

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
KAISERSLAUTERN

---

**Stefan Heilmann**

**Interferenz und Koexistenz  
in zellularen Netzen**

Forschungsberichte Mobilkommunikation Band 20

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. P.W. Baier



**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

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

**Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbiografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Herausgeber: Prof. Dr.–Ing. habil. Dr.–Ing. E.h. P.W. Baier  
Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung  
Technische Universität Kaiserslautern  
Postfach 3049  
67653 Kaiserslautern

Verfasser: Stefan Heilmann

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern  
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D-386

© Stefan Heilmann · Kaiserslautern 2005

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1438–6720

ISBN 3–936890–82–X

Stefan Heilmann  
Hauptstraße 72  
D-67304 Eisenberg  
Geburtsort: Grünstadt

## **Interferenz und Koexistenz in zellularen Netzen**

Beim Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
eingereichte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Stefan Heilmann

D 386

Tag der Einreichung: 08.06.2005  
Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2005

Dekan des Fachbereichs  
Elektrotechnik: Prof. Dr.-Ing. W. Kunz

Vorsitzender der  
Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. A. Potchinkov

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. P.W. Baier

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Urbansky



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von Oktober 2001 bis Juni 2005 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. P.W. Baiers am Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung der Universität Kaiserslautern. Ich möchte all jenen danken, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Baier für die Anregung, die Betreuung und die Förderung meiner Arbeit. Durch seine stete Diskussionsbereitschaft sowie durch zahlreiche Ratschläge und Hinweise hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Urbansky danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und für die freundliche Übernahme des Korreferats. Weiterhin danke ich dem Vorsitzenden der Promotionskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Potchinkov.

Den jetzigen und den ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung danke ich für eine angenehme Arbeitsatmosphäre und für viele fruchtbare Diskussionen, die mir oftmals weitergeholfen haben. Ein besonderer Dank ergeht an die Herren Dr.-Ing. habil. M. Meurer und Dr.-Ing. habil. T. Weber für viele hilfreiche Diskussionen. Ebenso danke ich allen Studenten, die im Rahmen von Studienarbeiten, Diplomarbeiten und Masterarbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte unter meiner Anleitung Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Wesentliche Teile der Arbeit entstanden im Rahmen der Kooperation des Lehrstuhls für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung mit der Fa. Siemens. Für die zahlreichen Anregungen aus der industriellen Praxis sowie die finanzielle Förderung sei den Herren Dipl.-Ing. H. von der Neyen, Dipl.-Ing. G. Lehmann sowie Dr.-Ing. M. Kuipers herzlich gedankt.

Der Technischen Universität Kaiserslautern danke ich für die Möglichkeit der Benutzung leistungsfähiger Rechnersysteme des Regionalen Hochschulrechenzentrums Kaiserslautern (RHRK). Den Mitarbeitern des RHRK sei für die Beratung in Softwarefragen gedankt.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir das Studium der Elektrotechnik ermöglichten und mich stets unterstützt haben. Schließlich danke ich meiner Freundin Katharina, die mir beim Entstehen der Dissertation einen wichtigen Rückhalt gab. Ihr möchte ich diese Arbeit widmen.

Kaiserslautern, im Juli 2005

Stefan Heilmann



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Mobilfunk . . . . .	1
1.2	Interferenzproblem . . . . .	3
1.3	Mehroperator-Szenarien . . . . .	6
1.4	Zellulares Konzept . . . . .	8
1.5	Mehrsystem-Szenarien . . . . .	10
1.6	Stand der Technik und offene Probleme . . . . .	11
1.7	Ziele der Arbeit . . . . .	15
1.8	Struktur der Arbeit . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Klassifizierung von MAI in Mobilfunksystemen</b>	<b>18</b>
2.1	Einleitung . . . . .	18
2.2	Intra- und Interzell-MAI . . . . .	19
2.3	Gleich- und Anderstrecken-MAI . . . . .	21
2.4	Gleich- und Anderhierarchie-MAI . . . . .	24
2.5	Gleich- und Anderkanal-MAI . . . . .	25
2.6	Intra- und Interoperator-MAI . . . . .	28
2.7	Intra- und Intersystem-MAI . . . . .	29
2.8	Zusammenhänge zwischen den eingeführten MAI-Klassen . . . . .	30
2.8.1	Vorbemerkung . . . . .	30
2.8.2	Aufschlüsselung bis herab zur Netzebene . . . . .	30
2.8.3	Weitere Aufschlüsselung . . . . .	30
2.8.4	Intrasystem-Intraoperator-MAI . . . . .	35
2.8.5	Intrasystem-Interoperator-MAI . . . . .	36
2.8.6	Intersystem-Interoperator-MAI . . . . .	37
2.8.7	Intersystem-Intraoperator-MAI . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Techniken zum Analysieren verschiedenartiger MAI-Effekte auf der System- ebene</b>	<b>40</b>
3.1	Simulationsverfahren . . . . .	40
3.2	Simulationsszenarien . . . . .	43
3.2.1	Vorbemerkung . . . . .	43
3.2.2	Makrozell-Szenario . . . . .	43
3.2.3	Mikrozell-Szenario . . . . .	44
3.3	Funkfelddämpfungsmodelle . . . . .	45
3.3.1	Vorbemerkung . . . . .	45
3.3.2	Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell . . . . .	46

3.3.3	Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell . . . . .	48
3.4	Modellieren von Anderkanal-MAI . . . . .	53
3.4.1	Beschreiben der Anderkanal-MAI . . . . .	53
3.4.2	Adjacent Channel Leakage Power Ratio (ACLR) . . . . .	55
3.4.3	Adjacent Channel Selectivity (ACS) . . . . .	58
3.4.4	Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR) . . . . .	61
3.4.5	Anforderungen an das ACLR und das ACS im 3G-Standard UMTS	62
3.5	Mathematisches Modell zum Ermitteln des SNRs im Ein-Operator-Fall . .	63
3.5.1	Mengenformalismus . . . . .	63
3.5.2	SNR in der Aufwärtsstrecke . . . . .	68
3.5.3	SNR in der Abwärtsstrecke . . . . .	72
3.5.4	Funkfeldgewinn zwischen BS und MS . . . . .	75
3.5.5	Kriterien zum Zuordnung von MSen zu BSen . . . . .	75
3.6	Mathematisches Modell zum Ermitteln des SNRs im Zwei-Operator-Fall . .	77
3.6.1	Vorbemerkung . . . . .	77
3.6.2	SNR in der Aufwärtsstrecke . . . . .	79
3.6.3	SNR in der Abwärtsstrecke . . . . .	81
3.7	Modellieren von Leistungsregelungsverfahren . . . . .	83
3.7.1	Vorbemerkung . . . . .	83
3.7.2	Regelung auf konstante Sendeleistung . . . . .	84
3.7.3	Regelung auf konstante Empfangsleistung . . . . .	84
3.7.4	Regelung auf gewünschtes SNR . . . . .	85
3.8	Verfahren zur Überlagerung verschiedener voneinander unabhängiger MAI-Effekte . . . . .	86
3.9	Zugangskontrolle und Kapazität in CDMA-basierten Mobilfunknetzen . . .	90
<b>4</b>	<b>Zusammenstellung wichtiger Koexistenzszenarien</b>	<b>94</b>
<b>5</b>	<b>MAI zwischen WCDMA-Mobilfunknetzen in Makrozellen</b>	<b>98</b>
5.1	Vorbemerkung . . . . .	98
5.2	Aufwärtsstrecke . . . . .	98
5.2.1	Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$ . . . . .	98
5.2.2	Analyse der Kapazität . . . . .	104
5.3	Abwärtsstrecke . . . . .	112
5.3.1	Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$ . . . . .	112
5.3.2	Analyse der Kapazität . . . . .	115
5.4	Einfluß von Techniken zur Intraoperator-MAI-Minderung auf die Interoperator-MAI . . . . .	120
5.4.1	Vorbemerkung . . . . .	120
5.4.2	Schutzbänder . . . . .	120



---

5.4.3	Compressed Mode zum Ermöglichen des IFHOs . . . . .	123
5.4.4	Soft Handover . . . . .	130
5.5	Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke . . . . .	138
<b>6</b>	<b>MAI zwischen TD-CDMA-Mobilfunknetzen in Mikrozellen</b>	<b>146</b>
<b>7</b>	<b>MAI zwischen einem WCDMA-Mobilfunknetz und einem TD-CDMA-Mobilfunknetz in einer hierarchischen Zellstruktur</b>	<b>154</b>
7.1	Vorbemerkung . . . . .	154
7.2	Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$ . . . . .	159
7.3	Analyse der Kapazität . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Methoden zum Vermindern von Interoperator-MAI durch Antennentechniken</b>	<b>166</b>
<b>9</b>	<b>Allgemeine Regeln und Erkenntnisse</b>	<b>172</b>
9.1	Vorbemerkung . . . . .	172
9.2	Intrasystem-Intraoperator-MAI . . . . .	174
9.3	Intrasystem-Interoperator-MAI . . . . .	174
9.4	Intersystem-Interoperator-MAI . . . . .	176
9.5	Intersystem-Intraoperator-MAI . . . . .	178
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>179</b>
10.1	Deutsch . . . . .	179
10.2	Englisch . . . . .	180
<b>A</b>	<b>Herleitungen und Erläuterungen</b>	<b>181</b>
A.1	Erläuterungen zum RRC-Filter . . . . .	181
A.2	Herleitung von (8.2) . . . . .	182
<b>B</b>	<b>Liste häufig verwendeter Begriffe, Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>184</b>
B.1	Begriffe . . . . .	184
B.2	Abkürzungen . . . . .	185
B.3	Mathematische Schreibweisen . . . . .	187
B.4	Formelzeichen . . . . .	188
	<b>Literatur</b>	<b>194</b>



# Kapitel 1

## Einführung

### 1.1 Mobilfunk

Bei der Luftschnittstelle im Mobilfunk geht es bekanntlich um die Informationsübertragung mittels Funk zwischen einer ortsfesten Basisstation (BS) und nicht ortsgelundenen Mobilstationen (MS) in einem von der betreffenden BS zu versorgenden geographischen Gebiet. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung eines speziellen Teilaspekts solcher Luftschnittstellen.

Der technisch nutzbare Funkfrequenzbereich mit seiner Obergrenze von heute etwa 100 GHz ist eine wertvolle naturgegebene und nicht vermehrbare Ressource. Deshalb ist es wichtig, daß diese Ressource von den verschiedenen auf sie zugreifenden Funkanwendern einerseits auf möglichst effiziente Weise und andererseits unter Wahrung von gegenseitiger Rücksichtnahme und Fairneß genutzt wird [Ste96, DB96]. Eine solche Rücksichtnahme und Fairneß verbieten einen chaotischen Zugriff auf diese Ressource. Vielmehr müssen von den einzelnen Funkanwendern gewisse Regeln eingehalten werden. Diese kommen dadurch zustande, daß für die einzelnen Funkanwendungen in nationalen und internationalen Vereinbarungen anwendungsspezifische Teilbereiche des nutzbaren Funkfrequenzbereichs festgelegt werden, die als anwendungsspezifische Frequenzressourcen bezeichnet werden können. Weltweit erfolgt die Vergabe anwendungsspezifischer Frequenzressourcen durch die WARC (engl. World Administrative Radio Conference) [OP98, HT00], eine von der ITU (engl. International Telecommunications Union) [Wal00b, OP98, HT00] in angemessenen Zeitabständen einberufene Konferenz. Für die nationale Vergabe anwendungsspezifischer Frequenzressourcen auf der Basis der genannten internationalen Vereinbarungen und für die Überwachung der regelkonformen Anwendung dieser Ressourcen sind die nationalen Regulatoren zuständig [LEK<sup>+</sup>97], in Deutschland die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP).

Mobilfunksysteme werden bekanntlich nach Generationen klassifiziert. Die heute mit weltweit ca. 1 Mrd. Teilnehmern dominante Mobilfunktechnik bildet die zweite Generation (2G). Mobilfunksysteme der dritten Generation (3G) sind derzeit weltweit in der Einführungsphase, und in Forschung und Entwicklung befaßt man sich heute bereits mit der vierten Mobilfunkgeneration (4G). Für jede Mobilfunkgeneration ist eine anwendungsbezogene Frequenzressource vorgesehen. Aus Bild 1.1 sind beispielsweise die anwendungsspezifischen Frequenzressourcen von 2G und 3G für Europa zu ersehen.

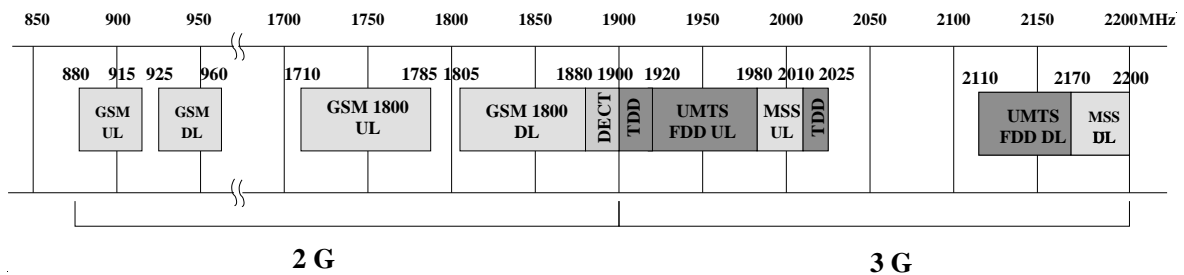


Bild 1.1. Anwendungsspezifische Frequenzressourcen von 2G und 3G in Europa [For98, OP98, Wal00b]; GSM: Global System for Mobile Communications, UMTS: Universal Mobile Telecommunications System, MSS: Mobile Satellite Services, DL: Abwärtsstrecke (engl. Downlink), UL: Aufwärtsstrecke (engl. Uplink), TDD: Time Division Duplex, FDD: Frequency Division Duplex

Im folgenden wird der Begriff "Mobilfunksystem" für die Gesamtheit der technischen Einrichtungen verwendet, bei denen die Verfahren zum Übertragen von Informationen über die Luftschnittstelle durch einen bestimmten Standard festgelegt sind. Solche Standards, im folgenden Mobilfunkstandards genannt, werden von internationalen Standardisierungsorganisationen, z.B. der ITU, ausgearbeitet und beschlossen [Wal00b]. Mobilfunksysteme der zweiten Generation wurden noch weitgehend von nationalen Institutionen standardisiert, z.B. IS-95 (engl. Interim Standard 95) [SG91, Pad94, OP98] von der FCC (engl. Federal Communications Commission) in den USA, PDC (engl. Personal Digital Cellular) [OP98] von der ARIB (engl. Association of Radio Industries and Businesses) in Japan, GSM (engl. Global System for Mobile Communications) [MP92] sowie DECT (engl. Digital Enhanced Cordless Telecommunications) [Wal00a] von der ETSI (engl. European Telecommunications Standard Institute) in Europa. Dagegen wurde die Standardisierung von Mobilfunksysteme der dritten Generation von der weltweit tätigen ITU koordiniert, um einheitliche Standards zu schaffen. Die in Europa von der ETSI adoptierten Standards werden unter dem Sammelbegriff UMTS (engl. Universal Mobile Telecommunications System) [HT00] geführt und beinhalten die Teilstandards WCDMA (engl. Wideband Code Division Multiple Access) und TD-CDMA (engl. Time Division Code Division Multiple Access) [HT00, AS97, OP98, FST<sup>+</sup>96]. Der 3G-Teilstandard WCDMA basiert auf dem Frequenzduplex (engl. Frequency Division Duplex, FDD) und der 3G-Teilstandard TD-CDMA basiert auf dem Zeitduplex (engl. Time Division Duplex, TDD), siehe Abschnitt 1.2. Bei TD-CDMA unterscheidet man zwei Modi, einen mit hoher Chiprate (engl. High Chip Rate, HCR) und eine mit niedriger Chiprate (engl. Low Chip Rate, LCR) [HT00]. Für die Mobilfunksysteme der dritten Generation wurde zudem der auf Satellitenübertragung basierende Standard MSS (engl. Mobile Satellite Services) [GIL<sup>+</sup>98] festgelegt.

Für einen Mobilfunkstandard wird von den Regulierungsbehörden ein Frequenzband festgelegt, in dem Mobilfunksysteme nach diesem Standard aktiv sein dürfen. Das für ein Mobil-

funksystem vorgesehene Frequenzband wird im folgenden Gesamtfrequenzband dieses Mobilfunksystems genannt. Die Gesamtfrequenzbänder für Mobilfunksysteme der 2. und 3. Generation in Europa sind in Bild 1.1 dargestellt und werden für diese Mobilfunkssysteme exklusiv genutzt. Die exklusive Nutzung eines Frequenzbandes von nur einem Mobilfunksystem ist jedoch nicht zwingend erforderlich, siehe Abschnitt 1.5.

Im folgenden wird für die Verbindung einer MS mit einer BS, zwischen denen eine Informationsübertragung stattfindet, der Begriff Teilnehmerverbindung verwendet. Im Gesamtfrequenzband eines Mobilfunksystems sollen möglichst viele Teilnehmerverbindungen gleichzeitig ermöglicht werden. Die Gründe für diese Anforderung sind

- das Befriedigen des kontinuierlich zunehmenden Bedarfs an Mobilkommunikation und
- das Erzielen möglichst hoher Wirtschaftlichkeit.

Ein Mobilfunksystem muß also eine effiziente Nutzung des zugewiesenen Gesamtfrequenzbandes gewährleisten, um unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit den Bedarf an Teilnehmerverbindungen befriedigen zu können. Das Versorgen einer Vielzahl von Teilnehmerverbindungen in einem gegebenen Gesamtfrequenzband bezeichnet man als Vielfachzugriff der MSen auf das Übertragungsmedium, d.h. den Raum.

## 1.2 Interferenzproblem

Bei Funkssystemen breiten sich elektromagnetische Wellen im Raum im Gegensatz zur leitungsgebundenen Übertragung in viele Richtungen aus. Das Übertragungsmedium, d.h. der Raum zwischen der BS und der MS, wird bzgl. der Wellenausbreitung als Mobilfunkkanal modelliert. Sind mehrere Teilnehmerverbindungen zum gleichen Zeitpunkt im gleichen räumlichen Gebiet in einem gegebenen Frequenzband aktiv, so treten gegenseitige Störungen der Teilnehmerverbindungen auf. Diese Störungen werden aufgrund ihrer Ursache im Vielfachzugriff als Vielfachzugriffsinterferenz (engl. Multiple Access Interference, MAI) bezeichnet. MAI ist ein ureigenes Problem des Mobilfunks, und in der vorliegenden Arbeit sollen gewisse Aspekte dieses Problems betrachtet werden. Zum Beherrschen des Interferenzproblems ist ein geordnetes Vergeben von Teilen der aus dem zur Verfügung stehenden Frequenzband und der verfügbaren Übertragungszeit bestehenden Übertragungsressourcen an die einzelnen Teilnehmerverbindungen erforderlich. Verfahren, die eine solche geordnete Vergabe von Übertragungsressourcen und damit ein Trennen der Teilnehmerverbindungen ermöglichen, werden als Vielfachzugriffsverfahren bezeichnet [Meu03].

Grundlegende Vielfachzugriffsverfahren sind der Frequenzmultiplex [SOSL88, LL86], der Zeitmultiplex [ENS97, MP92], der Codemultiplex [Gib99, Ste92, DB96] und der Raummultiplex [Ste92]:

- **Frequenzmultiplex** (engl. Frequency Division Multiple Access, FDMA): Bei FDMA nutzt jede Teilnehmerverbindung die gesamte verfügbare Übertragungszeit, aber nur einen Teil des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes [SOSL88, LL86]. Dazu wird das zur Verfügung stehende Frequenzband in Teilfrequenzbänder aufgeteilt, von denen jede Teilnehmerverbindung ein anderes benutzt. FDMA macht sich zunutze, daß sich verschiedenfrequente elektromagnetische Wellen durch Filterung im Frequenzbereich voneinander trennen lassen. Aufgrund der endlichen Flankensteilheit realer Filter ist allerdings eine perfekte Trennung nicht möglich, so daß Interferenzen, d.h. MAI, zwischen den Teilnehmerverbindungen unterschiedlicher Teilfrequenzbänder nicht vollständig vermieden werden können [Wal00b]. Die nichtperfekte Trennbarkeit von Teilnehmersignalen im Frequenzbereich hat eine fundamentale Bedeutung für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit.
- **Zeitmultiplex** (engl. Time Division Multiple Access, TDMA): Bei TDMA nutzt jede Teilnehmerverbindung das gesamte zur Verfügung stehende Frequenzband, aber nur einen Teil der verfügbaren Übertragungszeit [ENS97, MP92]. Dazu werden periodisch wiederkehrende Zeiträume (engl. Frames) in eine bestimmte Anzahl von Zeitschlitzen (engl. time slots) aufgeteilt, von denen jede Teilnehmerverbindung einen anderen nutzt [Wal00b]. MAI zwischen Teilnehmerverbindungen kann bei TDMA vollständig vermieden werden, wenn es gelingt, das Ende der Übertragung einer Teilnehmerverbindung und den Beginn der Übertragung der nächsten Teilnehmerverbindung in einem Zeitraum exakt zu synchronisieren, wobei die für unterschiedliche Teilnehmerverbindungen eine potentiell unterschiedliche Laufzeit der Teilnehmersignale zwischen Sender und Empfänger berücksichtigt werden muß. Zusätzlich ist ein Schutzintervall zwischen benachbarten Zeitschlitzen erforderlich, wenn der Mobilfunkkanal die zu übertragenden Informationen zeitlich spreizt (engl. Delay Spread) [Wal00b]. Die Synchronisation der Teilnehmersignale bei TDMA ist keine triviale Aufgabe und erfordert einen im Vergleich zur Filterung der Teilnehmersignale bei FDMA höheren Aufwand [Wal00b].
- **Codemultiplex** (engl. Code Division Multiple Access, CDMA): Bei CDMA nutzen die Signale aller Teilnehmerverbindungen das gesamte zur Verfügung stehende Frequenzband und die gesamte verfügbare Übertragungszeit. Die Signaltrennung erfolgt durch das Aufprägen teilnehmerspezifischer Feinstrukturen auf die Teilnehmersignale [Gib99, Ste92, DB96]. Diese Feinstrukturen werden als CDMA-Codes bezeichnet. Durch das Aufprägen der Feinstrukturen werden die Teilnehmersignale spektral gespreizt, so daß sie bei gegebener Leistung eine relativ geringe spektrale Leistungsdichte haben. Wegen dieser spektralen Spreizung werden die CDMA-Codes

auch als Spreizcodes bezeichnet. Empfängerseitig können die Teilnehmersignale durch Ausnutzen der Kenntnis der teilnehmerspezifischen CDMA-Codes getrennt werden [Kle96, Meu03, Ver98]. Die informationstheoretische Kapazität [Sha48], mit der auf einem zeitinvarianten und nicht frequenzselektiven Mobilfunkkanal [Par92] Information übertragen werden kann, ist bei allen drei Vielfachzugriffsverfahren CDMA, FDMA und TDMA die gleiche. Die Vorteile von CDMA gegenüber den Vielfachzugriffsverfahren FDMA und TDMA sind bei zeitvariantem und frequenzselektivem Mobilfunkkanal die höhere Frequenz- und Interfererdiversität [Wal00b], die eine bessere Ausnutzung der informationstheoretischen Kapazität des Übertragungsmediums ermöglichen. Der Nachteil von CDMA ist, daß optimale Verfahren zum Trennen der spektral gespreizten Teilnehmersignale sehr aufwendig sind [Kle96, Meu03], so daß in der Praxis meist suboptimale Trennverfahren eingesetzt werden [Meu03].

- **Raummultiplex** (engl. Space Division Multiple Access, SDMA): Bei SDMA wird das Verwenden von Mehrelement-Antennen an der BS vorausgesetzt [Ste92]. Dieses Verfahren beruht darauf, daß sich elektromagnetische Wellen konstruktiv oder destruktiv überlagern können. Es werde zunächst die Abwärtsstrecke betrachtet, d.h. die Übertragung von der BS zur MS. Über die einzelnen Antennenelemente der BS werden beim SDMA phasenverschobene Versionen der für die einzelnen MSen bestimmten Teilnehmersignale abgestrahlt. Hierbei werden die Phasenverschiebungen so gewählt, daß sich an jeder MS die von den verschiedenen BS-Antennenelementen ausgehenden erwünschten Wellen möglichst konstruktiv und die unerwünschten Wellen möglichst destruktiv überlagern [Ste92]. Dadurch wird das Verhältnis von empfangener Nutzleistung zu empfangener MAI-Leistung maximiert. In der Aufwärtsstrecke, d.h. bei der Übertragung von der MS zu der BS, kann man durch MS-spezifische Phasenverschiebung und Addition der Empfangssignale der einzelnen BS-Antennenelemente in entsprechender Weise für jede MS Teilnehmersignale mit einem maximalen Verhältnis der empfangenen Nutzleistung zur empfangenen MAI-Leistung gewinnen [Ste92].

Die genannten vier grundlegenden Vielfachzugriffsverfahren FDMA, TDMA, CDMA und SDMA können kombiniert werden [BJK96, BJ96]. Solche Kombinationen werden als hybride Vielfachzugriffsverfahren bezeichnet [BJK96, Wal00b]. Man strebt hierbei an, dem hybriden Vielfachzugriffsverfahren die Vorteile der Grundverfahren, nicht jedoch deren Nachteile zu vererben [BJK96]. Ein Beispiel für ein hybrides Vielfachzugriffsverfahren ist der 2G-Mobilfunkstandard IS-95 [SG91, Pad94]. Bei diesem Standard werden die Vielfachzugriffsverfahren FDMA und CDMA eingesetzt; jedes durch den Frequenzmultiplex aus dem Gesamtfrequenzband hervorgehende Teilfrequenzband wird nicht nur von einem einzigen Teilnehmersignal, sondern von einer Gruppe von Teilnehmersignalen genutzt, die jeweils durch teilnehmerspezifische CDMA-Codes voneinander getrennt werden können. Ein anderes Beispiel für ein hybrides Vielfachzugriffsverfahren ist der 3G-Mobilfunkstandard

TD-CDMA [HT00, AS97, FST<sup>+</sup>96], bei dem eine Kombination von FDMA, TDMA und CDMA verwendet wird.

Alle Vielfachzugriffsverfahren verfolgen dasselbe Ziel: Das Ermöglichen des Zugriffs vieler Teilnehmer auf die gemeinsamen Übertragungsressourcen zur Verfügung stehendes Frequenzband und verfügbare Übertragungszeit, wobei MAI möglichst gering gehalten werden soll. MAI läßt sich jedoch bei wirtschaftlich möglichst effizienter Nutzung, d.h. hoher Auslastung der zur Verfügung stehenden Übertragungsressourcen, nicht vollständig vermeiden. In einem Mobilfunksystem ist MAI der Preis für die intensive Nutzung der Übertragungsressourcen. Im Gegensatz zur Funkübertragung kann leitungsgebundene Übertragung MAI-frei gestaltet werden, bietet jedoch keine Mobilität der Sende- bzw. Empfangseinheiten. Eine vollständige MAI-Freiheit ist allerdings im Mobilfunk nicht erforderlich, denn man kann eine gewisse Beeinträchtigung der Übertragungsqualität durch MAI tolerieren.

Neben der Trennung der Signale verschiedener Teilnehmerverbindungen ist es auch erforderlich, die Übertragung in Auf- und Abwärtsstrecke einer Teilnehmerverbindung zu trennen. Die dazu eingesetzten Verfahren werden als Duplexverfahren bezeichnet. Mögliche Duplexverfahren sind FDD und TDD [Wes02]. Bei FDD finden Auf- und Abwärtsstrecke gleichzeitig statt, aber in unterschiedlichen Frequenzbändern. Beim TDD dagegen wird für Auf- und Abwärtsstrecke das gleiche Frequenzband verwendet, aber unterschiedliche Zeitschlitze. MAI zwischen Auf- und Abwärtsstrecke, im folgenden als Anderstrecken-MAI bezeichnet, kann bei FDD durch hohen Duplexabstand zwischen den Frequenzbändern für Auf- und Abwärtsstrecke weitgehend vermieden werden. Bei TDD sind ausreichende Synchronisation der Zeitschlitze verschiedener Teilnehmerverbindungen sowie ausreichende Schutzintervalle zwischen den Zeitschlitzen von Auf- und Abwärtsstrecke zu gewährleisten, um Anderstrecken-MAI durch Laufzeitunterschiede der Signale verschiedener Teilnehmerverbindungen zu vermeiden [Gib99, EV97, MP92, Bin01]. Sind ausreichende Synchronisation sowie Schutzintervalle nicht gegeben, so kann hohe Anderstrecken-MAI auftreten.

### 1.3 Mehroperator-Szenarien

Zum Schaffen von Wettbewerb ist es das Ziel der politischen Entscheidungsträger, ein Versorgungsgebiet von mehreren Betreibern (Operatoren) versorgen zu lassen [Reg00]. Für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung wird dazu das für einen gewissen Mobilfunkstandard wie z.B. UMTS zur Verfügung stehende Gesamtfrequenzband auf mehrere Operatoren aufgeteilt [Reg04]. Aus dem für einen Mobilfunkstandard verfügbaren Gesamtfrequenzband,



siehe Bild 1.1, wird jedem Operator von der Regulierungsbehörde im Rahmen der Lizenzierung ein operatorspezifisches Teilfrequenzband zugeteilt, welches er exklusiv nutzen darf.

Jeder Operator benötigt zum Versorgen von MSen eine Infrastruktur von BSen, die untereinander vernetzt sind. Ein solches Netzwerk eines Operators wird vom Verfasser der Arbeit als Mobilfunknetz bezeichnet. Die verschiedenen Operatoren planen und betreiben ihre Mobilfunknetze meist vollkommen unabhängig voneinander, da die Operatoren auf dem Markt konkurrieren und nur ungern Informationen über ihre Netze preisgeben. Da es zunehmend schwieriger wird, Standorte für neue BSen zu finden, kommt es allerdings vor, daß verschiedene Operatoren ihre BSen an denselben Orten installieren. Dann spricht man von Kollokation, andernfalls von Dislokation.

MAI zwischen den Teilnehmersignalen verschiedener Operatoren wird in der vorliegenden Arbeit als Interoperator-MAI bezeichnet. MAI zwischen den Teilnehmersignalen ein und desselben Operators wird als Intraoperator-MAI bezeichnet. Bei hoher Dislokation der BSen der beteiligten Operatoren kann die Interoperator-MAI im Vergleich zur Intraoperator-MAI sehr hoch sein [3GP02], da innerhalb eines Mobilfunknetzes eingesetzte Verfahren zum Mindern von Intraoperator-MAI wie z.B. Leistungsregelung und Handover-Techniken bei hoher Dislokation keine interferenzmindernde Wirkung auf die Interoperator-MAI haben. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 1.6 eingegangen.

Im Zusammenhang mit dem Untersuchen der MAI zwischen Teilnehmerverbindungen ist auch der Begriff Koexistenz von Bedeutung. Ist die MAI zwischen verschiedenen Teilnehmerverbindungen so hoch, daß diese nicht gleichzeitig betrieben werden können, so können die Teilnehmerverbindungen nicht koexistieren. Während der Begriff der Koexistenz im allgemeinen auf die Auswirkungen von MAI zwischen beliebigen Teilnehmerverbindungen zurückgeht, auch zwischen Teilnehmerverbindungen ein und denselben Operators, wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff Koexistenz für das spezielle Problem der Auswirkungen von MAI zwischen den Teilnehmerverbindungen verschiedener Mobilfunknetze verwendet, die also von unterschiedlichen Operatoren betrieben werden. Der Begriff der Koexistenz ist in der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung.

Neben der o.g. Koexistenz zwischen Mobilfunknetzen, die in unterschiedlichen operatorspezifischen Teilfrequenzbändern aktiv sind, gibt es auch Mobilfunksysteme, bei denen die Mobilfunknetze der koexistierenden Operatoren ein und dasselbe operatorspezifische Teilfrequenzband nutzen. Beispiele für solche Mobilfunksysteme sind Wireless Local Area Networks (WLAN) [IEE01] und DECT Networks [Wal00a]. Diese Mobilfunksysteme werden in unlicenzierten Gesamtfrequenzbändern betrieben, in denen jeder Operator auf das Gesamtfrequenzband frei zugreifen kann. Dabei können Kollisionen zwischen den Teilnehmerverbindungen verschiedener Mobilfunknetze beim Zugriff auf denselben Frequenzkanal auftreten, die dann durch entsprechende Algorithmen aufgelöst werden müssen [Man00, IEE01].

Die größte Verbreitung finden Mobilfunksysteme in unlizensierten Gesamtfrequenzbändern derzeit in privaten Heimnetzwerken, in kleinen Firmennetzwerken oder in Netzwerken in öffentlichen Gebäuden. MAI zwischen den Mobilfunknetzen ist in solchen Fällen relativ gering, wenn die Versorgungsgebiete der einzelnen Mobilfunknetze räumlich weitgehend disjunkt sind und beispielsweise durch Mauern und ähnliche hohe Funkfelddämpfung verursachenden Hindernisse elektromagnetisch separiert sind. In der vorliegenden Arbeit werden Mobilfunksysteme für unlicenzierte Gesamtfrequenzbänder nicht betrachtet.

## 1.4 Zellulares Konzept

Das in den siebziger Jahren für den Mobilfunk vorgeschlagene zellulare Konzept [MD79] ermöglicht die Versorgung eines räumlich unendlich ausgedehnten geographischen Gebietes durch ein Mobilfunknetz mit einem begrenzten operatorspezifischen Teilfrequenzband. Dazu wird das Versorgungsgebiet in Zellen eingeteilt, die jeweils von einer zellspezifischen BS versorgt werden. Das operatorspezifische Teilfrequenzband wird in nicht überlappende zellspezifische Teilfrequenzbänder aufgeteilt, von denen jede BS eines zum Versorgen der ihr zugeordneten MSen nutzt. Nach dem Prinzip der Frequenzwiederbenutzung (engl. Frequency Reuse) kann das in einer Zelle eingesetzte zellspezifische Teilfrequenzband in hinreichend großem Abstand wiederverwendet werden [MD79, Wes02]. Die Frequenzwiederbenutzung basiert auf der Beobachtung, daß die Leistungsdichte elektromagnetischer Wellen bei terrestrischer Übertragung mit zunehmender Distanz zum Sender stark abnimmt [Par92]. Durch die Frequenzwiederbenutzung entsteht neben der durch den Vielfachzugriff verschiedener Teilnehmerverbindungen innerhalb einer Zelle auftretenden MAI, die auch als Intrazell-MAI bezeichnet wird, MAI von Teilnehmerverbindungen aus anderen Zellen, die Interzell-MAI. Der Beitrag der Interzell-MAI zur gesamten auftretenden MAI ist nicht vernachlässigbar. Die auftretende Interzell-MAI läßt sich jedoch durch geschickte Zuweisung der zellspezifischen Teilfrequenzbänder zu den Zellen günstig beeinflussen [MD79]. Hierbei ist folgendes zu beachten:

- Einerseits soll der Abstand zweier Zellen, die das gleiche zellspezifische Teilfrequenzband nutzen, möglichst groß sein, um die Interzell-MAI möglichst klein zu halten.
- Andererseits sollte jedes zellspezifische Teilfrequenzband möglichst oft wiederverwendet werden, um möglichst viele Teilnehmerverbindungen gleichzeitig im operatorspezifischen Teilfrequenzband versorgen zu können.

Zellen, die das gleiche zellspezifische Teilfrequenzband nutzen, werden als Gleichkanalzellen bezeichnet [MD79]. Eine Gruppe benachbarter Zellen, die zusammengenommen das volle operatorspezifische Teilfrequenzband genau einmal nutzen, wird als Cluster bezeichnet

Tabelle 1.1. Übersicht der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe zum Abgrenzen von Frequenzressourcen

Begriff für Frequenzressource	reserviert für
Gesamtfrequenzband	ein Mobilfunksystem
operatorspezifisches Teilfrequenzband	ein Mobilfunknetz
zellspezifisches Teilfrequenzband	eine Zelle und deren Gleichkanalzellen
Frequenzkanal	je eine Teilnehmergruppe in den Gleichkanalzellen, welche durch CDMA oder TDMA-Verfahren getrennt werden

[MD79]. Die Anzahl der Zellen in einem Cluster ist die Clustergröße  $r$ . Bei regelmäßigen, hexagonalen Zellen ist eine lückenlose, überlappungsfreie Pflasterung eines Versorgungsgebiets mit bestimmten Clustergrößen  $r$  möglich, die den rhombischen Zahlen entsprechen [MD79, Far96]. Während in 2G-Mobilfunksystemen die Clustergrößen  $r$  noch im Bereich 7 bis 12 sind [MP92, Yac93], werden in 3G-Mobilfunksystemen meist Clustergrößen  $r$  von 1 oder 3 angewandt [HT00]. Für den Spezialfall einer Clustergröße  $r$  von 1 ist das zellspezifische Teilfrequenzband gleich dem operatorspezifischen Teilfrequenzband.

Die zellspezifischen Teilfrequenzbänder lassen sich weiter aufteilen in Frequenzkanäle, in denen in jeder Gleichkanalzelle eine Teilnehmergruppe aktiv ist, welche nicht mehr durch FDMA, sondern nur noch durch andere Vielfachzugriffsverfahren wie CDMA oder TDMA getrennt werden. Eine Übersicht der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe zum Abgrenzen von Frequenzressourcen zeigt Tabelle 1.1. Die Verteilung der zur Verfügung stehenden anwendungsspezifischen Frequenzressourcen wird in Bild 1.2 gezeigt.

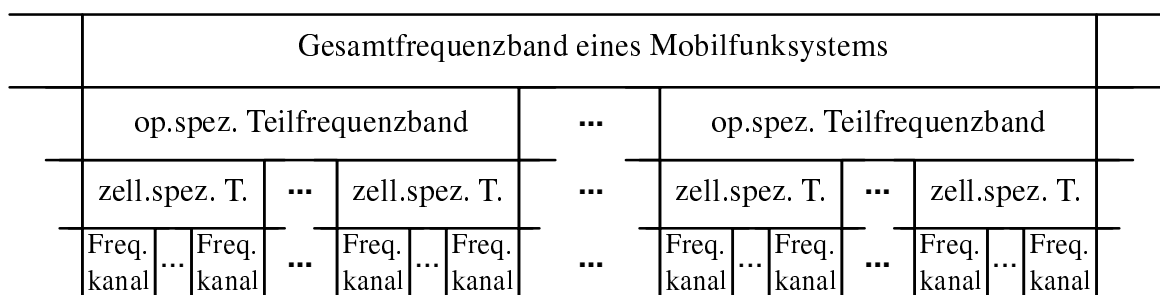


Bild 1.2. Aufteilung des Gesamtfrequenzbandes eines Mobilfunksystems

## 1.5 Mehrsystem-Szenarien

Durch die fortschreitende Entwicklung immer leistungsfähigerer Mobilfunksysteme sowie die zunehmende Nachfrage nach mobilen Funkdiensten wird ein Versorgungsgebiet meist nicht mehr nur von einem einzigen Mobilfunksystem, sondern oftmals von zwei oder mehreren Mobilfunksystemen unterschiedlichen Standards versorgt. Beispielsweise wird die praktisch lückenlose Versorgung Deutschlands mit GSM zunehmend ergänzt durch die Versorgung mit UMTS. Neben dem Vorteil des kontinuierlichen Übergangs von einer Generation zur nächsten liegt der Grund für Mehrsystem-Szenarien oft auch in der politischen Entscheidungsfindung. Da es angesichts der vielen an der Standardisierung beteiligten Parteien meist nicht möglich ist, sich auf einen einzigen Standard zu einigen [Web00], werden mehrere Standards mit individuellen Vor- und Nachteilen festgelegt, zwischen denen die jeweiligen Operatoren dann bei Freigabe durch die Regulierungsbehörden wählen können.

Wenn unterschiedliche Mobilfunksysteme, d.h. Systeme unterschiedlichen Standards, in einem Versorgungsgebiet eingesetzt werden und die den jeweiligen Mobilfunksystemen zugewiesenen Gesamtfrequenzbänder nur geringen Abstand voneinander haben oder gar direkt benachbart sind, siehe z.B. Bild 1.1, so kann MAI zwischen den Mobilfunksystemen auftreten [HMP00c, RK01, SAS<sup>+</sup>99a]. Diese MAI wird in der vorliegenden Arbeit als Intersystem-MAI bezeichnet, während die MAI zwischen Teilnehmerverbindungen innerhalb eines Mobilfunksystemes Intrasystem-MAI heißt. Ähnlich wie man es bei den Mehroperatorszenarien mit der Koexistenz von Mobilfunknetzen zu tun hat, geht es bei den Mehrsystemszzenarien um die Koexistenz unterschiedlicher Mobilfunksysteme.

Für die Koexistenz von Mobilfunksystemen ist besonders kritisch, daß unterschiedliche Mobilfunksysteme auf unterschiedlichen Vielfachzugriffsverfahren beruhen können [HV02, AS99, SAS<sup>+</sup>99a, HP98]. Dadurch können die Sende- und somit auch die MAI-Leistungen in einem der betrachteten Mobilfunksysteme wesentlich höher sein als in den anderen, woraus Szenarien mit sehr hoher Intersystem-MAI resultieren können.

Bei der Koexistenz unterschiedlicher Mobilfunksysteme muß unterschieden werden, ob die koexistierenden Mobilfunknetze unterschiedlichen Standards von ein und demselben Operator betrieben werden oder von unterschiedlichen Operatoren. Im ersteren Fall hat der Operator die Möglichkeit, etwaige Koexistenzprobleme durch geeignete Funknetzplanung sowie Handoveralgorithmen und Verfahren zur dynamischen Zuweisung der Frequenzkanäle effektiv zu vermindern. Im zweiten Fall verschiedener Operatoren der koexistierenden Mobilfunknetze unterschiedlichen Standards gibt es jedoch kaum Möglichkeiten, Koexistenzprobleme zu vermindern, weshalb für diesen Fall Koexistenzprobleme entweder bereits beim Entwurf

der Mobilfunksysteme ausgeschlossen werden müssen oder aber durch genügend hohen Frequenzabstand der operatorspezifischen Teilfrequenzbänder der koexistierenden Operatoren eine ausreichende Dämpfung der Interoperator-MAI gewährleistet werden muß.

In den bisherigen Betrachtungen der Abschnitte 1.3 bis 1.5 wird davon ausgegangen, daß die Gesamtfrequenzbänder verschiedener Mobilfunksysteme disjunkt und jeweils für Auf- und Abwärtsstrecke an einem Stück sind, d.h. zusammenhängend, vgl. Bild 1.1. Um einen Überblick über alle möglichen Koexistenzszenarien zu geben, werden in der folgenden Aufzählung Beispiele für Ausnahmen genannt, die jedoch im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr betrachtet werden:

- Zum einen ist es möglich, daß die Gesamtfrequenzbänder der Mobilfunksysteme zwar disjunkt, aber nicht jeweils für Auf- und Abwärtsstrecke am Stück sind [3GP01e, HV02]. Solche Lösungen werden üblicherweise dann verwendet, wenn nicht genügend freie Frequenzressourcen am Stück vorhanden sind, haben jedoch im allgemeinen den Nachteil, daß Koexistenzprobleme zwischen Mobilfunksystemen an jeder Grenze der Gesamtfrequenzbänder entstehen können.
- Zum anderen können die Gesamtfrequenzbänder der verschiedenen Mobilfunksysteme vollständig überlappen. Dabei muß beim Entwurf der koexistierenden Mobilfunksysteme eine vollständige Kompatibilität der Signalstruktur gewährleistet werden. Ein Beispiel ist das 3G-Mobilfunksystem CDMA-2000, bei dessen Entwurf Rückwärtskompatibilität der Signalstruktur mit dem 2G-System IS-95 gefordert wurde [OP98], so daß die beiden Mobilfunksysteme in ein und denselben Gesamtfrequenzband betrieben werden können. Ähnliche Überlegungen wurden auch für den Einsatz des 3G-Teilstandards TD-CDMA im Gesamtfrequenzband für WCDMA durchgeführt [HP98, HP99c, HP99a], um die Ausnutzung der Frequenzressourcen zu verbessern.

