio communications", US Patent, US5577047, November 19, 1996, Telefonaktiebolaget LM Ericsson, Stockholm, Sweden

[124] Peters, Marco; Reyniers, Guy; Fleming, Gary; Mellody, Martin „The Virtual Home Environment (VHE) - Basic Concepts & Principals", Proc. of ACTS Mobile Communications Summit 99, Sorrento, Italy, June 8-11, 1999

[125] Pettersson, Stefan „A comparison of radio resource management strategies in bunched systems for indoor communications", Proc. of VTC 99 - IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, TX, USA, May 16-19, 1999

[126] Plenge, Christian „Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme", Dissertation RWTH Aachen, Band 10, Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, 9.7.1998, Editor(s): Prof. Dr.-Ing. B. Walke, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen

[127] Pollini, Gregory P. „Trends in Handover Design“, IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 3, March 1996, pp. 82-90

[128] Pooch, U. W.; Wall, J. A. „Discrete Event Simulation“, CRC Press, Inc., 1993, ISBN 0-8493-7174-0

[129] Prasad, Ramjee „Universal Wireless Personal Communications“, 1998, Editor(s): Artech House, Boston, London, ISBN 0-89006-958-1, pp. 637

[130] Proakis J. G. „Digital Communications“, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-113814-5

[131] Raitola, Mika; Hottinen, Ari; Wichman, Risto „Transmission Diversity in Wideband CDMA“, Proc. of VTC 99 - IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, TX, USA, May 16-19, 1999, Editor(s): IEEE, pp. 5

[132] Rajagopalan, Bala „Mobility management in integrated wireless-ATM networks“, Mobile Networks and Applications (MONET), vol. 1, no. 3, Editor(s): Baltzer Science Publishers and ACM, 1996, pp. 273-285

[133] Rappaport, Theodore S. „Wireless Communications - Principles & Practice“, IEEE Press, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1996, ISBN 0-13-461088-1

[134] Raychaudhuri, D. „Wireless ATM: An enabling technology for multimedia personal communication“, Wireless Networks, vol. 1996, no. 2, 1996, pp. 163-171

[135] Ruggieri, M.; Graziosi, F.; Pratesi, M.; Santucci, F. „Modeling of handover initiation in a multicell system scenario“, Proc. of VTC 96 - the 46th IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, GA, USA, April 28- May 1, 1996, pp. 1505-1509

[136] Safak, Aysel „Statistical Analysis of the Power Sum of Multiple Correlated Log-Normal Components“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 1, February 1993, pp. 58-61

[137] Sadri, Ali S.; Dholakia, Ajay „Equalization, Coding, and Diversity Combining for TDMA Digital Cellular Systems“, Proc. of VTC 95 - the 1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference, Chicago, Illinois, July 25-28, 1995, pp. 404-408

[138] Schieder, Andreas „Entwicklung von GSM zu UMTS (HSCSD und GPRS)“, ITG-Fachtagung Mobilfunk - Stand der Technik und Zukunftspesrpektiven, Osnabrück, D, 17.-18.6.1998, Editor(s): E.Pohl, VDE Verlag, and ITG-Fachbericht 151, pp. 33-37

[139] Schopp, Michael „Mobilität in Kommunikationsnetzen - Konzepte, Modellierung und Leistungsbewertung“, Dissertationsschrift, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, eingereicht 3.12.1999

[140] Schulte, Gerrit „Wellenreiter - Technik und Standardisierung von drahtlosen Netzen“, c't Magazin für Computertechnik, vol. 1999, no. 6, 15.3.-28.3.1999, Heise Verlag, pp. 222-238

[141] Schwartz, S. C.; Yeh, Y. S. „On the Distribution Function and Moments of Power Sums With Log-Normal Components", Bell System Technical Journal, vol. 61, no. 7, September 1982, pp. 1441-1462

[142] Siegmar, Heike „Untersuchung von Handover-Verfahren im Mobilfunk", Diplomarbeit, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, April 2000

[143] Sinner, Christian; Sigle, Rolf „Towards Wireless Multimedia Communications - Current Standards and Future Directions", Internat. Journal of Wireless Information Networks, vol. 5, no. 1, January 1998, pp. 61-73

[144] Stoll, Detlef; Bogner, Werner „Mit 155 Mibt/s und ATM-Technik per Funkverbindung zum Teilnehmer", ntz, vol. 1997, no. 4, April 1997, pp. 64-67

[145] Stüber, Gordon, L. „Principles of Mobile Communication", 3rd ed., 1999, Editor(s): Kluwer Academic Publisher

[146] Taaghol, P.; Tafazolli, R.; Evans, B. G. „Air interface solution for multi-rate general packet radio service for GSM/DCS", Proc. of VTC'97 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, AZ, USA, May 4-7, 1997, pp. 1263-1267

[147] Takagi, H.; Sakamaki, K.-I-; Miyashiro, T. „Call Loss and Forced Termination Probabilities in Cellular Radio Communication Networks with Non-Uniform Traffic Conditions", IEICE Transactions on Communications, vol. E82-B, no. 9, November 1999, pp. 1496-1504

[148] Tekinay, Sirin; Jabbari, Bijan „Handover and Channel Assignment in Mobile Cellular Networks", IEEE Communications Magazine, November 1991, pp. 42-46

[149] TIA/EIA/ IS-95 Interim Standard, „Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System", July 1993, Telecommunications Industry Association

[150] Tozer, T. C.; Verdin, D.; French, P. „Maximizing coverage in multi-transmitter digital simulcast", Proc. of MILCOM 95 - IEEE Military Communications Conference 1995, San Diego, CA, USA, November 5-8, 1995, pp. 636-640

[151] Tran-Gia, Phuoc „Analytische Leistungsbewertung verteilter Systeme", 1996, Springer Verlag, ISBN 3-540-60666-1

[152] Tripathi, N. D.; Reed, J. H.; VanLandingham, H. F. „Handoff in Cellular Systems", IEEE Personal Communications, vol. 5, no. 6, December 1998, pp. 26-37

[153] Turkmani, A. M. D „Performance evaluation of a composite microscopic plus macroscopic diversity system", IEE Proceedings, Part I: Communications, Speech and Vision, vol. 138, no. 1, February 1991, pp. 15-20

[154] Turkmani, A. M. D. „Probability of error for M-branch macroscopic selection diversity", IEE Proceedings, Part I: Communications, Speech and Vision, vol. 139, no. 1, February 1992, pp. 71-78

[155] Tuttlebee, Walter H. W. „Cordless Telecommunications Worldwide", 1997, Springer-Verlag London, ISBN 3-540-19970-5

[156] Tuttlebee, Walter H. W. „Cordless Personal Communications", IEEE Communications Magazine, December 1992, pp. 42-53

[157] Viterbi, Andrew J.; Viterbi, Audrey M.; Gilhousen, Klein S.; Zehavi, Ephraim „Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, no. 8, October 1994, pp. 1281-1288

[158] Walke, Bernhard „Mobilfunknetze und ihre Protokolle", B. G. Teubner, Stuttgart, ISBN 3-519-06430-8, 1998

[159] Wang, J. Z. „A Fully Distributed Location Registration Strategy for Universal Personal Communication Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no. 6, August 1993, pp. 850-860

[160] Wang, L.-C.; Lea, C.-T. „Macrodiversity cochannel interference analysis", Electronics Letters, vol. 31, no. 8, 13th April 1995, pp. 614-616

[161] Wang, L.-C.; Chawla, K.; Greenstein, L. J. „Performance Studies of Narrow-Beam Trisector Cellular Systems", Proc. of VTC 98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 18-21, 1998, pp. 724-730

[162] Wang, Li-Chun; Stüber, Gordon L.; Lea, Chin-Tau „Effects of Rician Fading and Branch Correlation on a Local-Mean-Based Macrodiversity Cellular System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 2, March 1999, pp. 429-436

[163] Wang, Li-Chun; Stüber, Gordon L.; Lea, Chin-Tau „Effects of Rician Fading and Branch Correlation on a Local-Mean-Based Macrodiversity Cellular System", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 96, London, England, 18.-22.11.1996, IEEE 0-7803-3336-5/96

[164] Weiss, Ulrich „Gebietsabdeckung, Systemkapazität und Verbindungsqualität in einem Mobilfunksystem mit Makrodiversität", 6. Berichtskolloquium des GK PVS - Graduiertenkollegs Parallele und Verteilte Systeme, Stuttgart, Germany, 2.7.1999, pp. 19-28