## 1.6 Stand der Technik und offene Probleme

Das grundsätzlich in zellularen Mobilfunknetzen zu lösende Problem besteht im Trennen der verschiedenen Teilnehmersignale unter der Nebenbedingung möglichst geringer MAI, um möglichst viele Teilnehmerverbindungen mit den zur Verfügung stehenden Übertragungsressourcen Gesamtfrequenzband und Zeit versorgen zu können. Zum Lösen dieses Problems wird üblicherweise eine Kombination mehrerer der in Abschnitt 1.2 aufgeführten grundlegenden Vielfachzugriffsverfahren eingesetzt. Beim Konzipieren eines Mobilfunkstandards, für den ein lizenziertes Gesamtfrequenzband exklusiv genutzt wird, und von Techniken zum Vermindern von MAI wird jedoch zunächst nur die MAI berücksichtigt, die auf Teilnehmerverbindungen aus einem einzigen Frequenzkanal in dem betrachteten

Mobilfunknetz zurückgehen. Dies ist dadurch motiviert, daß MAI von Teilnehmerverbindungen in anderen Frequenzkanälen desselben oder eines anderen Mobilfunknetzes durch die Filterung im Frequenzbereich stark gedämpft wird. Es muß jedoch beachtet werden, daß bei hoher Dislokation der BSen verschiedener Mobilfunknetze oder -systeme die Interoperator- bzw. Intersystem-MAI trotz der Dämpfung durch die Filterung im Frequenzbereich in bestimmten Szenarien extrem hoch sein kann [3GP02, KPD02, HT00, KSK<sup>+</sup>99]. Ein solches Szenario tritt z.B. in der Aufwärtsstrecke von Mehroperator-Szenarien auf, wenn eine MS eines Operators von ihrer versorgenden BS weit entfernt ist und daher hohe Sendeleistung verwendet und sich gleichzeitig sehr nahe an der BS eines anderen Operators befindet [HT00], so daß an der BS des anderen Operators eine sehr hohe Interoperator-MAI auftritt. Szenarien, in dem extrem hohe Interoperator-MAI auftreten kann, sind also durch das Zusammentreffen zweier Faktoren gekennzeichnet:

- Eine MS verwendet sehr hohe Sendeleistung aufgrund großer Entfernung zu ihrer versorgenden BS und
- diese MS ist sehr nahe an einer BS eines anderen Operators, d.h. die Funkfelddämpfung zwischen der MS und dieser BS des anderen Operators ist sehr gering.

Das Zusammentreffen dieser beiden Faktoren wird für die MSen und BSen, die ein und demselben Operator angehören, durch die interferenzmindernden Techniken Handover und Leistungsregelung möglichst vermieden [HT00, KSK<sup>+</sup>99], wodurch die Intraoperator-MAI in einem erträglichen Rahmen gehalten werden kann. Der Handover hat die Aufgabe, jede MS immer derjenigen BS zuzuordnen, für die die Funkfelddämpfung zu der MS am geringsten ist. Durch die Leistungsregelung wird der erwünschte Effekt erzielt, daß eine MS nahe an einer BS nur eine verhältnismäßig geringe Sendeleistung aufwendet. Zwischen verschiedenen Mobilfunknetzen ist ein Handover jedoch üblicherweise nicht möglich, so daß bei hoher Dislokation von BSen verschiedener Operatoren Szenarien möglich sind, bei denen hohe Interoperator-MAI auftritt. Wie hoch diese MAI im schlimmsten Fall sein kann, hängt von der maximalen Sendeleistung der MSen und BSen und von der kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  (engl. Minimum Coupling Loss, MCL) [3GP02, HT00] zwischen einer BS und einer MS ab. Die maximalen Sendeleistungen werden in den Mobilfunkstandards für die MSen und BSen festgelegt, für UMTS siehe hierzu [3GP01a, 3GP01b, 3GP01c, 3GP01d]. Die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  hängt von dem betrachteten Szenario ab, d.h. von der Bebauung des betrachteten Versorgungsgebiets sowie von der Art der Installation der Antennen an den BSen. In [SAS<sup>+</sup>99b, Sie98] wird für verschiedene Szenarien untersucht, welche Werte der kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  auftreten können.

Da ein Schlimmstfall-Szenario mit extrem hoher Interoperator-MAI statistisch nur sehr selten auftritt [ERC99], ist eine Auslegung des Mobilfunksystems im Hinblick auf das Vermeiden von Koexistenzproblemen im Schlimmstfall-Szenario nicht erforderlich [ERC99]. Vielmehr wird eine Degradation der Systemkapazität durch Interoperator-MAI in begrenztem

Maße als tolerierbar erachtet [3GP02]. Die Frage der Koexistenz verschiedener Mobilfunknetze in einem Versorgungsgebiet wird durch simulative Methoden beantwortet [3GP02], basierend auf mathematischen Modellen zum realitätsnahen Beschreiben von Mobilfunkzenarien durch Zufallsprozesse.

Für den 3G-Teilstandard WCDMA, der in der vorliegenden Arbeit besonders interessiert, wurden zahlreiche Untersuchungen zur Interoperator-MAI durchgeführt [WL01, FJ99, HLH99, 3GP02]. Die verschiedenen Veröffentlichungen unterscheiden sich jedoch in der Wahl der Modellierungsparameter meist erheblich, woraus auch Unterschiede bei den Ergebnissen resultieren. So können z.B. sehr geringe Koexistenzprobleme in den Untersuchungen von [WL01] auf das Vernachlässigen von Sichtverbindungen zwischen MSen und BSen zurückgeführt werden. Das betrachtete Szenario, die Modellierung der Ausbreitungseigenschaften im Mobilfunkzenario sowie weitere Parameter der Modellierung sind sehr kritische Faktoren beim Beantworten der Frage, ob in einem Mobilfunknetz mit Problemen durch die Koexistenz mit anderen Mobilfunknetzen gerechnet werden muß. Umfangreiche Untersuchungen wurden bei der Standardisierung von UMTS durchgeführt und in [3GP02] zusammengefaßt, können jedoch letztlich keine Gewißheit über das tatsächliche Ausmaß der Koexistenzproblematik in realen Szenarien geben. Weiteren Klärungsbedarf sieht der Verfasser vor allem bzgl. der Auswirkung extrem großer Zellradien, verschiedener Höhen der Antennen über Grund und der Ausbreitungseigenschaften der Funkwellen in verschiedenen Szenarien auf die Koexistenzproblematik.

Bei den Koexistenzuntersuchungen werden die Auf- und Abwärtsstrecke, wie in [3GP02] vorgeschlagen, meist getrennt betrachtet. Allerdings sollten für aussagekräftige Koexistenzuntersuchungen die Wechselwirkungen zwischen der Auf- und Abwärtsstrecke berücksichtigt werden [HT02], die durch eine gemeinsame Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke entstehen und für die Koexistenz sehr wesentlich sein können. Einfache Abschätzungen nach [HT02] führen zu dem Ergebnis, daß Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke üblicherweise vernachlässigt werden kann, und daß somit nahezu ausschließlich Interoperator-MAI in der Abwärtsstrecke für das Auftreten von Koexistenzproblemen verantwortlich ist. Diese Wechselwirkungen müssen nach Ansicht des Verfassers durch Simulation näher untersucht werden.

In Mobilfunksystemen der dritten Generation ist der Einsatz neuer Techniken zum Vermindern von Intraoperator-MAI vorgesehen. Dazu gehören spezielle Algorithmen zur Leistungsregelung [GVGZ93, Zan92b, Zan92a, GZ94, LLS91, IFSPH01, WH00, KHR<sup>+</sup>01, BM00] und neue Handover-Prozeduren wie der Soft Handover (SHO) [BHC00, WL97, SB93, OP98]. Solche Techniken zum Mindern von Intraoperator-MAI werden zwar bei bekannten Koexistenzuntersuchungen zum Teil mit einbezogen. Dem Verfasser ist jedoch keine umfassende Untersuchung der Einflüsse der genannten Techniken zum Mindern von

Intraoperator-MAI auf die Interoperator-MAI bekannt. Ein weiteres Verfahren zum Mindern von Intraoperator-MAI ist der Einsatz eines Handovers von Teilnehmerverbindungen zwischen den Frequenzkanälen (engl. Interfrequency Handover, IFHO) [HT02] eines Operators. Ist die Auslastung eines Frequenzkanals besonders hoch und gibt es noch andere Frequenzkanäle zur Auswahl, so kann durch einen IFHO in den Frequenzkanal niedrigerer Auslastung das Auftreten hoher MAI vermieden werden. Dabei können auch die Frequenzkanäle anderer Mobilfunknetze des gleichen Operators, möglicherweise auch anderen Standards, in Betracht gezogen werden. Zum Durchführen des IFHO ist es erforderlich, Messungen in einem anderen als dem derzeit benutzten Frequenzkanal durchführen zu können [Eri99a]. In Mobilfunksystemen mit kontinuierlicher Datenübertragung ist ein Messen auf einem anderen Frequenzkanal aber nicht ohne weiteres möglich, da entweder eine zweite Empfängerstufe vorhanden sein oder die Übertragung in dem Nutz-Frequenzkanal ausgesetzt werden muß [Eri99a]. Daher wurde bei dem 3G-Teilstandard WCDMA der Compressed Mode (CM) spezifiziert [3GP00b], durch den ein Datenburst zeitlich komprimiert werden kann, um so eine Übertragungspause zu schaffen, in der eine Messung durchgeführt werden kann. Diese zeitliche Kompression wirkt sich jedoch auch auf die Sendeleistung aus [GJD97] und beeinflußt somit auch die erzeugte Interoperator-MAI. Daher ist ein weiteres in der Literatur nach Wissen des Verfassers nicht behandeltes Problem, wie sich der CM auf die Interoperator-MAI auswirkt.

Zum Mindern von Interoperator-MAI sind verschiedene Methoden denkbar:

- Kollokation der BSen unterschiedlicher Mobilfunknetze bzw. -systeme, zwischen denen aufgrund des Verwendens benachbarter Frequenzressourcen Koexistenzprobleme möglich sind. Durch Kollokation der BSen werden kritische Interferenzszenarien mit extrem hoher Interoperator- bzw. -system-MAI vermieden. Diese Methode erfordert jedoch eine gemeinsame Planung der Zellstruktur für die betrachteten Mobilfunknetze bzw. -systeme. Da unterschiedliche Mobilfunknetze nach der in Abschnitt 1.3 eingeführten Definition von unterschiedlichen Operatoren betrieben werden, wird eine Koordination der Funknetzplanung aus Wettbewerbsgründen oft nicht gewünscht.
- Einführen von Schutzbändern bzw. Erhöhen des Schutzabstandes zwischen benachbarten Frequenzkanälen koexistierender Mobilfunknetze bzw. -systeme. Diese Methode vermindert zwar die MAI im Nachbarkanal, bewirkt jedoch eine Verminderung der spektralen Effizienz [HMP00b, Eri98] der Mobilfunknetze bzw. -systeme, da das Spektrum der Schutzbänder nicht mehr zur Übertragen von Nutzinformationen zur Verfügung steht.
- Höhere Dämpfung der Kanalfilter im Bereich der interferierenden Anderkanäle. Diese Maßnahme ist jedoch meist mit relativ hohem Aufwand an Kosten, Platzbedarf und Gewicht verbunden, was vor allem in den MSen nachteilig ist [3GP01e].



Alle genannten Techniken bewirken eine Verminderung der MAI zwischen den Teilnehmerverbindungen koexistierender Mobilfunknetze bzw. -systeme, sind jedoch auch mit substantiellen Nachteilen für die Effizienz und die Einsetzbarkeit der Mobilfunknetze bzw. -systeme verbunden. Es stellt sich die Frage nach alternativen Methoden zum Vermindern von MAI zwischen koexistierenden Mobilfunknetzen bzw. -systemen.

In Abschnitt 1.1 wird auf die Eigenschaften der Duplexverfahren FDD und TDD im Bezug auf die Anderstrecken-MAI eingegangen. Die notwendige Synchronisation der Zeitschlitzte aller Teilnehmerverbindungen bei TDD kann für die Teilnehmerverbindungen verschiedener Mobilfunknetze nicht immer gewährleistet werden, da dies eine signifikante Einschränkung für den effizienten Betrieb der einzelnen Mobilfunknetze darstellt. Daher kann Anderstrecken-MAI zwischen Teilnehmerverbindungen verschiedener Mobilfunknetze auftreten, die sehr hoch sein kann [SAS<sup>+</sup>99a, HMP00c]. Das Problem der Anderstrecken-MAI kann auch für den Fall der Koexistenz unterschiedlicher Mobilfunksysteme auftreten. Es ist denkbar, daß das Gesamtfrequenzband eines TDD-Mobilfunksystems einem Gesamtfrequenzband eines FDD-Mobilfunksystems benachbart ist. Dieses Koexistenzszenario tritt bei der Frequenzzuweisung in Europa auf, siehe Bild 1.1, wo bei 1920 MHz das WCDMA-Gesamtfrequenzband direkt an das TD-CDMA-Gesamtfrequenzband angrenzt. Die hier zwischen den direkt benachbarten Frequenzkanälen für die unterschiedlichen 3G-Teilstandards TD-CDMA und WCDMA auftretende Intersystem-MAI wird als potentiell kritisch erachtet [AS99, SAS<sup>+</sup>99a, HMP00c], da möglicherweise sehr hohe Anderstrecken-MAI nicht vermieden werden kann, insbesondere, wenn die Frequenzkanäle von unterschiedlichen Operatoren genutzt werden, siehe Abschnitt 1.5.

## 1.7 Ziele der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Finden systematischer Zugänge zum Beschreiben, Ermitteln und Reduzieren bzw. Vermeiden von MAI zwischen koexistierenden Mobilfunknetzen. Dazu sind zunächst die Ursachen und Auswirkungen der verschiedenen MAI-Arten herauszuarbeiten und zusammenzustellen. Weiterhin müssen Modelle zum Beschreiben und Auswerten der zu untersuchenden Szenarien erarbeitet werden. Mit diesen Modellen können die interessierenden Effekte von Interoperator-MAI untersucht werden. Aufgrund der sehr komplexen und vielschichtigen Koexistenzproblematik, siehe die Abschnitte 1.3 und 1.5, wird sich die vorliegende Arbeit auf den Bereich der Koexistenz zwischen Mobilfunknetzen bzw. -systemen beschränken, die unterschiedliche Frequenzkanäle benutzen. Um vor dem Hintergrund realistischer Parameter und Szenarien arbeiten zu können, basieren die Untersuchungen auf dem 3G-Standard UMTS. Die grundlegenden Vorgehensweisen und Ergebnisse sind jedoch auf andere Mobilfunksysteme übertragbar.

Die konkreten Ziele der vorliegenden Arbeit sind die folgenden:

- Klassifizieren der möglichen MAI-Arten, die zwischen den Teilnehmerverbindungen innerhalb eines Mobilfunknetzes oder verschiedener Mobilfunknetze oder aber zwischen verschiedenen Mobilfunksystemen auftreten können. Gegenseitige Ausschlüsse verschiedener MAI-Arten sollen abhängig von den eingesetzten Vielfachzugriffsverfahren identifiziert und erläutert werden.
- Ermitteln und Beschreiben von Werkzeugen und Verfahren zum Bestimmen der gegenseitigen Beeinträchtigungen von Mobilfunknetzen bzw. -systemen durch MAI.
- Ermitteln des Performanzverlustes durch MAI zwischen den Mobilfunknetzen bzw. -systemen für Szenarien, die als kritisch erachtet werden, basierend auf der o.g. Klassifizierung der MAI-Arten.
- Bestimmen des Einflusses der Systemparameter auf die MAI zwischen den Mobilfunknetzen bzw. -systemen. Daraus sind Vorgaben und Konzepte zum Vermeiden von Interoperator-MAI bzw. Intersystem-MAI zu entwickeln.
- Untersuchen des Einflusses der in Abschnitt 1.6 angeführten Techniken zur Verminderung von Intraoperator-MAI bzw. Intrasystem-MAI auf die Interoperator-MAI bzw. Intersystem-MAI.
- Entwickeln von Verfahren zum Mindern von Interoperator-MAI bzw. Intersystem-MAI ausgehend von den spezifischen Problemstellungen in den verschiedenen Szenarien. Dabei soll die Unabhängigkeit der koexistierenden Mobilfunknetze bzw. -systeme nicht beeinträchtigt werden. Gleichzeitig soll die erzielbare Kapazität der jeweiligen Mobilfunknetze bzw. -systeme möglichst hoch sein.

## 1.8 Struktur der Arbeit

Im vorliegenden Abschnitt 1.8 werden die Struktur der Dissertation erläutert und die Inhalte der einzelnen Kapitel kurz vorgestellt.

In Kapitel 2 werden die grundlegenden MAI-Arten zusammengestellt und klassifiziert. Dabei wird insbesondere auf die Interoperator-MAI eingegangen. Ursachen und Auswirkungen der verschiedenen MAI-Arten werden beschrieben, und gegenseitige Ausschlüsse werden erläutert.

Gegenstand von Kapitel 3 sind grundlegende Arbeitsweisen zum MAI-mäßigen Untersuchen von Mobilfunknetzen. Neben verschiedenen Konzepten zur Simulation von Mobilfunknetzen werden Simulationsszenarien und Ausbreitungsmodelle erläutert. Weiterhin

wird ein mathematisches Modell zum Auswerten der untersuchten Mobilfunknetze unter Berücksichtigung von MAI zwischen Mobilfunknetzen hergeleitet, mit dessen Hilfe die Nutz-zu-Stör-Leistungsverhältnisse (engl. Signal to Noise Ratio, SNR) für die einzelnen Teilnehmerverbindungen berechnet werden können. Dabei werden verschiedene Leistungsregelungsverfahren berücksichtigt. Um den Simulationsaufwand zu vermindern und die Eigenschaften der verschiedenen MAI-Arten getrennt untersuchen zu können, wird weiterhin ein Konzept zum Überlagern unterschiedlicher MAI-Arten durch Faltung von Dichtefunktionen der Umkehrfunktion des SNRs vorgestellt.

Die verschiedenen, in der vorliegenden Arbeit untersuchten Systemkonstellationen und Szenarien werden in Kapitel 4 zusammengestellt, und die Unterschiede werden hervorgehoben.

Die Kapitel 5, 6 und 7 beschäftigen sich mit den in Kapitel 4 zusammengestellten Koexistenzszenarien. In Kapitel 5 wird die Koexistenz von WCDMA-Mobilfunknetzen in Makrozellen untersucht. Dabei wird neben dem Einfluß verschiedener Systemparameter auch der Einfluß der in Abschnitt 1.6 angesprochenen Techniken zum Vermindern von Intraoperator-MAI auf die Interoperator-MAI behandelt. Die Interoperator-MAI wird zunächst für Auf- und Abwärtsstrecke getrennt ausgewertet, und danach werden die MAI-mäßigen Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke untersucht. In Kapitel 6 wird die Koexistenz von TD-CDMA-Mobilfunknetzen in Mikrozellen untersucht, wobei vor allem auf die Auswirkungen von Anderstrecken-MAI eingegangen wird. In Kapitel 7 wird der Fall der Koexistenz zwischen einem WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen und einem TD-CDMA-Mobilfunknetz in Mikrozellen untersucht, d.h. ein Szenario mit hierarchischer Zellstruktur mit unterschiedlichen Zugriffstechnologien in den beiden betrachteten Hierarchieebenen.

Thema von Kapitel 8 ist ein neuartiges Konzept zum Mindern von Interoperator-MAI durch den Einsatz moderner Antennentechniken. Dabei wird durch die Wahl geeigneter Antennencharakteristiken MAI vermindert. Dieses Verfahren zeichnet sich insbesondere durch seine Einfachheit aus.

In Kapitel 9 werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit zusammengetragen und zu einem ganzheitlichen Konzept zur Minderung von Interoperator-MAI bzw. Intersystem-MAI integriert. Ausgehend von dieser Zusammenstellung werden Schlußfolgerungen gezogen und Empfehlungen für die Funknetzplanung in 3G-Mobilfunknetzen sowie für den Entwurf von Mobilfunksystemen zukünftiger Generationen gegeben.

Das Kapitel 10 bringt schließlich eine Zusammenfassung der Ergebnisse in deutscher und englischer Sprache.

## Kapitel 2

# Klassifizierung von MAI in Mobilfunksystemen

### 2.1 Einleitung

Die Kapazität moderner Mobilfunksysteme ist meist, wie bereits in Kapitel 1 angesprochen, durch MAI begrenzt [Yac93], also durch Störsignale, die in den Mobilfunksystemen selbst entsteht, und nicht durch das thermische Empfängerrauschen [MG86b]. Wenn es darum geht, die Leistungsfähigkeit von Mobilfunksystemen zu erhöhen, sind somit Maßnahmen zum Vermindern der MAI gefragt. Zum effizienten Bekämpfen von MAI ist es erforderlich, deren physikalische Ursachen und Eigenschaften genau zu kennen, also z.B. die Art und Anzahl der MAI-Quellen, die mittlere MAI-Leistung und deren Varianz. Abhängig von den Charakteristiken eines Mobilfunksystems können verschiedene Arten von MAI mit unterschiedlichen Ursachen und Eigenschaften auftreten. Auf die verschiedenen Arten von MAI wurde bereits in Kapitel 1 grundsätzlich eingegangen. Im vorliegenden Kapitel 2 schlägt der Verfasser nun eine detailliertere, in dieser Art in der Literatur noch nicht verfügbare, Klassifizierung der MAI vor, wobei folgende Klassen verwendet werden:

- Intra- und Interzell-MAI: MAI aus der gleichen bzw. einer anderen Zelle.
- Gleich- und Anderstrecken-MAI: MAI von einer Teilnehmerverbindung in derselben bzw. in der anderen Übertragungsrichtung.
- Gleich- und Anderhierarchie-MAI: MAI aus der gleichen Hierarchieebene oder aus einer anderen Hierarchieebene.
- Gleich- und Anderkanal-MAI: MAI aus dem gleichen bzw. aus einem anderen Frequenzkanal.
- Intra- und Interoperator-MAI: MAI aus dem Mobilfunknetz desselben bzw. eines anderen Operators.
- Intra- und Intersystem-MAI: MAI aus einem Mobilfunknetz gleichen bzw. anderen Standards.

In den Abschnitten 2.2 bis 2.7 werden diese MAI-Klassen näher erläutert und vertiefend betrachtet. Der Verfasser beabsichtigt hiermit, das im Mobilfunk wichtige Gebiet der MAI für systematische Untersuchungen besser zugänglich zu machen als dies bisher der Fall ist.

Eine MAI-Art kann mehreren Klassen angehören. Ob eine bestimmte MAI-Art auftreten kann, hängt ab von den eingesetzten Duplex- und Vielfachzugriffsverfahren sowie von der

Zellstruktur, d.h. von der Art, wie die Mobilfunknetze der unterschiedlichen Operatoren im einzelnen strukturiert sind. Abschnitt 2.8 bringt eine Übersicht über die Zusammenhänge der verschiedenen MAI-Klassen und über gegenseitige Ausschlüsse abhängig vom eingesetzten Duplexverfahren. Aus dieser Übersicht kann man für einen bestimmten Mobilfunkstandard ersehen, welche MAI-Arten auftreten können. Die Eigenschaften einer bestimmten MAI-Art sind aus den Beschreibungen der MAI-Klassen, der die MAI-Art angehört, nach den Abschnitten 2.2 bis 2.7 ersichtlich.

## 2.2 Intra- und Interzell-MAI

In zellularen Mobilfunknetzen werden, wie schon in Abschnitt 1.4 angesprochen, die MSen eines Versorgungsgebiets BSen zugeordnet, die jeweils Teilgebiete des Versorgungsgebiets, die Zellen, vgl. Abschnitt 1.4, abdecken. Beim Zuordnen der MSen zu Zellen hat es sich als sinnvoll erwiesen [GJP<sup>+</sup>91, Ste96], nach dem Kriterium der geringsten Funkfelddämpfung zwischen den BSen und MSen vorzugehen. Aufgrund des nicht eindeutigen Zusammenhangs zwischen Funkfelddämpfung und Abstand zwischen MS und BS verlaufen die Grenzen der Zellen im allgemeinen geographisch nicht regelmäßig [Ste96].

Bei der im folgenden behandelten Abgrenzung von Intra- und Interzell-MAI ist vom Mobilfunknetz eines einzigen Operators auszugehen. Weiterhin wird eine CDMA-Komponente im Vielfachzugriffsverfahren vorausgesetzt, und es wird der SHO verwendet, siehe Abschnitt 1.6. Diese Eigenschaften des betrachteten Mobilfunknetzes findet man zum Beispiel in den Mobilfunkstandards WCDMA und TD-CDMA, die, wie in den Abschnitten 1.6 und 1.7 erwähnt, in der vorliegenden Arbeit hauptsächlich betrachtet werden.

Beim SHO kann eine MS mehreren BSen gleichzeitig zugeordnet sein, wodurch eine vorteilhafte Diversität zum Verringern nachteiliger Eigenschaften des Funkkanals entsteht, siehe Abschnitt 3.3 und Unterabschnitt 3.5.1. Die Menge aller BSen, denen eine MS zugeordnet wird, wird als Active Set [HT00, OP98] dieser MS bezeichnet. Im folgenden wird eine einzige Teilnehmerverbindung zwischen einer MS und einer einzigen BS aus dem Active Set betrachtet, die als Referenzverbindung bezeichnet wird.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der MAI von Teilnehmerverbindungen, die der gleichen BS zugeordnet sind wie die Referenzverbindung, und der MAI von Teilnehmerverbindungen, die anderen BSen zugeordnet sind, werden Intra- und Interzell-MAI unterschieden. Intrazell-MAI ist MAI, die die Referenzverbindung von allen Teilnehmerverbindungen erfährt, die der gleichen BS zugeordnet sind wie die Referenzverbindung, Interzell-MAI ist die MAI, die die Referenzverbindung von den Teilnehmerverbindungen aller anderen BSen erfährt.

Wie bereits in Abschnitt 1.4 erwähnt, entsteht Interzell-MAI durch Frequenzwiederbenutzung in anderen Zellen, die als Gleichkanalzellen bezeichnet werden. Intrazell-MAI kann durch den Vielfachzugriff auf einen Frequenzkanal einer Zelle unter Verwendung des Vielfachzugriffsverfahrens CDMA auftreten [Meu03].

Unterscheiden sich die Teilnehmersignale in einem Frequenzkanal einer Zelle durch teilnehmerspezifische CDMA-Codes, so entsteht Intrazell-MAI, wenn diese Signale im Empfänger nicht perfekt voneinander getrennt werden können, vgl. Abschnitt 1.2. Eine solche perfekte Trennung kann durch Verfahren der Mehrteilnehmerdetektion (engl. Multiuser Detection, MUD) erzielt werden, bei denen alle in einem Frequenzkanal gleichzeitig aktiven Teilnehmerverbindungen, die einer BS zugeordnet sind, gemeinsam verarbeitet werden [Meu03, Ver98]. Solche Verfahren sind jedoch bei einer hohen Zahl gleichzeitig aktiver Teilnehmerverbindungen wie im Falle von WCDMA äußerst komplex [Ver98]. Dies gilt insbesondere für das optimale MUD-Verfahren nach dem Prinzip der ML (engl. Maximum Likelihood)-Detektion [Ver98], das mit der derzeit verfügbaren Technologie in Echtzeit praktisch nicht durchführbar ist. Suboptimale Verfahren wie JD (engl. Joint Detection) [Kle96, Meu03] sind eher realisierbar, verursachen aber eine Degradation des SNRs der Teilnehmersignale im Empfänger [BW98, Kle96]. In heutigen Mobilfunknetzen nach dem 3G-Teilstandard WCDMA werden aus Komplexitätsgründen anstelle von MUD-Verfahren die wesentlich einfacheren Verfahren der Einteilnehmerdetektion (engl. Single User Detection, SUD) eingesetzt [Hul94, Meu03], bei denen alle Teilnehmerverbindungen getrennt detektiert werden. Zu diesem Zweck werden meist Rakeempfänger [Hul94, ASS98] eingesetzt, bei denen die durch Mehrwegeausbreitung entstehenden zeitlich verschobenen Replika des spektral gespreizten teilnehmerspezifischen Sendesignals im Empfänger durch Korrelation mit entsprechend zeitverschobenen CDMA-Codes und anschließende Überlagerung der Korrelatorausgänge detektiert werden [Hul94]. Dabei kann jedoch eine nicht unerhebliche MAI zwischen den teilnehmerspezifischen Empfangssignalen auftreten [Meu03]. Um diesen nachteiligen Effekt zu mildern, werden in der Abwärtsstrecke orthogonale CDMA-Codes eingesetzt [3GP00a]. Im Falle einer eher unrealistischen Ein-Pfad-Ausbreitung könnte mit solchen CDMA-Codes Intrazell-MAI auch bei Verwenden von SUD komplett vermieden werden. Im Fall von Mehrwegeausbreitung tritt trotz Verwenden orthogonaler CDMA-Codes Intrazell-MAI zwischen den unterschiedlich zeitverschobenen Replika des Sendesignals auf.

Auch Interzell-MAI läßt sich prinzipiell durch das Berücksichtigen von Interzell-Interferern bei der MUD vermindern [Ost01]. Da die Quellen der Interzell-MAI einen relativ großen Abstand zur betrachteten Referenzzelle haben, sind die MAI-Leistungen der einzelnen Interzell-Interferer eher klein, so daß die durch das Einbeziehen von Interzell-Interferern in die MUD erzielbare MAI-Reduktion weniger bedeutend ist.

Wird zum Trennen der Teilnehmerverbindungen in einem Frequenzkanal ausschließlich das

Vielfachzugriffsverfahren TDMA eingesetzt, wie dies z.B. im 3G-Teilstandard TD-CDMA beim Verwenden der Spreizfaktors  $Q$  gleich 1 der Fall ist, so tritt keine Intrazell-MAI zwischen den durch TDMA getrennten Teilnehmerverbindungen auf, solange die Signale in den Zeitschlitzten der Teilnehmerverbindungen einer Zelle synchron an dem jeweiligen Empfänger ankommen und MAI durch den Delay Spread des Kanals durch das Vorsehen von Schutzintervallen vermieden wird. Zum Erzielen der Synchronität wird bei großen Zellradien in der Aufwärtsstrecke ein Timing Advance (TA) verwendet [Bin01], d.h. weit von der BS entfernte MSen beginnen früher mit Senden als die näher an der BS gelegenen MSen.

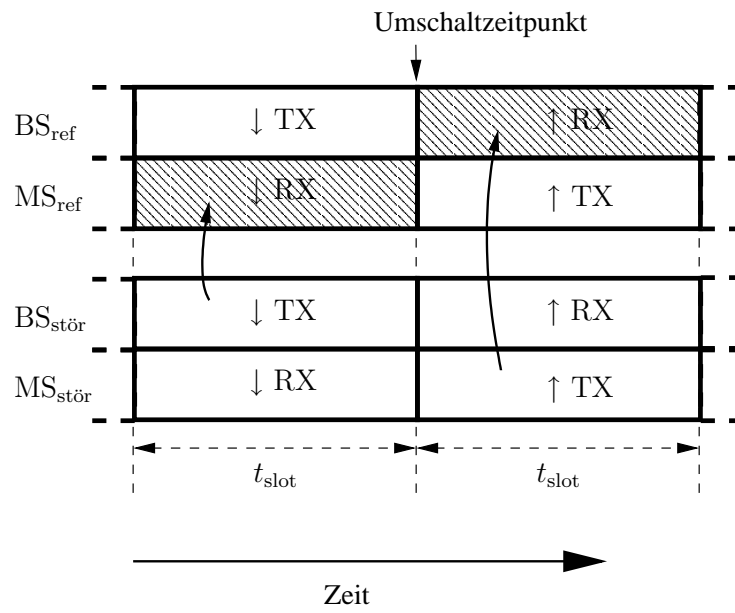
## 2.3 Gleich- und Anderstrecken-MAI

In einem TDD-Mobilfunknetz werden, wie in Abschnitt 1.2 erläutert, für Auf- und Abwärtsstreckenübertragung dieselben Frequenzkanäle benutzt. Deshalb kann der Fall auftreten, daß eine Auf(Ab)wärtsstreckenübertragung eine andere Auf(Ab)wärtsstreckenübertragung stört. In diesem Fall spricht man von Gleichstrecken-MAI. Diese kann in die beiden Varianten MS→BS-Gleichstrecken-MAI und BS→MS-Gleichstrecken-MAI unterteilt werden, wobei MS→BS und BS→MS bedeutet, daß ein MS-Sender einen BS-Empfänger bzw. daß ein BS-Sender einen MS-Empfänger stört. Es kann auch der Fall eintreten, daß eine Auf(Ab)wärtsstreckenübertragung eine andere Ab(Auf)wärtsstreckenübertragung stört. In diesem Fall hat man es mit einer Anderstrecken-MAI zu tun, vgl. Abschnitt 1.2, bei der es die beiden Varianten MS→MS-Anderstrecken-MAI und BS→BS-Anderstrecken-MAI gibt. Insgesamt geht es im vorliegenden Abschnitt also um vier unterschiedliche Arten von MAI.

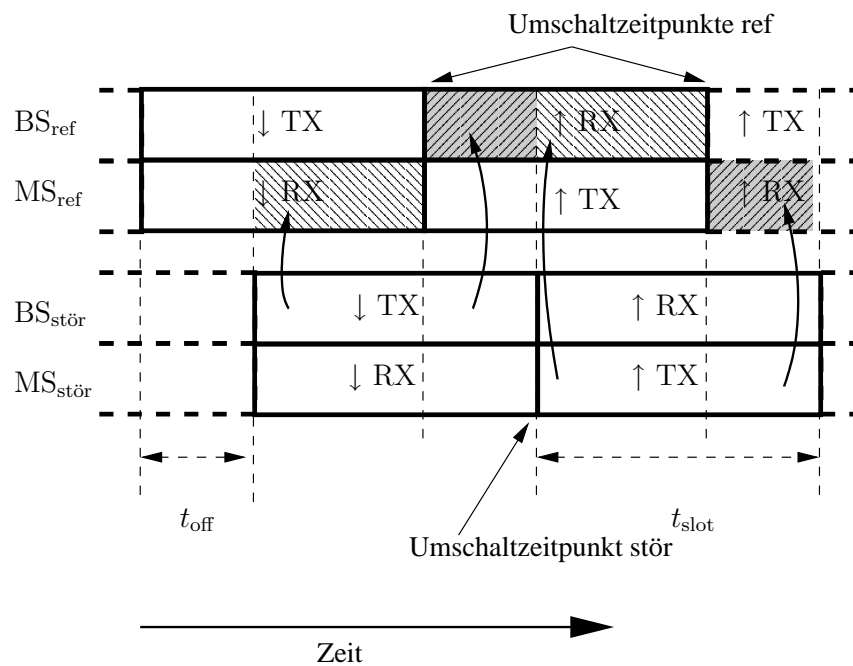
Die Übergangzeitpunkte aufeinanderfolgender Auf- und Abwärtsstreckenübertragungen werden als Umschaltzeitpunkte (engl. Switching Point [Bin01]) bezeichnet. Im einfachsten, auch hier vorausgesetzten Fall, liegen die Umschaltzeitpunkte so, daß aufeinanderfolgende Zeitschlitzte der Auf- bzw. Abwärtsstreckenübertragung die gleiche Dauer  $t_{\text{slot}}$  haben, siehe Bild 2.1. In Bild 2.1 werden die Zeitschlitzte einer Referenzverbindung zwischen  $BS_{\text{ref}}$  und  $MS_{\text{ref}}$  sowie einer diese Referenzverbindung störenden Teilnehmerverbindung zwischen  $BS_{\text{stör}}$  und  $MS_{\text{stör}}$  gezeigt. Betrachtet man die Umschaltzeitpunkte der Auf- und Abwärtsstreckenübertragungen der beiden verschiedenen Teilnehmerverbindungen, so besteht eine weitere Vereinfachung darin, daß die Zeitschlitzte für Auf- bzw. Abwärtsstreckenübertragung synchron sind, siehe Bild 2.1a). In diesem Fall gibt es ausschließlich Gleichstrecken-MAI. Sind die Zeitschlitzte der störenden Teilnehmerverbindung dagegen um

$$-t_{\text{slot}} \leq t_{\text{off}} \leq t_{\text{slot}} \quad (2.1)$$

a)  $t_{\text{off}} = 0$



b)  $t_{\text{off}} > 0$



Anderstrecken-MAI

↑ Aufwärtsstrecke



Gleichstrecken-MAI

↓ Abwärtsstrecke

Bild 2.1. MAI in einem TDD-Mobilfunknetz abhängig von der Zeitschlitz-Synchronisation [HP99b, Bin01]



zeitlich gegen die der Referenzverbindung versetzt, siehe Bild 2.1b), so tritt sowohl Gleich- als auch Anderstrecken-MAI auf. Als relatives Maß für den Versatz ist der Synchronisationsfaktor [HP99b]

$$\alpha_S = \|t_{\text{off}}\|/t_{\text{slot}}, \quad 0 \leq \alpha_S \leq 1, \quad (2.2)$$

geeignet. Im Falle  $\alpha_S$  gleich 0 gibt es ausschließlich Gleichstrecken-MAI, im Fall  $\alpha_S$  gleich 1 gibt es ausschließlich Anderstrecken-MAI.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß trotz netzweit synchroner Auf- bzw. Abwärtsstreckenübertragung gemäß Bild 2.1a) in TDD-Mobilfunknetzen mit großen Zellen eine signifikante Anderstrecken-MAI vom Typ BS→BS auftreten kann. Nach dem synchronen Übergang von der Ab- zur Aufwärtsstreckenübertragung, d.h. nachdem alle BSen auf Empfang geschaltet sind, könne nämlich an fernen BSen Reste der Sendesignale der Abwärtsstrecken als BS→BS-Anderstrecken-MAI ankommen.

Im folgenden wird noch auf einige Charakteristika der vier verschiedenen Arten der Gleich- bzw. Anderstrecken-MAI eingegangen.

Die Leistung der MS→BS-Gleichstrecken-MAI und der BS→MS-Gleichstrecken-MAI fluktuiert aufgrund der Bewegung der MSen i.a. relativ stark. Da die Distanz zwischen MSen und BSen eine gewisse Schranke nicht unterschreitet, ist die Gleichstrecken-MAI im allgemeinen gut handhabbar.

Die Leistung der BS→BS-Anderstrecken-MAI fluktuiert i.a. relativ wenig, da die BSen ortsfest sind. Sie kann kritisch werden im Falle großer Zellen und dem damit einhergehenden Anbringen der BSen an erhöhten Punkten oder aber wenn zwei BSen einander sehr nahe sind. Die eventuell hieraus resultierende direkte gegenseitige Sichtbarkeit (engl. Line of Sight, LoS) der BSen kann zu geringen Dämpfungen der Pfade zwischen den BSen und in Kombination mit den sehr hohen Sendeleistungen der BSen zu entsprechend hoher MAI-Leistung führen. Ungünstig wirkt sich in diesem Zusammenhang auch aus, daß die BSen im allgemeinen eine relativ hohe Empfängerempfindlichkeit haben müssen.

Die MS→MS-Anderstrecken-MAI ist im allgemeinen relativ unkritisch, weil die Dämpfungen der Pfade zwischen MSen tendenziell hoch sind. Kritisch kann diese MAI jedoch in Szenarien mit hohen Teilnehmerdichten werden, weil in solchen Szenarien MSen räumlich eng benachbart sein können.

## 2.4 Gleich- und Anderhierarchie-MAI

Da die MSen in einem Versorgungsgebiet aufgrund des Nutzerverhaltens in der Realität meist nicht gleichförmig verteilt sind [HRMS03], muß die Kapazität in bestimmten Teilgebieten höher sein als in anderen. Durch unterschiedliche Zellgrößen kann die verfügbare Kapazität an die zu erwartende höhere Teilnehmerdichte z.B. in Städten im Vergleich zu ländlichen Gebieten angepaßt werden [OP98, FA94, JKH02], je kleiner die Zellen, desto größer ist nämlich die pro Flächeneinheit versorgbare Anzahl von Teilnehmern. In Gebieten sehr hohen Kapazitätsbedarfs, die auch als Hotspots bezeichnet werden, z.B. Innenstädte, Fußballstadien, Geschäftszentren oder Flughäfen, sind deshalb extrem kleine Zellen mit Radien bis herab zu wenigen zehn Metern erforderlich [FA94]. Solche kleinen Zellen werden als Mikrozellen bezeichnet. Allerdings sind Mikrozellen ungeeignet, um sich schnell bewegendende MSen, z.B. in Autos, zu versorgen [GCSA03, TRV98], da zu viele Handover notwendig wären. Daher werden zellulare Mobilfunknetze hierarchisch aufgebaut [CPA99, HT00]:

- Durch ein Zellnetz mit vergleichsweise großen Makrozellen wird die flächendeckende Versorgung sichergestellt [GCSA03].
- In Hotspots wird unterhalb der Hierarchieebene der Makrozellen eine weitere Hierarchieebene mit kleineren Mikrozellen aufgebaut [CPA99].
- MSen hoher Geschwindigkeit werden auch im Bereich der Hotspots in die Makrozellen eingebucht, während MSen geringer Geschwindigkeit in den Mikrozellen versorgt werden [GCSA03]. Dort sind durch die kleineren Zellgrößen wesentlich geringere Sendeleistungen erforderlich als in den Makrozellen, so daß weniger MAI entsteht und die Kapazität höher ist [FA94].

In einer inhomogenen Zellstruktur der beschriebenen Art mit Makro- und Mikrozellen können kritische Interferenzszenarien auftreten, wenn die BSen der verschiedenen Hierarchieebenen an den gleichen Orten stehen und geringe Funkfelddämpfung zwischen den BSen besteht [3GP02].

Die Unterscheidung von Intrazell- und Interzell-MAI laut der Definition in Abschnitt 2.2 ist nur bei der MAI aus der gleichen Hierarchieebene möglich, da die Zellen unterschiedlicher Hierarchieebenen überlappen und nicht deckungsgleich sind.

Es können auch mehr als zwei Hierarchieebenen bestehen. Üblich sind neben den bereits erwähnten Makro- und Mikrozellen noch Pikozellen, die zum Versorgen von Hotspots sehr hohen Kapazitätsbedarfs, z.B. in Bürogebäuden, gedacht sind [3GP98].