[165] Weiss, Ulrich „Designing Macroscopic Diversity Cellular Systems", Proc. of VTC'99 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, Texas, USA, 16.-20.5.1999, pp. 2054-2058

[166] Weiss, Ulrich „Improving Coverage and Link Quality by Macroscopic Diversity", Proc. of EPMCC 99 - the 3rd European Personal Mobile Communications Conference, Paris, France, March 9-11, 1999, pp. 268-273

[167] Weiss, Ulrich „Makrodiversität in der Mobilkommunikation“, 5. Berichtskolloquium des GK PVS - Graduiertenkollegs Parallele und Verteilte Systeme, Stuttgart, Germany, 3. Juli 1998, pp. 83-90

[168] Weiss, Ulrich; Dropmann, Ulrich; Godlewski, Philippe „Admission Control Gurantee-ing Quality of Service in Packet Access based Pico-Cellular Networks“, Proc. of the 1996 ACTS Mobile Telecommunications Summit (ACTS 96), Granada, Spain, Novem-ber 27-29, 1996, pp. 204-210

[169] Weiss, Ulrich „Einsatz von Makrodiversität in der Breitband-Mobilkommunikation“, 4. Berichtskolloquium des GK PVS - Graduiertenkollegs Parallele und Verteilte Systeme, Stuttgart, Germany, 13.6.1997, pp. 71-81

[170] Weiss, Ulrich „Admission control in pico-cellular environments for packet access proto-cols“, Technical report ENST 96 D 004, March 1996, Editor(s): Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST) Paris, Département Réseaux, Groupe Accès et Sécurité, 46 rue Barrault, F-75634 Paris Cedex 13

[171] Winters, Jack H. „The Diversity Gain of Transmit Diversity in Wireless Systems with Rayleigh Fading“, Proc. of. ICC 94 - Int. Conf. on Communications, New Orleans, LA, USA, May 1-5, 1994, IEEE 0.7803-1825-0/94, pp. 1121-1125

[172] Yeh, Yu-Shuan Schwartz, Stuart C. „Outage Probability in Mobile Telephony Due to Multiple Log-Normal Interferers“, IEEE Transactions on Communications, vol. COM-32, no. 4, April 1984, pp. 380-388

[173] Yeh, Yu-Shuan Wilson, Joanne C.; Schwartz, Stuart C. „Outage Probability in Mobile Telephony with Directive Antennas and Macrodiversity“, IEEE Transactions on Vehicu-lar Technology, vol. 33, no. 3, August 1984, pp. 123-127 und IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 2, no. 4, July 1984, pp. 507-511

[174] Zander, Jens „Radio Resource Management in Next Generation Personal Communica-tion Systems“, Proc. of MMT 97 - 3rd Workshop on Multiaccess, Mobility and Teletraf-fic, Melbourne, Australia, December 1997, pp. 1-11

[175] Zürbes, Stefan „Analyse und Optimierung digitaler Mobilfunksysteme mit Gleich-wellenversorgung“, Dissertation IND Aachen, Aachener Beiträge zu Digitalen Nach-richtensystemen, Band 7, Februar 1997, Editor(s): Prof. Dr.-Ing. Peter Vary, Inst. f. Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung, RWTH Aachen, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Pontstr. 96, D-52062 Aachen, ISBN 3-86073-436-9

[176] Zürbes, Stefan; Papen, Wolfgang „Versorgungswahrscheinlichkeit und Signalkombina-tion in zellularen Mobilfunksystemen mit Makrodiversität“, Proc. of Mobile Kommu-nikation (ITG-Fachtagung) 95, Neu Ulm, Germany, 26-28.9.1995, Editor(s): VDE-Verlag, pp. 289-300

[177] Zürbes, Stefan; Papen, Wolfgang; Schmidt, Werner „A New Architecture for Mobile Radio with Macroscopic Diversity And Overlapping Cells“, Proc. of PIMRC 94 Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Den Haag, Holland, September 18-22, 1994, pp. 640-644

Anhang A

Berechnung des Signal-Interferenz-Verhältnisses bei Abschattung

Im folgenden wird für ein zellulares System mit fester Kanalvergabe die Verteilungsfunktion $F(x) = \text{Prob}(\text{CIR} \leq x)$ des Signal-Interferenz-Verhältnisses CIR berechnet. Für einen festen Wert x=q, dem sogenannten Schutzabstand (*protection ratio*), wird *F(q)* auch als Ausfallwahrscheinlichkeit (*outage probability*) bezeichnet. Sollte das Signal-Interferenz-Verhältnis nämlich unter diesen Wert fallen, fällt die Verbindung aus, da die empfangenen Daten nicht mehr dekodiert werden können. Im GSM z. B. beträgt der nötige Schutzabstand 10 lg(q)=9 dB (s. Kapitel 2)[1].

Im Gegensatz zu den einfachen Abschätzungen basierend auf der rein distanzabhängigen Dämpfung der Signalleistung in Kapitel 2 wird hier das Phänomen der Abschattung mitberücksichtigt.

Die Verteilungsfunktion *F(x)* des Signal-Interferenz-Verhältnisses ist definiert als

$$F(x) = \text{Prob}(\text{CIR} \leq x) = \text{Prob}\left(\left\{\frac{C}{\sum_i I_i}\right\} \leq x\right) \qquad \text{(A-1)},$$

mit C der Nutz-Empfangsleistung und I_i der Stör-Empfangsleistung des Störers i ($i \in \mathbb{N}$).

Die Empfangsleistung eines der Abschattung unterliegenden Signals läßt sich als log-normal verteilte Zufallsvariable beschreiben (siehe Kapitel 2.2.3). Die log-normal Verteilung gibt die Verteilung der Zufallsvariable X=exp(Y) an, wenn Y eine normal verteilte Zufallsvariable mit Mittelwert m und Standardabweichung s ist. Die Verteilungsdichtefunktion der log-normal verteilten Zufallsvariablen kann geschrieben werden als

1. 'lg' ist der Logarithmus zur Basis 10, 'ln' der Logarithmus zur Basis e.

$$g(x) = \frac{1}{x \cdot s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x)-m)^2}{2s^2}\right) \qquad \text{(A-2).}$$

Es ist zu beachten, daß s und m in Gleichung (A-2) der Mittelwert und die Standardabweichung der korrespondierenden Normalverteilung sind. Die log-normal verteilte Zufallsvariable hat den Mittelwert $r = \exp(m)\exp(s^2/2)$ und die Standardabweichung $D = \sqrt{\exp(2m+s^2)[\exp(s^2)-1]}$ [52].

Da im Mobilfunksystem sowohl das Nutzsignal als auch die Störsignale der Abschattung unterliegen, sind sowohl C als auch die einzelnen I_i log-normal verteilte Zufallsvariablen. In einem gleichmäßig bebauten Gebiet kann die Standardabweichung für alle Zufallsvariablen als gleich angenommen werden. Ihre Mittelwerte unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Distanzen zwischen Sender und Empfänger jedoch deutlich. Sie lassen sich aus der distanzabhängigen Dämpfung z. B. nach Gleichung (2-16) bestimmen.

Bei der folgenden Berechnung wird vom schlimmsten Fall ausgegangen. Die Mobilstation befindet sich am Zellrand, also in Entfernung R (Zellradius) von der sie bedienenden Feststation. Es sind jeweils alle sechs am nächsten liegenden Gleichkanalstörer aktiv. Störer in größerer Entfernung tragen aufgrund der starken distanzabhängigen Dämpfung mit Faktor γ=3...4 nur noch gering zur Störleistung bei und werden deshalb vernachlässigt. Alle Feststationen senden mit derselben, festen Sendeleistung. Die Nutz- und die Störempfangsleistungen werden als unabhängig voneinander angenommen. Betrachtet wird die Abwärtsstrecke von den Feststationen zur Mobilstation.