## 2.5 Gleich- und Anderkanal-MAI

Das Vielfachzugriffsverfahren FDMA erlaubt den geordneten Zugriff verschiedener Teilnehmerverbindungen in einem Mobilfunksystem auf den Mobilfunkkanal mit seinen Übertragungsressourcen Gesamtfrequenzband und Zeit durch Filterung im Frequenzbereich. Im folgenden wird von einem hybrides Vielfachzugriffsverfahren ausgegangen, bei dem FDMA mit CDMA kombiniert wird. Das Gesamtfrequenzband des betrachteten Mobilfunksystems wird durch FDMA in Frequenzkanäle aufgeteilt, vgl. Abschnitt 1.4. Ob diese Frequenzkanäle unterschiedlichen operatorspezifischen Teilfrequenzbändern oder unterschiedlichen zellspezifischen Teilfrequenzbändern angehören, ist im vorliegenden Abschnitt 2.5 nicht relevant. Es werde jedoch angenommen, daß in jedem Frequenzkanal keine weitere Trennung von Teilnehmersignalen durch FDMA vorgenommen wird. Innerhalb eines Frequenzkanals können trotzdem mehrere Teilnehmerverbindungen gleichzeitig aktiv sein, indem sie durch das Vielfachzugriffsverfahren CDMA getrennt werden. In Bezug auf eine betrachtete Referenzverbindung bezeichnet man MAI aus dem Frequenzkanal, in dem auch die Referenzverbindung arbeitet, als Gleichkanal-MAI, MAI aus einem anderen Frequenzkanal als Anderkanal-MAI [Yac93]. Der Frequenzkanal der Referenzverbindung wird vom Verfasser als Referenzkanal bezeichnet.

Die Gleichkanal-MAI entsteht durch zwei Effekte: Zum einen durch MAI zwischen den durch CDMA-Codes getrennten Teilnehmerverbindungen in und derselben Zelle, siehe auch Abschnitt 1.2, zum anderen durch das Wiederverwenden des gleichen Frequenzkanals in einer anderen Zelle, siehe auch Abschnitt 1.4. Die erstgenannte dieser MAI-Klassen gehört zur Klasse der Intrazell-MAI, die zweitgenannte zur Klasse der Interzell-MAI, vgl. Abschnitt 2.2.

Obwohl in der Theorie die in einem Mobilfunksystem abgestrahlten Sendesignale als ideal bandbegrenzt angenommen werden und damit theoretisch auf den zugewiesenen Frequenzkanal begrenzt sind, ist eine solche Begrenzung in der Realität nicht möglich. Da Signale nicht zugleich band- und zeitbegrenzt sein können [Rup93], müßte das Sendesignal für eine ideale Bandbegrenzung unrealistischerweise zeitlich unendlich ausgedehnt sein. Das Entstehen von Anderkanal-MAI ist also grundsätzlich nicht zu vermeiden. Der Effekt, daß ideal bandbegrenzte Sendesignale in der Praxis nicht realisierbar sind, hat allerdings nur eine sehr geringe Auswirkung auf die Anderkanal-MAI. Es gibt jedoch noch weitere Effekte, die die Empfangsqualität durch Anderkanal-MAI beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit unterschieden zwischen Anderkanal-MAI, die im Sender verursacht wird, und Anderkanal-MAI, die im Empfänger verursacht wird.

Anderkanal-MAI entsteht im Sender vor allem in den dem Referenzkanal direkt benachbarten Frequenzkanälen durch Wechselwirkungen zwischen den spektralen Komponenten

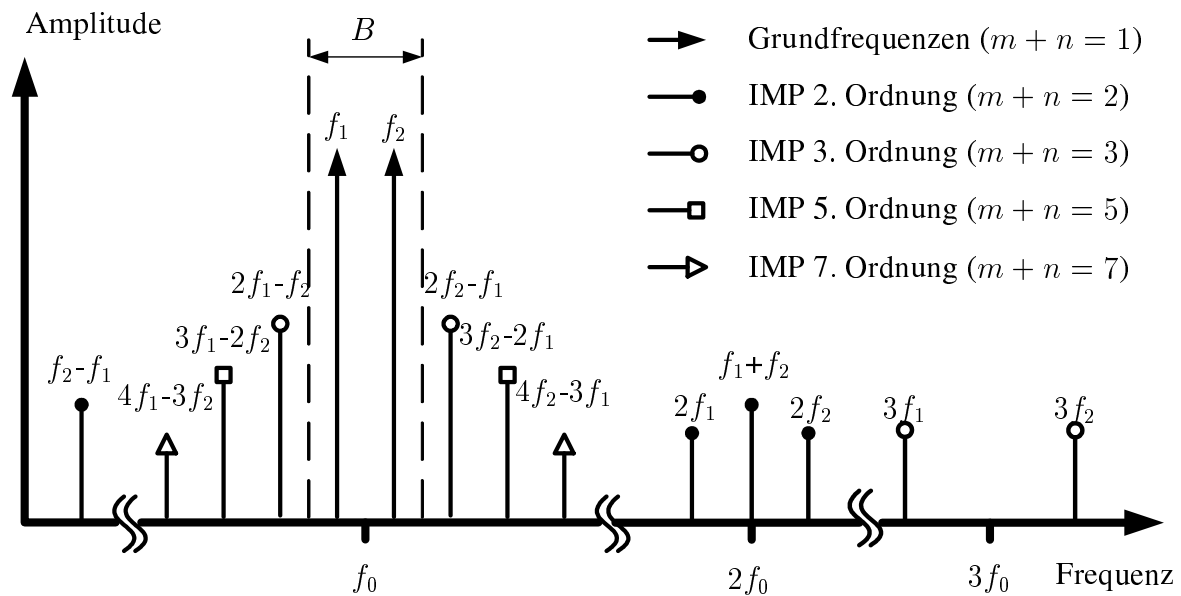


Bild 2.2. Zwei-Ton-Test: IMP bei Übertragung zweier Signale der Frequenzen  $f_1$  und  $f_2 > f_1$  über ein nichtlineares Übertragungsglied [Ken00]

des Sendesignals. In CDMA-Mobilfunksystemen wie z.B. UMTS erzeugt die Überlagerung mehrerer CDMA-gespreizter Sendesignal-Komponenten eine stark zeitabhängige Signaleinhüllende [Pho99]. Dies führt in Kombination mit nichtlinearen senderseitigen Übertragungsgliedern wie z.B. Leistungsverstärkern zu Intermodulationsprodukten (IMP) zwischen den spektralen Komponenten des Sendesignals, die das Leistungsdichtespektrum des Sendesignals verbreitern und auf diese Weise Anderkanal-MAI hervorrufen können [Ken00].

Die Auswirkungen von Intermodulation lassen sich am Beispiel des Zwei-Ton-Tests veranschaulichen [Ken00]. Schickt man zwei Signale der Frequenzen  $f_1$  bzw.  $f_2 > f_1$ , innerhalb des betrachteten Referenzkanals der Mittenfrequenz  $f_0$  und der Bandbreite  $B \ll f_0$  über ein nichtlineares Übertragungsglied, z.B. den Leistungsverstärker, wobei die Nichtlinearität die Ordnung  $m + n$ ,  $n, m \in \mathbb{N}_0$  [Ken00] hat, so treten am Ausgang des Übertragungsgliedes neben den Signalen der beiden Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  zusätzliche Signale der Intermodulationsfrequenzen

$$f_{\text{im}} = \pm m f_1 \pm n f_2, \quad f_{\text{im}} \geq 0, \quad (2.3)$$

auf. Bei schmalbandigen Mobilfunksystemen, d.h. wenn die Mittenfrequenz  $f_0$  wesentlich größer als die Bandbreite  $B$  des Referenzkanals ist, sind in erster Linie IMP dritter Ordnung für die Anderkanal-MAI problematisch [Ken00]. Bild 2.2 zeigt ein Beispiel für Intermodulationsfrequenzen  $f_{\text{im}}$  nach (2.3), die durch ein nichtlineares Übertragungsglied verursacht werden können.

Wie aus Bild 2.2 ersichtlich, treten IMP zweiter Ordnung nur im Bereich von Vielfachen der Mittenfrequenz  $f_0$  auf, d.h. bei  $2f_1, 2f_2, f_2 - f_1, f_1 + f_2$ , und lassen sich somit bei schmalbandigen Mobilfunksystemen durch Bandpaßfilterung relativ einfach unterdrücken [Ken00], da die hierzu benötigten Filter nur eine geringe Flankensteilheit haben müssen. IMP höherer Ordnung in der Nähe der Vielfachen der Mittenfrequenz  $f_0$  können ebenfalls relativ einfach unterdrückt werden, jedoch treten IMP ungerader Ordnung auch in direkter Nachbarschaft zur Mittenfrequenz  $f_0$  auf, siehe Bild 2.2. Diese IMP weiten das Leistungsdichtespektrums des Sendesignals über die Grenzen des Frequenzkanals hinaus aus. Da die IMP dritter Ordnung meist wesentlich höhere Leistungen haben als die IMP höherer Ordnungen [Ken00], reicht es meist aus, IMP dritter Ordnung zu berücksichtigen, um die Anderkanal-MAI realitätsnah zu erfassen [OP98].

IMP können auch zwischen unterschiedlichen Frequenzkanälen auftreten. Dies ist besonders kritisch, wenn zwei oder mehrere benachbarte Frequenzkanäle mit einem gemeinsamen Leistungsverstärker verstärkt werden [Ken00]. Eine solche Lösung stellt sehr hohe Anforderungen an die Linearität der Leistungsverstärker, wird aber trotzdem als vorteilhaft zum Herstellen und Betreiben kostengünstiger BSen angesehen [OP98]. Auch von anderen Sendern empfangene Störsignale in benachbarten Frequenzbändern können im Sender mit dem Sendesignal intermodulieren und somit Anderkanal-MAI verursachen [ITU01]. Eine weitere Quelle von Anderkanal-MAI sind IMP von Signalen im Referenzkanal mit Signalen außerhalb des Referenzkanals, die zum Erzeugen der Mittenfrequenz  $f_0$  notwendig sind [ITU01, Viz95].

Neben den genannten IMP, die alle von der Mittenfrequenz  $f_0$  oder von Frequenzen zum Erzeugen der Mittenfrequenz  $f_0$  abhängen, gibt es noch die parasitären Emissionen [ITU01]. Diese werden z.B. durch das Rauschen von Oszillatoren zur Frequenzkonversion verursacht und sind sowohl von der Mittenfrequenz  $f_0$  als auch von den Frequenzen zum Erzeugen der Mittenfrequenz  $f_0$  unabhängig.

Anderkanal-MAI wird nicht nur im Sender verursacht, sondern auch im Empfänger. Dort können Signale benachbarter Frequenzbänder die Detektion stören [ITU01]. Ursachen hierfür sind in erster Linie nicht perfekt bandbegrenzende Empfangsfilter sowie Störquellen bei der Transformation vom Hochfrequenz (HF)-Bereich in den äquivalenten Basisband (BB)-Bereich [ITU01]. Grundsätzlich gilt, daß in einem Empfänger der zu detektierende Referenzkanal durch Kanalfilterung von den anderen Frequenzkanälen bei möglichst hoher Frequenz, d.h. bereits im HF-Bereich, von den anderen Frequenzkanälen getrennt werden sollte, damit in den vor der Frequenzumsetzung notwendigen Verstärkern keine IMP mit anderen Frequenzkanälen entstehen [MWB00]. Eine Implementierung von Kanalfiltern im HF-Bereich der Mittenfrequenz  $f_0$  ist aber äußerst aufwendig [MWB00], da bei hohen Frequenzen eine hohe Filtergüte notwendig ist, um genügend hohe Flankensteilheit bei geringen

Verzerrungen im Durchlaßband zu erreichen, und weil die Filtermittenfrequenz verschiebbar sein muß. Daher wird im HF-Bereich meist nur eine Vorselektion des zu detektierenden Referenzkanals durchgeführt (Image-Reject-Filter) [Viz95], die zum Unterdrücken von Spiegelfrequenzen dient. Danach wird das Signal der Mittenfrequenz  $f_0$  durch Mischen mit einem Oszillatorsignal  $f_{osz}$  auf die Zwischenfrequenz (ZF)  $f_{zf} = |f_{osz} - f_0|$  umgesetzt. Im ZF-Bereich wird dann die eigentliche Kanalfilterung zum Unterdrücken der Anderkanal-MAI durchgeführt, während das Durchlaßband des Image-Reject-Filters im HF-Bereich üblicherweise jeweils das komplette Gesamtfrequenzband des Mobilfunksystems für die Aufwärtsstrecke oder die Abwärtsstrecke ist [WMJ00]. Nach der Kanalfilterung ist eine Verstärkung des Signals relativ unkritisch, während für eine Verstärkung vor der Kanalfilterung Verstärker mit Übertragungskennlinien sehr geringer Nichtlinearität erforderlich wären. Beim Entwurf eines Empfängers ist also abzuwägen zwischen hohem Aufwand für Kanalfilterung und hohem Aufwand für Verstärkungsglieder möglichst geringer Nichtlinearität. Ein solches Abwägen kann vor allem in MSen mit der Anforderung geringer Baugröße, niedriger Kosten sowie niedrigem Energiebedarf dazu führen, daß Anderkanal-MAI in Kauf genommen werden muß. Zum Umsetzen des Signals aus dem ZF-Bereich in den äquivalenten BB-Bereich wird ein weiteres Mal mit einem Oszillatorsignal gemischt [Car90]. Durch das Verschieben der Kanalfilterung vom HF- in den ZF-Bereich tritt weiterhin der Effekt des reziproken Mischens auf [Car90, MG86b]. Beim Umsetzen vom HF- in den BB-Bereich übernimmt jedes umgesetzte Signal die Seitenbänder des Phasenrauschens vom Oszillatorsignal [MG86b]. Dadurch kann ein Signal von außerhalb des Referenzkanals im HF-Bereich im Nutzspektrum des ZF-Bereich bzw. des BB-Bereichs zusätzliches Rauschen verursachen und somit die Rauschzahl des Empfängers erhöhen [MG86b]. Bei geringem Phasenrauschen und geringer Störsignalleistung kann dieser Effekt gegenüber dem thermischen Rauschen vernachlässigt werden [MG86b].

## 2.6 Intra- und Interoperator-MAI

Sind Mobilfunknetze mehrerer Operatoren im gleichen geographischen Gebiet aktiv, so kann dies zu MAI zwischen diesen Mobilfunknetzen führen. Die Problematik dieser Interoperator-MAI rührt hauptsächlich daher, daß verschiedene Operatoren ihre Mobilfunknetze unabhängig voneinander planen und betreiben. Dadurch ist mitunter hohe Dislokation der BSen der Operatoren zu erwarten, so daß kritische Koexistenzszenarien mit hohem MAI-Leistungen entstehen können, wie bereits in Abschnitt 1.6 erläutert. Solche kritischen Interferenzszenarien können bei der Intraoperator-MAI durch das interferenzmindernde Verfahren des Handover abgemildert werden, indem jede MS von derjenigen BS versorgt wird, deren Funkstrecke zu der MS die geringste Funkfelddämpfung hat. Ein Handover von MSen

von einem Operator zum anderen ist jedoch nach heutigem Stand der Technik nicht vorgesehen, so daß die Interoperator-MAI kritisch sein kann, selbst wenn sie in einem Anderkanal entsteht und somit durch Kanalfilterung gedämpft wird.

Die Unterscheidung von Intrazell- und Interzell-MAI ist nur bei der Intraoperator-MAI möglich, da verschiedene Operatoren unterschiedliche Zellnetze mit unterschiedlichen Standorten von BSen nutzen können.

## **2.7 Intra- und Intersystem-MAI**

Die Problematik bei der Intersystem-MAI besteht vor allem darin, daß die betrachteten Mobilfunksysteme verschiedenen Standards grundlegende Unterschiede in den eingesetzten Verfahren und Parametern zur Versorgung von Teilnehmern über die Luftschnittstelle haben können. Dabei spielen bzgl. der Intersystem-MAI bei den koexistierenden Mobilfunksystemen sehr viele Faktoren eine Rolle, z.B. die Bandbreiten der Frequenzkanäle, die Wahl der Duplex- und Vielfachzugriffsverfahren, die Sendeleistungen, etc.

Der Einsatz unterschiedlicher Duplexverfahren, nämlich TDD oder FDD, in koexistierenden Mobilfunksystemen verursacht Anderstrecken-MAI, die auch als Anderkanal-MAI noch als kritisch erachtet wird [AS99, SAS<sup>+</sup>99a, HMP00c, HMP00a, HMP02]. Weiterhin können sich durch kapazitätserhöhende Vielfachzugriffsverfahren wie SDMA in einem von mehreren koexistierenden Mobilfunksystem die Teilnehmerdichten in den unterschiedlichen Mobilfunksystemen und somit die räumliche Dichte von Interferern stark unterscheiden, wodurch hohe Intersystem-MAI verursacht werden kann.

Unterschiedliche Verfahren und Parameter eingesetzt in Mobilfunksystemen unterschiedlichen Standards können kritische MAI verursachen, so daß Koexistenzuntersuchungen erforderlich sind, wenn die Mobilfunksysteme im gleichen oder in direkt benachbarten Frequenzbändern eingesetzt werden sollen. Insbesondere, wenn die verschiedenen Mobilfunknetze unterschiedliche BS-Standorte nutzen, also wenn sie in anderen Hierarchieebenen eingesetzt werden oder von anderen Operatoren betrieben werden, können aufgrund einer solchen hohen Dislokation der BSen kritische Interferenzsituationen entstehen.

## **2.8 Zusammenhänge zwischen den eingeführten MAI-Klassen**

### **2.8.1 Vorbemerkung**

Im vorliegenden Abschnitt 2.8 geht es um Zusammenhänge bzw. gegenseitige Ausschlüsse der verschiedenen in Kapitel 2 eingeführten MAI-Klassen. Zusammengehörige MAI-Klassen werden in den folgenden Ebenen gegenübergestellt:

- Systemebene: Intra- und Intersystem-MAI.
- Netzebene: Intra- und Interoperator-MAI.
- Kanalebene: Gleich- und Anderkanal-MAI.
- Hierarchieebene: Gleich- und Anderhierarchie-MAI.
- Streckenebene: Gleich- und Anderstrecken-MAI.
- Zellebene: Intra- und Interzell-MAI.

### **2.8.2 Aufschlüsselung bis herab zur Netzebene**

In Bild 2.3 wird die MAI sehr grundsätzlich bis herab zur Netzebene aufgeschlüsselt. Das Bild bringt zum Beispiel zum Ausdruck, daß es sich beim Untersuchen von Intrasystem- und Intersystem-MAI um zwei unterschiedliche Kategorien handelt, und daß beispielsweise bei der Intrasystem-MAI unterschieden werden kann, ob es sich um Intraoperator-MAI, d.h. um die Eigenstörung des Mobilfunknetzes eines Operators geht, oder um Interoperator-MAI, d.h. um die gegenseitige Störung von Mobilfunknetzen gleichen Standards und unterschiedlicher Operatoren.

Im folgenden Bild 2.4 wird das Schema nach Bild 2.3 angewandt auf den Fall zweier Operatoren A und B, die beide mit Mobilfunknetzen, sowohl nach dem 3G-Teilstandard WCDMA als auch nach dem 3G-Teilstandard TD-CDMA aktiv sind.

### **2.8.3 Weitere Aufschlüsselung**

Aus dem Schema nach Bild 2.3 ergeben sich die vier MAI-Arten



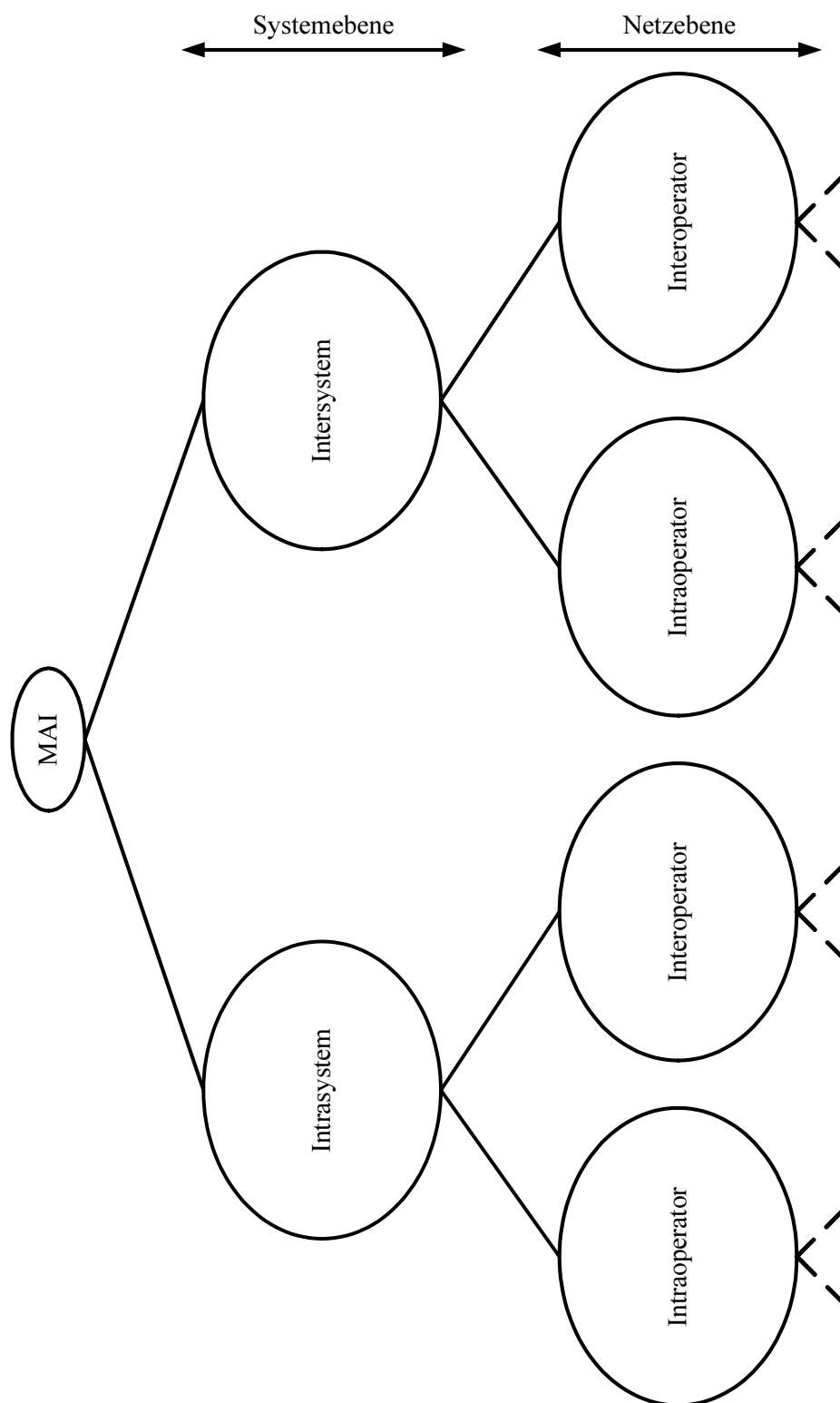


Bild 2.3. Aufschlüsselung von MAI-Arten bis herab zur Intra/Interoperatorebene  
 — — Übergang zu Bild 2.5

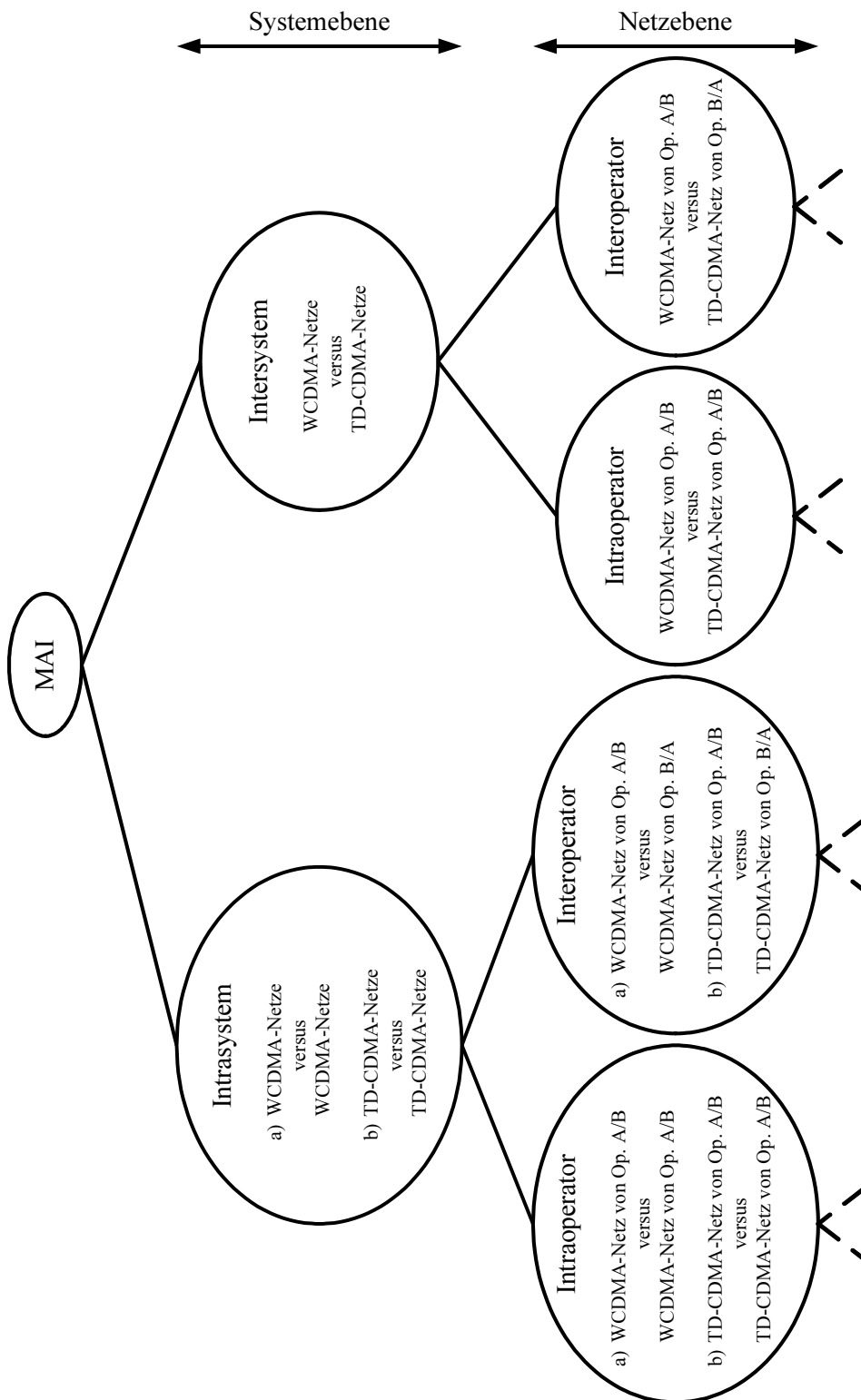


Bild 2.4. Anwenden des Schemas nach Bild 2.4 auf den Fall zweier Operatoren A und B, die beide mit Mobilfunknetzen sowohl nach dem 3G-Teilstandard WCDMA als auch nach dem 3G-Teilstandard TD-CDMA aktiv sind

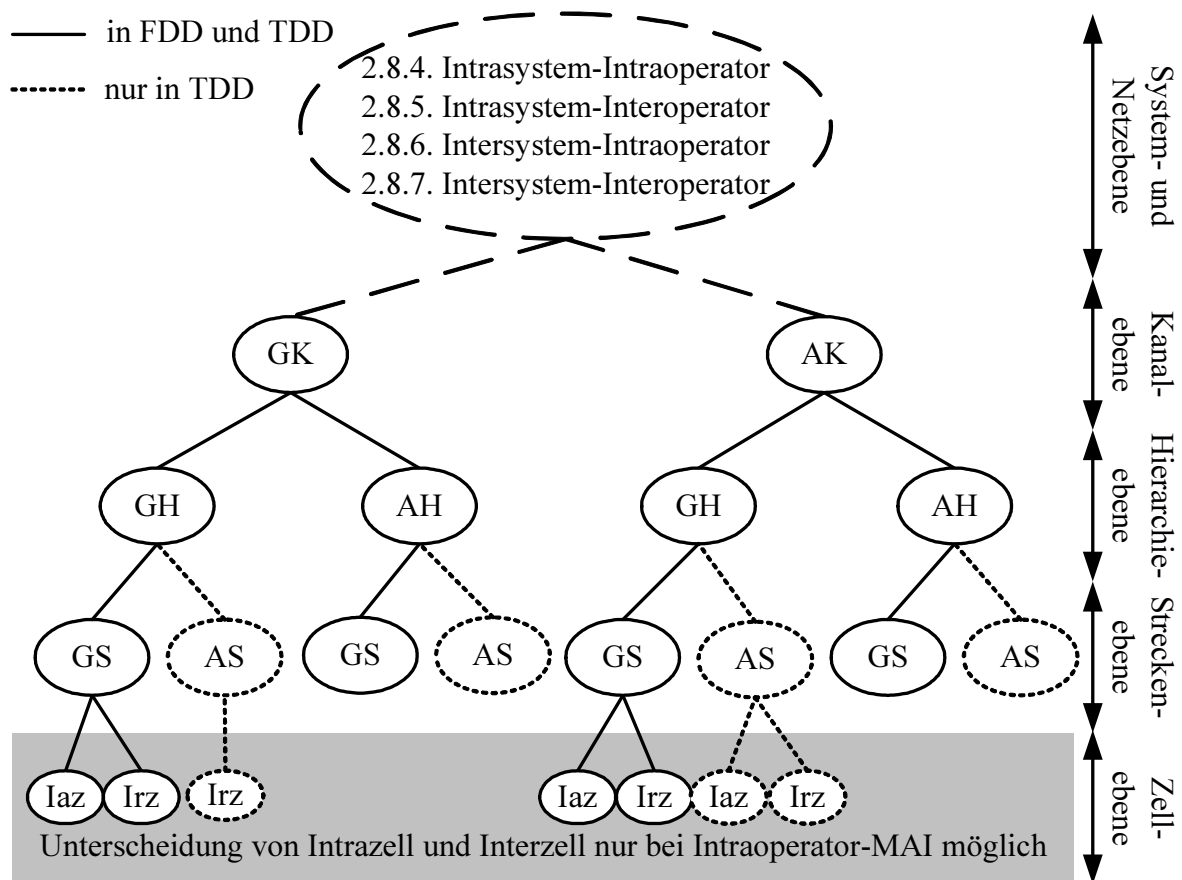


Bild 2.5. Detaillierte Aufschlüsselung von MAI-Arten

- Intrasystem-Intraoperator-MAI,
- Intrasystem-Interoperator-MAI,
- Intersystem-Interoperator-MAI,
- Intersystem-Intraoperator-MAI.

Jede dieser MAI-Arten kann wie in Bild 2.5 gezeigt weiter aufgeschlüsselt werden. Dabei werden in den graphischen Darstellungen Abkürzungen für die in Abschnitt 2.1 eingeführten MAI-Klassen verwendet, die in Tabelle 2.1 dargelegt werden.

In der graphischen Aufschlüsselung nach Bild 2.5 kann in Kombination mit der grundlegenden Aufschlüsselung nach Bild 2.3 eine bestimmte MAI-Art durch einen vollständigen Zweig charakterisiert werden, der sich von der Wurzel (MAI) in Bild 2.3 bis zur untersten MAI-Ebene in Bild 2.5 erstreckt. Die durch einen Zweig charakterisierte MAI-Art gehört dabei den MAI-Klassen an, die den durchlaufenen Knoten des Zweigs entsprechen. Wird im folgenden von einer MAI-Art unter Nennung bestimmter MAI-Klassen aus bestimmten

MAI-Ebene	MAI-Klasse	Abkürzung	MAI-Klasse	Abkürzung
Systemebene	Intrasystem	IaS	Intersystem	IrS
Netzebene	Intraoperator	IaO	Interoperator	IrO
Kanalebene	Gleichkanal	GK	Anderkanal	AK
Hierarchieebene	Gleichhierarchie	GH	Anderhierarchie	AH
Streckenebene	Gleichstrecken	GS	Anderstrecken	AS
Zellebene	Intrazell	IaZ	Interzell	IrZ

Tabelle 2.1. Abkürzungen für die in Abschnitt 2.1 eingeführten MAI-Klassen

MAI-Ebenen gesprochen, so gilt die angesprochene MAI-Art für alle MAI-Klassen aus den anderen MAI-Ebenen.

In Darstellungen der MAI-Arten nach Bild 2.5 können grundlegende Ausschlüsse von MAI-Klassen kenntlich gemacht werden. Im folgenden werden für die in Bild 2.5 gezeigten MAI-Ebenen solche Ausschlüsse angesprochen und erläutert.

- Grundsätzlich ist bei der Aufteilung der auftretenden MAI in Gleichkanal-MAI und Anderkanal-MAI zu beachten, daß die Gleichkanal-MAI üblicherweise um Größenordnungen höher ist als die Anderkanal-MAI, vgl. Abschnitt 2.5. Daher muß die Gleichkanal-MAI beim Systementwurf berücksichtigt werden, während die Anderkanal-MAI meist vernachlässigt werden kann.
- Gibt es eine andere Hierarchieebene, die im Gleichkanal betrieben wird, so ist eine hohe Anderhierarchie-MAI bei der Planung des Mobilfunknetzes zu berücksichtigen.
- Wird ein FDD-Mobilfunksystem betrachtet, so kann das Auftreten der MAI-Klasse Anderstrecken-MAI ausgeschlossen werden, da Anderstrecken-MAI in FDD-Mobilfunksystemen durch hohen Duplex-Abstand vernachlässigbar klein ist, vgl. Abschnitt 1.2.
- Bei der Aufteilung in Intrazell- und Interzell-MAI ist zu beachten, welche Detektionsverfahren eingesetzt werden. So kann z.B. durch MUD die Klasse der Intrazell-MAI vermieden werden. Intrazell-MAI kann weiterhin grundsätzlich ausgeschlossen werden in Kombination mit der MAI-Art Gleichkanal-Gleichhierarchie-Anderstrecken-MAI, siehe Bild 2.5, da ein gleichzeitiges Senden und Empfangen von ein und derselben BS im gleichen Frequenzkanal nicht möglich ist. In Kombination mit der MAI-Art Anderkanal-Gleichhierarchie-Anderstrecken-MAI ist Intrazell-MAI prinzipiell möglich, da ein gleichzeitiges Senden und Empfangen an ein und derselben BS und damit Anderstrecken-MAI bei genügend hohem Frequenzabstand von Referenz- und Anderkanal ermöglicht werden kann. Für die Klasse der Anderhierarchie-MAI ist ein Unterscheiden der Klassen Intrazell-MAI und Interzell-MAI prinzipiell nicht

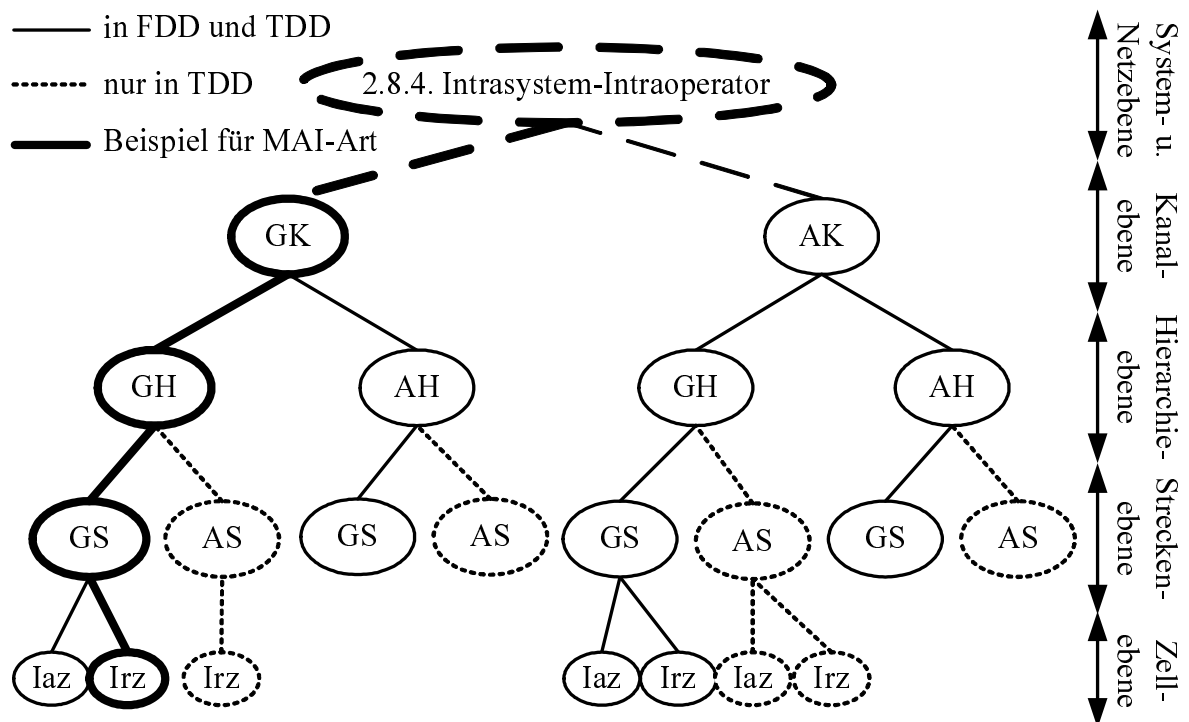


Bild 2.6. Detaillierte Aufschlüsselung der Intrasystem-Intraoperator-MAI

möglich, da die Zellen der Referenzverbindung und der störenden Verbindung unterschiedlich sein können. Intrazell- und Interzell-MAI können aus dem gleichen Grund auch für die Klasse der Interoperator-MAI nicht unterschieden werden, was auch in den Bildern 2.7 und 2.8 dargestellt ist.

Für jede der vier möglichen Kombinationen von Intra/Intersystem-MAI und Intra/Interoperator-MAI wird in den Unterabschnitten 2.8.4 bis 2.8.6 auf weitere Ausschlüsse und Eigenschaften der MAI-Klassen sowie auf Beispiele für konkrete MAI-Arten eingegangen.

## 2.8.4 Intrasystem-Intraoperator-MAI

Im vorliegenden Abschnitt 2.8.4 wird die Intrasystem-Intraoperator-MAI betrachtet. Die Aufschlüsselung aus Bild 2.5 wird in Bild 2.6 für die Intrasystem-Intraoperator-MAI gezeigt. Darin wird eine MAI-Art beispielhaft hervorgehoben, nämlich die Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-Gleichhierarchie-Gleichstrecken-Interzell-MAI. Diese MAI-Art kann für viele Mobilfunksystemen hoher spektraler Effizienz als kapazitätsbegrenzend angenommen werden [Zan92b], d.h. die Leitung dieser MAI-Art ist wesentlich höher

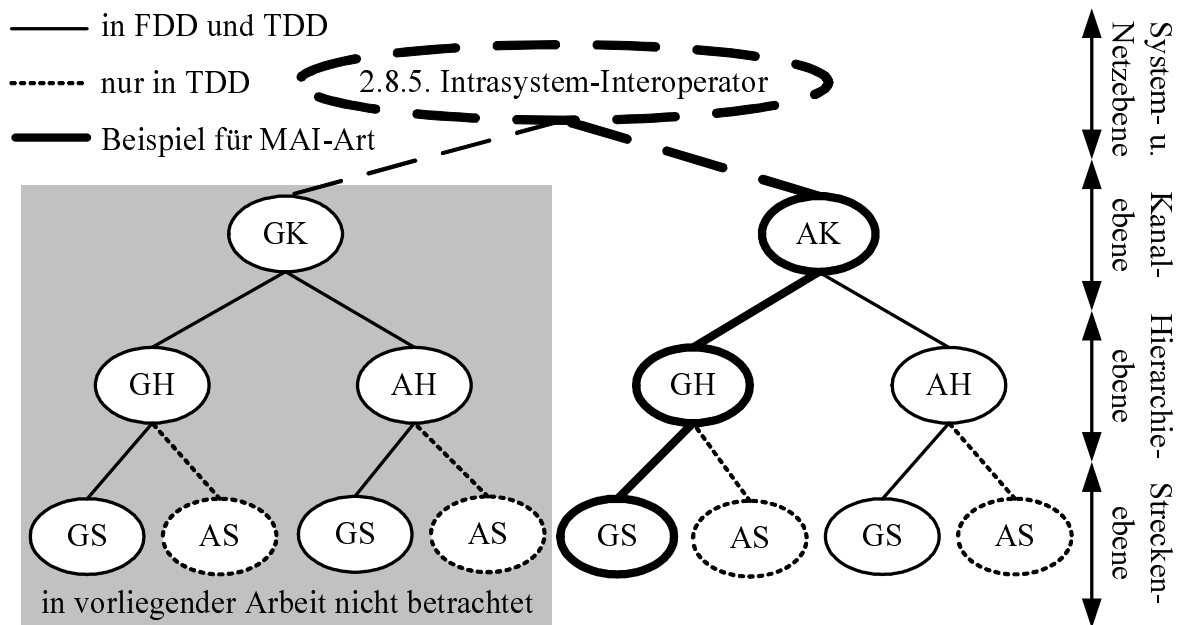


Bild 2.7. Detaillierte Aufschlüsselung der Intrasystem-Interoperator-MAI

als die Leistung der übrigen auftretenden MAI-Arten. Die Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-Gleichhierarchie-Gleichstrecken-Interzell-MAI ist jedoch nur dann dann kapazitätsbegrenzend, wenn im Gleichkanal keine weitere Hierarchieebene betrieben wird, keine Anderstrecken-MAI im Gleichkanal auftritt und wenn MUD betrachtet wird. Bei SUD ist zusätzlich die Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-Gleichhierarchie-Gleichstrecken-Intrazell-MAI zu berücksichtigen. Die genannten MAI-Arten werden in der vorliegenden Arbeit als Referenz für die Koexistenzuntersuchungen verwendet, d.h. bei den Koexistenzuntersuchungen in den Kapiteln 5 bis 8 wird im gestörten Mobilfunknetz nur MAI von Teilnehmern aus dem gleichen Frequenzkanal, der gleichen Hierarchieebene sowie der gleichen Überagerichtung wie die Referenzverbindung berücksichtigt.

## 2.8.5 Intrasystem-Interoperator-MAI

Die Intrasystem-Interoperator-MAI tritt auf, wenn ein anderer Operator im gleichen geographischen Gebiet mit einem Mobilfunknetz gleichen Standards aktiv ist. Die Aufschlüsselung aus Bild 2.5 wird in Bild 2.7 für die Intrasystem-Interoperator-MAI gezeigt. Wie in Abschnitt 2.8.3 erläutert, kann Intrazell- und Interzell-MAI in Bild 2.7 wegen der möglicherweise unterschiedlichen Zellnetze der betrachteten Operatoren nicht unterschieden werden.

Wie in Bild 2.7 angedeutet, werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Mobilfunksysteme in lizenzierten Frequenzbändern betrachtet, die den jeweiligen Operatoren exklu-

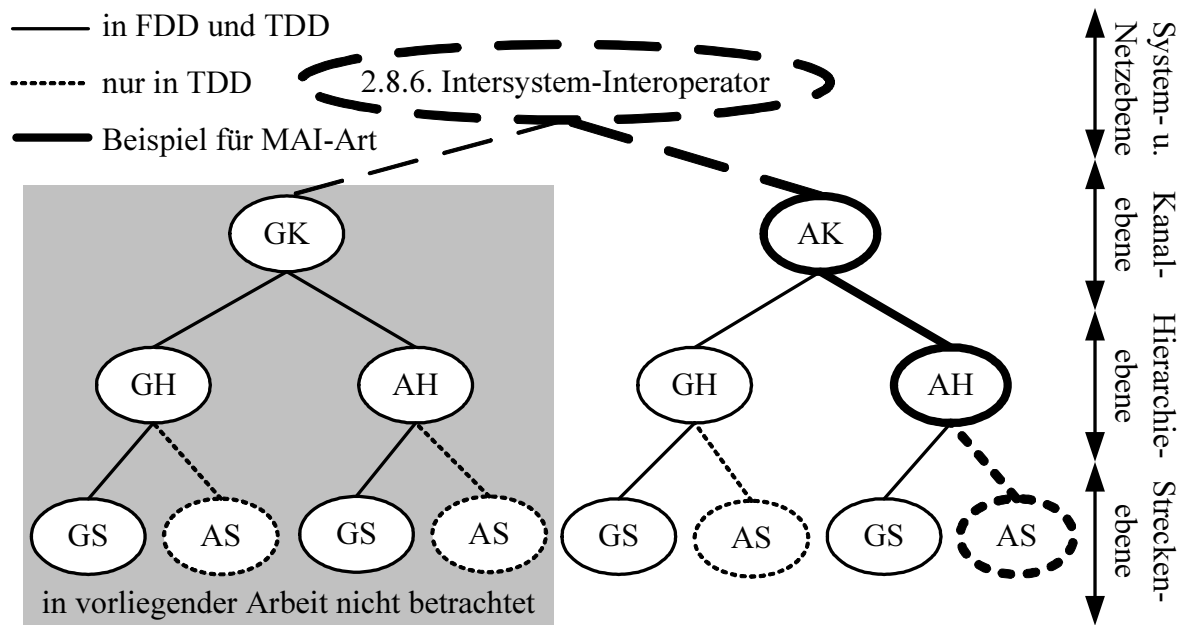


Bild 2.8. Detaillierte Aufschlüsselung der Intersystem-Interoperator-MAI

siv zur Verfügung stehen, siehe Abschnitt 1.7. Daher kann Intrasystem-Interoperator-MAI bei den Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit ausschließlich als Anderkanal-MAI, nicht jedoch als Gleichkanal-MAI auftreten. Der nicht betrachtete Fall der Interoperator-Gleichkanal-MAI kann z.B. in einem WLAN-System auftreten, bei dem mehrere Operatoren dieselben operatorspezifischen Teilfrequenzbänder nutzen können, vgl. Abschnitt 1.3.

Beispielhaft wird in Bild 2.7 ein Zweig gezeigt, der die Intrasystem-Interoperator-Anderkanal-Gleichhierarchie-Gleichstrecken-MAI zeigt. Diese MAI-Art kann z.B. auftreten, wenn zwei Operatoren mit jeweils einem FDD-Mobilfunknetz im gleichen Versorgungsgebiet und in der gleichen Hierarchieebene, aber in verschiedenen operatorspezifischen Teilfrequenzbändern aktiv sind. Diese MAI-Art wird z.B. in Kapitel 5 untersucht.

## 2.8.6 Intersystem-Interoperator-MAI

Die Intersystem-Interoperator-MAI tritt auf, wenn verschiedene Operatoren Mobilfunknetze verschiedenen Standards im gleichen geographischen Gebiet betreiben. Die Aufschlüsselung aus Bild 2.5 wird in Bild 2.8 für die Intersystem-Interoperator-MAI gezeigt. Für die Intersystem-Interoperator-MAI wird Gleichkanal-MAI in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Ein Beispiel für Gleichkanal-MAI der Art Intersystem-Interoperator sind Ultra-Wideband-Mobilfunksysteme [HHT<sup>+</sup>02, GM05], die durch extrem geringe spektrale Leistungsdichten den Einsatz in den Gesamtfrequenzbändern anderer Mobilfunksysteme

erlauben sollen, ohne die Leistungsfähigkeit der in diesen Gesamtfrequenzbändern aktiven Mobilfunksysteme signifikant zu beeinträchtigen.

Für die Anderkanal-MAI wird in Bild 2.8 der Zweig der Intrasystem-Interoperator-Anderkanal-Anderhierarchie-Anderstrecken-MAI gezeigt. Diese MAI wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel der Koexistenz zwischen WCDMA und TD-CDMA untersucht, siehe Kapitel 7. Da TD-CDMA das Duplexverfahren TDD nutzt, ist Anderstrecken-MAI möglich, die selbst im Anderkanal als kritisch erachtet wird, vgl. Abschnitt 2.3. Ein aufgrund der Eigenschaften von TD-CDMA und WCDMA typischer Anwendungsfall [HT00] ist, daß TD-CDMA und WCDMA in unterschiedlichen Hierarchieebenen eingesetzt werden und somit MAI zwischen verschiedenen Hierarchieebenen entsteht, vgl. Kapitel 4. Hierbei ist zu beachten, daß die Teilnehmerdichten in den unterschiedlichen Hierarchieebenen sehr unterschiedlich sein können.

## **2.8.7 Intersystem-Intraoperator-MAI**

Die Intersystem-Intraoperator-MAI tritt auf, wenn ein Operator mehrere Mobilfunknetze unterschiedlichen Standards im gleichen geographischen Gebiet betreibt. Die Aufschlüsselung aus Bild 2.5 wird in Bild 2.9 für die Intersystem-Intraoperator-MAI gezeigt.

Grundlegendes Unterscheidungskriterium auch bei der Intersystem-Intraoperator-MAI ist, ob die koexistierenden Mobilfunknetze im Gleich- oder einem Anderkanal aktiv sind. Im in der vorliegenden Arbeit nicht betrachteten Fall von Mobilfunknetzen, die im gleichen Frequenzkanal aktiv sein können, entsteht Gleichkanal-MAI sehr hoher Leistung [IEE01]. Aus diesem Grund muß in diesem Fall die Koexistenz der Mobilfunknetze durch aufeinander abgestimmte Vielfachzugriffsverfahren, Duplexverfahren und Systemparameter bereits beim Entwurf gewährleistet werden. Ein Beispiel ist die in 1.5 angesprochene Verwendung des 3G-Systems CDMA-2000 in den Frequenzkanälen des 2G-Systems IS-95 [OP98].

Da in der vorliegenden Arbeit ausschließlich gegenseitig interferierende Mobilfunknetze betrachtet werden, die in unterschiedlichen Frequenzkanälen aktiv sind, kann bei der Intersystem-Intraoperator-MAI ausschließlich Anderkanal-MAI entstehen. Beispielhaft wird in Bild 2.7 der Zweig der Intrasystem-Interoperator-Anderkanal-Anderhierarchie-Anderstrecken-MAI gezeigt. Für diese MAI kann das gleiche Beispiel der Koexistenz zwischen den 3G-Teilstandards WCDMA und TD-CDMA angeführt werden wie in Abschnitt 2.8.6. In Abschnitt 2.8.7 jedoch werden die betrachteten beiden Mobilfunknetze verschiedenen Standards vom gleichen Operator betrieben, so daß dieser die Möglichkeit hat, hohe



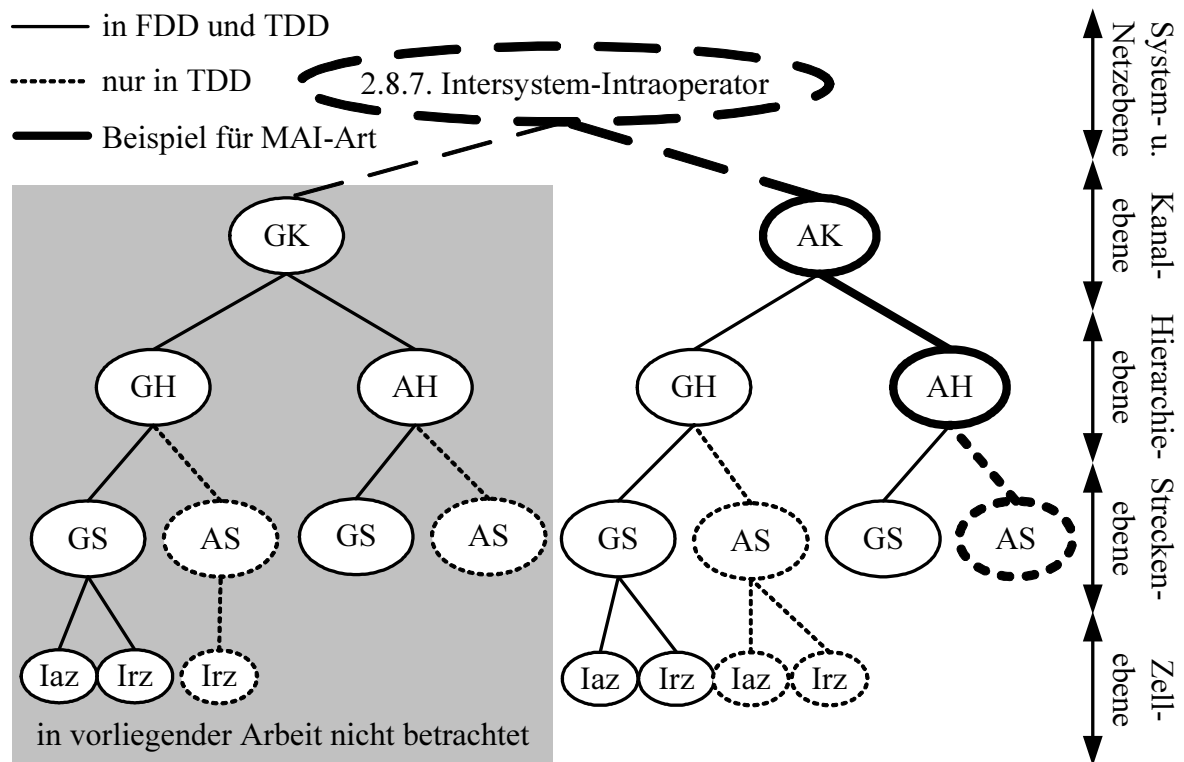


Bild 2.9. Detaillierte Aufschlüsselung der Intersystem-Intraoperator-MAI

Intersystem-Intraoperator-MAI durch einen Handover zum anderen Mobilfunksystem, also einen Intersystem-Handover, zu mindern. Daher wird bei der Zuweisung von Frequenzkanälen an Operatoren durch die zuständigen Regulierer versucht, direkt benachbarte Frequenzkanäle für Mobilfunknetze verschiedenen Standards an den gleichen Operator zu vergeben, so daß dieser Operator die Möglichkeit hat, zum einen durch geeignete Funknetzplanung und zum anderen durch Intersystem-Handover kritische Interferenzszenarien zu vermeiden. Jedoch ist Zuweisung benachbarter Frequenzkanäle an der Grenze der Gesamtfrequenzbänder von Mobilfunksystemen verschiedenen Standards an den gleichen Operator nicht immer möglich.

## Kapitel 3

# Techniken zum Analysieren verschiedenartiger MAI-Effekte auf der Systemebene

### 3.1 Simulationsverfahren

Das Testen von Verfahren und Algorithmen für den Mobilfunk mit realisierten Testsystemen ist sehr zeitaufwendig und teuer, da es hierzu erforderlich ist, die entsprechende Hard- und Software zu erstellen. Deshalb erfolgen Entwurf und erste Tests von Mobilfunksystemen heutzutage nahezu ausschließlich durch Rechnersimulationen. Um die Leistungsfähigkeit eines Mobilfunksystems zu beurteilen, werden hierbei in Simulationsmodellen reale Mobilfunkszenarien nachgestellt. Nicht deterministisch vorhersagbare Größen werden durch Zufallsgrößen modelliert [JBS92]. Diese Art von Simulation wird auch als Monte-Carlo-Simulation bezeichnet [HH64, Edr94]. Der Name leitet sich vom monegasischen Stadtteil Monte Carlo ab, der durch seine Spielbank berühmt wurde.

Aufgrund der Komplexität einer detailgenauen Simulation kompletter Mobilfunksysteme [OP98] wird das Lösen des Simulationsproblems meist in zwei Schritte aufgeteilt [Sch01, OP98]: In Simulationen auf der Verbindungsebene (engl. Link Level Simulation) und in Simulationen auf der Systemebene (engl. System Level Simulation). In den Simulationen auf Verbindungsebene wird jeweils eine einzelne Teilnehmerverbindung in allen Details simuliert [Naß95], d.h. inklusive komplexer Verfahren wie Datendetektion und Kanalcodierung. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden dann in Simulationen auf der Systemebene verwendet, in denen ein ganzes Zellnetz mit vielen auf mehrere Zellen verteilten Teilnehmerverbindungen mit geringerer Detaillierung der Vorgänge in den einzelnen Teilnehmerverbindungen untersucht wird [Sch01, Ste96].

Simulationen auf Systemebene lassen sich in verschiedene Abstraktionsebenen einteilen. Man unterscheidet statische und dynamische Simulationen [HT02, OP98]. Bei den statischen Simulationen wird ein statisches Simulationsszenario [MS99] anhand statistisch voneinander unabhängiger Schnappschüsse eines realen Szenarios untersucht. Dazu werden in jedem Schnappschuß zufällig MSen im Szenario verteilt, es wird Leistungsregelung durchgeführt, und die sich in dem Schnappschuß ergebenden Statistiken von MAI bzw. SNR für die betrachtete Momentaufnahme des Szenarios, in der sich die MSen nicht bewegen, werden ausgewertet. Bei den dynamischen Simulationen dagegen wird ein sich veränderndes Szenario kontinuierlich beobachtet und ausgewertet [MS99], wobei die Veränderung des Szenarios

durch Bewegungsmodelle der MSen [MS99, BRS03], Zu- und Abgang von MSen sowie durch Korrelationen bei der Pfadmodellierung bewegter MSen charakterisiert ist.

Dynamische Simulationen sind wesentlich komplizierter als statische Simulationen. Zum einen ist das dynamische Systemmodell wesentlich aufwendiger, zum anderen müssen bei dynamischen Simulationen mehr Schnappschüsse ausgewertet werden als bei statischen, um zuverlässige Statistiken zu erhalten. Der Grund für die bei dynamischen Simulationen erforderliche höhere Zahl von Schnappschüssen im Vergleich zu statischen Simulationen ist, daß bei statischen Simulationen die einzelnen Schnappschüsse unkorreliert sind, während bei dynamischen Simulationen die Systemzustände zu den verschiedenen Schnappschüssen, die zu dicht aufeinanderfolgenden Zeitpunkten erstellt werden, korreliert sein können. Zwar ermöglichen die dynamischen im Gegensatz zu den statischen Simulationen bei entsprechend realistischer Modellierung eine Untersuchung des zeitabhängigen Systemverhaltens; viele Untersuchungen können jedoch mit den wesentlich einfacheren statischen Simulationen mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden [OP98]. Deshalb beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf statische Simulationen.

Bild 3.1 zeigt ein Ablaufdiagramm des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entworfenen statischen Simulators nach dem Monte-Carlo-Prinzip. Aufgrund seiner Bestimmung zur Simulation von Anderkanal-MAI wird das vom Verfasser erstellte Simulationstool als OCIS (engl. Other Channel Interference Simulator) bezeichnet. OCIS wurde in MATLAB implementiert und umfaßt über 500 Zeilen Programmcode. In OCIS werden jeweils zwei Mobilfunknetze parallel simuliert, die unterschiedliche, aber überlappende Versorgungsgebiete haben können. OCIS plaziert zunächst BSen im Versorgungsgebiet eines jeden der beiden Mobilfunknetze. Danach wird zum Erstellen von Statistiken eine hohe Zahl von Schnappschüssen simuliert, in denen jeweils MSen im jeweiligen Versorgungsgebiet der Mobilfunknetze zufällig und gleichverteilt ausgewürfelt und SNRs für diese MSen bestimmt werden, vgl. die Abschnitte 3.5 und 3.6. Basierend auf dem Kriterium zum Zuordnen der MSen zu BSen, vgl. Abschnitt 3.5.1, können den verschiedenen BSen unterschiedlich viele MSen zugeordnet sein. Für die MSen wird ein iteratives Leistungsregelungsverfahren angewandt, wobei die von dem anderen Mobilfunknetz ausgehende MAI berücksichtigt werden kann, siehe Abschnitt 3.7. Mit dem Speichern der Ergebnisse und dem Erstellen von Statistiken, z.B. über die SNRs für die MSen, ist die Simulation beendet. Solche Simulationen können mit OCIS für verschiedene Zahlen von MSen im Mobilfunknetz, verschiedene Szenarien und verschiedene Systemimplementierungen durchgeführt werden. Auf diese Weise kann die Funktionsfähigkeit eines Mobilfunknetzes unter Beeinflussung durch ein anderes Mobilfunknetz in bestimmten Szenarien umfassend untersucht und optimiert werden.

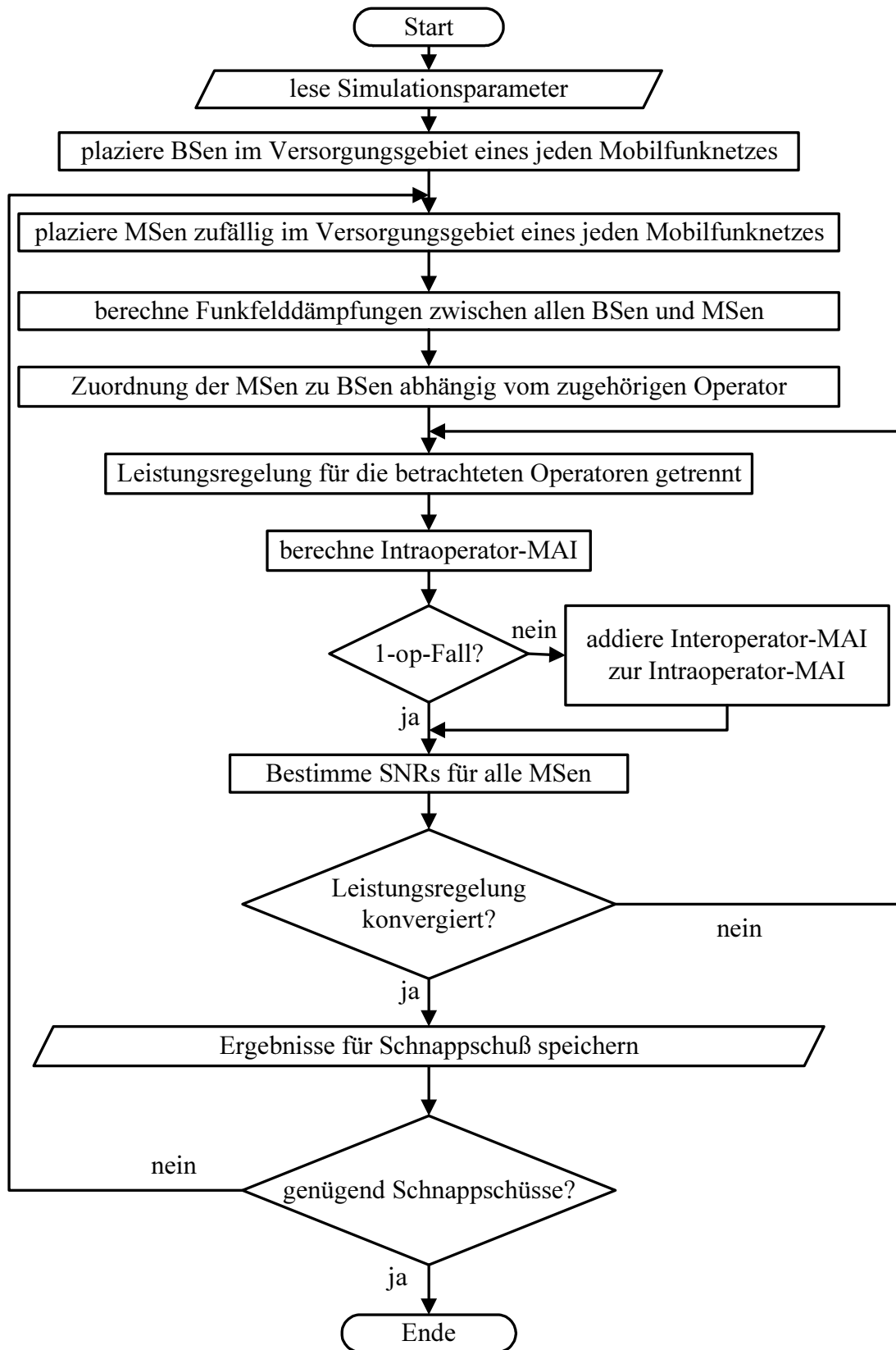


Bild 3.1. Ablaufdiagramm des Simulationstools OCIS

## 3.2 Simulationsszenarien

### 3.2.1 Vorbemerkung

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, werden Mobilfunksysteme der zweiten und der dritten Generation in Form hierarchischer Zellnetze aufgebaut. Aufgrund der meist unterschiedlichen Zweckbestimmung von Makro- und Mikrozellen, d.h. flächendeckende Versorgung hoch mobiler MSen für die Makrozellen und hohe Kapazität bei geringer Mobilität der MSen in den Mikrozellen, sowie der meist unterschiedlichen Bebauungsstruktur unterscheiden sich sowohl die typischen Szenarien für Makro- und Mikrozellen als auch die Eigenschaften der Funkfelddämpfung. Diese Unterschiede müssen bei der Modellierung der Szenarien für den Einsatz in Simulationstools berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit werden die Untersuchungsszenarien aus der Standardisierung von 3G-Systemen verwendet [3GP02]. Die betrachteten Untersuchungsszenarien Makrozell-Szenario und Mikrozell-Szenario werden in den folgenden Unterabschnitten 3.2.2 und 3.2.3 vorgestellt.

### 3.2.2 Makrozell-Szenario

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Makrozell-Szenario besteht aus homogenen, hexagonalen Zellen mit je einer BS in der Mitte einer jeden Zelle, siehe Bild 3.2. Durch den Einsatz hexagonaler Zellen ist eine lückenlose und gleichzeitig überlappungsfreie Pflasterung eines zusammenhängenden Versorgungsgebiets möglich [Ste96]. In dem Simulationsmodell haben alle Zellen die gleiche Größe. Nur eine Zelle in der Mitte des Simulations-szenarios, die Referenzzelle, wird ausgewertet. Die umliegenden Zellen sind ringförmig um die Referenzzelle angeordnet und dienen ausschließlich zum Erzeugen von MAI. Die Zahl der bei der Simulation berücksichtigbaren Zellringe (engl. tier) ist beschränkt durch die erlaubte Komplexität des Simulators. In der vorliegenden Arbeit werden wie auch im Fall von Bild 3.2 zwei Ringe von Interferenzzellen vorausgesetzt; dies entspricht einer Gesamtzahl von  $K_B$  gleich 19 BSen. Eine höhere Zahl von Zellringen steigert wegen des geringeren Einflusses von Randeffekten zwar die Genauigkeit der Simulation, erhöht jedoch auch den Simulationsaufwand.

MSen werden gleichverteilt in dem Versorgungsgebiet, das durch die angedeutete Fläche des Simulationsszenarios in Bild 3.2 begrenzt wird, ausgewürfelt.

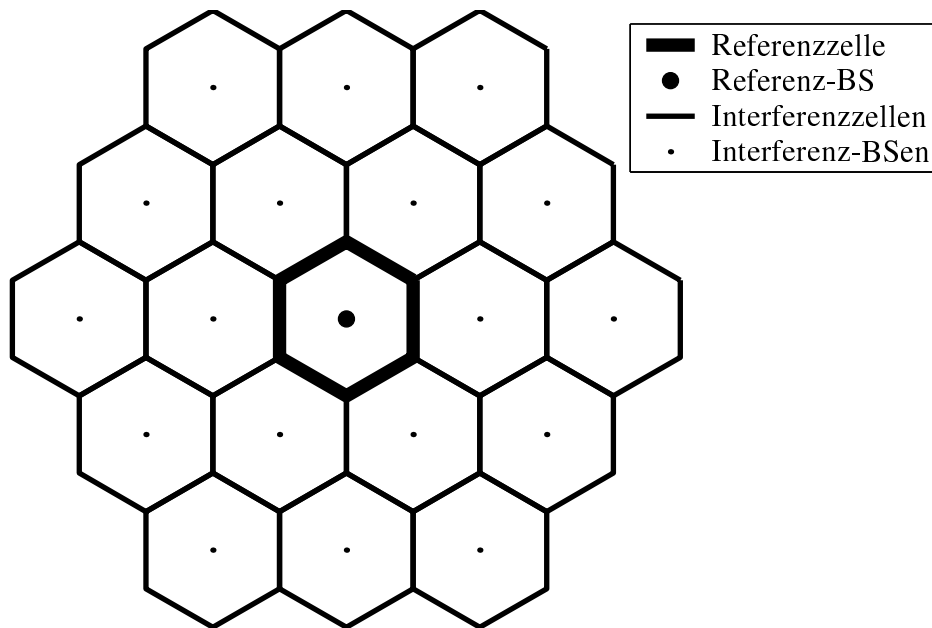


Bild 3.2. Makrozell-Szenario

### 3.2.3 Mikrozell-Szenario

Das in der Arbeit verwendete Mikrozell-Szenario basiert auf einer Manhattan-Struktur [3GP98, 3GP02] nach Bild 3.3. Die Quadrate im Bild symbolisieren Häuserblöcke, die durch ein Straßengitter getrennt sind. Die Breite der Häuserblöcke ist  $w_b$ , die Breite der Straßen ist  $w_s$ . BSen werden in den Straßenzügen nach einem regelmäßigen Muster angebracht [3GP02]. Da im Mikrozell-Szenario die elektromagnetischen Wellen durch die Straßen relativ stark geführt sind, so daß auch geometrisch relativ nahe MAI-Quellen durch die Häuser sehr stark gedämpft sein können, werden im Vergleich zum Makrozell-Szenario wesentlich mehr BSen betrachtet, damit eine ausreichende Zahl relevanter MAI-Quellen berücksichtigt wird [3GP02]. Der Grund für die geführte Wellenausbreitung ist, daß in Mikrozellen die BSen in den Straßen unterhalb der mittleren Gebäudehöhe  $h_T$  angebracht werden, um so MAI durch Abschattung zu unterdrücken, während in dem Makrozellen die BSen wesentlich über der mittleren Gebäudehöhe  $h_T$  installiert werden, um eine flächendeckende Versorgung zu gewährleisten. Ausgewertet werden im Mikrozell-Szenario mehrere BSen in der Mitte des Simulationsszenarios, die als Referenz-BSen bezeichnet werden. MSen können sich nur im Bereich der Straßen aufhalten [3GP02]. Sie werden für die Simulationen in den Straßen gleichverteilt ausgewürfelt.

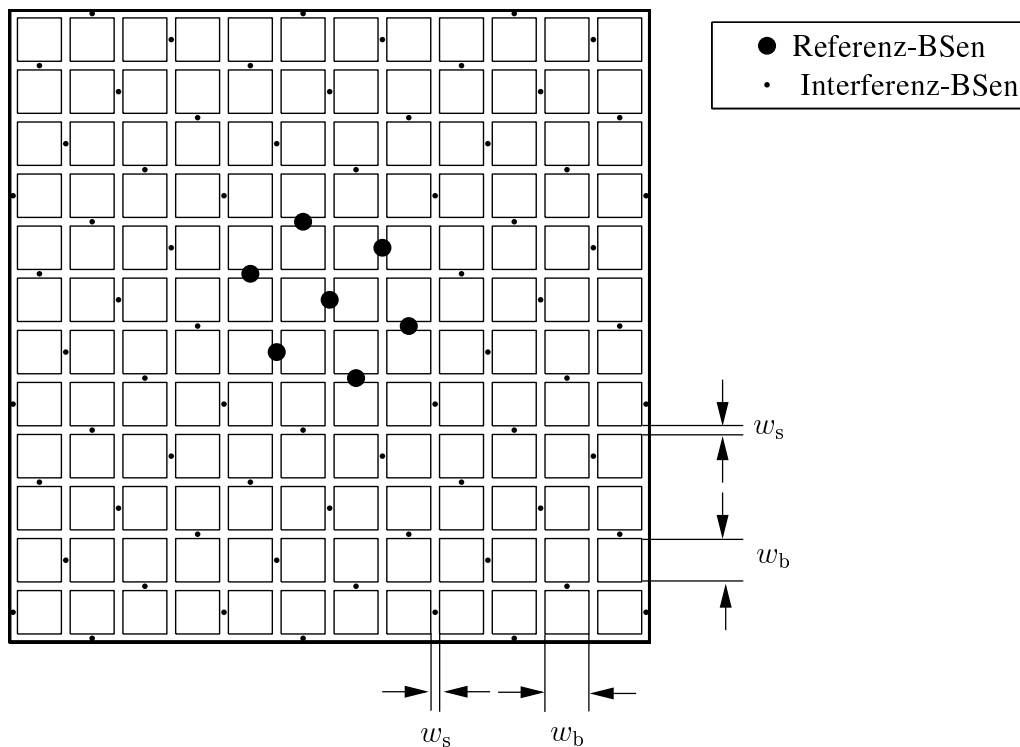


Bild 3.3. Mikrozell-Szenario (Manhattan-Struktur)

### 3.3 Funkfelddämpfungsmodelle

#### 3.3.1 Vorbemerkung

Im Mobilfunk werden Informationen durch Funkwellen über die Luftschnittstelle übertragen. Man unterscheidet zwischen Fällen, in denen LoS besteht, siehe Abschnitt 2.3, und solchen, in denen keine direkte Sichtverbindung (engl. Non Line of Sight, NLoS) besteht. In NLoS-Fällen können sich die Funkwellen aufgrund von Abschattung durch Gebäude und andere Hindernisse nur auf Pfaden ausbreiten, die durch Reflexion, Beugung und Streuung zustandekommen [Par92]. Da hierbei meist mehrere Ausbreitungspfade auftreten, wird diese Art der Ausbreitung Mehrwegeausbreitung genannt [HBH96, Par92]. Bewegt sich eine MS langsam durch ein Szenario, so treten im NLoS-Fall bei gleichbleibender Sendeleistung starke Schwankungen der Leistung des Empfangssignals auf, verursacht durch das Hinzukommen oder den Wegfall von Ausbreitungspfaden. Diese Schwankungen werden als langsamer Schwund bezeichnet [Par92]. Messungen zeigen, daß die Schwankungen der Funkfelddämpfung durch langsamen Schwund gut durch eine Lognormal-Verteilung [Pap91] beschrieben werden können [Par92, Egl57]. Der aufgrund der konstruktiven und destruktiven Überlagerung der einzelnen Pfadsignale zusätzlich zu beobachtende schnelle

Schwund [HBH96] bleibe hier außer Acht. Das Verhältnis  $A$  von Sendeleistung zu Empfangsleistung wird als Funkfelddämpfung bezeichnet [Ste96]. Um einfache Modelle zur Simulation von Mobilfunkszenarien zu erhalten, ohne die einzelnen Ausbreitungspfade explizit modellieren zu müssen, können die Schwankungen der Funkfelddämpfung  $A$  durch Zufallsvariablen nachgestellt werden [Pap91].

Im vorliegenden Abschnitt 3.3 werden zwei verschiedene Modelle zum Berechnen der Funkfelddämpfung  $A$  vorgestellt. Wie bereits gesagt, modelliert das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell die Funkfelddämpfung  $A$  in großen Zellen mit sehr hoch angebrachten Antennen der BSen und das Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell die Funkfelddämpfung  $A$  in kleineren Zellen mit wesentlich niedriger angebrachten BS-Antennen.

### 3.3.2 Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell

Das in dieser Arbeit verwendete Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell basiert auf dem in der Standardisierung von Mobilfunksystemen der dritten Generation verwendeten Vehicular-Funkfelddämpfungsmodell [3GP02, 3GP98]. Es beschreibt die Funkfelddämpfung  $A$  in Makrozellen für vorstädtische und städtische Umgebung, ohne allerdings Gebiete mit vorwiegender Hochhausbebauung zu berücksichtigen.

Im Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell werden sowohl LoS- als auch NLoS-Verbindungen berücksichtigt [3GP02]. Je eine LoS- und eine NLoS-Verbindung werden für ein exemplarisches Szenario in Bild 3.4 gezeigt. Für das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell wird angenommen [3GP02], daß in dem betrachteten Szenario Gebäude der mittleren Höhe  $h_r$  sind. Die BS-Antennen werden  $\Delta h_b$  oberhalb der mittleren Gebäudehöhe  $h_r$  auf den Hausdächern angebracht [3GP02]. Die MSen haben die Höhe  $h_{MS}$ . Die Antennen an den BSen haben in alle azimuthalen Richtungen den gleichen Gewinn  $G$  [3GP02]. Solche Antennen werden als horizontal omnidirektional bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird ein vom Verfasser verallgemeinertes Modell basierend auf [3GP02] betrachtet, bei dem die betrachtete horizontal omnidirektionale Antenne unterschiedlichen Gewinn  $G$  für verschiedene Depressionswinkel haben kann. Der Depressionswinkel ist in der vorliegenden Arbeit definiert als der Winkel  $\vartheta_{LoS}$  bzw.  $\vartheta_{NLoS}$  zwischen der Vertikalen und der Richtung des Ausbreitungspfad, siehe Bild 3.4. In [3GP02] wird vereinfachend ein fester Antennengewinn  $G$  für alle Depressionswinkel  $\vartheta_{LoS}$  bzw.  $\vartheta_{NLoS}$  angenommen. Wie in Bild 3.4 angedeutet, werden typischerweise Antennen hoher Gewinne  $G$  im Bereich von Depressionswinkeln  $\vartheta_{LoS}$  und  $\vartheta_{NLoS}$  um  $90^\circ$  eingesetzt, so daß weit entfernte MSen mit hohem Gewinn  $G$  versorgt werden können.



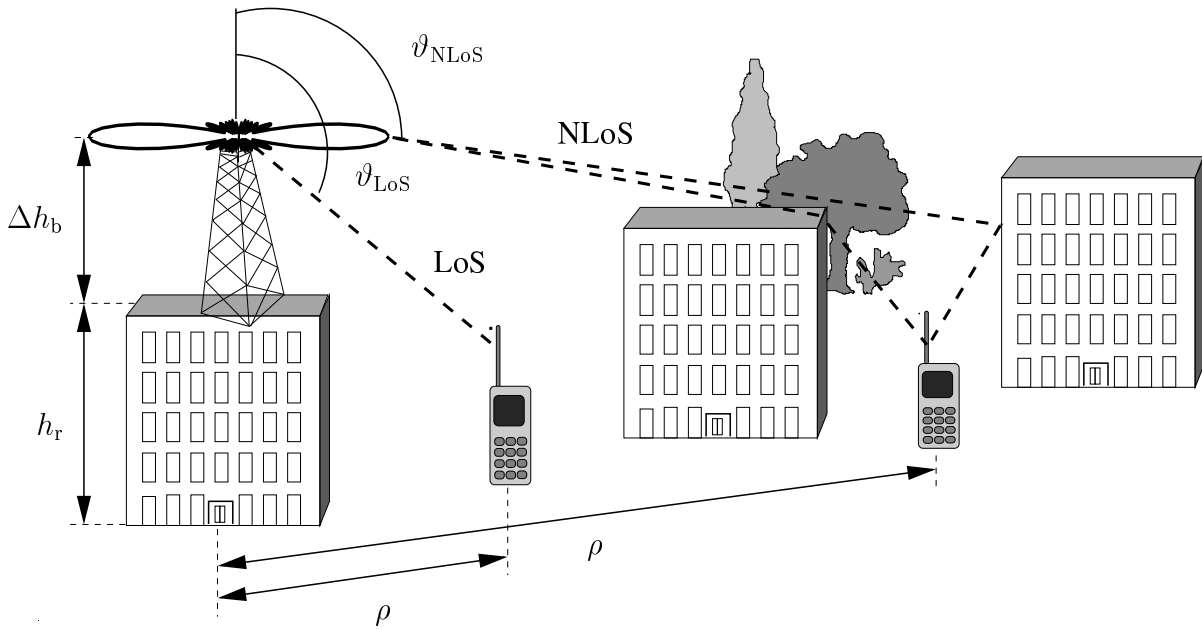


Bild 3.4. LoS- und NLoS-Ausbreitung im Vehicular-Funkfelddämpfungsmodell nach [3GP02]

Im LoS-Fall ist mit der Mittenfrequenz  $f_0$  des betrachteten Frequenzkanals, der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ , dem Dämpfungsexponenten  $\alpha_d$ , dem Antennengewinn  $G(\vartheta_{\text{LoS}})$ , dem Höhenunterschied

$$\Delta h = h_r + \Delta h_b - h_{\text{MS}} \quad (3.1)$$

sowie dem Abstand  $\rho$  zwischen Sender und Empfänger die Funkfelddämpfung approximierbar durch [Par92]

$$A_{\text{LoS}}/\text{dB} = 10 \cdot \lg \left( \left( \frac{4\pi f_0/\text{Hz}}{c_0/(\text{m/s})} \right)^{\alpha_d} ((\rho/\text{m})^{\alpha_d} + (\Delta h/\text{m})^{\alpha_d}) \right) - G(\vartheta_{\text{LoS}})/\text{dB}. \quad (3.2)$$

Im LoS-Fall ist der Dämpfungsexponent  $\alpha_d$  gleich 2. Während im LoS-Fall ein näherungsweise deterministischer Zusammenhang zwischen Funkfelddämpfung  $A$  und Abstand  $\rho$  besteht, ist dies im NLoS-Fall aufgrund der Mehrwegeausbreitung nicht gegeben. Die Schwankung der Funkfelddämpfung durch den langsamen Schwund kann durch eine normalverteilte Zufallsvariable  $\sigma_a/\text{dB} \cdot N(0, 1)$  des Mittelwerts null und der Standardabweichung  $\sigma_a$  beschrieben werden [Par92].  $\sigma_a$  beträgt für typische Mobilfunkszenarien etwa 10 dB [3GP02], in hügeligen und städtischen Gebieten u.U. auch mehr [Par92]. Der schnelle Schwund wird, wie in Unterabschnitt 3.3.1 bereits gesagt, nicht betrachtet. Nach dem Okumura-Hata-Funkfelddämpfungsmodell [Rap96, Wes02] wird mit dem Antennengewinn  $G(\vartheta_{\text{NLoS}})$  sowie dem Abstand  $\rho$  zwischen Sender und Empfänger die Funkfelddämpfung im NLoS-Fall zu [3GP02, 3GP98]

$$\begin{aligned} A_{\text{NLoS}}/\text{dB} = & \alpha_d \cdot 10 \lg(\rho/\text{km}) - 18 \lg(\Delta h_b/\text{m}) \\ & + 21 \lg(f_0/\text{MHz}) + 80 + \sigma_a/\text{dB} \cdot N(0, 1) - G(\vartheta_{\text{NLoS}})/\text{dB} \end{aligned} \quad (3.3)$$

angesetzt [3GP02]. Der Dämpfungsexponent wird berechnet als [3GP02]

$$\alpha_d = 4(1 - 0,004 \cdot \Delta h_b / \text{m}) \quad (3.4)$$

und ist für die möglichen Höhe  $\Delta h_b$  der BS-Antenne über den Hausdächern zwischen 0 und 50 m wesentlich höher als im LoS-Fall. Im betrachteten Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell wird in [3GP02] zunächst prinzipiell davon ausgegangen, daß ein NLoS-Pfad mit einer Modellierung nach (3.3) vorliegt. Allerdings ist die Modellierung der Funkfelddämpfung  $A_{\text{NLoS}}$  nach (3.3) relativ ungenau für kleine Abstände  $\rho$  zwischen MS und BS [3GP02]. Zudem können durch die Modellierung des langsamen Schwundes mit einer in logarithmischer Skala normalverteilten Zufallsvariablen  $\sigma_a \cdot N(0, 1)$  für die Funkfelddämpfung  $A_{\text{NLoS}}$  nach (3.3) im NLoS-Fall niedrigere Werte auftreten als bei  $A_{\text{LoS}}$  nach (3.2) im LoS-Fall, was physikalisch fragwürdig ist. Aus diesem Grund wird die Funkfelddämpfung  $A_{\text{LoS}}$  nach (3.2) für den LoS-Fall als untere Schranke für die minimal auftretende Funkfelddämpfung  $A$  verwendet [3GP02]. Für den Antennengewinn  $G$  wird für das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell in [3GP02] ein fester Wert von 11 dBi sowohl im NLoS- als auch im LoS-Fall eingesetzt. Das  $i$  bei der Angabe des Antennengewinns in dBi bedeutet, daß der Gewinn gegen eine isotrope Antenne betrachtet wird [MG86c]. Der Gewinn  $G$  von 11 dBi wird bei der eingesetzten Antenne mit horizontal omnidirektionaler Abstrahlcharakteristik nur im Bereich der Horizontalen, d.h. für Depressionswinkel  $\vartheta_{\text{LoS}}$  bzw.  $\vartheta_{\text{NLoS}}$  gleich  $90^\circ$ , erreicht. Für wesentlich höhere Depressionswinkel  $\vartheta_{\text{LoS}}$  bzw.  $\vartheta_{\text{NLoS}}$  ist der Antennengewinn  $G$  bedeutend kleiner. Durch die Vereinfachung der Annahme eines festen Antennengewinns  $G$  für alle Depressionswinkel  $\vartheta_{\text{LoS}}$  bzw.  $\vartheta_{\text{NLoS}}$  im Berechnungsverfahren des Funkfelddämpfungsmodells können für geringe Abstände  $\rho$  zwischen MS und BS aus (3.2) und (3.3) Funkfelddämpfungen  $A$  resultieren, die geringer sind als diese in der Realität auftreten können [3GP02]. Um dies zu kompensieren, wird eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  definiert [3GP02], vgl. Abschnitt 1.6, die in dem betrachteten Szenario typischerweise auftreten kann, und durch die die Funkfelddämpfung  $A$  nach unten begrenzt wird. Mit der kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$ , der Funkfelddämpfung  $A_{\text{NLoS}}$  im NLoS-Fall nach (3.3) und der Funkfelddämpfung  $A_{\text{LoS}}$  im LoS-Fall nach (3.2) wird die gesamte Funkfelddämpfung  $A$  für das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell [3GP02]

$$A/\text{dB} = \max(A_{\text{LoS}}/\text{dB}, A_{\text{NLoS}}/\text{dB}, A_{\text{min}}/\text{dB}). \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell

Das in der Arbeit verwendete Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell basiert, wie schon gesagt, auf der Annahme, daß die BS-Antennen unterhalb der mittleren Gebäudehöhe  $h_r$  sind. Die Höhe der BS-Antennen im Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell ist  $h_{\text{Mikro-BS}}$ . Dabei

wird ein Mikrozell-Szenario nach Unterabschnitt 3.2.3 betrachtet, siehe Bild 3.3. Infolge der niedrig angebrachten BS-Antennen muß nach [Ber95] neben der Wellenausbreitung über die Hausdächer (engl. Rooftop Diffraction) auch die Ausbreitung entlang der Straßenschluchten berücksichtigt werden, um die Wellenausbreitung in Mikrozell-Szenarien realistisch zu modellieren. Im folgenden wird das COST231 Walfish-Ikegami-Modell [Stu96, Wes02] für die Ausbreitung über Hausdächer und das Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95] für die Ausbreitung entlang der Straßenzüge vorgestellt, die in [3GP02] gemeinsam das Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell bilden.