Das Problem bei der Auswertung von Gleichung (A-1) ist, daß kein geschlossener Ausdruck für die Summe $\sum I_i$ von log-normal verteilten Zufallsvariablen bekannt ist. Jedoch haben analytische und simulative Untersuchungen gezeigt, daß die Summe einer begrenzten Zahl von log-normal verteilten Zufallsvariablen wieder durch eine log-normal verteilte Zufallsvariable mit angepaßtem Mittelwert und Standardabweichung angenähert werden kann [52,66,111,141]. Die beiden meist gebrauchten Methoden zur Bestimmung der Summenvariable sind die Fenton-Wilkinson Methode [52] und die Schwartz-Yeh Methode [141,173]. Beide Methoden sind für unabhängige log-normal verteilte Zufallsvariablen anwendbar. Erweiterungen für korrelierte Zufallsvariablen finden sich in [1,136]. Im Gegensatz zur häufig geäußerten Meinung, daß die Fenton-Wilkinson Methode nur für Standardabweichungen kleiner als 4 dB anwendbar ist und für größere Standardabweichungen die Schwartz-Yeh Methode geeigneter ist [129], wurde von Beaulieu et al. [13,1] nachgewiesen, daß die Fenton-Wilkinson Methode in den meisten praktisch interessanten Fällen bei der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit vorzuziehen ist. Dieser Argumentation folgend, wird im weiteren die Fenton-Wilkinson Methode angewendet.

Da es in der Praxis üblich ist, die Signal-Interferenz-Verhältnisse in Dezibel anzugeben, werden die folgenden Berechnungen im logarithmischen Maßstab durchgeführt. Dabei kann ausgenutzt werden, daß eine log-normal verteilte Zufallsvariable nach Transformation in den logarithmischen Maßstab normal verteilt ist. Zur besseren Unterscheidung werden die Zufallsvariablen im logarithmischen Maßstab mit *dB* bzw. *dBm* gekennzeichnet.

Es sei also die gewünschte Signalleistung C^{dBm} (in dBm) am Empfänger der Mobilstation eine normal verteilte Zufallsvariable mit Mittelwert m_c^{dBm} (in dBm) und Standardabweichung s_c^{dB} (in dB). Außerdem sei die Summen-Störleistung I_{Sum}^{dBm}, die sich im linearen Maßstab als Summe der log-normal verteilten Empfangsleistung der Einzelstörer I_i ergibt, näherungsweise normalverteilt mit den Parametern m_{Sum}^{dBm} und s_{Sum}^{dB}.

Sind alle I_i (i=1,...,Z) voneinander unabhängig und haben ihre korrespondierenden Normalverteilungen dieselben Standardabweichungen $s_i^{dB} = s_I^{dB}, \forall i = 1, \ldots, Z$ (aber unterschiedliche Mittelwerte m_i^{dBm}), dann ergeben sich m_{Sum}^{dBm} und s_{Sum}^{dB} nach Fenton-Wilkinson zu

$$s_{Sum}^{dB} = k\sqrt{\ln\left(\frac{\left(\exp\left(\left(\frac{s_I^{dB}}{k}\right)^2\right)-1\right)\sum_{i=1}^{Z}\exp\left(\frac{2m_i^{dBm}}{k}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{Z}\exp\left(\frac{m_i^{dBm}}{k}\right)\right)^2}+1\right)} \tag{A-3}$$

$$m_{Sum}^{dBm} = k\left(\frac{(s_I^{dB})^2-(s_{Sum}^{dB})^2}{2k^2}+\ln\left(\sum_{i=1}^{Z}\exp\left(\frac{m_i^{dBm}}{k}\right)\right)\right) \tag{A-4},$$

wobei k=10/ln(10) der Umrechnungsfaktor von Dezibel (Logarithmus zur Basis 10) in natürliche Einheiten (Logarithmus zur Basis e) ist [66].

Damit ergibt sich für die Verteilungsfunkion des Signal-Interferenz-Verhältnisses

$$\begin{aligned} F(x^{dB}) &= \text{Prob}(\{C^{dBm} - I_{Sum}^{dBm}\} \le x^{dB}) \\ &= 1 - Q\left(\frac{x^{dB} - m_c^{dBm} + m_{Sum}^{dBm}}{\sqrt{(s_c^{dB})^2 + (s_{Sum}^{dB})^2}}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{x^{dB} - m_c^{dBm} + m_{Sum}^{dBm}}{\sqrt{(s_c^{dB})^2 + (s_{Sum}^{dB})^2}}\right) \end{aligned} \tag{A-5}$$

mit x^{dB}=10lg(x), $Q(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\alpha}^{\infty}\exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right)du$ und dem Wahrscheinlichkeitsintegral der normierten und zentrierten Normalverteilung $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right)du$.