Im COST231 Walfish-Ikegami-Modell [Stu96, Wes02] wird die Ausbreitung der Funkwellen über die Hausdächer modelliert. Die zu modellierenden Ausbreitungspfade sind aufgrund des Anbringens der BS-Antennen unterhalb der mittleren Gebäudehöhe  $h_r$  meist NLoS-Pfade mit relativ hoher Funkfelddämpfung  $A$ . Die NLoS-Funkfelddämpfung  $A_{\text{Walfish}}$  für das COST231 Walfish-Ikegami-Modell ist unter der Annahme einer Mittenfrequenz  $f_0$  des betrachteten Frequenzkanals von 2GHz und mit dem Abstand  $\rho$  zwischen Sender und Empfänger gegeben durch [3GP02]

$$A_{\text{Walfish}}/\text{dB} = 24 + 45 \lg(\rho/\text{m} + 20). \quad (3.6)$$

In (3.6) sind weder Antennengewinn  $G$  noch Lognormal-Schwund berücksichtigt. Diese Größen können erst am Ende des vorliegenden Abschnitts 3.3.3 im gesamten Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell, bestehend aus COST231 Walfish-Ikegami-Modell und Funkfelddämpfungsmodell nach Berg, einbezogen werden.

Wie bereits gesagt, ist vor allem bei Antennen unterhalb der mittleren Gebäudehöhe  $h_r$  und gradlinigen Straßenzügen die Ausbreitung der Funkwellen entlang der Straßenzüge zu berücksichtigen. Eine solche Wellenausbreitung wird durch das rekursive Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95] beschrieben. Während in dem Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95] die Straßen sich prinzipiell in beliebigen Winkeln kreuzen können, verlaufen in der betrachteten Manhattan-Struktur, vgl. Bild 3.3, die Straßen senkrecht zueinander. Deshalb wird das Funkfelddämpfungsmodell nach Berg hier in vereinfachter Form wiedergegeben.

In dem Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95] wird ein Ausbreitungspfad betrachtet, bei dem im allgemeinen Fall keine Sichtverbindung zwischen Sender (Tx) und Empfänger (Rx) bestehen muß, beispielhaft gezeigt in Bild 3.5. Dabei wird angenommen, daß dieser Ausbreitungspfad aufgrund des Anbringens der BS-Antennen unterhalb der Hausdächer durch die Straßenzüge geführt wird. Kreuzungen, an denen der Ausbreitungspfad seine Richtung ändert, werden durch Knoten  $K_j$  mit dem Index  $j, j \geq 0$  bezeichnet; die Länge eines Segments des Ausbreitungspfades zwischen den Knoten  $K_j$  und  $K_{j+1}$  wird mit  $s_j$  bezeichnet.

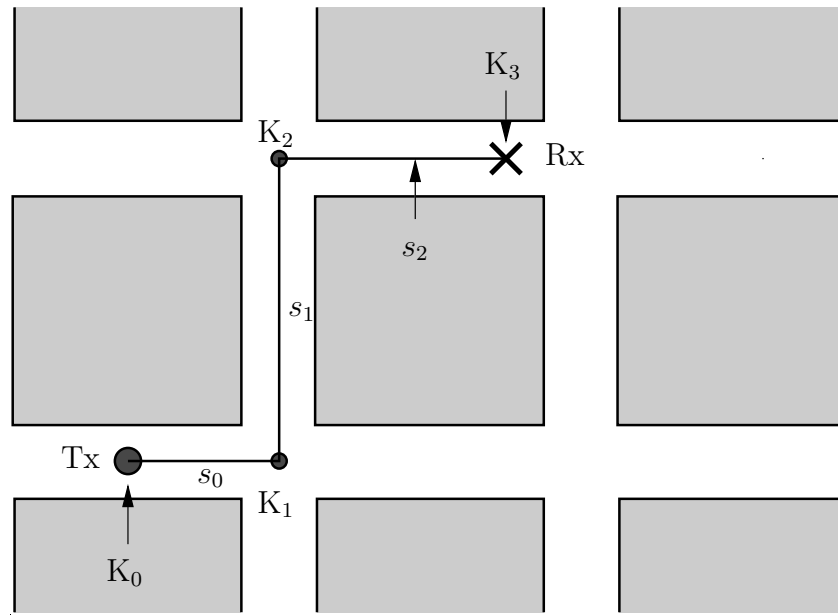


Bild 3.5. Beispiel der Wellenausbreitung im Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95]

Der Sender ist der Knoten  $K_0$ , der Empfänger ist der letzte Knoten  $K_n$  im Ausbreitungspfad, d.h. die Anzahl der Knoten ist  $n + 1$  und es gilt  $j < n$ .

Mit der noch zu erläuternden virtuellen Distanz  $d_n$ , der Mittenfrequenz  $f_0$  des betrachteten Frequenzkanals und der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  wird nach [Ber95] für die Funkfelddämpfung zwischen dem Sender am Knoten  $K_0$  und dem Empfänger am Knoten  $K_n$

$$A_{\text{Berg}}/\text{dB} = 20 \lg \left( \frac{4\pi f_0/\text{Hz} \cdot d_n/\text{m}}{c_0/(\text{m/s})} \right) \quad (3.7)$$

angesetzt. Im Sonderfall  $n$  gleich 1 herrscht LoS zwischen Sender und Empfänger, so daß die virtuelle Distanz  $d_n$  gleich der Länge des Segments  $s_0$  ist. Im NLoS-Fall hingegen, d.h. für  $n > 1$ , kommt an jedem Knoten eine zusätzliche Dämpfung hinzu, die sich durch eine virtuelle Distanz  $d_n$  beschreiben läßt. Diese virtuelle Distanz  $d_n$  ist länger als die einfache Summe der Segmente  $s_j$  über  $j = 0 \dots (n - 1)$ . Die virtuelle Distanz  $d_n$  wird im Funkfelddämpfungsmodell nach Berg [Ber95] mit einem Faktor  $q_j$  zum Beschreiben der Dämpfung am Knoten  $K_j$  berechnet durch die  $n$ -malige Rekursion

$$k_j = k_{j-1} + d_{j-1} \cdot q_{j-1}, \quad (3.8)$$

$$d_j = k_j \cdot s_{j-1} + d_{j-1}, \quad (3.9)$$

mit den Anfangswerten

$$k_0 = 1 \quad \text{und} \quad d_0 = 0. \quad (3.10)$$

Um die virtuelle Distanz  $d_j, j = 1 \dots n$  bei gegebener virtueller Distanz  $d_{j-1}$  zu bestimmen, wird also nach (3.8) das Segment  $s_{j-1}$  mit einem Faktor  $k_j$  multipliziert und zur bisherigen virtuellen Distanz  $d_{j-1}$  addiert. Der Faktor  $k_j$  modelliert die zusätzliche Dämpfung durch den Knoten  $K_{j-1}$ , also die Kreuzung, und berechnet sich nach (3.8). Der Parameter  $q_j$  im allgemeinen Modell nach Berg [Ber95] hängt vom Winkel zwischen den aufeinander treffenden Straßenzügen ab. In der vorliegenden Arbeit wird für alle  $j$   $q_j$  zu 0,5 gewählt [Ber95], da, wie schon gesagt, alle Straßen rechtwinklig zueinander verlaufen. Das Funkfelddämpfungsmodell nach Berg basiert auf der Annahme, daß sich die an einem Knoten  $K_j, j > 1$ , empfangene Leistung so verhält, als wäre sie nicht vom Sender am Knoten  $K_0$  gesendet worden, sondern von einem gedachten Sender am Ort des Knotens  $K_{j-1}$ . Dieser gedachte Sender wirkt so, als würde die an diesem Ort des Knotens  $K_{j-1}$  empfangene Leistung mit einer isotropen Abstrahlcharakteristik, d.h. in alle Richtungen, verteilt werden. Am Ort des Knotens  $K_{j-1}$ , an dem sich die Richtung der Wellenausbreitung durch Reflexion und Beugung grundlegend ändert, entstehen also hohe Verluste im Vergleich zur geradlinigen Wellenausbreitung.

Aus der Literatur ist bekannt, daß die Funkfelddämpfung bei hohen Entfernungen  $\rho$  üblicherweise Dual-Slope-Verhalten zeigt [BBL92, XBM<sup>+</sup>93]: Bei geringer Distanz nimmt die Funkfelddämpfung quadratisch mit der Entfernung  $\rho$  zwischen Sender und Empfänger zu, d.h.  $\alpha_d$  ist gleich 2; ab einer Entfernung  $\rho_{br}$ , die auf englisch als Breakpoint Distance bezeichnet wird, nimmt die Funkfelddämpfung mit der Entfernung  $\rho$  zur vierten Potenz zu, d.h.  $\alpha_d$  ist gleich 4. Mit der Funktion

$$D(\rho) = \begin{cases} \rho/\rho_{br} & \text{für } \rho > \rho_{br}, \\ 1 & \text{für } \rho \leq \rho_{br} \end{cases} \quad (3.11)$$

ist die Funkfelddämpfung für das Dual-Slope-Modell gegeben durch [3GP02]

$$A_{\text{Berg,dual}}/\text{dB} = 20 \lg \left[ \frac{4\pi f_0/\text{Hz} \cdot d_n/\text{m}}{c_0/(\text{m/s})} D \left( \sum_{j=1}^n s_{j-1} \right) \right]. \quad (3.12)$$

Im Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach [3GP02] wird zunächst für jede Kombination aus Sender und Empfänger sowohl die Funkfelddämpfung  $A_{\text{Berg,dual}}$  nach Berg als auch die Funkfelddämpfung  $A_{\text{Walfish}}$  nach dem COST231 Walfish-Ikegami-Modell berechnet. Für die resultierende Funkfelddämpfung  $A_{\text{res}}$  wird dasjenige von den beiden Modellen nach (3.6) und (3.12) ausgewählt, das den niedrigeren Wert liefert, d.h.

$$A_{\text{res}}/\text{dB} = \min(A_{\text{Walfish}}/\text{dB}, A_{\text{Berg,dual}}/\text{dB}), \quad (3.13)$$

da der Ausbreitungspfad mit der niedrigeren Funkfelddämpfung  $A$  die Übertragungseigenschaften dominiert. Der resultierenden Funkfelddämpfung  $A_{\text{res}}$  nach (3.13) wird eine Lognormal-verteilte Zufallsgröße mit der Standardabweichung  $\sigma_a$  hinzugefügt, die den langsamen Schwund modelliert. Die Funkfelddämpfung  $A_{\text{res}}$  vermindert

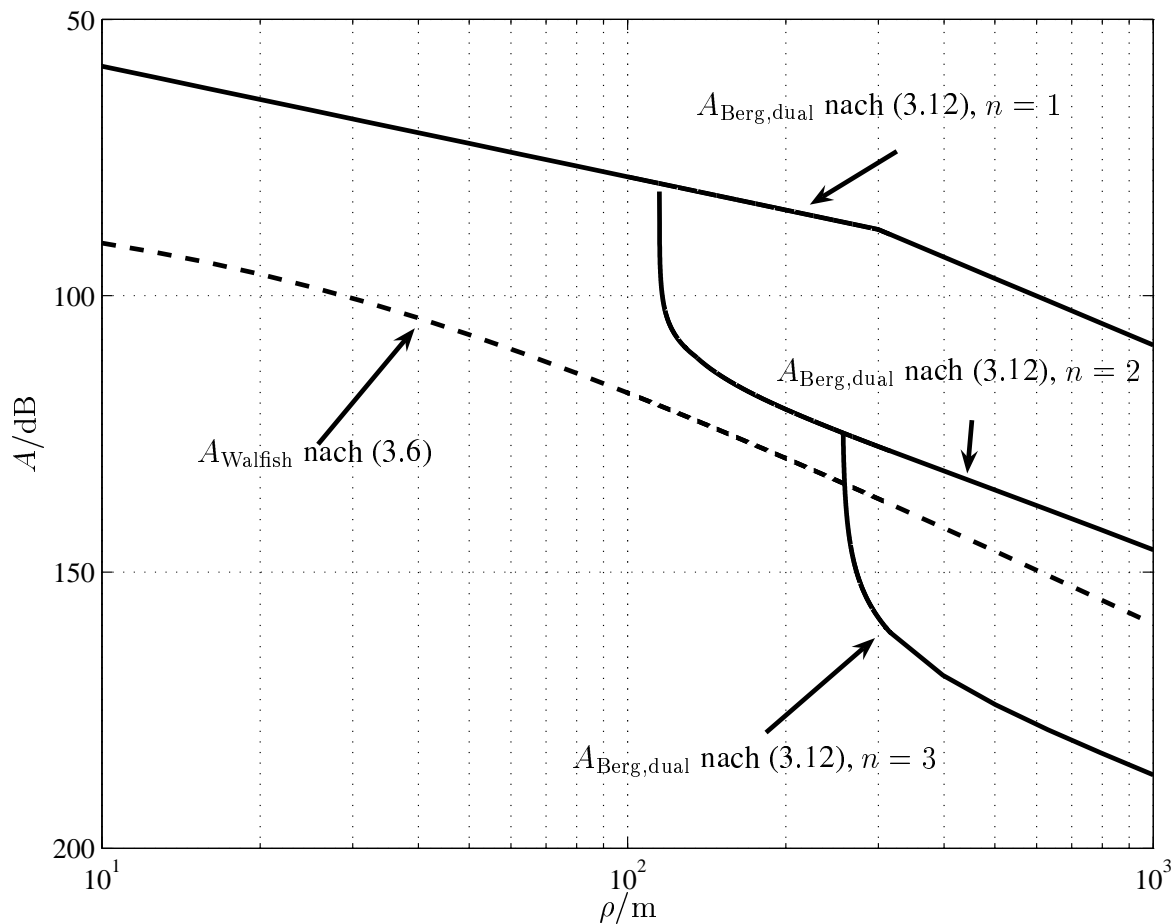


Bild 3.6. Funkfelddämpfung  $A/\text{dB}$  über dem Abstand  $\rho/\text{m}$  zwischen Sender und Empfänger für einen Pfad mit  $n = 1$  (LoS),  $n = 2$  (NLoS, eine Straßenecke im Pfad), und  $n = 3$  (NLoS, 2 Straßenecken im Pfad, siehe Bild 3.5)

sich zudem um den Antennengewinn  $G$  der BS. Die aus  $A_{\text{res}}$ , Lognormal-Schwund und Antennengewinn  $G$  resultierende Funkfelddämpfung  $A$  darf nicht kleiner werden als eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$ , durch den ein minimaler Abstand zwischen Sender und Empfänger modelliert werden kann. Somit ist die Funkfelddämpfung im Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach [3GP02]

$$A/\text{dB} = \max(A_{\text{res}}/\text{dB} + \sigma_a/\text{dB} \cdot N(0, 1) - G/\text{dB}, A_{\text{min}}/\text{dB}). \quad (3.14)$$

In Bild 3.6 werden die beiden Funkfelddämpfungsmodelle nach Berg, siehe (3.12), und nach COST231 Walfish-Ikegami, siehe (3.6), exemplarisch miteinander verglichen. Dabei wird die Abwärtsstrecke betrachtet, bei der die BSen wie in Bild 3.5 angeordnet werden. Die Abszisse ist der Abstand  $\rho/\text{m}$  zwischen Sender und Empfänger, die Ordinate die Funkfelddämpfung  $A_{\text{res}}/\text{dB}$ . Für das Funkfelddämpfungsmodell nach Berg und den LoS-Fall, d.h. für  $n$  gleich 1, erkennt man in Bild 3.6 die Breakpoint Distance  $\rho_{\text{br}}$ , die nach [3GP02] zu 300 m gewählt wurde. Da sich die BS auf einer Straße in der Mitte zwischen zwei Kreuzun-

gen befindet, siehe Bild 3.3, und die Breite  $w_b$  der Häuserblöcke zu 200 m und die Breite  $w_s$  der Straßen zu 30 m angenommen wird, gibt es ab einer Distanz  $\rho$  von 115 m einen NLoS-Pfad um eine Straßenecke, d.h. für  $n$  gleich zwei. Ein solcher Pfad wird beispielhaft in Bild 3.5 gezeigt. Durch die Straßenecke erhöht sich die Funkfelddämpfung  $A$  sprunghaft. Ist in dem Pfad eine weitere Straßenecke vorhanden, d.h. für  $n$  gleich drei, so gibt es eine weitere sprunghafte Erhöhung der Funkfelddämpfung  $A$ . Beim Vergleich mit dem Funkfelddämpfungsmodell nach COST231 Walfish-Ikegami erkennt man, daß nur im Fall  $n$  gleich drei die Funkfelddämpfung  $A_{\text{Walfish}}$  nach COST231 Walfish-Ikegami geringer wird als die Funkfelddämpfung  $A_{\text{Berg,dual}}$  nach Berg. Es kann also für das betrachtete Mikrozell-Szenario festgehalten werden, daß MAI im betrachteten Mikrozell-Szenario in erster Linie auf MSen zurückgeht, die LoS zur BS haben oder nur eine Straßenecke in ihrem Ausbreitungspfad. Die verwendete Anordnung der BSen zwischen Häuserblöcken ist somit wichtig, um MAI zu vermeiden. Im Vergleich dazu würde beim Anordnen der BSen auf den Kreuzungen wesentlich höhere MAI entstehen.

## 3.4 Modellieren von Anderkanal-MAI

### 3.4.1 Beschreiben der Anderkanal-MAI

In der vorliegenden Arbeit soll, wie bereits in Abschnitt 1.7 gesagt, die Koexistenz von Mobilfunknetzen bzw. -systemen untersucht werden, die in verschiedenen Frequenzkanälen aktiv sind. Die zwischen diesen Mobilfunknetzen bzw. -systemen auftretende MAI ist somit Anderkanal-MAI. Daher ist ein Modell zum Beschreiben der Anderkanal-MAI erforderlich. Das Beschreiben und Auswerten von Anderkanal-MAI basierend auf den physikalischen Ursachen, siehe Abschnitt 2.5, ist nur dann exakt möglich, wenn eine spezifische Systemrealisierung angenommen wird, bei der insbesondere die nichtidealen Eigenschaften der eingesetzten Hardwarekomponenten bekannt sind. Da diese Komponenten jedoch nicht schon in der Phase der Standardisierung festgelegt werden, sondern von den Herstellern innerhalb der in der Standardisierung festgelegten Spezifikation frei gewählt werden können, wird für die Auslegung des Mobilfunksystems in der Standardisierungsphase ein Modell zum Beschreiben der Anderkanal-MAI weitgehend unabhängig von der jeweiligen Systemimplementierung benötigt. Dazu werden im 3G-Standard UMTS verschiedene Gütekriterien herangezogen, die das Leistungsverhältnis von gesamter Anderkanal-MAI zur Nutzleistung beschreiben, aufgesplittet nach der Ursache im Sender oder Empfänger [Eri99b]. Diese Gütekriterien sind das Adjacent Channel Leakage Power Ratio  $\delta_{\text{ACLR}}$ , die Adjacent Channel Selectivity  $\delta_{\text{ACS}}$  und das Adjacent Channel Interference Ratio  $\delta_{\text{ACIR}}$ . Im folgenden werden diese Gütekriterien gemäß ihrer Definition im 3G-Standard UMTS [3GP01a] erläutert, wobei die

Chiprate  $R_{\text{chip}}$  ohne Beschränkung der Allgemeinheit zu 3,84 Mchip/s angenommen wird. Auf die Anforderungen an ein TD-CDMA-Mobilfunksystem mit Chiprate  $R_{\text{chip}}$  von 1,28 Mchip/s wird in Unterabschnitt 3.4.5 kurz eingegangen.

- Adjacent Channel Leakage Power Ratio (ACLR) ist das Verhältnis von im Referenzkanal gesendeter Nutzleistung  $P_{\text{ACLR}}$  zur Störleistung  $I_{\text{ACLR}}$ , die unerwünschterweise gleichzeitig in einen Anderkanal abgestrahlt wird [3GP01a]. Dabei wird nur ein einziger Anderkanal berücksichtigt. Sowohl die im Referenzkanal als auch die im Anderkanal gesendete Leistung werden am Ausgang eines Root Raised Cosine (RRC)-Filters, siehe Anhang A.1, mit einem Roll-Off-Faktor  $\alpha_r$  von 0,22 und der Rauschbandbreite  $\Delta f_c$  gleich der Chiprate  $R_{\text{chip}}$  von 3,84 Mcps bestimmt.
- Adjacent Channel Selectivity (ACS) ist eine Größe, die die Fähigkeit des Empfängers beschreibt, ein Signal im Referenzkanal zu empfangen, und zwar in Anwesenheit eines Signals in einem Anderkanal mit einem bestimmten Frequenzoffset  $\Delta f_a$  von der Mittenfrequenz des betrachteten Referenzkanals [3GP01a].  $\delta_{\text{ACS}}$  ist definiert als das Verhältnis von Empfangsfilterdämpfung im Referenzkanal zur Empfangsfilterdämpfung im benachbarten Frequenzband.
- Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR) ist das Verhältnis der von einem Sender im Referenzkanal aufgebrauchten Nutzleistung  $P$  zur gesamten Störleistung  $I$ , die auf Imperfektionen sowohl des Empfängers als auch des Senders zurückgeht. Die Störleistung wird dabei durch ein Signal in einem Anderkanal verursacht [3GP02, Eri99b].

In den folgenden Unterabschnitten 3.4.2 bis 3.4.5 werden die Größen  $\delta_{\text{ACLR}}$ ,  $\delta_{\text{ACS}}$  und  $\delta_{\text{ACIR}}$  anschaulich erklärt. Dazu werden vom Verfasser die Leistungsdichtespektren beispielhafter Sendesignale und Empfangssignale betrachtet. Diese Leistungsdichtespektren werden basierend auf den Anforderungen des 3G-Standards UMTS an die Sende- und Empfangssignale bzgl. der Anderkanal-MAI-Eigenschaften gewählt. In Tabelle 3.1 werden einige zum Erläutern und Berechnen benötigte Größen und Funktionen eingeführt. Alle Signale und Übertragungsfunktionen werden im Frequenzbereich und im äquivalenten Tiefpaßbereich des Referenzkanals mit der Mittenfrequenz  $f_0$  betrachtet.

In einem Sender gemäß dem 3G-Standard UMTS werden RRC-Filter mit einem Roll-off-Faktor  $\alpha_r$  von 0,22 und einer Bandbreite  $\Delta f_c$  gleich der Chiprate  $R_{\text{chip}}$  von 3,84 MHz zur Impulsformung eingesetzt [3GP01a, 3GP01b, 3GP01c, 3GP01d]. Durch den Einsatz eines an das Sendefilter signalangepaßten Filters mit derselben RRC-Charakteristik im Empfänger ergibt sich nach der Filterung im Empfänger ein Signal mit Raised Cosine (RC)-Charakteristik. Die RC-Charakteristik ist ein Nyquist-Impuls und hat daher die vorteilhafte Eigenschaft, daß das Signal im Zeitbereich zu den Abtastzeitpunkten  $T_c$  frei von Intersymbol-MAI (engl. Intersymbol Interference, ISI) der vorhergehenden und nachfolgenden Chips ist [Pro95], siehe Bild A.1 in Anhang A.1.



Tabelle 3.1. Wichtige Größen und Funktionen

Formelzeichen	Erklärung
$R_{\text{chip}} = 3,84 \text{ Mcps}$	Symbol-Rate des Sendesignals, in CDMA-Mobilfunksystemen Chiprate
$T_c = 260 \text{ ns}$	Dauer eines Sendesymbols, in CDMA-Mobilfunksystemen eines Chips
$\Delta f_c = R_{\text{chip}} = 3,84 \text{ MHz}$	Bandbreite, die der Symbol- bzw. Chip-Rate des Sendesignals entspricht
$\Delta f_n$	Abstand der Mittenfrequenzen zweier benachbarter Frequenz- kanäle
$\Delta f_a$	Abstand der Mittenfrequenz des Referenzkanals von der Mitten- frequenz des betrachteten Anderkanals, d.h. Vielfaches von $\Delta f_n$
$f_0$	Mittenfrequenz des Referenzkanals
$S_{\text{id}}(f)$	Leistungsdichtespektrum eines CDMA-Signals bei Mittenfre- quenz $f_0$ im äquivalenten Tiefpaßbereich nach Impulsformung mit einem RRC-Filter, am Ausgang eines idealen Leistungs- verstärkers. Diese spektrale Leistungsdichte hat somit RRC- Charakteristik nach (A.4)
$S_{\text{re}}(f)$	Leistungsdichtespektrum eines CDMA-Signals bei Mittenfre- quenz $f_0$ im äquivalenten Tiefpaßbereich nach Impulsformung mit einem RRC-Filter, am Ausgang eines nicht-idealen Lei- stungsverstärkers
$\underline{G}_{\text{rrc}}(f)$	Übertragungsfunktion eines RRC-Filters mit Roll-Off-Faktor $\alpha_r = 0,22$ nach (A.4)
$\underline{G}_{\text{re}}(f)$	Übertragungsfunktion eines realen Empfangsfilters im äquivalenten Tiefpaßbereich, beinhaltet Filterung im Hoch- frequenz (HF)-, Zwischenfrequenz (ZF)- und Basisband (BB)- Bereich. Die Gesamtübertragungs-Charakteristik im Referenz- kanal ist die eines RRC-Filters. Die Übertragungsfunktion $\underline{G}_{\text{re}}(f)$ ist im Gegensatz derjenigen des RRC- Filters $\underline{G}_{\text{id}}(f)$ im Nachbarkanal nicht ideal gedämpft

### 3.4.2 Adjacent Channel Leakage Power Ratio (ACLR)

Die Größe  $\delta_{\text{ACLR}}$  beschreibt bzgl. der Anderkanal-MAI die Güte des Senders. Für das Berechnen von  $\delta_{\text{ACLR}}$  wird, wie oben schon erwähnt, die Anderkanal-MAI nur in einem einzigen benachbarten Frequenzkanal berücksichtigt.

Die Anderkanal-MAI wird hauptsächlich durch Nichtlinearitäten der Leistungsverstärker in den Senderendstufen verursacht. Es entstehen Intermodulationsprodukte, die zu einer Verbreiterung des Spektrums führen, vgl. Abschnitt 2.5. Im Idealfall einer linearen Leistungsverstärkung und einer idealen Formung des Sendesignals mit dem RRC-Filter nach (A.4)

Tabelle 3.2. Spektrale Maske für maximal zulässige Anderkanal-Emissionen von MSen [3GP01a]

Frequenzoffset $\Delta f$ /MHz von der Mittenfrequenz $f_0$ des Referenzkanals	maximale Leistung /dBc	Bandbreite des Teilspektrums /MHz
2,5 – 3,5	$-35 - 15(\Delta f - 2,5)$	0,03
3,5 – 7,5	$-35 - 1(\Delta f - 3,5)$	1
7,5 – 8,5	$-35 - 10(\Delta f - 7,5)$	1
8,5 – 12,5	-49	1

ist das Leistungsdichtespektrum des Sendesignals eine RRC-Charakteristik nach (A.4). Das RRC-Filter nach (A.4) ist begrenzt auf eine Bandbreite von

$$\frac{1 + \alpha_r}{T_c} = 4,6848 \text{ MHz}, \quad (3.15)$$

siehe (A.3) und (A.4). Daher entsteht im Idealfall linearer Leistungsverstärkung und idealer Impulsformung bei der nominellen Bandbreite eines Frequenzkanals  $\Delta f_n$  von 5 MHz keine Anderkanal-MAI. Jedoch läßt sich ebensowenig wie die lineare Leistungsverstärkung die Impulsformung in der Realität ideal implementieren, da dies das Erzeugen eines bandbegrenzten Leistungsdichtespektrums des Sendesignals erfordert, also zeitlich unendlich ausgedehnte Impulse, vgl. Abschnitt 2.5. Die Impulsformung kann allerdings im Gegensatz zur linearen Leistungsverstärkung relativ aufwandsgünstig optimiert werden, so daß im allgemeinen — vor allem bei hohen Leistungen des Sendesignals, wo das  $\delta_{\text{ACLR}}$  klein und damit schlecht wird — die Anderkanal-Performanz des Senders vor allem durch Nichtlinearitäten der Leistungsverstärker bestimmt ist.

Im 3G-Standard UMTS [3GP01a] werden Grenzwerte für das  $\delta_{\text{ACLR}}$  angegeben, die die maximale Anderkanal-MAI in einem gesamten Anderkanal festlegen. Neben diesen Grenzwerten gibt es auch noch spektrale Masken, die die maximal zulässige Störleistungsdichte in einem Anderkanal festlegen [3GP01a]. Sender für den 3G-Standard UMTS dürfen nachweisbar diese maximale Störleistungsdichte in einem Anderkanal nicht überschreiten. Dazu wird die abgestrahlte Störleistung in einem Teilspektrum der Bandbreite 0,03 oder 1 MHz, je nach Frequenzoffset  $\Delta f$  von der Mittenfrequenz  $f_0$  des Referenzkanals, gemessen. Die spektrale Maske definiert die maximal erlaubte Anderkanal-Leistung, die eine MS [3GP01a, 3GP01b] oder eine BS [3GP01a, 3GP01b] in einem Teilspektrum der Bandbreite 0,03 bzw. 1 MHz erzeugen darf. Die spektrale Maske einer MS ist in Tabelle 3.2 beschrieben. Die maximal erlaubten Anderkanal-Leistungen sind relativ zur Sendeleistung der MS im Referenzkanal in einer Bandbreite von 3,84 MHz angegeben. Die Angabe der Störleistung relativ zur Leistung des Trägersignals (engl. Carrier Signal) wird in der Einheit dBc angegeben [Pho99]. Typische Werte für die Mittenfrequenzen  $f_0$  der Referenzkanäle haben im 3G-Standard UMTS

die Größenordnung 2 GHz, liegen also um Größenordnungen höher als die Breite der in Tabelle 3.2 angegebenen spektralen Maske von 12,5 MHz.

Zum Veranschaulichen des Begriffs  $\delta_{\text{ACLR}}$  wird das Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  eines beispielhaften realen, d.h. durch Nichtlinearitäten spektral aufgeweiteten Sendesignals betrachtet. Das Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  des Sendesignals wird im Referenzkanal durch eine RRC-Charakteristik modelliert, die die senderseitig durchgeführte Impulsformung des betrachteten CDMA-Signals beschreibt. Die Verzerrung des Leistungsdichtespektrums im Referenzkanal durch Nichtlinearitäten wird vernachlässigt. Es wird der schlimmstmögliche Fall betrachtet, bei dem das Sendesignal mit dem Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  die nach dem 3G-Standard UMTS maximal erlaubten Anderkanal-Emissionen verursacht. Diese maximal erlaubten Anderkanal-Emissionen werden durch die spektrale Maske nach Tabelle 3.2 für eine MS beschrieben. Das eingeführte Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  des Sendesignals wird in Bild 3.7 gezeigt und enthält Knickpunkte bei etwa 2,5 und bei 3,5 MHz, bedingt durch die spektrale Maske nach Tabelle 3.2.

Entsprechend der Definition in Unterabschnitt 3.4.1 ist das  $\delta_{\text{ACLR}}$  das Verhältnis von im Referenzkanal gesendeter Nutzleistung  $P_{\text{ACLR}}$  zur im Nachbarkanal gesendeten Störleistung  $I_{\text{ACLR}}$ , d.h.

$$\delta_{\text{ACLR}} = \frac{P_{\text{ACLR}}}{I_{\text{ACLR}}}. \quad (3.16)$$

$P_{\text{ACLR}}$  und  $I_{\text{ACLR}}$  werden dabei am Ausgang eines RRC-Filters mit der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{rrc}}(f)$  bzw.  $\underline{G}_{\text{rrc}}(f + \Delta f_a)$  und Roll-Off-Faktor  $\alpha_r = 0,22$  über eine Bandbreite  $\Delta f_c$  gleich 3,84 MHz um die jeweilige Mittenfrequenz des Frequenzkanals bestimmt.

In Bild 3.7 werden das Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  des beispielhaften Sendesignals sowie die Betragsquadrate  $|\underline{G}_{\text{rrc}}(f)|^2$  und  $|\underline{G}_{\text{rrc}}(f + \Delta f_a)|^2$  der Übertragungsfunktionen der RRC-Empfangsfilter im Referenz- und im Anderkanal für  $\Delta f_a$  von 5 MHz dargestellt, d.h. der betrachtete Anderkanal ist der dem Referenzkanal direkt benachbarte Frequenzkanal, und  $\Delta f_a$  ist demnach hier gleich  $\Delta f_n$ . Die spektralen Leistungsdichten der Filterausgangssignale im Referenz- und im Anderkanal werden in Bild 3.8 gezeigt, und durch Integration der Leistungsdichtespektren der Filterausgangssignale aus Bild 3.8 über eine Bandbreite von  $\Delta f_c = 3,84$  MHz wird im Referenzkanal die Nutzleistung  $P_{\text{ACLR}}$  und im Anderkanal die Störleistung  $I_{\text{ACLR}}$  bestimmt. Damit ergibt sich aus (3.16) das Leistungsverhältnis

$$\delta_{\text{ACLR}} = \frac{P_{\text{ACLR}}}{I_{\text{ACLR}}} = \frac{\int_{-\frac{\Delta f_c}{2}}^{\frac{\Delta f_c}{2}} S_{\text{re}}(f) |\underline{G}_{\text{rrc}}(f)|^2 df}{\int_{\Delta f_a - \frac{\Delta f_c}{2}}^{\Delta f_a + \frac{\Delta f_c}{2}} S_{\text{re}}(f) |\underline{G}_{\text{rrc}}(f + \Delta f_a)|^2 df}. \quad (3.17)$$

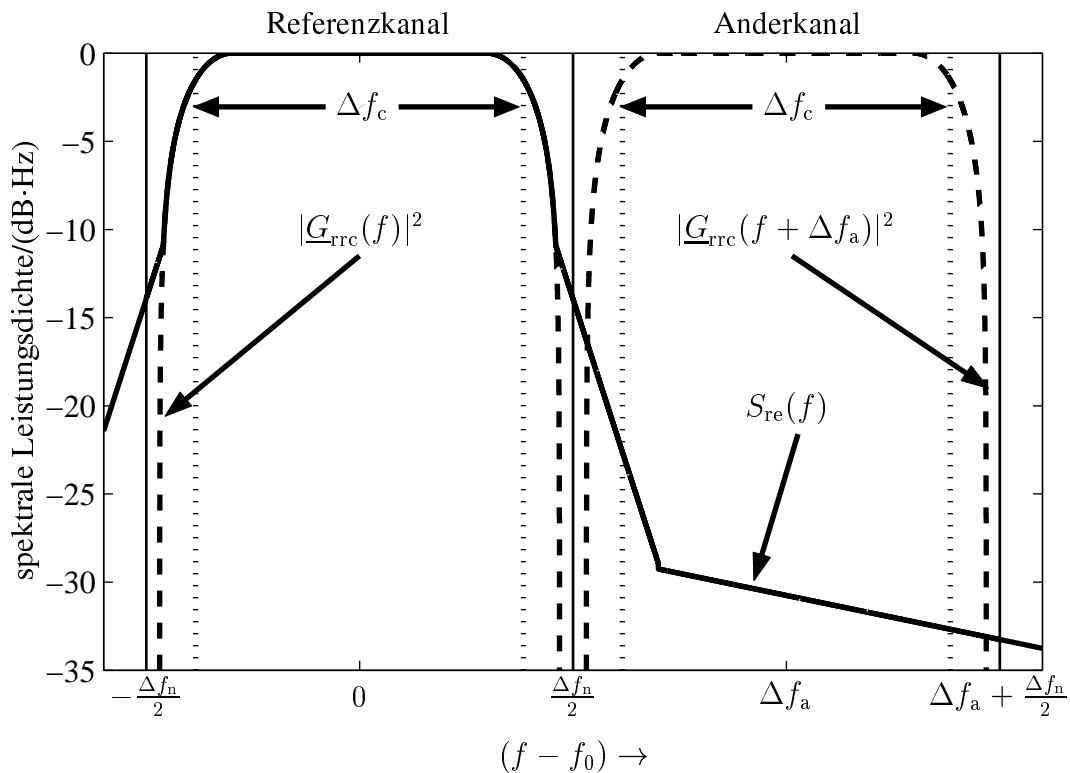


Bild 3.7. Leistungsdichtespektrum  $S_{re}(f)$  des Sendesignals und Betragsquadrate der Übertragungsfunktionen  $|G_{rrc}(f)|^2$  und  $|G_{rrc}(f + \Delta f_a)|^2$  von RRC-Empfangsfiltern im Referenz- und Anderkanal

Für die in Bild 3.7 gezeigte Leistungsdichtespektrum  $S_{re}(f)$  des beispielhaften Sendesignals berechnet sich das  $\delta_{ACLR}$  nach (3.17) zu 29,8 dB für den direkt benachbarten Frequenzkanal, d.h. für  $\Delta f_a$  gleich 5 MHz. Damit ist das für das Leistungsdichtespektrum  $S_{re}(f)$  des Sendesignals berechnete  $\delta_{ACLR}$  niedriger als der in [3GP01a] geforderte Wert von 33 dB für das  $\delta_{ACLR}$  einer MS, da die zur Modellierung der Leistungsdichtespektrums  $S_{re}(f)$  des Sendesignals verwendete spektrale Maske mehr Anderkanal-Emissionen zulässt als der in [3GP01a] angegebene Grenzwert  $\delta_{ACLR}$  von 33 dB für den gesamten Anderkanal an Emissionen erlaubt. Diesen Unterschied kann man dadurch erklären, daß die spektrale Maske in schmalen Teilspektren der Bandbreite 1 MHz bzw. 0,03 MHz, vgl. Tabelle 3.2, höhere Emissionen erlaubt als das  $\delta_{ACLR}$  über die Breite des gesamten Anderkanals. Insgesamt müssen jedoch über den gesamten Anderkanal die Anforderungen des  $\delta_{ACLR}$  nach [3GP01a] eingehalten werden.

### 3.4.3 Adjacent Channel Selectivity (ACS)

Die Größe  $\delta_{ACS}$  beschreibt bzgl. der Anderkanal-MAI die Güte des Empfängers.  $\delta_{ACS}$  ist, wie in Abschnitt 3.4.1 definiert, das Verhältnis der empfangenen Nutzleistung  $P_{ACS}$  zur

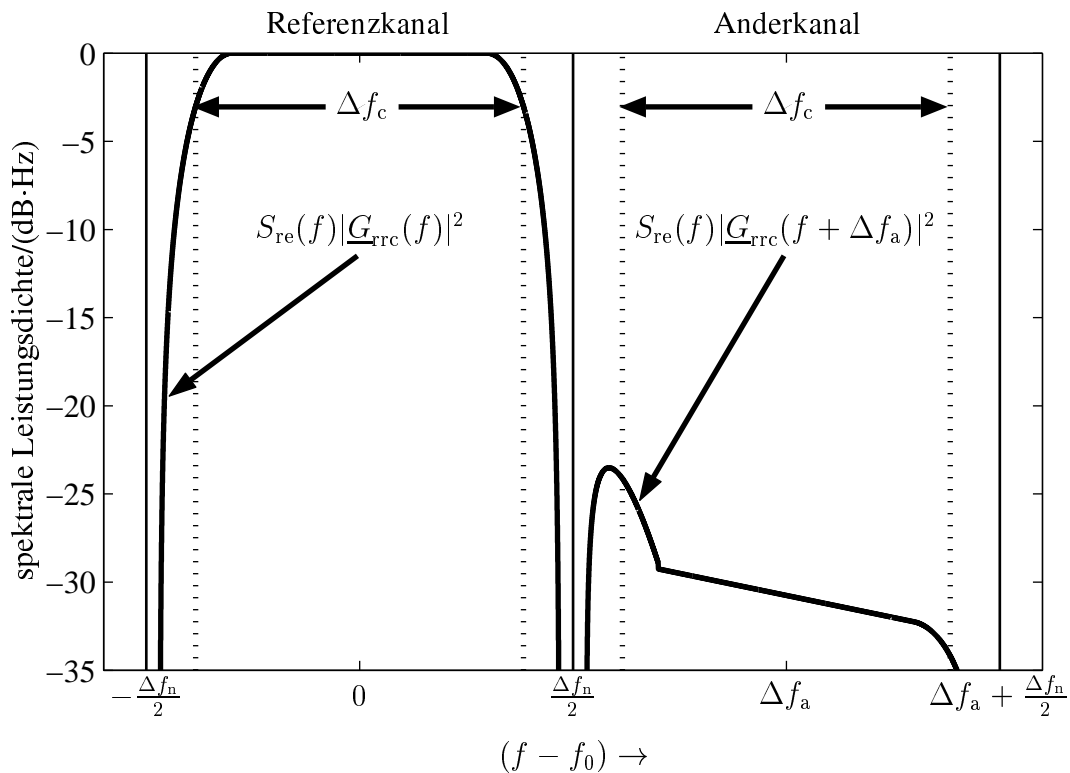


Bild 3.8. Leistungsdichtespektren der Filterausgangssignale jeweils im Referenz- und im Anderkanal

Störleistung  $I_{ACS}$ , die durch ungenügende Dämpfung des Empfangsfilters in einem Anderkanal bei der Datendetektion mit berücksichtigt wird. Im vorliegenden Unterabschnitt 3.4.3 wird Größe  $\delta_{ACS}$  anschaulich erläutert anhand eines beispielhaften nicht-idealen Empfangsfilters mit der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{re}(f)$ . Auch wenn das Durchlaßband dieses Filters nominell im Referenzkanal liegt, kann durch eine ungenügende Dämpfung in einem Anderkanal ein Signal in diesem Anderkanal die Datendetektion im Referenzkanal beeinträchtigen. Für das Beschreiben des  $\delta_{ACS}$  wird angenommen, daß sowohl im Referenz- als auch im Anderkanal jeweils ein CDMA-Signal mit einem Leistungsdichtespektrum  $S_{id}(f)$ , das durch ideale RRC-Impulsformung erzeugt wird, am Empfängereingang anliegt.

Die Nutzleistung  $P_{ACS}$  im Referenzkanal wird durch Integration des Leistungsdichtespektrums am Ausgang eines nicht-idealen Empfangsfilters mit der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{re}(f)$  über eine Bandbreite von  $\Delta f_c$  im Referenzkanal bestimmt, wobei am Eingang des Filters ein Empfangssignal mit dem Leistungsdichtespektrum  $S_{id}(f)$  anliegt. Die Störleistung  $I_{ACS}$  im Anderkanal wird durch Integration des Leistungsdichtespektrums am Ausgang eines nicht-idealen Empfangsfilters der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{re}(f)$  über eine Bandbreite von  $\Delta f_c$  im Anderkanal bestimmt, wobei am Eingang des Filters ein Empfangssignal mit dem Leistungs-

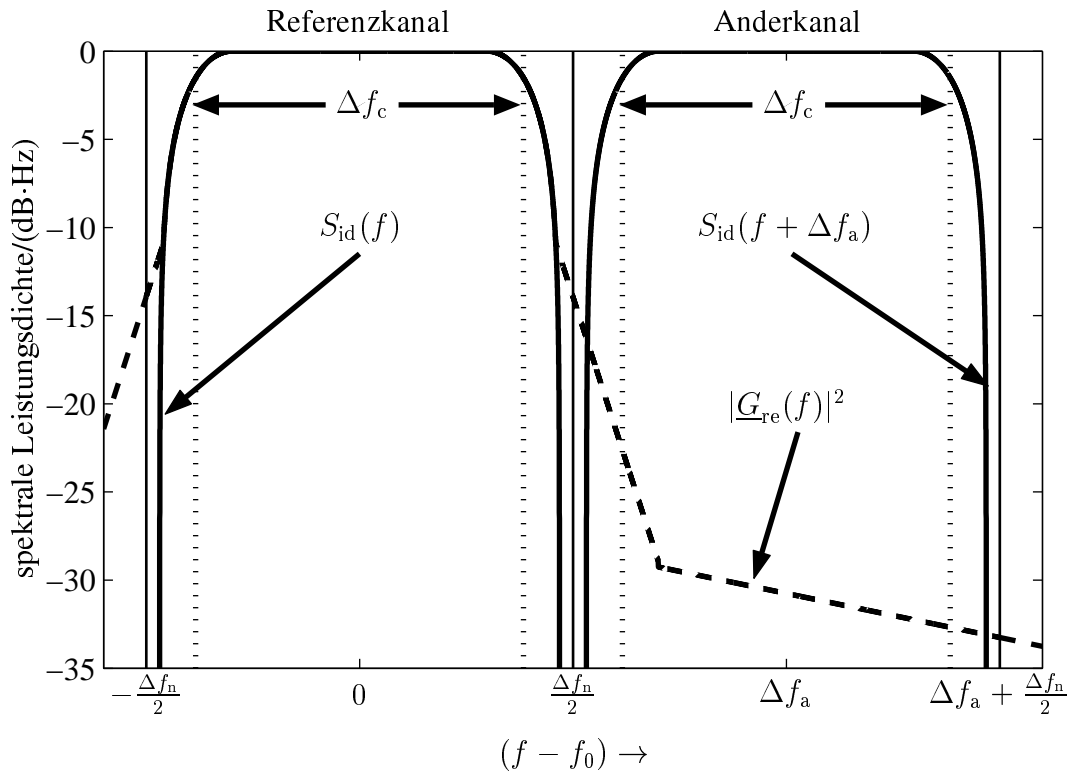


Bild 3.9. Leistungsdichtespektrum  $|\underline{G}_{\text{re}}(f)|^2$  des nicht-idealen Empfangsfilters und Leistungsdichtespektren  $S_{\text{id}}(f)$  und  $S_{\text{id}}(f + \Delta f_a)$  von idealen Sendesignalen im Referenz- und Anderkanal

dichtespektrum  $S_{\text{id}}(f + \Delta f_a)$  anliegt. Damit ergibt sich das Verhältnis

$$\delta_{\text{ACS}} = \frac{P_{\text{ACS}}}{I_{\text{ACS}}} = \frac{\int_{-\frac{\Delta f_c}{2}}^{\frac{\Delta f_c}{2}} S_{\text{id}}(f) |\underline{G}_{\text{re}}(f)|^2 df}{\int_{\Delta f_a - \frac{\Delta f_c}{2}}^{\Delta f_a + \frac{\Delta f_c}{2}} S_{\text{id}}(f + \Delta f_a) |\underline{G}_{\text{re}}(f)|^2 df}. \quad (3.18)$$

Die erläuterte Vorgehensweise zum Berechnen des  $\delta_{\text{ACS}}$  wird in Bild 3.9 anhand der Leistungsdichtespektren  $S_{\text{id}}(f)$  des Sendesignals im Referenzkanal bzw.  $S_{\text{id}}(f + \Delta f_a)$  des Sendesignals im Anderkanal sowie einer beispielhaften Übertragungsfunktion eines Empfangsfilters mit dem Betragsquadrat  $|\underline{G}_{\text{re}}(f)|^2$  für  $\Delta f_a$  gleich 5 MHz veranschaulicht. Da die Approximation eines realen Empfangsfilters mit der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{re}}(f)$  eine Festlegung auf eine bestimmte Filterart erfordert, wird im folgenden ausschließlich zum Veranschaulichen des Begriffs  $\delta_{\text{ACS}}$  für das Betragsquadrat  $|\underline{G}_{\text{re}}(f)|^2$  der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{re}}(f)$  an einer MS das gleiche Leistungsdichtespektrum angenommen wie für das Leistungsdichtespektrum  $S_{\text{re}}(f)$  des Sendesignals im Unterabschnitt 3.4.2. Die Ausgangssignale des Empfangsfilters mit der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{re}}(f)$  im Referenz- und Anderkanal werden in Bild 3.10 gezeigt.

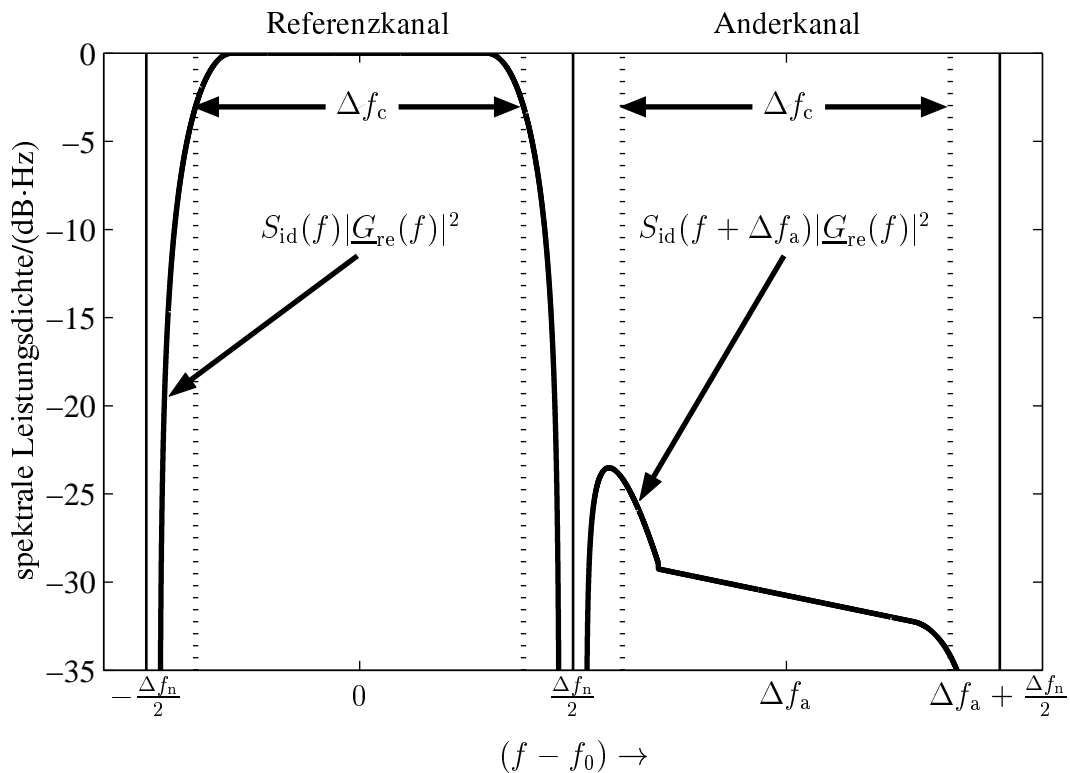


Bild 3.10. Leistungsdichtespektren der Filterausgangssignale jeweils im Referenz- und im Anderkanal

### 3.4.4 Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR)

Das  $\delta_{\text{ACIR}}$  ist definiert als das Verhältnis

$$\delta_{\text{ACIR}} = \frac{P}{I_{\text{ACLR}} + I_{\text{ACS}}} \quad (3.19)$$

der Nutzleistung  $P$  im Referenzkanal zur gesamten Störleistung  $I_{\text{ACLR}} + I_{\text{ACS}}$ , die durch ein Störsignal in einem Anderkanal mit Frequenzoffset  $\Delta f_a$  von der Mittenfrequenz  $f_0$  des Referenzkanals verursacht wird. Die gesamte Störleistung setzt sich dabei zusammen aus der Störleistung  $I_{\text{ACLR}}$ , die durch Imperfektionen des störenden Senders im Anderkanal entsteht, und der Störleistung  $I_{\text{ACS}}$ , die durch Imperfektionen des Empfängers für das Nutzsinal entsteht. Bei allen Betrachtungen im vorliegenden Unterabschnitt 3.4.4 wird zum Zweck einer leicht verständlichen Erläuterung der beschriebenen Vorgehensweise davon ausgegangen, daß die Funkfelddämpfung gleich eins ist.

Die Nutzleistung  $P_{\text{ACLR}}$  für das  $\delta_{\text{ACLR}}$  aus Unterabschnitt 3.4.2 und die Nutzleistung  $P_{\text{ACS}}$  für das  $\delta_{\text{ACS}}$  aus Unterabschnitt 3.4.3 sind nicht exakt gleich, da beim  $\delta_{\text{ACLR}}$  ein nicht-ideales Leistungsdichtespektrum des Sendesignals und ideale Empfangsfilter angenommen werden, während beim  $\delta_{\text{ACS}}$  ein ideales Leistungsdichtespektrum des Sendesignals und nicht-ideale

Empfangsfilter angenommen werden. Da jedoch sowohl das nicht-ideale Leistungsdichtespektrum des Sendesignals als auch die Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{re}}(f)$  des nicht-idealen Empfangsfilters im Integrationsbereich von 3,84 MHz des Referenzkanals gut durch die RRC-Charakteristik angenähert werden können, sind die Nutzleistungen  $P_{\text{ACLR}}$  und  $P_{\text{ACS}}$  nahezu gleich,

$$P = P_{\text{ACLR}} \approx P_{\text{ACS}}. \quad (3.20)$$

Durch Einsetzen von (3.17), (3.18) und (3.20) in (3.19) läßt sich das  $\delta_{\text{ACIR}}$  aus dem  $\delta_{\text{ACLR}}$  und dem  $\delta_{\text{ACS}}$  berechnen:

$$\delta_{\text{ACIR}} = \frac{P}{I} = \frac{P}{I_{\text{ACLR}} + I_{\text{ACS}}} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{\text{ACLR}}} + \frac{1}{\delta_{\text{ACS}}}}. \quad (3.21)$$

### 3.4.5 Anforderungen an das ACLR und das ACS im 3G-Standard UMTS

Für den 3G-Standard UMTS sind die Anforderungen an die Anderkanal-Eigenschaften von Sender- und Empfängerbauteilen exakt definiert [3GP01a, 3GP01b, 3GP01c, 3GP01d]. Die Werte  $\delta_{\text{ACLR}}$  bzw.  $\delta_{\text{ACS}}$  beschreiben, wie schon erläutert, die maximal zulässigen Anderkanal-Emissionen durch Imperfektionen in Sender bzw. Empfänger im Bezug auf die gesendete Nutzleistung  $P$ . Diese Anforderungen an das  $\delta_{\text{ACLR}}$  und das  $\delta_{\text{ACS}}$  werden in der vorliegenden Arbeit benutzt, um den Schlimmstfall einer maximalen Anderkanal-Emission zu modellieren. Daher sind in Tabelle 3.3 die wichtigsten vorgeschriebenen Werte für das  $\delta_{\text{ACLR}}$  und das  $\delta_{\text{ACS}}$  zusammengestellt [3GP01a, 3GP01b, 3GP01c, 3GP01d].

Die Anforderungen an das  $\delta_{\text{ACLR}}$  werden für den direkt benachbarten Frequenzkanal im Abstand  $\Delta f_a$  von 5 (1,6) MHz für den WCDMA- bzw. den TD-CDMA-HCR- (TD-CDMA-LCR)-Modus bei der Chiprate  $R_{\text{chip}}$  von 3,84 (1,28) Mcps sowie für den übernächsten Frequenzkanal im Abstand  $\Delta f_a$  von 10 (3,2) MHz von der Mittenfrequenz  $f_0$  des Referenzkanals definiert. Die Anforderungen an das  $\delta_{\text{ACS}}$  sind nur für den direkt benachbarten Frequenzkanal im Abstand  $\Delta f_a$  von 5 (1,6) MHz festgelegt. Das erforderliche  $\delta_{\text{ACS}}$  ist im 3G-Standard UMTS nur für die MS als Leistungsverhältnis angegeben. Für die BS muß das Einhalten der  $\delta_{\text{ACS}}$ -Anforderungen anhand fest vorgegebener Testbedingungen zum Einhalten einer Bitfehlerrate (BER) überprüft werden [3GP01c, 3GP01d].

Aufgrund der wesentlich niedrigeren Anforderungen an  $\delta_{\text{ACLR}}$  und  $\delta_{\text{ACS}}$  in der MS gegenüber der BS ist das  $\delta_{\text{ACIR}}$  für die Gleichstrecken-MAI meist fast ausschließlich durch die MS bestimmt [Eri99b]. In der Aufwärtsstrecke ist daher das  $\delta_{\text{ACIR}}$  in etwa gleich dem  $\delta_{\text{ACLR,MS}}$  der MS,

$$\delta_{\text{ACIR}} \approx \delta_{\text{ACLR,MS}}, \quad (3.22)$$



Tabelle 3.3. Anforderungen an Anderkanal-Dämpfung von UMTS-Sendern und -Empfängern.

	$\delta_{\text{ACLR}}$		$\delta_{\text{ACS}}$	Referenz	
	$\Delta f_a = 5 \text{ MHz}$ (1,6 MHz)	$\Delta f_a = 10 \text{ MHz}$ (3,2 MHz)	$\Delta f_a = 5 \text{ MHz}$ (1,6 MHz)		
BS	FDD	45 dB	50 dB	nicht als Leistungsverhältnis festgelegt	[3GP01c]
	TDD 3,84 Mcps (1,28 Mcps)	45 dB (40 dB)	55 dB (50 dB)		[3GP01d]
MS	FDD	33 dB (33 dB)	43 dB (43 dB)	33 dB (33 dB)	[3GP01a]
	TDD 3,84 Mcps (1,28 Mcps)				[3GP01b]

während für die Abwärtsstrecke

$$\delta_{\text{ACIR}} \approx \delta_{\text{ACS,MS}}, \quad (3.23)$$

gilt.

## 3.5 Mathematisches Modell zum Ermitteln des SNRs im Ein-Operator-Fall

### 3.5.1 Mengenformalismus

Die Funkseite eines Mobilfunknetzes besteht aus der Menge

$$\mathbb{B} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_b, \dots, \beta_{|\mathbb{B}|}\} \quad (3.24)$$

der BSen und aus der Menge

$$\mathbb{M} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m, \dots, \mu_{|\mathbb{M}|}\} \quad (3.25)$$

der MSen. Zwischen BSen und MSen findet Funkkommunikation statt, die über die BSen an das Festnetz angeknüpft wird. In Mobilfunknetzen bis einschließlich der zweiten Generation kommuniziert jede MS mit ausschließlich einer einzigen BS, wobei sich die Zuordnung MS→BS z.B. wegen der Bewegung der MSen mit der Zeit ändern kann. In gewissen 3G-Mobilfunknetzen ist vorgesehen, daß eine MS gleichzeitig mit mehreren BSen in Verbindung stehen kann. Dies ist beispielsweise der Fall beim SHO in 3G-Mobilfunknetzen nach dem UMTS-Standard WCDMA, vgl. Abschnitt 2.2. Die in einer solchen Situation der Mehrfachzuweisung auftretende Art der Diversität bezeichnet man als Makrodiversität [Jak74, OP98, Wes02]. Durch Makrodiversität können die nachteiligen Auswirkungen des

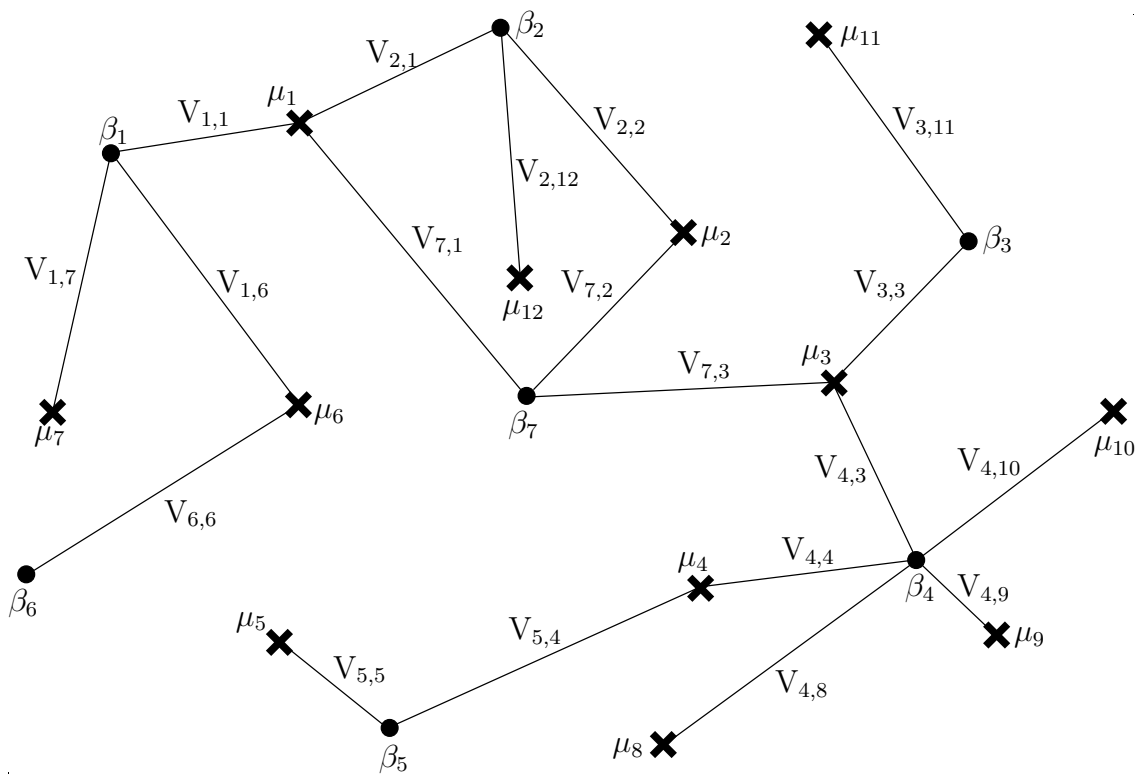
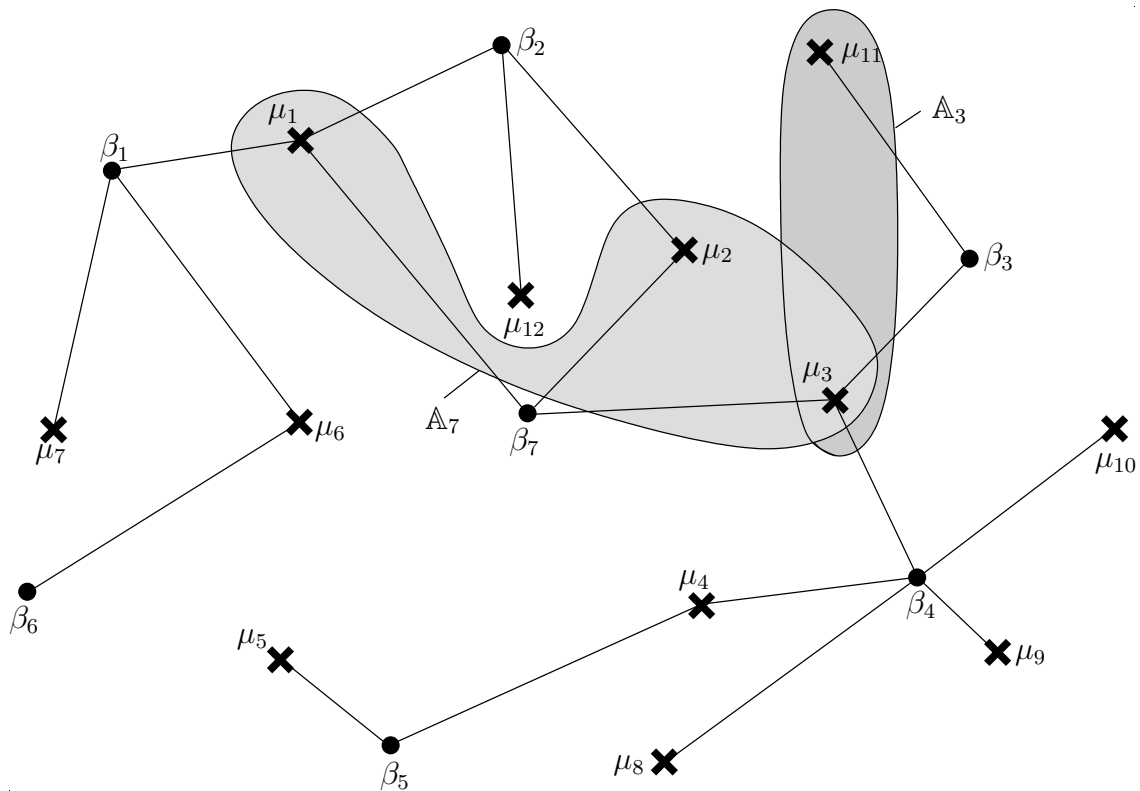


Bild 3.11. Exemplarisches Mobilfunknetz (BS: ●, MS: ✕)

langsamen und des schnellen Schwundes auf die Funkübertragung vermindert werden. Das Ausnutzen von Makrodiversität ist eine vielversprechende Maßnahme zum Erhöhen des SNRs [Jak74, Wes02] und damit der spektralen Effizienz. Deshalb ist zu erwarten, daß diese Technik über 3G hinaus auch bei künftigen Mobilfunkgenerationen eine Rolle spielen wird.

Die Verbindung zwischen einer BS  $\beta_b$  und einer MS  $\mu_m$  wird im folgenden mit dem Symbol  $V_{b,m}$  bezeichnet. Bild 3.11 zeigt exemplarisch ein Mobilfunknetz mit sieben BSen und zwölf MSen. In dieses Bild sind auch die Verbindungen  $V_{b,m}$  eingetragen, wobei die Kriterien, nach denen eine MS gewissen BSen zugeordnet und anderen BSen nicht zugeordnet wird, zunächst noch offen bleiben sollen; generell sei lediglich gesagt, daß die Zuordnung so erfolgen sollte, daß die gegenseitigen Störungen der Verbindungen des Netzes möglichst klein gehalten werden, d.h. daß die für die einzelnen MSen geltenden SNRs möglichst groß werden. Im Falle des Bildes 3.11 ist beispielsweise die MS  $\mu_{11}$  nur einer einzigen BS, nämlich der BS  $\beta_3$  zugeordnet, während die MS  $\mu_3$  gleichzeitig mit den drei BSen  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  und  $\beta_7$  kommuniziert. Die im SNR enthaltene, englisch mit „Noise“ bezeichnete Störleistung sei die Summe der MAI-Leistung und der thermischen Rauschleistung.

Für das kompakte Formulieren der im weiteren Verlauf der Arbeit interessierenden SNRs ist es behilflich, gewisse Untermengen der Menge  $\mathbb{B}$  der BSen und der Menge  $\mathbb{M}$  der MSen

Bild 3.12. Veranschaulichen der MS-Mengen  $\mathbb{A}_b$ 

einzuführen. Dies soll im folgenden geschehen. Hierbei kann auf Überlegungen aufgebaut werden, die in [Ste96] für den Spezialfall gemacht werden, daß jede MS nur einer einzigen BS zugewiesen wird. Ein Teil der im folgenden eingeführten Mengen beruht auf eigenen, über [Ste96] hinausgehenden Überlegungen des Verfassers.

Jeder BS  $\beta_b$  ist eine gewisse Anzahl von MSen zugeordnet. Diese MSen bilden die Menge

$$\mathbb{A}_b \subseteq \mathbb{M} \quad (3.26)$$

Im Falle des Netzes nach Bild 3.11 ist beispielsweise

$$\mathbb{A}_7 = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}. \quad (3.27)$$

$\mathbb{A}_7$  nach (3.27) ist in Bild 3.12 durch graues Unterlegen veranschaulicht. Für die Vereinigungsmenge aller  $|\mathbb{B}|$  Mengen  $\mathbb{A}_b$  nach (3.26) gilt

$$\bigcup_{b=1 \dots |\mathbb{B}|} \mathbb{A}_b = \mathbb{M}, \quad (3.28)$$

da jede MS mindestens einer BS zugeordnet ist. Die Schnittmenge zweier Mengen  $\mathbb{A}_b$  und  $\mathbb{A}_{\tilde{b}}$ ,  $\tilde{b} \neq b$ , ist im allgemeinen nicht leer, siehe z.B. die Mengen  $\mathbb{A}_3$  und  $\mathbb{A}_7$  im Bild 3.12, die

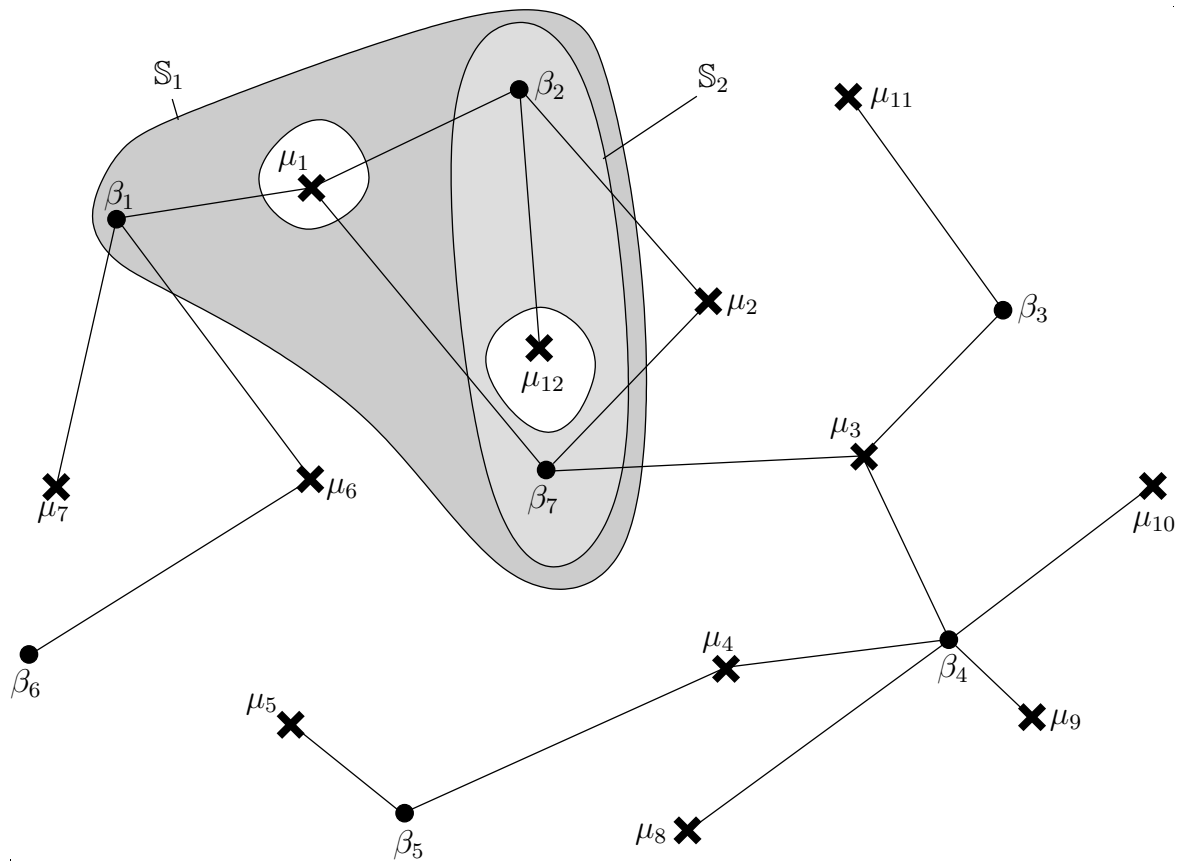


Bild 3.13. Veranschaulichen des Active Sets  $\mathbb{S}_m$

die MS  $\mu_3$  gemeinsam haben. Für den Fall, daß jede MS nur einer einzigen BS zugeordnet ist, wurde der Begriff der Zelle geprägt, siehe Abschnitt 1.4. In Erweiterung dieses Begriffs werde im Fall der Mehrfachzuordnung MS  $\rightarrow$  BS die Menge  $\mathbb{A}_b$  der einer BS  $\beta_b$  zugewiesenen MSen als die Zelle dieser BS bezeichnet.

Jede MS  $\mu_m$  kommuniziert mit einer gewissen Anzahl von BSen. Diese bilden die Menge

$$\mathbb{S}_m \subseteq \mathbb{B} \tag{3.29}$$

$\mathbb{S}_m$  nach (3.29) wird Active Set der MS  $\mu_m$  genannt [WL97, HT02]. Im Falle des Netzes nach Bild 3.11 ist beispielsweise

$$\mathbb{S}_1 = \{\beta_1, \beta_2, \beta_7\}, \tag{3.30}$$

siehe Bild 3.13. Für die Vereinigungsmenge aller  $|\mathbb{M}|$  Active Sets nach (3.29) gilt

$$\bigcup_{m=1 \dots |\mathbb{M}|} \mathbb{S}_m \subseteq \mathbb{B}. \tag{3.31}$$

Das Gleichheitszeichen in (3.31) gilt, wenn jeder BS mindestens eine MS zugeordnet ist. Die Schnittmenge zweier Active Sets  $\mathbb{S}_m$  und  $\mathbb{S}_{\tilde{m}}$ ,  $\tilde{m} \neq m$ , ist im allgemeinen nicht leer,

siehe z.B. die Active Sets  $\mathbb{S}_1$  und  $\mathbb{S}_2$  im Beispiel nach Bild 3.13, die gemeinsam die BS  $\beta_2$  enthalten.

Für die Verbindungen einer speziellen MS  $\mu_m$  im Mobilfunknetz wirken die Verbindungen anderer MSen  $\mu_{\tilde{m}}, \tilde{m} \neq m$ , im Netz als MAI. Die auf diese Weise die Verbindungen der MS  $\mu_m$  störenden anderen Verbindungen können auf unterschiedliche Weise zu Mengen zusammengefaßt werden, deren Definition eine Systematik der späteren MAI-Betrachtungen ermöglicht. Im folgenden geht es um solche Mengen.

Wir betrachten eine Verbindung  $V_{b,m}$  im Mobilfunknetz. Für diese Verbindung sind alle MSen  $\mu_{\tilde{m}}, \tilde{m} \neq m$ , potentielle Verursacher von MAI. Die Menge dieser die Verbindung  $V_{b,m}$  potentiell störenden MSen ist mit  $\mathbb{M}$  nach (3.25)

$$\mathbb{I}_m = \mathbb{M} \setminus \{\mu_m\}. \quad (3.32)$$

$\mu_m$  sei eine der MSen, die der BS  $\beta_b$  zugewiesen ist und deshalb der Menge  $\mathbb{A}_b$  und damit der Zelle dieser BS angehört. Betrachtet man nur alle Verbindungen  $V_{b,m}, \mu_m \in \mathbb{M}$ , zwischen der BS  $\beta_b$  und den dieser BS zugewiesenen MSen, so ist die Menge der MSen, die die Verbindung  $V_{b,m}$  stören, gegeben durch

$$\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}} = \mathbb{A}_b \setminus \{\mu_m\}. \quad (3.33)$$

Das Superskript IaZ drückt aus, daß es sich um Intrazell-MAI handelt. Für das Mobilfunknetz nach Bild 3.11 ist in Bild 3.14 exemplarisch die MS-Menge

$$\mathbb{I}_{7,2}^{\text{IaZ}} = \{\mu_1, \mu_3\} \quad (3.34)$$

veranschaulicht.

Alle MSen  $\mu_{\tilde{m}}, \tilde{m} \neq m$ , die für die Verbindung  $V_{b,m}$  MAI verursachen und nicht der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  der Intrazellinterferer angehören, werden zur Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  zusammengefaßt, die sich mit  $\mathbb{I}_m$  nach (3.32) und  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  nach (3.33) ergibt zu

$$\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}} = \mathbb{I}_m \setminus \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}. \quad (3.35)$$

Das Superskript IrZ drückt aus, daß es sich um Interzell-MAI handelt. Für das Mobilfunknetz nach Bild 3.11 zeigt Bild 3.15 exemplarisch die MS-Menge  $\mathbb{I}_{7,2}^{\text{IrZ}}$ .

Den Definitionen der MS-Mengen  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  nach (3.33) und  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  nach (3.35) liegt eine gewissermaßen BS-zentrische Sichtweise zugrunde. Das Gegenstück hierzu wäre eine MS-zentrische Sichtweise, auf die im folgenden eingegangen wird. Wir betrachten wieder eine spezielle MS  $\mu_m$ . Wir können nun alle MSen  $\mu_{\tilde{m}}, \tilde{m} \neq m$ , die Verbindung mit mindestens einer der BSen

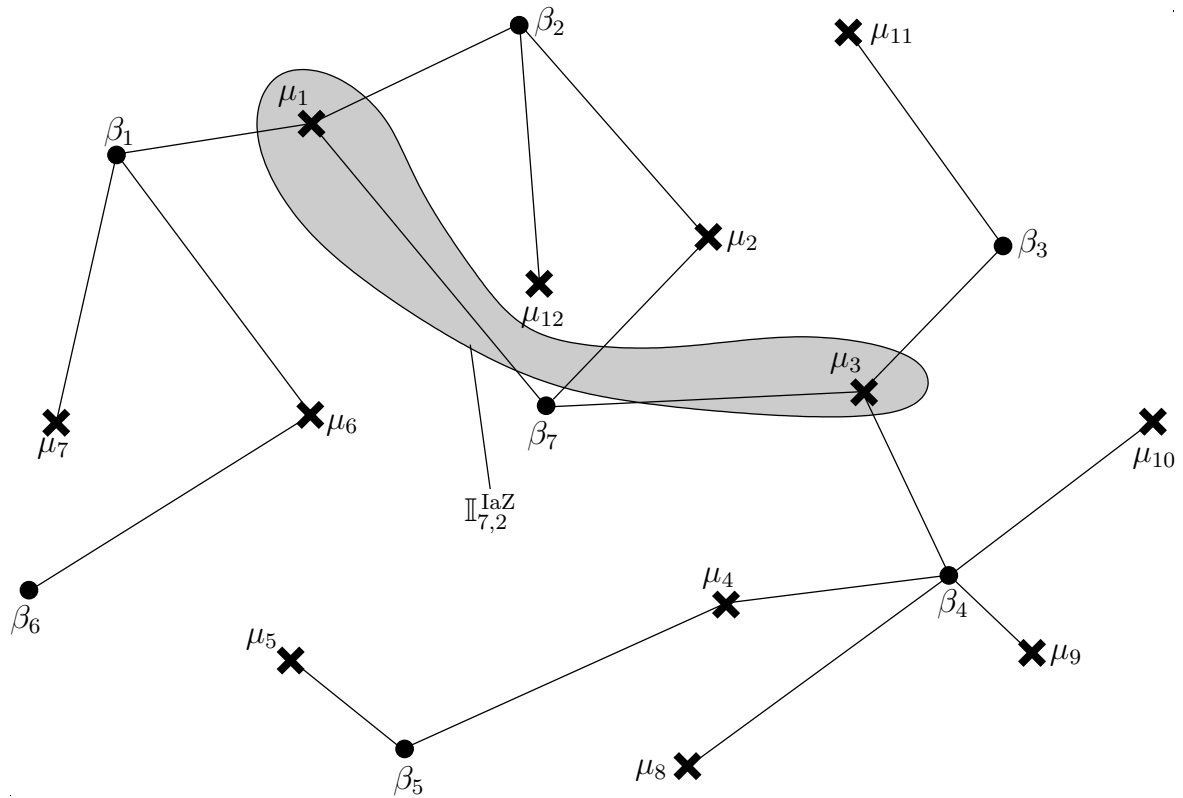


Bild 3.14. Veranschaulichen der MS-Mengen  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  nach (3.33)

des Active Sets  $\mathbb{S}_m$  der MS  $\mu_m$  haben, zur MS-Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  zusammenfassen. Diese Menge kann dargestellt werden in der Form

$$\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}} = \{\mu_{\tilde{m}} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{A}_{\tilde{b}} \wedge \beta_{\tilde{b}} \in \mathbb{S}_m \wedge \mu_{\tilde{m}} \neq \mu_m\}. \quad (3.36)$$

Das Superskript IaAS steht für Intra-Active-Set-MAI. Für das Mobilfunknetz nach Bild 3.11 veranschaulicht Bild 3.16 als Beispiel die MS-Menge  $\mathbb{I}_2^{\text{IaAS}}$ .

Alle MSen  $\mu_{\tilde{m}}, \tilde{m} \neq m$ , die nicht der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  angehören und mit ihren Verbindungen die Verbindungen der MS  $\mu_m$  stören, bilden die MS-Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}}$ , für die mit  $\mathbb{I}_m$  nach (3.32) und  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  nach (3.36)

$$\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}} = \mathbb{I}_m \setminus \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaAS}} \quad (3.37)$$

gilt. Das Superskript IrAS steht hierbei für Inter-Active-Set-MAI. Bild 3.17 veranschaulicht für das Mobilfunknetz nach Bild 3.11 die MS-Menge  $\mathbb{I}_2^{\text{IrAS}}$ .

### 3.5.2 SNR in der Aufwärtsstrecke

Im folgenden bezeichnet  $T_m$  die Sendeleistung der MS  $\mu_m$  und  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  den Funkfeldgewinn des Kanals zwischen der MS  $\mu_m$  und der BS  $\beta_b$ . Das Superskript BM bei  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  wird ein-

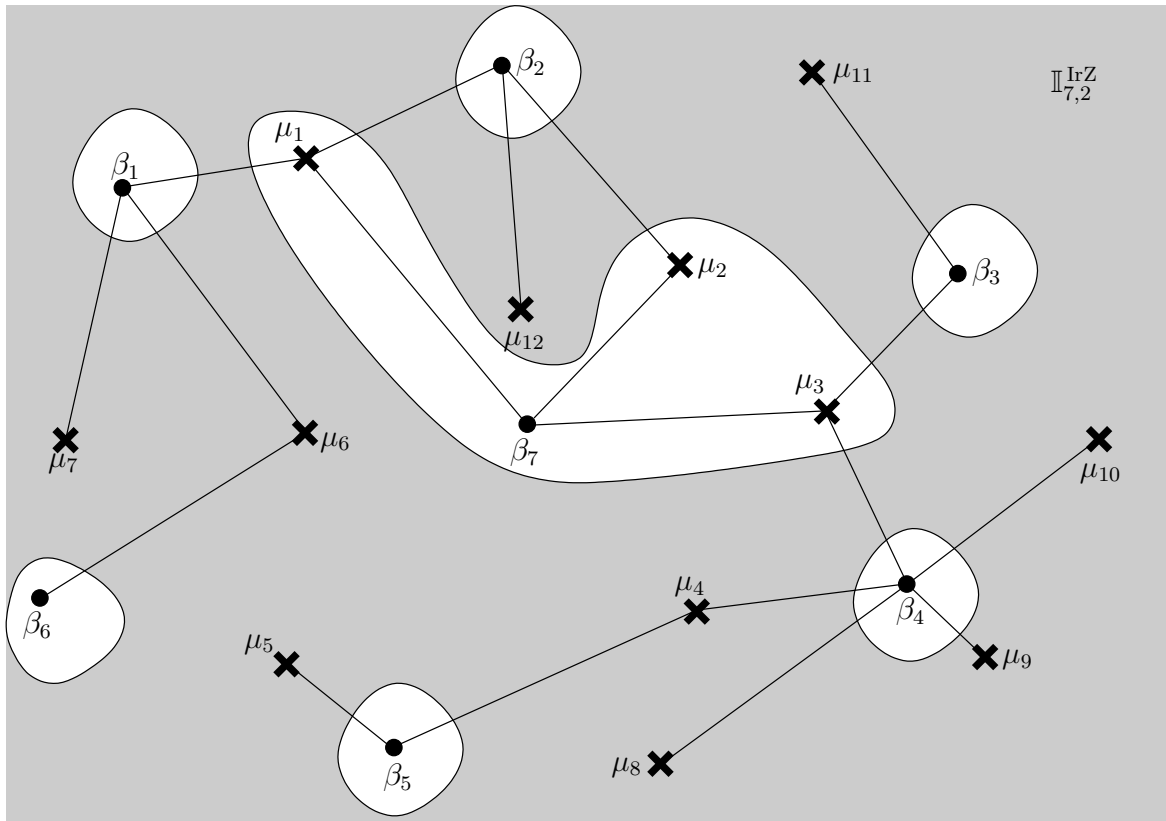


Bild 3.15. Veranschaulichen der MS-Mengen  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  nach (3.35)

geführt, weil es in den später in dieser Arbeit behandelten Mehroperator-Szenarien nicht nur auf die Funkfeldgewinne der Kanäle zwischen BSen und MSen, sondern auch auf Funkfeldgewinne der Kanäle zwischen unterschiedlichen BSen oder zwischen unterschiedlichen MSen ankommt; diese Funkfeldgewinne werden dann mit dem Superskript BB bzw. MM gekennzeichnet.

Im vorliegenden Unterabschnitt 3.5.2 werde die Aufwärtsstreckenverbindung  $V_{b,m}$  der MS  $\mu_m$  zu einer ihr zugeordneten BS  $\beta_b \in \mathbb{S}_m$  betrachtet. Zunächst werde SUD am Empfänger, d.h. der BS, vorausgesetzt, vgl. Abschnitt 2.2. Mit  $T_m$  und  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  ergibt sich die an der BS  $\beta_b$  von der MS  $\mu_m$  empfangene Nutzleistung zu

$$C_{b,m}^u = g_{b,m}^{\text{BM}} T_m, \quad \beta_b \in \mathbb{S}_m. \quad (3.38)$$

Die an der BS  $\beta_b$  ankommende, die betrachtete Verbindung  $V_{b,m}$  störende MAI-Leistung ist mit  $\mathbb{I}_m$  nach (3.32)

$$I_{b,m}^u = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_m\}} g_{b,\tilde{m}}^{\text{BM}} T_{\tilde{m}}. \quad (3.39)$$

Mit  $C_{b,m}^u$  nach (3.38),  $I_{b,m}^u$  nach (3.39) und der für alle BSen als gleich angenommenen

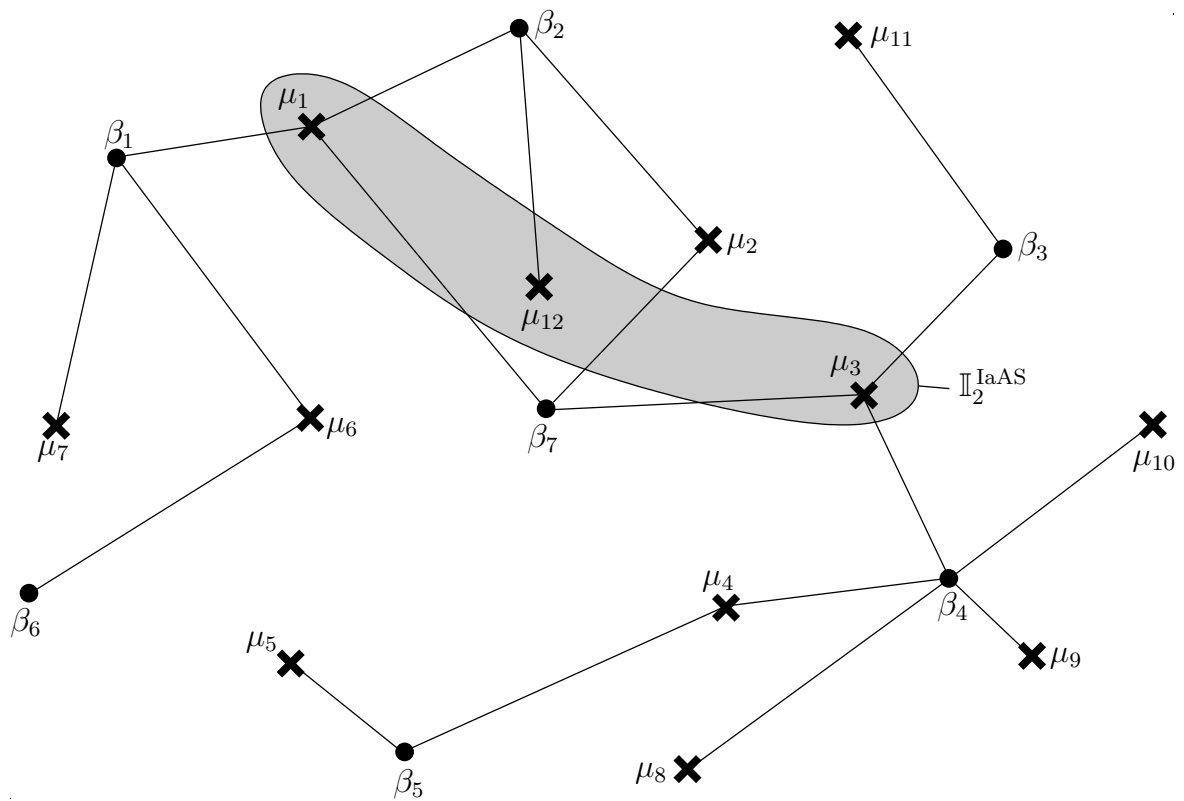


Bild 3.16. Veranschaulichen der MS-Mengen  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  nach (3.36)

Rauschleistung  $N$  ist das SNR der Verbindung  $V_{b,m}$  somit

$$\gamma_{b,m}^u = \frac{C_{b,m}^u}{I_{b,m}^u + N}. \quad (3.40)$$

Beim Auswerten des von der MS  $\mu_m$  kommenden Empfangssignals an der BS  $\beta_b$ , beispielsweise mit einem Rakeempfänger [Hul94, ASS98], ist die effektive Nutzleistung kleiner als die empfangene Nutzleistung  $C_{b,m}^u$  nach (3.38), weil ein Teil der empfangenen Nutzleistung als ISI-Leistung anzusehen ist. Diese ISI-Leistung müßte zum Gewinnen des effektiven oder Netto-SNR auf der zweiten Seite von (3.40) im Zähler abgezogen und im Nenner dazugaddiert werden. Diese Feinheit bleibt jedoch im folgendem außer Acht, d.h.  $\gamma_{b,m}^u$  nach (3.40) wird also als Netto-SNR angesehen.