Die Mittelwerte der Störleistungen werden mit Hilfe der Clustergröße N aus Gleichung (2-24) berechnet zu

$$m_i^{dBm} = 10lg\left(c\frac{1}{(R\sqrt{3N})^{\gamma}}\right), \text{ für i=1,...,Z=6} \quad \text{(A-6)}$$

und der Mittelwert der Signalleistung am Zellrand

$$m_c^{dBm} = 10lg\left(c\frac{1}{R^{\gamma}}\right) \quad \text{(A-7)},$$

mit c einer Konstante in Abhängigkeit von der Sendeleistung und den Antennengewinnen (siehe Kapitel 2.2.3) und γ dem Dämpfungskoeffizienten. Dabei kann wie in Gleichung (2-26) die Distanz zwischen den umliegenden sechs Feststationen und der Mobilstation mit D angenähert werden. Berechnungen mit genauen Distanzen am Beispiel N=7 ergeben nur minimale Unterschiede.

Für Tabelle 2-1 (Kapitel 2.3.4.1) interessiert der minimale CIR-Wert, der am Zellrand in 90% der Fälle erreicht wird (Versorgungswahrscheinlichkeit von 90%). Die geduldete Ausfallwahrscheinlichkeit darf also nur 10% betragen:

$$\text{Prob}(\{C^{dBm} - I_{Sum}^{dBm}\} \leq x^{dB}) = 0{,}1 \quad \text{(A-8)}.$$

Mit den tabellierten Werten für $\Phi(z)$ [26] ergibt sich das 10%-Quantil zu -1.28 und somit

$$x^{dB} = (-1{,}28)\sqrt{(s_c^{dB})^2 + (s_{Sum}^{dB})^2} + m_c^{dBm} - m_{Sum}^{dBm} \quad \text{(A-9)}.$$

In Tabelle 2-1 sind die Standardabweichungen sowohl für das gewünschte Signal als auch für die sechs Störer zu 6 dB angenommen.

In [1] werden ähnliche Rechenschritte wie hier verwendet, um die Ausfallwahrscheinlichkeit bei korrelierten Störsignalen zu berechnen. Allerdings wird eine andere Definition des Wiederverwendungsfaktors angewandt.

Das Vorgehen zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. des Schutzabstandes für die Aufwärtsstrecke läßt sich analog der hier gezeigten Methode durchführen. Da die Übertragungspfade auf der Aufwärts- und Abwärtsstrecke bei gleicher Frequenz reziprok sind, gibt es keine prinzipiellen Unterschiede. Simulationsresultate in [172] bestätigen dies.

Anhang B

Erzeugung einer „Hot-Spot"-Verkehrsverteilung

Mit der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik soll hier ein sogenanntes „Hot-Spot"-Szenario für das Dienstgebiet nach Bild 4-6 erzeugt werden. In einem „Hot-Spot"-Szenario gibt es in einem Mobilfunksystem eine Zelle oder ein kleines Gebiet, in dem eine hohe Verkehrsdichte herrscht, während im restlichen Dienstgebiet weit geringerer Verkehr vorliegt [37,170].

Für das Dienstgebiet nach Bild 4-6 läßt sich ein solches Szenario mit Hilfe von Bild B-1 darstellen.