Damit Makrodiversität Nutzen bringt, muß man die an den BSen  $\beta_b \in \mathbb{S}_m$  ankommenden gestörten Signale der MS  $\mu_m$  zusammenführen. Das optimale Verfahren einer solchen Zusammenführung ist das Maximum Ratio Combining (MRC) [SB93, BEGV02]. In diesem Falle ergibt sich mit  $\gamma_{b,m}^u$  nach (3.40) das für die MS  $\mu_m$  geltende Gesamt-SNR zu

$$\gamma_m^u = \sum_{\{b|\beta_b \in \mathbb{S}_m\}} \gamma_{b,m}^u. \quad (3.41)$$



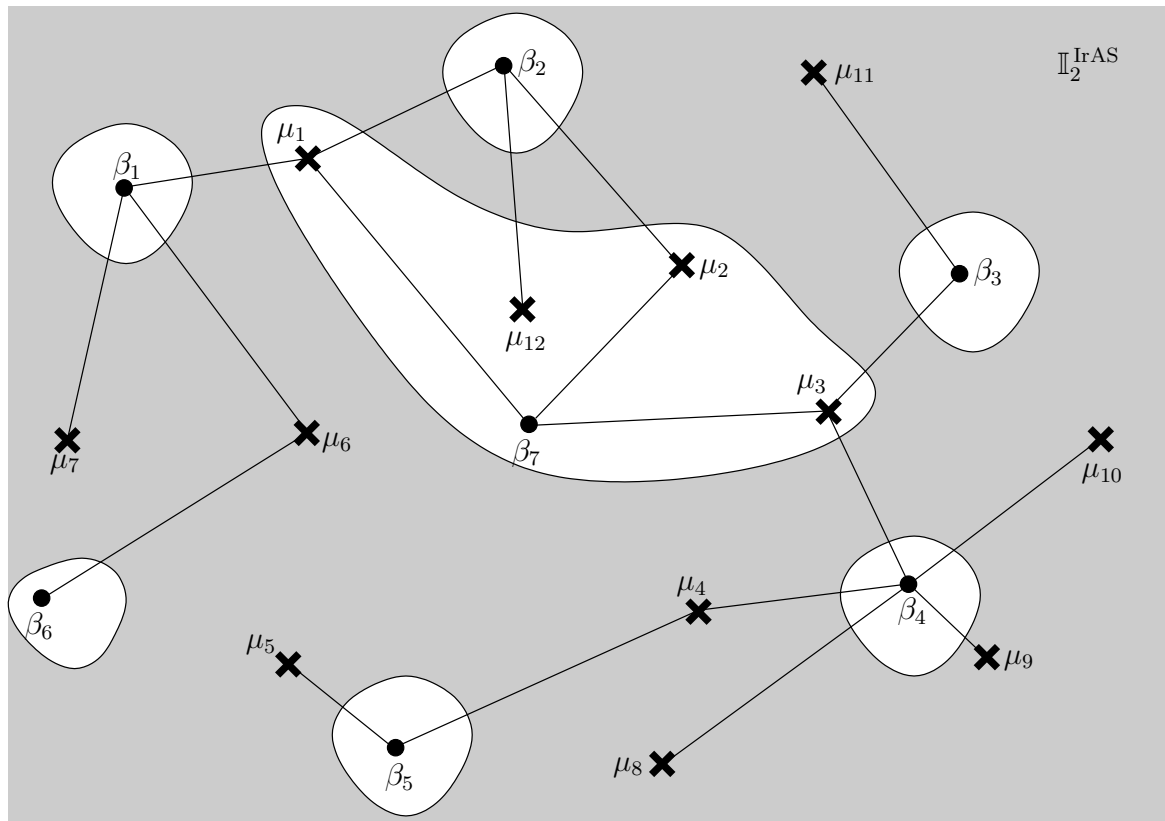


Bild 3.17. Veranschaulichen der MS-Mengen  $\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}}$  nach (3.37)

MRC erforderte allerdings erhebliche Ressourcen für die Datenübertragung von den BSen  $\beta_b \in \mathbb{S}_m$  zum Festnetz. Mit weniger Aufwand arbeitet das Selection Combining (SC) [WL97, SB93]. Bei diesem ist das für die MS  $\mu_m$  geltende Gesamt-SNR [SB93]

$$\gamma_m^u = \max_{\{b|\beta_b \in \mathbb{S}_m\}} \{\gamma_{b,m}^u\} \quad (3.42)$$

und damit geringer als im Falle MRC.

Wie in Abschnitt 2.2 bereits erwähnt, kann durch MUD-Verfahren MAI vermieden werden. Dabei können prinzipiell alle Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_m$  nach (3.32) berücksichtigt werden. Allerdings kann die Menge  $\mathbb{I}_m$  aller Interferer bei einem ausgedehnten Zellnetz sehr groß werden. Da die Komplexität der MUD überproportional mit der Menge der berücksichtigten Interferer wächst [Kle96], wird meist nur einen Teil der Interferer bei der MUD berücksichtigt [Kle96]. Ein sinnvoller Ansatz ist das Berücksichtigen aller Intrazell-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  bei der MUD, da

- diese üblicherweise aufgrund ihrer räumlichen Nähe zur betrachteten BS  $\beta_b$  eine hohe MAI verursachen, und

- die für die MUD benötigten Informationen über die eingesetzten CDMA-Codes der Interferer an der BS  $\beta_b$  für alle Intrazell-Interferer direkt ohne weitere Signalisierung verfügbar sind, und
- die Signale der Intrazell-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  an der BS  $\beta_b$  ohnehin detektiert werden müssen.

Zum Berücksichtigen von MUD-Verfahren zum Eliminieren von Intrazell-MAI wird im folgenden die von Interferern aus der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  nach (3.33) an der BS  $\beta_b$  ankommende Intrazell-MAI-Leistung

$$I_{b,m}^{\text{u,IaZ}} = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}\}} g_{b,\tilde{m}}^{\text{BM}} T_{\tilde{m}} \quad (3.43)$$

getrennt betrachtet von der von Interferern aus der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  nach (3.35) an der BS  $\beta_b$  ankommenden Interzell-MAI-Leistung

$$I_{b,m}^{\text{u,IrZ}} = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}\}} g_{b,\tilde{m}}^{\text{BM}} T_{\tilde{m}}. \quad (3.44)$$

Abhängig vom eingesetzten Detektionsverfahren wirkt an einer BS  $\beta_b$  für die Verbindung  $V_{b,m}$  ein Anteil  $\kappa I_{b,m}^{\text{u,IaZ}}$ ,  $0 \leq \kappa \leq 1$ , als MAI, so daß die gesamte die Verbindung  $V_{b,m}$  störende MAI

$$I_{b,m}^{\text{u}} = \kappa I_{b,m}^{\text{u,IaZ}} + I_{b,m}^{\text{u,IrZ}} \quad (3.45)$$

ist. Für SUD-Verfahren gilt dabei  $\kappa$  gleich eins, da die gesamte Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{u,IaZ}}$  als Störung wirkt. In diesem Fall beschreibt (3.45) genau die gleiche MAI wie (3.39). MUD-Verfahren können prinzipiell die Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{u,IaZ}}$  vollständig vermeiden, was in (3.45) durch  $\kappa$  gleich null beschrieben wird. Optimale MUD-Verfahren wie ML-Detektion haben jedoch, wie in Abschnitt 2.2 bereits gesagt, das Problem extrem hoher Komplexität [Ver98], während suboptimale Verfahren wie JD zwar die komplette Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{u,IaZ}}$  vermeiden können, aber eine Degradation des SNR verursachen [BW98]. Andere MUD-Verfahren wie sequentielle MAI-Eliminierung [Meu03] haben zwar nicht das Problem der SNR-Degradation, können aber die Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{u,IaZ}}$  nicht vollständig vermeiden, was durch einen Faktor  $0 < \kappa < 1$  beschrieben werden kann.

### 3.5.3 SNR in der Abwärtsstrecke

Die von der BS  $\beta_b$  für die MS  $\mu_m$  abgestrahlte Sendeleistung werde mit  $T_{b,m}$  bezeichnet. Es werde die Abwärtsstreckenverbindung  $V_{b,m}$  von einer BS  $\beta_b$  zu einer einzigen ihr zugeordneten MS  $\mu_m \in \mathbb{A}_b$  betrachtet. Dabei wird zunächst SUD am Empfänger, d.h. der MS

$\mu_m$ , vorausgesetzt, vgl. Abschnitt 2.2. Mit  $T_{b,m}$  und dem bereits in Unterabschnitt 3.5.2 eingeführten Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  ergibt sich die an der MS  $\mu_m$  von der BS  $\beta_b$  empfangene Nutzleistung zu

$$C_{b,m}^{\text{d}} = g_{b,m}^{\text{BM}} T_{b,m}, \quad \mu_m \in \mathbb{A}_b. \quad (3.46)$$

Die an der MS  $\mu_m$  ankommende, die Verbindung  $V_{b,m}$  störende MAI-Leistung ist die Summe aus der mit  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  nach (3.33) ausdrückbaren Intrazell-MAI-Leistung

$$I_{b,m}^{\text{d,IaZ}} = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}\}} g_{b,m}^{\text{BM}} T_{b,\tilde{m}} \quad (3.47)$$

und der mit  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  nach (3.35) ausdrückbaren Interzell-MAI-Leistung

$$I_{b,m}^{\text{d,IrZ}} = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}} \cup \{\mu_m\}\}} \sum_{\{\tilde{b} | \beta_{\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{\tilde{m}} \wedge \tilde{b} \neq b\}} g_{\tilde{b},m}^{\text{BM}} T_{\tilde{b},\tilde{m}}. \quad (3.48)$$

Die Signale, die zur Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$  nach (3.47) führen, entspringen alle an der BS  $\beta_b$ , und an dieser BS entspringt auch das in der Verbindung  $V_{b,m}$  für die MS  $\mu_m$  gesendete Nutzsignal. Man kann deshalb durch entsprechende Wahl der CDMA-Codes in der BS  $\beta_b$  dafür sorgen, daß die von der BS  $\beta_b$  gesendeten Signale für die MSen aus der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaZ}}$  Anteile enthalten, die zu dem von der BS  $\beta_b$  für die MS  $\mu_m$  gesendeten Signal orthogonal sind [3GP00a]. Dies führt dazu, daß die Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$  nach (3.47) nur noch mit einem Anteil  $\zeta I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$ ,  $0 < \zeta \leq 1$ , störend wirksam ist. Mit  $\zeta$ ,  $I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$  nach (3.47) und  $I_{b,m}^{\text{d,IrZ}}$  nach (3.48) ergibt sich schließlich die gesamte MAI-Leistung der Abwärtsstreckenverbindung  $V_{b,m}$  zu

$$I_{b,m}^{\text{d}} = \zeta I_{b,m}^{\text{d,IaZ}} + I_{b,m}^{\text{d,IrZ}}. \quad (3.49)$$

Mit  $I_{b,m}^{\text{d}}$  nach (3.49) und  $C_{b,m}^{\text{d}}$  nach (3.46) erhält man das SNR dieser Verbindung zu

$$\gamma_{b,m}^{\text{d}} = \frac{C_{b,m}^{\text{d}}}{I_{b,m}^{\text{d}} + N}. \quad (3.50)$$

Aus den SNRs  $\gamma_{b,m}^{\text{d}}$  nach (3.50) erhält man schließlich bei Anwenden von MRC das Gesamt-SNR der MS  $\mu_m$  zu

$$\gamma_m^{\text{d}} = \sum_{\{b | \beta_b \in \mathbb{S}_m\}} \gamma_{b,m}^{\text{d}}. \quad (3.51)$$

In der Abwärtsstrecke ist MRC mit geringerem Aufwand als in der Aufwärtsstrecke implementierbar, so daß hier die Alternative SC weniger interessant ist.

Ebenso wie in der Aufwärtsstrecke sind auch in der Abwärtsstrecke MUD-Verfahren einsetzbar. Die Vorteile von MUD- gegenüber SUD-Verfahren unterscheiden sich für Ab- und Aufwärtsstrecke signifikant:

- Während in der Aufwärtsstrecke alle Intrazell-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$ , die der BS  $\beta_b$  zugeordnet sind, bei der MUD üblicherweise berücksichtigt werden, ist es in der Abwärtsstrecke sinnvoll, die Signale, die an den BSen im Active Set  $\mathbb{S}_m$  der betrachteten MS  $\mu_m$  für die Intra-Active-Set-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  gesendet werden, bei der MUD zu berücksichtigen. Alle BSen im Active Set  $\mathbb{S}_m$  zeichnen sich durch hohen Funkfeldgewinn zur betrachteten MS  $\mu_m$  aus und verursachen dadurch besonders hohe MAI.
- An der MS  $\mu_m$  sind die für die MUD benötigten Informationen über die eingesetzten CDMA-Codes für die Intra-Active-Set-Interferer nicht direkt verfügbar, sondern müssen durch Signalisierung von den BSen im  $\mathbb{S}_m$  übertragen werden.
- Beim Verwenden von MUD in der Abwärtsstrecke werden die Signale aller berücksichtigten Intra-Active-Set-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  mit detektiert, obwohl die in diesen Signalen enthaltenen Informationen an der MS  $\mu_m$  nicht benötigt werden.

Um eine MUD unter Berücksichtigung aller Intra-Active-Set-Interferer aus der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$  nach (3.36) zu beschreiben, werde zunächst die auftretende MAI aufgeteilt in Intra-Active-Set-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaAS}}$ , die durch die MUD beeinflusst wird, und in Inter-Active-Set-MAI-Leistung  $I_m^{\text{d,IrAS}}$ , auf die die MUD keine Auswirkung hat. Ein Teil der Intra-Active-Set-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaAS}}$ , nämlich die Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$ , kann durch die Wahl orthogonaler CDMA-Codes vermindert werden, vgl. (3.49), beschrieben durch den Faktor  $\zeta$ . Der verbleibende Teil der Intra-Active-Set-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaAS}}$  stammt von den Interferern, die nicht in der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}}$  der Intrazell-Interferer sind, d.h die der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}}$  der Interzell-Interferer angehören, und die gleichzeitig auch in der Menge  $\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaAS}}$  der Intra-Active-Set-Interferer sind. Mit der Intrazell-MAI-Leistung  $I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$  nach (3.47) ist somit die Intra-Active-Set-MAI-Leistung

$$I_{b,m}^{\text{d,IaAS}} = \zeta I_{b,m}^{\text{d,IaZ}} + \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in ((\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}} \cap \mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}) \cup \{\mu_m\})\}} \sum_{\{\tilde{b} | \beta_{\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{\tilde{m}} \wedge \tilde{b} \neq b\}} g_{b,m}^{\text{BM}} T_{\tilde{b},\tilde{m}} \quad (3.52)$$

und die Inter-Active-Set-MAI-Leistung ist die MAI-Leistung von allen Interferern aus der Menge  $\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}}$

$$I_m^{\text{d,IrAS}} = \sum_{\{\tilde{m} | \mu_{\tilde{m}} \in \mathbb{I}_m^{\text{IrAS}}\}} \sum_{\{\tilde{b} | \beta_{\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{\tilde{m}}\}} g_{b,m}^{\text{BM}} T_{\tilde{b},\tilde{m}}. \quad (3.53)$$

Mit  $I_m^{\text{d,IaAS}}$  nach (3.52) und  $I_m^{\text{d,IrAS}}$  nach (3.53) und mit dem Faktor  $\kappa$  ist die vom eingesetzten Detektionsverfahren abhängige gesamte an einer MS  $\mu_m$  als Störung wirkende MAI

$$I_{b,m}^{\text{d}} = \kappa I_m^{\text{d,IaAS}} + I_m^{\text{d,IrAS}}. \quad (3.54)$$

Der Faktor  $\kappa$  von eins beschreibt, wie in Unterabschnitt 3.5.2 eingeführt, die SUD, bei der (3.54) äquivalent ist zu (3.49).  $\kappa$  gleich null ist der Fall optimaler MUD, bei der die Intra-Active-Set-MAI vollständig eliminiert werden kann.

### 3.5.4 Funkfeldgewinn zwischen BS und MS

In Abschnitt 3.3 werden Modelle zum Bestimmen von Funkfelddämpfungen  $A$  für Makrozell-Szenarien bzw. für Mikrozell-Szenarien eingeführt. Aus den dort gewonnenen Funkfelddämpfungen  $A$  nach (3.5) bzw. nach (3.14) kann der Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  zwischen einer BS  $\beta_b$  und einer MS  $\mu_m$  ermittelt werden. Der Reziprokwert einer Funkfelddämpfung  $A$  zwischen einer MS  $\mu_m$  und einer BS  $\beta_b$  ist der Funkfeldgewinn

$$g_{b,m}^{\text{BM}} = \frac{1}{10^{\frac{A/\text{dB}}{10}}}. \quad (3.55)$$

Man beachte, daß für die Berechnungen in der vorliegenden Arbeit alle Größen in linearer Skala vorliegen müssen, sofern nicht explizit durch die Angabe von „/ dB“ darauf hingewiesen wird, daß die Größe in logarithmischer Skala vorliegen muß. Während die Berechnungen in Abschnitt 3.3 wie gekennzeichnet meist auf logarithmischen Größen beruhen, werden in den Abschnitten 3.5 bis 3.9 lineare Größen eingesetzt.

Der Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  gilt gleichermaßen für Auf- und Abwärtsstrecke, da die vorgestellten Modelle der Funkfelddämpfung  $A$ , wie in Abschnitt 3.3 erläutert, nur die Eigenschaften der Übertragungskanäle basierend auf dem langsamen Schwund beschreiben, und über den schnellen Schwund gemittelt sind. Dies gelte auch, wenn ein FDD-Mobilfunksystem betrachtet wird, bei dem der Mobilfunkkanal in Auf- und Abwärtsstrecke wegen der unterschiedlichen zugehörigen Frequenzbereiche nicht gleich ist.

### 3.5.5 Kriterien zum Zuordnung von MSen zu BSen

In Unterabschnitt 3.5.1 wird der Begriff des Active Set  $S_m$  eingeführt, durch das die Zuordnung einer MS zu BSen beschrieben wird. Dabei kann, wie bereits in Abschnitt 2.2 gesagt, die als Makrodiversität bezeichnete Mehrfachzuweisung MS→BS auftreten, durch die v.a. nachteilige Effekte durch Schwankungen des Funkfeldgewinns aufgrund schnellen Schwundes vermindert werden können, da mehrere MS→BS-Verbindungen eine höhere Diversität bieten als nur eine. Im vorliegenden Unterabschnitt 3.5.5 werden Kriterien betrachtet, nach denen eine solche Mehrfachzuordnung durchgeführt werden kann. Wie bereits in Unterabschnitt 3.5.1 gesagt, werden dabei möglichst geringe Störungen zwischen den Verbindungen des Netzes angestrebt.

Eine plausible Vorgehensweise für das Zuordnen bestünde darin, jede MS jeweils den geographisch nächstgelegenen BSen zuzuordnen. Da der Funkfeldgewinn jedoch, wie in Abschnitt 3.3 erläutert, aufgrund der Eigenschaften des Mobilfunkkanals nicht monoton mit

der geographischen Entfernung zwischen MS und BS abnimmt, könnten bei einer derartigen distanzbasierten Zuordnung gewisse MSen solchen BSen zugeordnet werden, zu denen trotz räumlicher Nähe sehr kleine Funkfeldgewinne bestehen; dies müßte dann ungünstigerweise durch exzessiv hohe Sendeleistungen kompensiert werden. Eine hinsichtlich der erforderlichen Sendeleistungen günstigere Zuordnung ergibt sich, wenn eine MS  $\mu_m$  denjenigen BSen  $\beta_b$  aus  $\mathbb{B}$  nach (3.24) zugewiesen wird, zu denen der Funkkanal möglichst großen Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  hat [Ste96]. Zur Wahl des Active Sets  $\mathbb{S}_m$  der MS  $\mu_m$  geht man in diesem Fall also folgendermaßen vor:

- Es wird festgestellt, zu welcher BS der Funkfeldgewinn der MS am größten ist, wobei dieser Größtwert mit

$$g_m^{\text{BM,max}} = \max_{\{b|\beta_b \in \mathbb{B}\}} (g_{b,m}^{\text{BM}}) \quad (3.56)$$

bezeichnet wird. Die betreffende BS  $\beta_b$  bildet ein Element des Active Set  $\mathbb{S}_m$ .

- Mit einem Faktor

$$\delta_{\text{th}} > 1 \quad (3.57)$$

werden nun alle BSen aus  $\mathbb{B}$  nach (3.24) ermittelt, zu denen die für die MS  $\mu_m$  gültigen Funkfeldgewinne die Bedingung

$$g_{b,m}^{\text{BM}} \cdot \delta_{\text{th}} > g_m^{\text{BM,max}} \quad (3.58)$$

erfüllt. Alle diese BSen bilden die restlichen Elemente des Active Set  $\mathbb{S}_m$ .

Das für die MS  $\mu_m$  geltende Active Set  $\mathbb{S}_m$  ergibt sich demnach gemäß

$$\mathbb{S}_m = \{ \beta_b \mid g_{b,m}^{\text{BM}} \cdot \delta_{\text{th}} > g_m^{\text{BM,max}} \}. \quad (3.59)$$

$\delta_{\text{th}}$  wird in der Literatur auch als SHO-Schwellwert bezeichnet [BHC00, WL97, HT00]. Aufgrund der Bewegung der MSen ist das Active Set  $\mathbb{S}_m$  einer MS  $\mu_m$  zeitvariant. Grundsätzlich könnte man für jede MS einen anderen Wert verwenden. Beispielsweise sind im UMTS-Standard WCDMA für das Hinzufügen, Entfernen und — bei begrenzter Zahl von BSen im Active Set  $\mathbb{S}_m$  — auch für das Ersetzen von BSen im Active Set  $\mathbb{S}_m$  unterschiedliche Werte  $\delta_{\text{th}}$  vorgesehen. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch vereinfachend im ganzen Mobilfunknetz nur ein einziger, einmal festgelegter Wert  $\delta_{\text{th}}$  verwendet.

Für den Fall  $|\mathbb{S}_m|$  gleich 1 entartet die vorgestellte Zuordnung durch das Active Set  $\mathbb{S}_m$  zu der Zuordnung nach [Ste96] einer jeden MS zu genau einer BS. Da das Ändern der Zuordnung einer MS zu einer BS, d.h. ein Handover, vgl. Abschnitt 1.6, in realen Mobilfunksystemen einen gewissen Signalisierungsaufwand und damit eine gewisse Zeit benötigt, kann bei dem konventionellen Ansatz der Zuordnung jeder MS zu genau einer BS nach [Ste96] nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden, daß die MS der BS  $\beta_b$  zugeordnet ist, zu der der Funkkanal den größten Funkfeldgewinn  $g_m^{\text{BM,max}}$  nach (3.56) hat. Somit dient die Makrodiversität neben dem Vermindern nachteiliger Effekte des schnellen Schwundes auch dazu, zu jedem Zeitpunkt die Zuordnung der MS zur optimalen BS zu gewährleisten.

## 3.6 Mathematisches Modell zum Ermitteln des SNRs im Zwei-Operator-Fall

### 3.6.1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Abschnitt 3.6 soll die in Abschnitt 3.5 vorgestellte Verfahrensweise zum Berechnen des SNRs erweitert werden, um zusätzlich zur Gleichkanal-MAI auch Anderkanal-MAI bei der Simulation des SNRs einbeziehen zu können. Dabei wird ausschließlich der Fall betrachtet, bei dem die Anderkanal-MAI von einem anderen Operator verursacht wird. Im 3G-Standard UMTS ist vorgesehen, daß für das Untersuchen der Anderkanal-MAI nur ein direkt benachbarter Anderkanal eines anderen Operators berücksichtigt wird [3GP02]. Dieser direkt benachbarte Anderkanal genügt zum Erfassen des Großteils der Interoperator-MAI, da zum einen davon ausgegangen wird, daß jeder Operator mindestens zwei Frequenzkanäle zur Verfügung hat, und zum anderen die Anderkanal-MAI aus einem nicht direkt benachbarten Frequenzkanal wesentlich stärker durch die Filterdämpfung unterdrückt wird als die Anderkanal-MAI aus dem direkt benachbarten Frequenzkanal, vgl. Abschnitt 3.4.

Um die Darstellung möglichst einfach zu halten, wird im folgenden ein Szenario mit nur zwei Operatoren betrachtet. Zum Unterscheiden zweier Operatoren A und B dient der Index A bzw. B, der den bisher verwendeten Indizes vorangestellt wird. Ausschließlich für den Funkfeldgewinn  $g_{A,B,b,m}^{\text{BM}}$  werden zwei solcher Indizes A bzw. B verwendet, da nur beim Funkfeldgewinn die betrachtete BS  $\beta_{A,b}$  und die betrachtete MS  $\mu_{B,m}$  unterschiedlichen Operatoren A und B angehören können. Der erste Index in  $g_{A,B,b,m}^{\text{BM}}$  beschreibt den Operator, dem die BS angehört, der zweite Index den Operator, dem die MS angehört. Bei allen anderen Bezeichnern genügt die Angabe eines einzigen Indexes für den Operator, dem die zugehörige Verbindung  $V_{A,b,m}$  gehört. Die für den Zwei-Operator-Fall notwendige Erweiterung der in Abschnitt 3.5 eingeführten Bezeichner um die Indizes A bzw. B zeigt Tabelle 3.4. Für den Operator A wird das SNR bestimmt, während die MSen und BSen des Operators B in der beschriebenen Notation nur die Interoperator-MAI erzeugen. Daher kann ein Teil der Formelzeichen in Tabelle 3.4 eindeutig dem Operator A zugeordnet werden. Bezeichner, die für beide Operatoren gelten, werden mit dem Index  $\Omega \in \{A, B\}$  gekennzeichnet.

Tabelle 3.4: Für den Ein-Operator-Fall eingeführte Formelzeichen zum Berechnen von Nutz- und MAI-Leistungen und deren Erweiterung für den Zwei-Operator-Fall

Bezeichner	Kommentar	Glg.
$\mu_m \rightarrow \mu_{\Omega,m}$	$m$ -te MS von Operator $\Omega$	
$\beta_b \rightarrow \beta_{\Omega,b}$	$b$ -te BS von Operator $\Omega$	

Tabelle 3.4: Für den Ein-Operator-Fall eingeführte Formelzeichen zum Berechnen von Nutz- und MAI-Leistungen und deren Erweiterung für den Zwei-Operator-Fall

Bezeichner	Kommentar	Glg.
$V_{b,m} \rightarrow V_{\Omega,b,m}$	Verbindung zwischen BS $\beta_{\Omega,b}$ und MS $\mu_{\Omega,m}$	
$\mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}_{\Omega}$	Menge der BSen von Operator $\Omega$	(3.24)
$\mathbb{M} \rightarrow \mathbb{M}_{\Omega}$	Menge der MSen von Operator $\Omega$	(3.25)
$\mathbb{S}_m \rightarrow \mathbb{S}_{\Omega,m}$	Active Set der MS $\mu_{\Omega,m}$ von Operator $\Omega$	(3.29)
$\mathbb{I}_m \rightarrow \mathbb{I}_{A,m}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$	(3.32)
$\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IaZ}} \rightarrow \mathbb{I}_{A,b,m}^{\text{IaZ}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Intrazell-MAI für die Verbindung $V_{A,b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$	(3.33)
$\mathbb{I}_{b,m}^{\text{IrZ}} \rightarrow \mathbb{I}_{A,b,m}^{\text{IrZ}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Interzell-MAI für die Verbindung $V_{A,b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$	(3.35)
$\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}} \rightarrow \mathbb{I}_{A,m}^{\text{IaAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Intra-Active-Set-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$	(3.36)
$\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}} \rightarrow \mathbb{I}_{A,m}^{\text{IrAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Inter-Active-Set-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$	(3.37)
$g_{b,m}^{\text{BM}} \rightarrow g_{A,\Omega,b,m}^{\text{BM}}$	Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_{\Omega,m}$ und BS $\beta_{A,b}$	(3.55)
$g_m^{\text{BM,max}} \rightarrow g_{A,m}^{\text{BM,max}}$	maximaler Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_{A,m}$ und BS $\beta_{A,b}$	(3.56)
$C_{b,m}^u \rightarrow C_{A,b,m}^u$	Nutzleistung empfangen an BS $\beta_{A,b}$ von MS $\mu_{A,m}$	(3.38)
$T_m \rightarrow T_{\Omega,m}$	Sendeleistung der MS $\mu_{\Omega,m}$	
$I_{b,m}^u \rightarrow I_{A,b,m}^u$	Intraoperator-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke	(3.45)
$I_{b,m}^{u,\text{IaZ}} \rightarrow I_{A,b,m}^{u,\text{IaZ}}$	Intraoperator-Intrazell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke	(3.43)
$I_{b,m}^{u,\text{IrZ}} \rightarrow I_{A,b,m}^{u,\text{IrZ}}$	Intraoperator-Interzell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke	(3.44)
$C_{b,m}^d \rightarrow C_{A,b,m}^d$	Nutzleistung für MS $\mu_{A,m}$ , aufgebracht von BS $\beta_{A,b}$	(3.46)
$T_{b,m} \rightarrow T_{\Omega,b,m}$	Sendeleistung für MS $\mu_{\Omega,m}$ , aufgebracht von BS $\beta_{\Omega,b}$	
$I_{b,m}^d \rightarrow I_{A,b,m}^d$	Intraoperator-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Abwärtsstrecke	(3.54)
$I_{b,m}^{d,\text{IaAS}} \rightarrow I_{A,b,m}^{d,\text{IaAS}}$	Intraoperator-Intra-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Abwärtsstrecke	(3.52)
$I_m^{d,\text{IrAS}} \rightarrow I_{A,m}^{d,\text{IrAS}}$	Intraoperator-Inter-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die MS $\mu_{A,m}$ , Abwärtsstrecke	(3.53)



Die Operatoren haben disjunkte Mengen

$$\mathbb{B}_A \cap \mathbb{B}_B = \emptyset \quad (3.60)$$

von BSen sowie

$$\mathbb{M}_A \cap \mathbb{M}_B = \emptyset. \quad (3.61)$$

von MSen. Wird ein TDD-basiertes Mobilfunksystem untersucht, so werden die nachfolgenden Betrachtungen ohne Beschränkung der Allgemeinheit jeweils für einen einzigen Zeitschlitz der Referenz-MS  $\mu_{A,m} \in \mathbb{M}_A$  durchgeführt, in dem alle betrachteten MSen  $\mu_{\Omega,\tilde{m}} \in \mathbb{M}_\Omega$ ,  $\Omega \in \{A, B\}$ , aktiv sind.

Das im folgenden vorgestellte mathematische Modell zum Beschreiben des SNRs im Zwei-Operator-Fall beinhaltet die Modellierung einer nicht perfekten Synchronisation der Umschaltzeitpunkte, vgl. Abschnitt 2.3, in den TDD-Mobilfunknetzen zweier Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$ . Dabei wird angenommen, daß die Umschaltzeitpunkte innerhalb des Mobilfunknetzes eines jeden der betrachteten Operatoren synchron sind, d.h. daß in allen Verbindungen  $V_{\Omega,b,m}$ ,  $\Omega \in \{A, B\}$  eines Operators Auf- und Abwärtsstrecke jeweils gleichzeitig sind. Die Umschaltzeitpunkte der Verbindungen  $V_{B,b,m}$  des Operators B sind um eine Zeitdauer  $t_{\text{off}}$  später als die des Operators A. Damit kann der Anteil von Gleich- zu Anderstrecken-MAI an der Interoperator-MAI durch den Synchronisationsfaktor  $\alpha_S$  nach (2.2) beschrieben werden.

Bei der Anderstrecken-MAI sind Funkfeldgewinne zwischen Geräten gleicher Art, d.h. zwischen BSen bzw. zwischen MSen, zu berücksichtigen. Im folgenden werden die Bezeichnungen  $g_{A,B,b,\tilde{b}}^{\text{BB}}$  bzw.  $g_{A,B,m,\tilde{m}}^{\text{MM}}$  zum Beschreiben dieser Funkfeldgewinne verwendet. Da Anderstrecken-MAI in der vorliegenden Arbeit nur als Interoperator-MAI untersucht wird, gehören die betrachteten Geräte  $\beta_{A,b}$  und  $\beta_{B,\tilde{b}}$  bzw.  $\mu_{A,m}$  und  $\mu_{B,\tilde{m}}$  unterschiedlichen Operatoren an. Eine eindeutige Notation ist also gewährleistet unter der Bedingung, daß der erste und der dritte Index gemeinsam die Senke und der zweite und vierte Index gemeinsam die Quelle der MAI bezeichnen.

### 3.6.2 SNR in der Aufwärtsstrecke

Im vorliegenden Unterabschnitt 3.6.2 wird genau wie im Unterabschnitt 3.5.2 die Aufwärtsstreckenverbindung  $V_{A,b,m}$  der MS  $\mu_{A,m}$  zu einer ihr zugeordneten BS  $\beta_{A,b} \in \mathbb{S}_{A,m}$  betrachtet, wobei statt des Ein-Operator-Falls nun der Zwei-Operator-Fall beschrieben wird. Das Berechnen der Nutzleistung  $C_{A,b,m}^u$  und der Intraoperator-MAI-Leistung  $I_{A,b,m}^u$  erfolgt wie in Unterabschnitt 3.5.2 beschrieben, und die Abbildung der eingesetzten Bezeichner vom

Ein- auf den Zwei-Operator-Fall erfolgt nach Tabelle 3.4. Das Berechnen der Interoperator-MAI-Leistung wird im folgenden erläutert. Die Dämpfung der Interoperator-MAI-Leistung aufgrund ihrer Entstehung im Anderkanal wird durch das  $\delta_{\text{ACIR}}$  nach (3.19) erfaßt.

Mit den Sendeleistungen  $T_{B,\tilde{m}}$  der MSen  $\mu_{B,\tilde{m}}$  des Operators B und den Funkfeldgewinnen  $g_{A,B,b,\tilde{m}}^{\text{BM}}$  ergibt sich die Interoperator-Gleichstrecken-MAI-Leistung an der BS  $\beta_{A,b}$  zu

$$I_{A,b}^{\text{u,IrO,GS}} = \frac{1}{\delta_{\text{ACIR}}} \sum_{\{\tilde{m}=1\dots|\mathbb{M}_B|\}} g_{A,B,b,\tilde{m}}^{\text{BM}} T_{B,\tilde{m}}. \quad (3.62)$$

Wird der in Unterabschnitt 3.6.1 beschriebene Fall nicht synchroner Zeitschlitze für Auf- und Abwärtsstreckenübertragung der Verbindungen zweier Operatoren mit TDD betrachtet, so kann Anderstrecken-MAI auftreten. Mit den Sendeleistungen  $T_{B,\tilde{b},\tilde{m}}$  von BSen  $\beta_{B,\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{B,\tilde{m}}$  für MSen  $\mu_{B,\tilde{m}}$  des Operators B in der Abwärtsstrecke und den Funkfeldgewinnen  $g_{A,B,b,\tilde{b}}^{\text{BB}}$  ist die an der  $\beta_{A,b}$  ankommende Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung

$$I_{A,b}^{\text{u,IrO,AS}} = \frac{1}{\delta_{\text{ACIR}}} \sum_{\{\tilde{m}=1\dots|\mathbb{M}_B|\}} \sum_{\{\tilde{b}|\beta_{B,\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{B,\tilde{m}}\}} g_{A,B,b,\tilde{b}}^{\text{BB}} T_{B,\tilde{b},\tilde{m}}. \quad (3.63)$$

Sind die Zeitschlitze der Verbindungen verschiedener Operatoren zeitlich gegeneinander um  $0 < t_{\text{off}} < t_{\text{slot}}$  gegeneinander versetzt, vgl. Bild 2.1, so tritt sowohl Interoperator-Gleichstrecken-MAI als auch Interoperator-Anderstrecken-MAI auf. Die über einen Zeitschlitz gemittelte Interoperator-MAI-Leistung ist mit dem Synchronisationsfaktor  $\alpha_S$  nach (2.2)

$$I_{A,b}^{\text{u,IrO}} = (1 - \alpha_S) I_{A,b}^{\text{u,IrO,GS}} + \alpha_S I_{A,b}^{\text{u,IrO,AS}} \quad (3.64)$$

Für  $\alpha_S$  gleich null tritt nur Interoperator-Gleichstrecken-MAI auf, für  $\alpha_S$  gleich eins nur Interoperator-Anderstrecken-MAI. Ein FDD-Mobilfunksystem kann mit (3.64) beschrieben werden, indem  $\alpha_S$  zu null gesetzt wird, da bei FDD-Mobilfunksystemen Anderstrecken-MAI durch hohe Filterdämpfung zwischen den Frequenzkanälen der Auf- und Abwärtsstreckenverbindungen sehr gut unterdrückt werden kann, wie in Abschnitt 1.2 bereits gesagt.

Mit der Nutzleistung  $C_{A,b,m}^{\text{u}}$  nach Tabelle 3.4, der Intraoperator-MAI-Leistung  $I_{A,b,m}^{\text{u}}$  nach Tabelle 3.4 sowie der Interoperator-MAI-Leistung  $I_{A,b}^{\text{u,IrO}}$  nach (3.64) und der Leistung  $N$  des thermischen Rauschens ergibt sich das SNR für die MS  $\mu_{A,m}$  an der BS  $\beta_{A,b}$  zu

$$\gamma_{A,b,m}^{\text{u}} = \frac{C_{A,b,m}^{\text{u}}}{I_{A,b,m}^{\text{u}} + I_{A,b}^{\text{u,IrO}} + N}. \quad (3.65)$$

Die SNRs  $\gamma_{A,b,m}^{\text{u}}$  werden an allen BSen  $\beta_{A,b}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{A,m}$  für eine jede MS ermittelt. Beim SC, vgl. Unterabschnitt 3.5.2, ist mit den SNRs  $\gamma_{A,b,m}^{\text{u}}$  nach (3.65) der einzelnen Verbindungen  $V_{A,b,m}$  das Gesamt-SNR

$$\gamma_{A,m}^{\text{u}} = \max_{\{b|\beta_{A,b} \in \mathbb{S}_{A,m}\}} \{\gamma_{A,b,m}^{\text{u}}\}. \quad (3.66)$$

### 3.6.3 SNR in der Abwärtsstrecke

Im vorliegenden Unterabschnitt 3.6.3 wird die Notation zum Beschreiben des SNRs einer MS  $\mu_{A,m}$  in der Abwärtsstrecke aus Unterabschnitt 3.5.3 erweitert, um auch die im Zwei-Operator-Fall auftretende Interoperator-MAI zu erfassen. Dazu werden zunächst anhand eines beispielhaften Szenarios nach Bild 3.18 die möglichen Arten von Interoperator-MAI veranschaulicht. In diesem Bild werden zwei BSen und drei MSen des Operators A in der Abwärtsstrecke betrachtet, angedeutet durch gerichtete Funktsignale von BS zu MS. Für einen zweiten Operator B wird eine BS  $\beta_{B,1}$  gezeigt, die eine Übertragung in Abwärtsstrecke zur MS  $\mu_{B,2}$  hat und somit Interoperator-Gleichstrecken-MAI für die MSen des Operators A verursacht. Weiterhin wird die MS  $\mu_{B,1}$  von Operator B gezeigt, die in der Aufwärtsstrecke aktiv ist und somit Interoperator-Anderstrecken-MAI für die MSen des Operators A verursacht. Man beachte jedoch, daß das Bild 3.18 keinen Schnappschuß eines Szenarios zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_0$  darstellt, sondern lediglich die im vorliegenden Unterabschnitt 3.6.3 berechneten Arten von Interoperator-MAI visualisieren soll. In der vorliegenden Arbeit wird eine gleichzeitige Übertragung in Auf- und Abwärtsstrecke von Teilnehmerverbindungen ein- und desselben Operators nicht modelliert.

Das Berechnen der Nutzleistung  $C_{A,b,m}^d$  und der Intraoperator-MAI-Leistung  $I_{A,b,m}^d$  erfolgt wie in Unterabschnitt 3.5.3 beschrieben; die Abbildung der eingesetzten Bezeichner vom Ein- auf den Zwei-Operator-Fall erfolgt nach Tabelle 3.4. Das Berechnen der Interoperator-MAI-Leistung wird im folgenden erläutert. Die Dämpfung der Interoperator-MAI-Leistung aufgrund ihrer Entstehung im Anderkanal wird durch das  $\delta_{\text{ACIR}}$  nach (3.19) beschrieben.