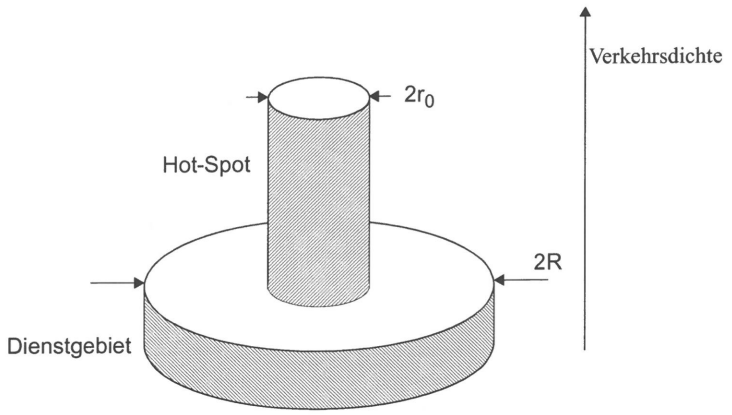


Bild B-1: Verkehrsdichte im „Hot-Spot"-Szenario

Die zur Erzeugung dieser Verkehrsdichte nötige räumliche Verteilungsdichte p_A der Mobilstationen ergibt sich in Abhängigkeit des Radius r zu einer Funktion nach Bild B-2. Der Winkel α wird für dieses konzentrische Szenario wie in Kapitel 4 gleichverteilt zwischen 0 und 2π gewählt.

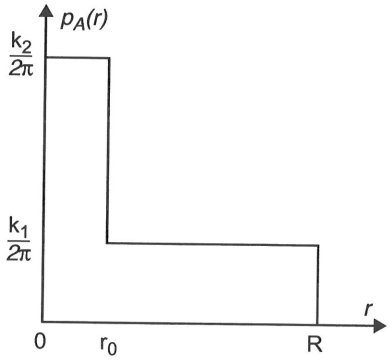


Bild B-2: Flächendichte der Mobilstationen

$p_A(r)$ läßt sich angeben als

$$p_A(r) = \begin{cases} \frac{k_2}{2\pi} \text{ für } 0 \le r \le r_0 \\ \frac{k_1}{2\pi} \text{ für } r_0 < r \le \mathrm{R} \\ 0 \qquad \text{sonst} \end{cases} \tag{B-1}.$$

Mit der Definition der Verteilungsdichtefunktion des Radius als

$$p_r(r) = 2\pi p_A(r) r \tag{B-2}$$

ergibt sich diese zu

$$p_r(r) = \begin{cases} k_2 r \text{ für } 0 \le r \le r_0 \\ k_1 r \text{ für } r_0 < r \le \mathrm{R} \\ 0 \qquad \text{sonst} \end{cases} \tag{B-3}.$$

Wird der Parameter Ω als Fläche unter der Verteilungsdichte des Radius von 0 bis r_0 definiert, also

$$\Omega = \int_0^{r_0} p_r(r)\,dr \tag{B-4},$$

ergeben sich die Konstanten k_1 und k_2 mit der Normierungsbedingung

$$\int_0^{\infty} p_r(r)dr = 1 \tag{B-5}$$

zu

$$k_1 = 2\frac{1-\Omega}{R^2 - r_0^2} \tag{B-6}$$

und

$$k_2 = 2\frac{\Omega}{r_0^2} \tag{B-7}.$$

Die gesuchte Verteilungsdichte, der die Zufallsvariable des Radius r bei der Plazierung einer Mobilstation folgen muß, ist demnach

$$p_r(r) = \begin{cases} 2\frac{\Omega}{r_0^2}r & \text{für } 0 \le r \le r_0 \\ 2\frac{1-\Omega}{R^2 - r_0^2}r & \text{für } r_0 < r \le R \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{B-8}.$$

Ihr Schaubild gibt Bild B-3 wieder.

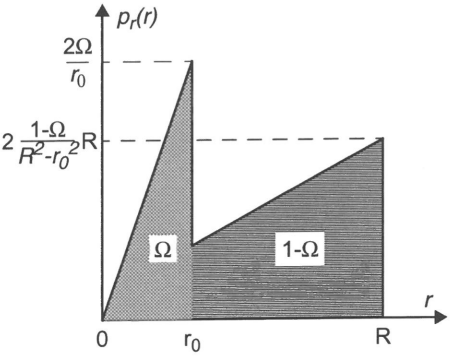


Bild B-3: Verteilungsdichtefunktion des Radius r

Soll zum Beispiel 50% des Verkehrs in der zentralen Zelle (Zellradius R_Z) ankommen und die restlichen 50% verteilt über das restliche Dienstgebiet, so muß r_0=R_Z und Ω=0.5 gewählt werden.

Anhang C

Kapazitätsvergleich des DCA-Systems mit einem FCA-System

Einen Kapazitätsvergleich des in Kapitel 4 vorgestellten und in Kapitel 6 angewandten DCA-Algorithmus mit der Kanalvergabe in einem konventionellen FCA-System ermöglicht die folgende Systembetrachtung.

Aus den theoretischen Erkenntnissen hinsichtlich der minimalen Wiederverwendungsdistanz der Ressourcen eines FCA-Systems nach Kapitel 2.3.4.1 ergibt sich für ein minimal notwendiges Signal-Interferenz-Verhältnis CIR_{min}=9 dB eine Clustergröße von vier. In einem FCA-System könnten deshalb pro Zelle nur vier der 16 Ressourcen des Gesamtsystems verwendet werden.

Bild C-1 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit eines FCA-Systems berechnet mit der Erlang-Verlustformel für das M/M/4 System (Gleichung (2-29), Kapitel 2.1), sowie die Blockierwahrscheinlichkeit des hier betrachteten DCA-Systems. Zum korrekten Vergleich mit einem FCA-System wurde das DCA-System bei rein entfernungsabhängiger Dämpfung (ohne Abschattung) und ohne Anwendung von Makrodiversität betrachtet. Dies stellt sicher, daß in jeder Zelle immer die nächstliegende Feststation gewählt wird und kein Verbindungswunsch aufgrund zu geringer Empfangsleistung abgelehnt wird.

Das DCA-System weist eine geringere Blockierwahrscheinlichkeit als das FCA-System auf. Dies ist auf die Minimierung des tatsächlichen Wiederverwendungsabstandes und auf die bedarfsgerechte Verwendung der Gesamtzahl der Ressourcen im System zurückzuführen (siehe Kapitel 2.3.4.2). Der lokal zentralisierte DCA-Algorithmus erhöht zudem den Bündelungsgewinn, da im theoretischen Extremfall an einem Ort bis zu 16 Ressourcen zur Verfügung gestellt werden können. Im FCA-System sind es dagegen nur vier Ressourcen.

Bei einem Arbeitspunkt von 3% Blockierwahrscheinlichkeit erzielt der hier angewandte DCA-Algorithmus eine ungefähr vierfache Systemkapazität bezüglich des Verkehrswertes eines FCA-Systems.

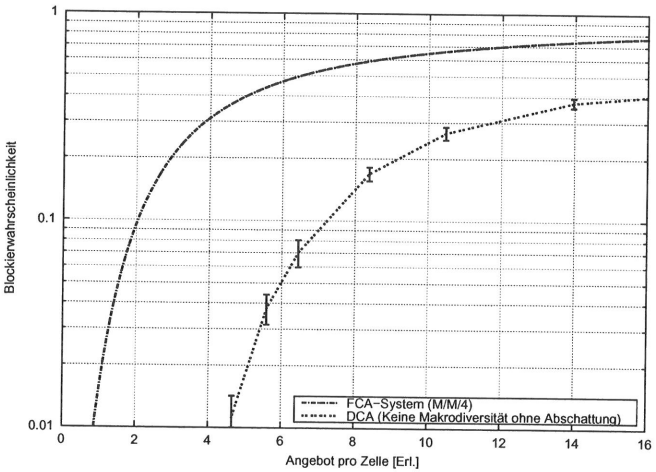


Bild C-1: Vergleich der Blockierwahrscheinlichkeiten für ein FCA- und das DCA-System

Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß in Bild C-1 die Blockierwahrscheinlichkeit des DCA-Systems niedriger ist als in den Betrachtungen nach Kapitel 6 (zum Beispiel Bild 6-1, Kurve „Keine Makrodiversität"). Dies liegt daran, daß hier das Phänomen der Abschattung nicht betrachtet wird. In Kapitel 6 wird dagegen für alle Simulationen die Abschattung mitberücksichtigt. Dabei kann es aufgrund starker Dämpfung der Signale zu sehr geringen Empfangsleistungen an den Mobilstationen kommen (siehe auch Kapitel 5). Bei entsprechender Interferenzlage ist das realisierbare Signal-Interferenz-Verhältnis dann häufig nicht ausreichend, um eine Verbindung zu ermöglichen. Dies führt zu einer höheren Blockierwahrscheinlichkeit für das System mit Abschattung.

In einem FCA-System hat die Abschattung natürlich denselben kapazitätssenkenden Effekt. Die erreichte Kapazität kann dann nicht mehr mit der Erlang-Verlustformel angegeben werden.