Mit den Sendeleistungen  $T_{B,\tilde{b},\tilde{m}}$  der BSen  $\beta_{B,\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{B,\tilde{m}}$  für MSen  $\mu_{B,\tilde{m}}$  von Operator B und den Funkfeldgewinnen  $g_{B,A,\tilde{b},m}^{\text{BM}}$  ergibt sich die Interoperator-Gleichstrecken-MAI-Leistung an der MS  $\mu_{A,m}$  zu

$$I_{A,m}^{\text{d,IrO,GS}} = \frac{1}{\delta_{\text{ACIR}}} \sum_{\{\tilde{m}=1..|\mathbb{M}_B|\}} \sum_{\{\tilde{b}|\beta_{B,\tilde{b}} \in \mathbb{S}_{B,\tilde{m}}\}} g_{B,A,\tilde{b},m}^{\text{BM}} T_{B,\tilde{b},\tilde{m}}. \quad (3.67)$$

Wird der in Unterabschnitt 3.6.1 beschriebene Fall nicht synchroner Zeitschlitze für Auf- und Abwärtsstreckenübertragung der Verbindungen zweier Operatoren mit TDD-Zugriffsverfahren betrachtet, so kann Anderstrecken-MAI auftreten. Mit den Sendeleistungen  $T_{B,\tilde{m}}$  von MSen  $\mu_{B,\tilde{m}}$  der Operators B in der Aufwärtsstrecke und den Funkfeldgewinnen  $g_{A,B,m,\tilde{m}}^{\text{MM}}$  ist die an der  $\mu_{A,m}$  ankommende Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung

$$I_{A,m}^{\text{d,IrO,AS}} = \frac{1}{\delta_{\text{ACIR}}} \sum_{\{\tilde{m}=1..|\mathbb{M}_B|\}} g_{A,B,m,\tilde{m}}^{\text{MM}} T_{B,\tilde{m}}. \quad (3.68)$$

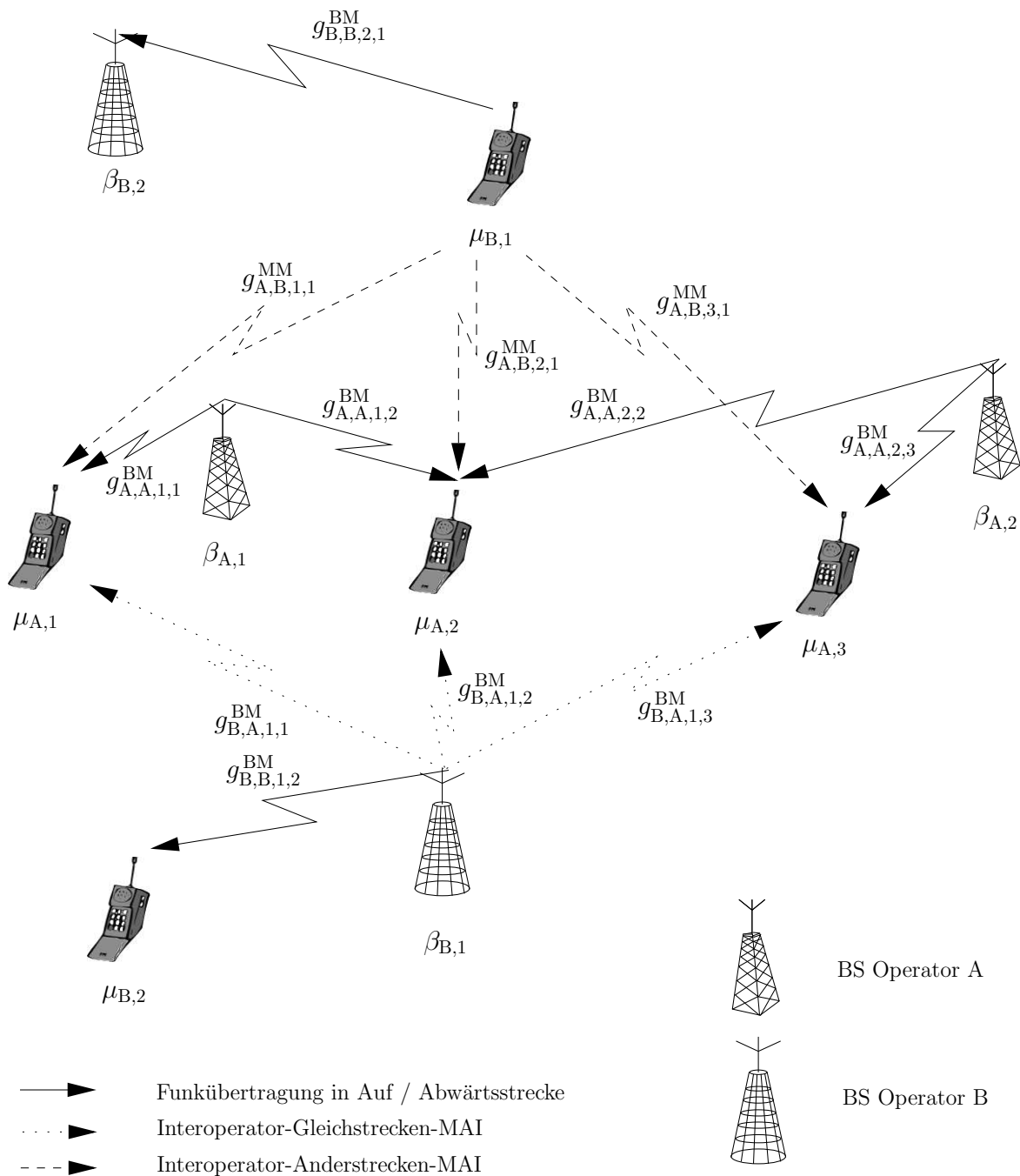


Bild 3.18. Beispielhaftes Szenario zum Veranschaulichen der auftretenden MAI-Arten für die Abwärtsstrecke im Zwei-Operator-Fall

Sind die Zeitschlitz der Verbindungen verschiedener Operatoren zeitlich gegeneinander um  $0 < t_{\text{off}} < t_{\text{slot}}$  gegeneinander versetzt, vgl. Bild 2.1, so tritt sowohl Interoperator-Gleichstrecken-MAI als auch Interoperator-Anderstrecken-MAI auf. Die über einen Zeitschlitz gemittelte Interoperator-MAI-Leistung ist mit dem Synchronisationsfaktor  $\alpha_S$  nach

(2.2)

$$I_{A,m}^{\text{d,IrO}} = (1 - \alpha_S) I_{A,m}^{\text{d,IrO,GS}} + \alpha_S I_{A,m}^{\text{d,IrO,AS}}. \quad (3.69)$$

Wie in Unterabschnitt 3.6.2 erläutert, tritt für  $\alpha_S$  gleich null nur Interoperator-Gleichstrecken-MAI auf, für  $\alpha_S$  gleich eins nur Interoperator-Anderstrecken-MAI. Ein FDD-Mobilfunksystem kann mit (3.69) beschrieben werden, indem  $\alpha_S$  zu null gesetzt wird.

Mit der Nutzleistung  $C_{A,b,m}^{\text{d}}$  nach Tabelle 3.4, der Intraoperator-MAI-Leistung  $I_{A,b,m}^{\text{d}}$  nach Tabelle 3.4 sowie der Interoperator-MAI-Leistung  $I_{A,m}^{\text{d,IrO}}$  nach (3.69) und der Leistung  $N$  des thermischen Rauschens ergibt sich das SNR an der MS  $\mu_{A,m}$ , das auf die von der BS  $\beta_{A,b}$  gesendete Nutzleistung zurückgeht, zu

$$\gamma_{A,b,m}^{\text{d}} = \frac{C_{A,b,m}^{\text{d}}}{I_{A,b,m}^{\text{d}} + I_{A,m}^{\text{d,IrO}} + N}. \quad (3.70)$$

Werden die im Fall von SHO von verschiedenen BSen  $\beta_{A,b}, \beta_{A,b} \in \mathbb{S}_{A,m}$  für eine MS  $\mu_{A,m}$  ausgesendeten Teilnehmersignale durch MRC kombiniert, vgl. Unterabschnitt 3.5.3, so kann aus den SNRs  $\gamma_{A,b,m}^{\text{d}}$  der einzelnen von den BSen  $\beta_{A,b}$  ausgesendeten Teilnehmersignalen das Gesamt-SNR der MS  $\mu_{A,m}$

$$\gamma_{A,m}^{\text{d}} = \sum_{\{b|\beta_{A,b} \in \mathbb{S}_{A,m}\}} \gamma_{A,b,m}^{\text{d}} \quad (3.71)$$

bestimmt werden.

## 3.7 Modellieren von Leistungsregelungsverfahren

### 3.7.1 Vorbemerkung

Die Leistungsregelung (engl. Power Control) in Mobilfunksystemen dient zum Reduzieren der MAI. Werden einfache Verfahren zur Leistungsregelung angewendet, wie zum Beispiel in der Aufwärtsstrecke eines CDMA-Mobilfunksystems die Wahl einer gleichen Sendeleistung für alle MSen, so unterscheiden sich die Leistungen der auf die Sendesignale der einzelnen MSen zurückgehenden Empfangssignale der BSen erheblich [Wes02]. Die Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Dämpfungen der Pfade zwischen den MSen und den sie versorgenden BSen aufgrund unterschiedlicher geographische Distanzen. Dieses als Near-Far-Effekt bekannte Phänomen [Wes02] stellt je nach verwendetem Algorithmus für die Datendetektion in der BS ein erhebliches Problem dar, da empfangene Signale von Teilnehmern mit hoher Empfangsleistung an der BS die Detektion der Signale anderer Teilnehmer erheblich stören. Durch fortschrittliche Leistungsregelungsverfahren kann der Einfluß

des Near-Far-Effekts erheblich reduziert werden [GZ94]. Im Szenario der Aufwärtsstrecke kann dieses Reduzieren des Einflusses des Near-Far-Effekts durch Anpassen der Sendeleistung der einzelnen aktiven MSen, so daß die jeweiligen Signale an der BS im Idealfall alle mit demselben SNR empfangen werden, erzielt werden. Im folgenden wird die mathematische Modellierung verschiedener Leistungsregelungsverfahren eingeführt.

### 3.7.2 Regelung auf konstante Sendeleistung

Die einfachste Möglichkeit zum Einstellen der Sendeleistungen  $T_{\Omega,m}$  der MSen  $\mu_{\Omega,m} \in \mathbb{M}_{\Omega}$  und  $T_{\Omega,b,m}$  der BSen  $\beta_{\Omega,b} \in \mathbb{B}_{\Omega}$  ist die Wahl der gleichen, konstanten Sendeleistung  $T_{\max}$  bzw.  $T_{\max}$  für jede zu versorgende Verbindung  $V_{\Omega,b,m}$  in dem Mobilfunknetz eines jeden Operators  $\Omega \in \{A, B\}$  [Ste96]. Um dies zu erreichen, kann in der Abwärtsstrecke die für eine MS  $\mu_{\Omega,m}$  zu sendende Leistung auf alle BSen  $\beta_{\Omega,b} \in \mathbb{S}_{\Omega,m}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{\Omega,m}$  der MS  $\mu_{\Omega,m}$  zu gleichen Teilen aufgeteilt werden, so daß die von der BS  $\beta_{\Omega,b}$  zu sendende Leistung

$$T_{\Omega,b,m} = T_{\max}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}| \quad (3.72)$$

ist. In der Aufwärtsstrecke wird die Leistung

$$T_{\Omega,m} = T_{\max} = \text{const.} \quad (3.73)$$

von der MS  $\mu_{\Omega,m}$  gesendet. Dieses Verfahren wird in Kapitel 5 unter der Abkürzung  $T = \text{const}$  verwendet.

### 3.7.3 Regelung auf konstante Empfangsleistung

Gegenstand des vorliegenden Unterabschnitts 3.7.3 ist ein einfacher Algorithmus zum Einstellen der Sendeleistungen  $T_{\Omega,b,m}$  und  $T_{\Omega,m}$  für beide Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$ . Die Sendeleistungen  $T_{\Omega,b,m}$  und  $T_{\Omega,m}$  werden so eingestellt, daß in der Abwärtsstrecke die von allen BSen  $\beta_{\Omega,b}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{\Omega,m}$  an den MSen  $\mu_{\Omega,m}$  empfangene Nutzleistung für jede Teilnehmerverbindung den gleichen Wert hat [Lee91]. In der Aufwärtsstrecke müssen die an den BSen  $\beta_{\Omega,b}$  von den MSen  $\mu_{\Omega,m}$  empfangenen Nutzleistungen den gleichen Wert haben. Man spricht von einer Regelung auf „konstante“ Empfangsleistung. Diese Bedingung konstanter Empfangsleistung  $C_{\text{target}}$  an allen Empfängern ist erfüllt, wenn im Fall der Abwärtsstrecke die Sendeleistung  $T_{\Omega,m}$  einer BS  $\beta_{\Omega,b}$  für die ihr zugeordnete MS  $\mu_{\Omega,m}$  umgekehrt proportional zum Funkfeldgewinn  $g_{\Omega,\Omega,b,m}^{\text{BM}}$  ist, vgl. (3.46), wobei die Sendeleistung für eine MS  $\mu_{\Omega,m}$  auf die BSen  $\beta_{\Omega,b} \in \mathbb{S}_{\Omega,m}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{\Omega,m}$  aufgeteilt werden muß, d.h.

$$T_{\Omega,b,m} = \frac{C_{\text{target}}}{g_{\Omega,\Omega,b,m}^{\text{BM}} \cdot |\mathbb{S}_{\Omega,m}|} \quad (3.74)$$

Im Fall der Aufwärtsstrecke muß die MS  $\mu_{\Omega,m}$  zur Versorgung der BS  $\beta_{\Omega,b}$  die Leistung

$$T_{\Omega,m} = \frac{C_{\text{target}}}{g_{\Omega,\Omega,b,m}^{\text{BM}}} \quad (3.75)$$

aufbringen. Sind mehrere BSen  $\beta_{\Omega,b}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{\Omega,m}$ , so wird an der MS  $\mu_{\Omega,m}$  nur jene Leistung  $T_{\Omega,m}$  gesendet, die ausreicht, um das gewünschte  $C_{\text{target}}$  an der BS  $\beta_{\Omega,b}$  zu erzielen, zu der die MS  $\mu_{\Omega,m}$  den höchsten Funkfeldgewinn  $g_{\Omega,m}^{\text{BM,max}}$  hat. Das Leistungsregelungsverfahren auf konstante Empfangsleistung  $C_{\text{target}}$  wird in Kapitel 5 unter der Abkürzung  $C = \text{const}$  verwendet.

### 3.7.4 Regelung auf gewünschtes SNR

Im vorliegenden Unterabschnitt 3.7.4 wird ein Leistungsregelungsverfahren eingeführt, mit der das SNR für eine jede MS auf einen gewünschten Wert  $\gamma_{\text{target}}$  eingestellt werden kann. Dieses Leistungsregelungsverfahren ist in den Mobilfunkstandards WCDMA und TD-CDMA vorgesehen [3GP02]. Das Leistungsregelungsverfahren auf gewünschtes SNR  $\gamma_{\text{target}}$  wird in den Kapiteln 5 bis 7 unter der Abkürzung  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  verwendet.

Zunächst wird die Aufwärtsstrecke betrachtet. Ausgehend von einer initialen Einstellung der Sendeleistung nach den Verfahren der Regelung auf konstante Sendeleistung wird die Sendeleistung  $T_{\Omega,m}$  einer jeden MS  $\mu_{\Omega,m}$  beider Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$  in mehreren Iterationsschritten erhöht bzw. erniedrigt [3GP02], um an den BSen  $\beta_{\Omega,b}$  das gewünschte SNR  $\gamma_{\text{target}}$  für die betrachtete MS  $\mu_{\Omega,m}$  einzustellen. Die Sendeleistung  $T_{\Omega,m}^{(n)}$  einer MS  $\mu_{\Omega,m}$  im Iterationsschritt  $n$  wird zum Erzeugen der Sendeleistung im darauffolgenden Iterationsschritt  $n + 1$  um den Faktor  $\delta_s > 1$  erhöht oder erniedrigt, wenn das an der BS gemessene Gesamt-SNR  $\gamma_{\Omega,m}^{\text{u},(n)}$  nicht im Intervall  $[\gamma_{\text{target}}, \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s]$  liegt. Ansonsten wird die Sendeleistung  $T_{\Omega,m}^{(n)}$  im nächsten Iterationsschritt ( $n + 1$ ) beibehalten. Es gilt also

$$T_{\Omega,m}^{(n+1)} = \begin{cases} T_{\Omega,m}^{(n)} \cdot \delta_s & \text{für } \gamma_{\Omega,m}^{\text{u},(n)} < \gamma_{\text{target}}, \\ T_{\Omega,m}^{(n)} & \text{für } \gamma_{\text{target}} \leq \gamma_{\Omega,m}^{\text{u},(n)} < \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s, \\ T_{\Omega,m}^{(n)} / \delta_s & \text{für } \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s \leq \gamma_{\Omega,m}^{\text{u},(n)}. \end{cases} \quad (3.76)$$

Dabei muß jedoch  $T_{\min} < T_{\Omega,m}^{(n+1)} < T_{\max}$  gelten, was durch eine Begrenzung der Sendeleistungen gemäß

$$T_{\Omega,m}^{(n+1)} = \begin{cases} T_{\min} & \text{für } T_{\Omega,m}^{(n+1)} \leq T_{\min}, \\ T_{\Omega,m}^{(n+1)} & \text{für } T_{\min} < T_{\Omega,m}^{(n+1)} < T_{\max}, \\ T_{\max} & \text{für } T_{\max} \leq T_{\Omega,m}^{(n+1)} \end{cases} \quad (3.77)$$

erreicht wird. Bei der iterativen Anpassung der Sendeleistungen  $T_{\Omega,m}$  werden die Gesamt-SNRs  $\gamma_{\Omega,m}^{u,(n)}$  jeweils zwischen zwei Iterationsschritten aktualisiert, d.h. erst nachdem die Sendeleistungen  $T_{\Omega,m}^{(n)}$  aller MSen  $\mu_{\Omega,m}$ ,  $m = 1 \dots |\mathbb{M}_{\Omega}|$ , für die beiden betrachteten Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$  angepaßt wurden.

Im Fall der Abwärtsstrecke wird die Sendeleistung  $T_{\Omega,b,m}$  einer jeden BS  $\beta_{\Omega,b} \in \mathbb{S}_{\Omega,m}$  beider Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$  in mehreren Iterationsschritten erhöht bzw. erniedrigt, um an der MS  $\mu_{\Omega,m}$  das gewünschte SNR  $\gamma_{\text{target}}$  für die betrachtete Verbindung  $V_{\Omega,b,m}$  einzustellen. Die Sendeleistung  $T_{\Omega,b,m}^{(n)}$  einer BS  $\beta_{\Omega,b}$  im Iterationsschritt  $n$  wird zum Erzeugen der Sendeleistung  $T_{\Omega,b,m}^{(n+1)}$  im darauffolgenden Iterationsschritt  $n + 1$  um den Faktor  $\delta_s > 1$  erhöht oder erniedrigt, wenn das an der MS  $\mu_{\Omega,m}$  gemessene Gesamt-SNR  $\gamma_{\Omega,m}^{d,(n)}$  nicht im Intervall  $[\gamma_{\text{target}}, \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s]$  liegt. Ansonsten wird die Sendeleistung  $T_{\Omega,b,m}^{(n)}$  im nächsten Iterationsschritt ( $n + 1$ ) beibehalten. Es gilt also

$$T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} = \begin{cases} T_{\Omega,b,m}^{(n)} \cdot \delta_s & \text{für } \gamma_{\Omega,m}^{d,(n)} < \gamma_{\text{target}}, \\ T_{\Omega,b,m}^{(n)} & \text{für } \gamma_{\text{target}} \leq \gamma_{\Omega,m}^{d,(n)} < \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s, \\ T_{\Omega,b,m}^{(n)} / \delta_s & \text{für } \gamma_{\text{target}} \cdot \delta_s \leq \gamma_{\Omega,m}^{d,(n)}. \end{cases} \quad (3.78)$$

Dabei muß jedoch  $T_{\min} < T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} < T_{\max}$  gelten, was durch eine Begrenzung der Sendeleistungen gemäß

$$T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} = \begin{cases} T_{\min}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}| & \text{für } T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} \leq T_{\min}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}|, \\ T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} & \text{für } T_{\min}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}| < T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} < T_{\max}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}|, \\ T_{\max}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}| & \text{für } T_{\max}/|\mathbb{S}_{\Omega,m}| \leq T_{\Omega,b,m}^{(n+1)} \end{cases} \quad (3.79)$$

erreicht wird. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, daß die für eine MS  $\mu_{\Omega,m}$  verfügbare Sendeleistung  $T_{\max}$  gleichmäßig auf alle BSen  $\beta_{\Omega,b}$  im Active Set  $\mathbb{S}_{\Omega,m}$  verteilt wird. Beim iterativen Anpassen der Sendeleistungen werden die Gesamt-SNRs  $\gamma_{\Omega,m}^{d,(n)}$  jeweils zwischen zwei Iterationsschritten aktualisiert, d.h. erst nachdem die Sendeleistungen  $T_{\Omega,b,m}^{(n)}$  aller BSen  $\beta_{\Omega,b}$ ,  $b = 1 \dots |\mathbb{B}_{\Omega}|$  für alle betrachteten Operatoren  $\Omega \in \{A, B\}$  angepaßt wurden.

### 3.8 Verfahren zur Überlagerung verschiedener voneinander unabhängiger MAI-Effekte

In den Unterabschnitten 3.5 und 3.6 werden mathematische Modelle zum Ermitteln des SNRs eingeführt. Zum Auswerten eines Mobilfunkszenarios können in Monte-Carlo-Simulationen mehrere unabhängige Schnappschüsse eines Szenarios simuliert werden und die aus dem mathematischen Modell bestimmten SNRs statistisch ausgewertet werden, siehe



Abschnitt 3.1. Dazu werden meist Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  herangezogen, die durch Integration von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (engl. Probability Density Function, PDF) bestimmt werden können. Das Bestimmen der PDF durch Simulation sehr großer Szenarien mit vielen MSen und vielen BSen kann sehr rechenaufwendig sein [Edr94]. Im vorliegenden Abschnitt 3.8 wird ein Verfahren zum Vermindern des Rechenaufwands vorgestellt. Das Verfahren beruht auf der Tatsache, daß die PDF der Summe zweier unabhängiger Zufallsvariablen durch Faltung der PDFen der Zufallsvariablen erzeugt werden kann [BS87]. Diese Eigenschaft unabhängiger Zufallsvariablen wurde nach Wissen des Verfassers noch nicht in dieser Art und Weise für die Simulation von Mobilfunksystemen eingesetzt.

Im vorliegenden Abschnitt 3.8 werden auf die Nutzleistung an einem Empfänger normierte MAI-Leistungen  $\Theta$  betrachtet, die als Zufallsvariablen angesehen werden können. Zunächst werde jede dieser MAI-Leistungen  $\Theta$  durch eine einzige Verbindung verursacht, von denen es insgesamt  $N_Q$  im betrachteten Versorgungsgebiet gibt und die alle gleichberechtigt sind, d.h. weder Orthogonalität von CDMA-Codes noch MUD werden betrachtet. Die Summe aller  $N_Q$  normierten MAI-Leistungen  $\Theta$  ergibt den Reziprokwert des SNRs nach (3.41) bzw. (3.51). Die PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  von  $\Theta$  für eine hohe Zahl  $N_Q$  von MSen in einem Szenario wird konventionell durch das Auswürfeln von  $N_Q$  MS-Positionen und Aufsummieren aller normierten MAI-Leistungen  $\Theta$  in vielen Schnappschüssen bestimmt. Bei dem vorgestellten recheneffizienten Verfahren wird die Position nur einer MS in dem Szenario ausgewürfelt und deren MAI-Leistung  $\Theta$  an einem Empfänger für viele Schnappschüsse bestimmt. Aus der daraus entstandenen PDF  $p_{\Theta}^{(1)}(\Theta)$  kann unter der Annahme der Unabhängigkeit der MAI-Leistungen verschiedener MSen durch  $(N_Q - 1)$ -maliges Falten mit sich selbst die PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  für  $N_Q$  MSen im Szenario bestimmt werden, d.h.

$$p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta) = \underbrace{p_{\Theta}^{(1)}(\Theta) * p_{\Theta}^{(1)}(\Theta) * \dots * p_{\Theta}^{(1)}(\Theta)}_{N_Q\text{-mal}}. \quad (3.80)$$

Für die PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  für  $N_Q$  MSen im Szenario ist der Erwartungswert [BS87]

$$E\{p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)\} = N_Q \cdot E\{p_{\Theta}^{(1)}(\Theta)\} \quad (3.81)$$

und die Varianz

$$\text{Var}\{p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)\} = N_Q \cdot \text{Var}\{p_{\Theta}^{(1)}(\Theta)\}. \quad (3.82)$$

Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz [BS87] geht für eine große Zahl  $N_Q$  unabhängiger MAI-Quellen im Mobilfunknetz die PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  in eine Normalverteilung mit Erwartungswert und Varianz gemäß (3.81) und (3.82) über.

Die vorausgesetzte Unabhängigkeit der Zufallsvariablen, die auf MAI von unterschiedlichen MSen zurückgehen, ist nur dann gegeben, wenn die Regelung der Sendeleistung einer jeden

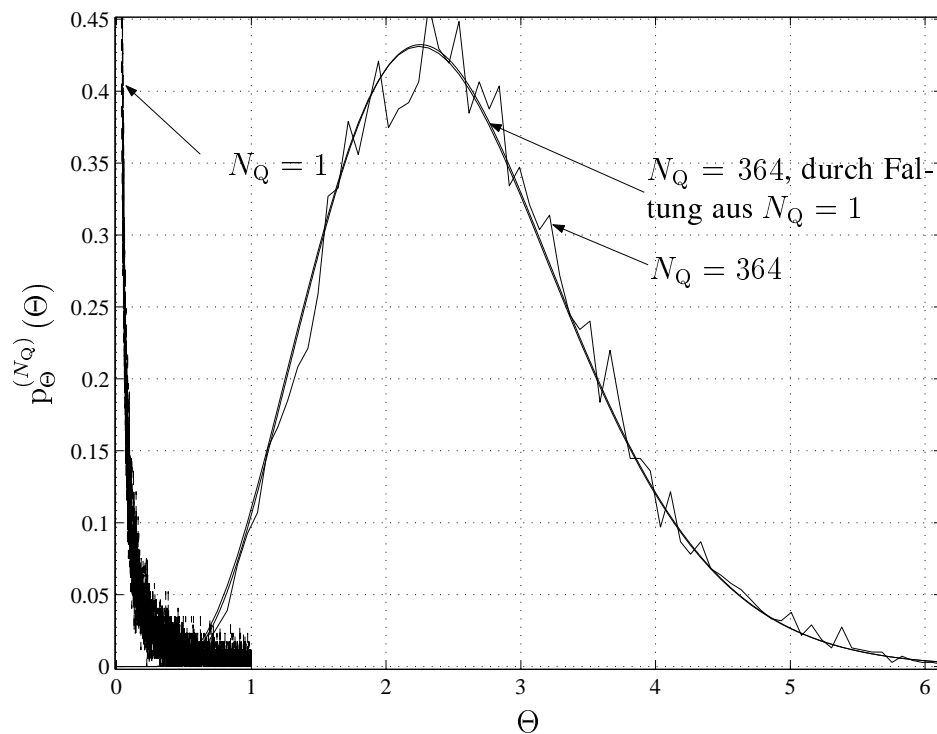


Bild 3.19. PDF der MAI-Leistung  $\Theta$  der Interzell-MAI für verschiedene Zahlen  $N_Q$  von MAI-Quellen in einem zellularen Mobilfunknetz mit  $K_B = 91$  BSen, Makrozell-Szenario, Aufwärtsstrecke, Leistungsregelungsverfahren auf konstante Empfangsleistung, thermische Rauschleistung  $N = 0$

MAI-Quelle unabhängig von allen anderen MAI-Quellen stattfindet. Aus diesem Grund ist das Erzeugen einer PDF der normierten MAI-Leistung  $\Theta$  für mehrere MSen aus der PDF der MAI-Leistung  $\Theta$  für eine MS nur für Leistungsregelungsverfahren auf konstante Sendeleistung oder konstante Empfangsleistung möglich, nicht jedoch für Leistungsregelungsverfahren auf ein gewünschtes SNR  $\gamma_{\text{target}}$ . Bei dem Leistungsregelungsverfahren auf ein gewünschtes SNR  $\gamma_{\text{target}}$  sind die Sendeleistungen der MSen voneinander abhängig, da sie unter Berücksichtigung der MAI von anderen MSen eingestellt werden.

In Bild 3.19 sind die PDFen der MAI-Leistung  $\Theta$  für  $N_Q = 1$  sowie für eine hohe Zahl von  $N_Q = 364$  MSen in einem beispielhaften Szenario dargestellt. Da die MAI nur positive Werte annehmen kann, sind die PDFen asymmetrisch. Für eine sehr große Zahl  $N_Q$  von MSen nähern sie sich einer Gaußverteilung an. Die PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  für  $N_Q = 364$  wird zum einen durch Simulation, zum anderen durch Faltung aus  $N_Q = 1$  ermittelt. Für das Ermitteln der PDF  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  für  $N_Q = 1$  und 364 muß jeweils der gleiche Aufwand investiert werden, d.h. bei geringerer Zahl  $N_Q$  von MSen im Szenario je Schnappschuss muß die Zahl der Schnappschüsse um den inversen Faktor erhöht werden, um die gleiche Güte der Statistik zu erhalten. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung der PDFen  $p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$  aus Simulation

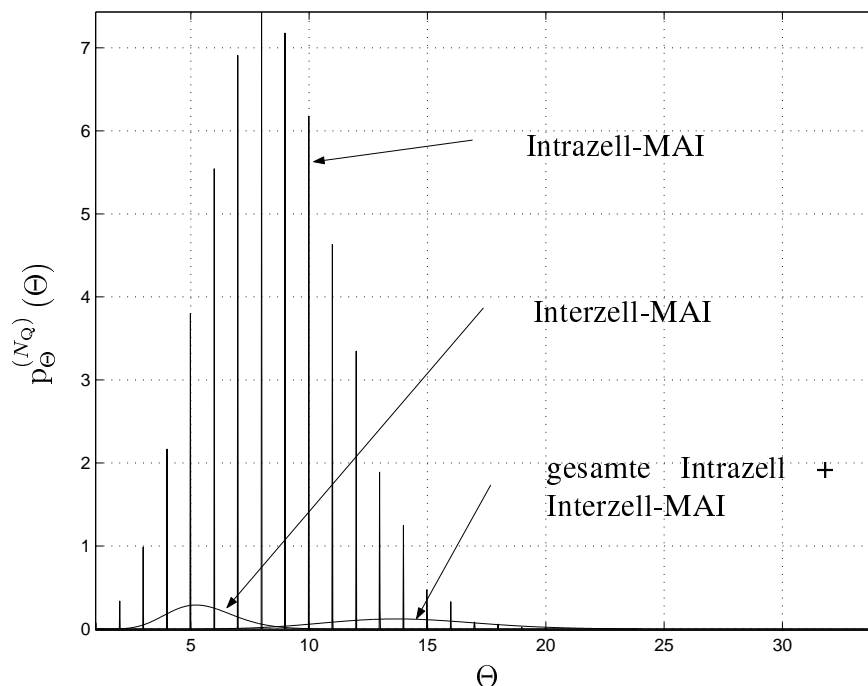


Bild 3.20. PDF der MAI-Leistung  $\Theta$  der Interzell- und Intrazell-MAI sowie der gesamten MAI für  $N_Q = 728$  MSen in einem zellularen Mobilfunknetz mit  $K_B = 91$  BSen, Makrozell-Szenario, Aufwärtsstrecke, Leistungsregelungsverfahren auf konstante Empfangsleistung, thermische Rauschleistung  $N = 0$

von  $N_Q = 364$  und aus der mehrfachen Faltung der Ergebnisse von  $N_Q = 1$ . Das Verfahren bietet also Vorteile, wenn von einem Szenario viele Ergebnisse mit unterschiedlichen Zahlen  $N_Q$  von MSen im Szenario benötigt werden, da nur einmal das aufwendige Bestimmen der Statistik der MAI-Leistung  $\Theta$  für  $N_Q = 1$  durchgeführt werden muß, und daraus durch Faltung die Ergebnisse für unterschiedliche Zahlen  $N_Q$  von MSen im Szenario bestimmt werden können.

Das Verfahren kann erweitert werden, um unterschiedliche MAI-Arten getrennt zu ermitteln. Denkbar ist hier z.B. das getrennte Bestimmen der PDFen der MAI-Leistung  $\Theta$  jeweils für Intra- und Interoperator-MAI und die Überlagerung der PDFen durch Faltung. Vorteile des getrennten Bestimmens der Statistiken verschiedener MAI-Arten ist neben dem Aufzeigen der Unterschiede der MAI-Arten auch, daß bestimmte MAI-Arten, die sich beim Verändern bestimmter Parameter nicht verändern, nur einmal simuliert werden müssen.

Die Überlagerung der Leistung verschiedener MAI-Arten durch Faltung deren PDFen wird anhand des Beispiels von Intra- und Interzell-MAI in Bild 3.20 gezeigt. Die PDF der Intrazell-MAI-Leistung ist aufgrund des Leistungsregelungsverfahrens auf konstante Empfangsleistung Poisson-verteilt [Ste96], da die von einer MS erzeugte Intrazell-MAI beim

Leistungsregelungsverfahren auf konstante Empfangsleistung genauso groß ist wie die Nutzleistung der Referenzverbindung. Die gesamte Intrazell- und Interzell-MAI wird in Bild 3.20 sowohl durch direkte Simulation als auch durch Faltung bestimmt und ist identisch.

### 3.9 Zugangskontrolle und Kapazität in CDMA-basierten Mobilfunknetzen

Im vorliegenden Abschnitt geht es um die Aufwärtsstrecke eines zellularen CDMA-Mobilfunknetzes. Es wird ein Kriterium beschrieben, mit dem die Kapazität dieses Mobilfunknetzes bestimmt werden kann. In der vorliegenden Arbeit ist die Kapazität definiert als die Zahl  $K$  von MSen, die pro BS versorgt werden können, und zwar unter Einhaltung eines bestimmten Qualitätskriteriums. Mit dem im folgenden vorgestellten Kriterium, das in der Literatur als Noise Rise bezeichnet wird [DBK<sup>+</sup>98, KBPY97, KBPY98, HL99], ist unter der Annahme einer konstanten Zahl  $K$  von jeder BS zugeordneten MSen eine Vorhersage der Kapazität des Mobilfunknetzes möglich. Für diese Vorhersage genügt es, bestimmte Ausbreitungseigenschaften des Szenarios sowie die Parameter des Mobilfunknetzes zu kennen. Das Kriterium Noise Rise kann außerdem im Betrieb oder bei der Simulation von Mobilfunknetzen eingesetzt werden, um zu entscheiden, ob bei gegebener Auslastung des Mobilfunknetzes weitere MSen aufgenommen werden können. Den Betrachtungen des vorliegenden Abschnittes 3.9 vergleichbare Überlegungen für die Abwärtsstrecke unterscheiden sich im wesentlichen durch einen zusätzlich zu berücksichtigenden Orthogonalitätsfaktor  $\zeta$  [DBK<sup>+</sup>98, KBPY98].

Es wird ein zellulares Mobilfunksystem mit mehreren BSen betrachtet. Es werde angenommen, daß jeder der BSen genau  $K$  MSen zugeordnet sind, und daß jede MS genau einer BS zugeordnet ist. Weiterhin wird vorausgesetzt, daß an jeder BS alle  $K$  ankommenden Teilnehmersignale das gleiche, als Entwurfsparameter vorgegebene bitbezogene erforderliche  $E_b/N_0$  haben. Mit der Informationsbitrate  $R_b$ , der Chiprate  $R_{\text{chip}}$  und dem Aktivitätsfaktor  $\nu_s$  ist das erforderliche SNR [HT00]

$$\gamma_{\text{target}} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{\nu_s R_b}{R_{\text{chip}}}. \quad (3.83)$$

Nun werden für die MSen einer einzigen betrachteten BS in der Referenzzelle die folgenden Größen eingeführt:

- $C$  : Leistung des von jeder der  $K$  MSen an der BS ankommenden Nutzsignals
- $I^{\text{IaZ}}$  : Leistung der Intrazell-MAI an der BS
- $I^{\text{IrZ}}$  : Leistung der Interzell-MAI an der BS
- $N$  : Thermische Rauschleistung an der BS

Mit diesen Größen ergibt sich das SNR eines jeden der  $K$  Teilnehmersignale an der BS zu

$$\gamma = \frac{C}{I^{\text{IaZ}} + I^{\text{IrZ}} + N} \underbrace{\quad}_{\text{durch Einstellen von } C} = \gamma_{\text{target}}, \quad (3.84)$$

wobei, wie in (3.84) angedeutet,  $C$  durch die Leistungsregelung so einzustellen ist, daß  $\gamma$  den Zielwert  $\gamma_{\text{target}}$  annimmt. Da für jede der  $K$  der BS zugeordneten MSen die Empfangsleistung  $C$  des Nutzsignals gleich ist, gilt für die Intrazell-MAI

$$I^{\text{IaZ}} = (K - 1)C. \quad (3.85)$$

Mit der getroffenen Annahme einer gleichen Zahl  $K$  von MSen pro BS ist das Verhältnis

$$f = \frac{I^{\text{IrZ}}}{C + I^{\text{IaZ}}} \quad (3.86)$$

konstant. Das Verhältnis  $f$  wird in [BWW99, BW98] als zellulare Interferenzfunktion bezeichnet und basiert auf der Annahme eines unendlich ausgedehnten Zellnetzes sowie  $K$  in jeder Zelle flächenmäßig gleichverteilten MSen [BWW99].  $f$  nach (3.86) hängt dann nur von den Ausbreitungseigenschaften des Szenarios und der Clustergröße, vgl. Abschnitt 1.4, ab. Somit gilt mit (3.85)

$$I^{\text{IrZ}} = f(C + I^{\text{IaZ}}) = fKC. \quad (3.87)$$

(3.85) und (3.87) eingesetzt in (3.84) ergibt

$$\gamma_{\text{target}} = \frac{C}{(K - 1)C + fKC + N} = \frac{1}{K(1 + f) - 1 + N/C}. \quad (3.88)$$

(3.88) stellt eine Beziehung zwischen der Teilnehmerzahl  $K$  und der Empfangsleistung  $C$  her, d.h.

$$K = \frac{1 + 1/\gamma_{\text{target}} - N/C}{1 + f}. \quad (3.89)$$

Die maximale Teilnehmerzahl  $K_{\text{pole}}$  ergibt sich aus (3.89), wenn  $C$  über alle Maßen wächst. Man erhält

$$K_{\text{pole}} = \frac{1 + 1/\gamma_{\text{target}}}{1 + f}. \quad (3.90)$$

$K_{\text{pole}}$  wird in der Literatur auch als Polkapazität bezeichnet [HT02]. Solange  $K < K_{\text{pole}}$  ist, besteht prinzipiell die Möglichkeit,  $K$  unter gleichzeitigem Erhöhen von  $C$  zu erhöhen.

Wir gehen nun davon aus, daß  $K$  einen gewissen Wert hat und stellen die Frage, ob  $K$  um 1 erhöht werden kann, d.h. ob in jeder Zelle eine weitere MS zugelassen werden kann, und zwar unter der Nebenbedingung, daß  $\gamma_{\text{target}}$  nach (3.88) durch ein entsprechendes Erhöhen von  $C$  nach wie vor erreicht wird. Zum Beantworten dieser Frage kann der Quotient

$$\chi = \frac{C + I^{\text{IaZ}} + I^{\text{IrZ}} + N}{N} = \frac{C + (1 - K)C + fKC + N}{N} = \frac{(1 + f)K + N/C}{N/C} \quad (3.91)$$

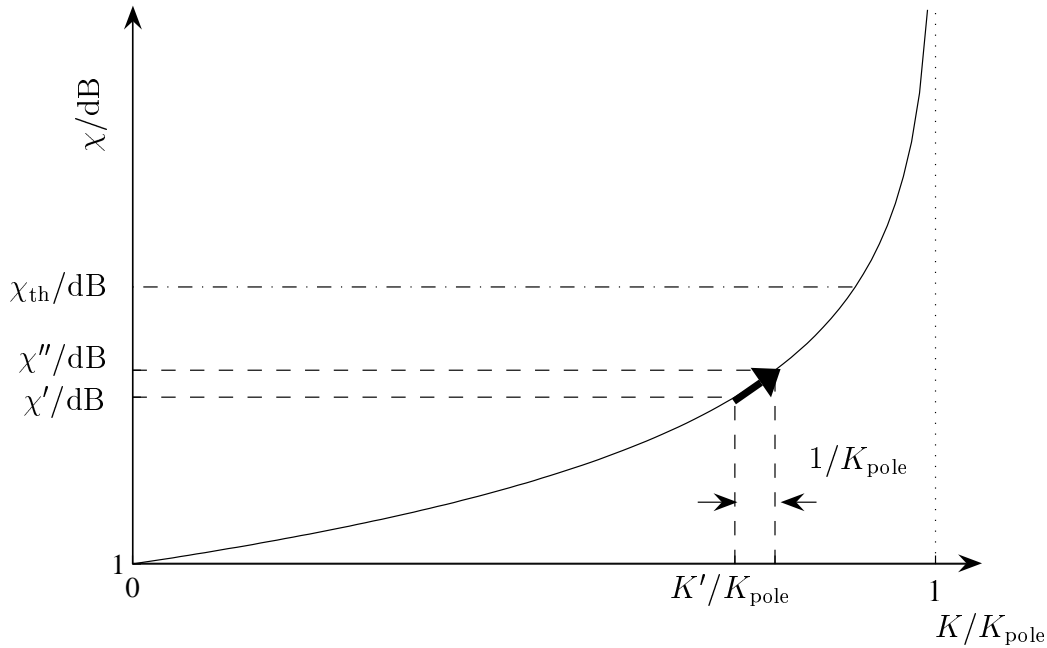


Bild 3.21. Noise Rise  $\chi$  aufgetragen über dem Verhältnis  $K/K_{\text{pole}}$  der Zahl  $K$  von MSen pro BS zur Polkapazität  $K_{\text{pole}}$  sowie Einfluß einer Erhöhung von  $K'$  um eins auf den Noise Rise  $\chi'$

aus der gesamten Empfangsleistung  $C + I^{\text{IaZ}} + I^{\text{IrZ}} + N$  der BS und der thermischen Rauschleistung  $N$  herangezogen werden, der in der Literatur als Noise Rise bezeichnet wird [HT02]. (3.91) ist an der BS ohne großen Aufwand meßbar. Aus (3.88) folgt

$$\frac{N}{C} = \frac{1}{\gamma_{\text{target}}} - K(1 + f) - 1. \tag{3.92}$$

(3.92) in (3.91) eingesetzt ergibt mit  $K_{\text{pole}}$  nach (3.90)

$$\chi = \frac{1}{1 - \frac{K(1 + f)}{1 + 1/\gamma_{\text{target}}}} \tag{3.93}$$

$$= \frac{1}{1 - \frac{K}{K_{\text{pole}}}}. \tag{3.94}$$

Je näher  $K$  an  $K_{\text{pole}}$  herankommt, desto größer  $\chi$ . Um festzustellen, ob bei gegebenem  $K$  netzweit jeweils eine weitere MS pro BS versorgt werden kann, kann man deshalb feststellen, wie weit die gemessene Größe  $\chi$  noch vom Wert  $\infty$  entfernt ist. Ist die Entfernung hinreichend groß, so kann eine weitere MS pro BS zugelassen werden. In Bild (3.21) ist  $K/K_{\text{pole}}$  dargestellt.

Die in (3.86) getroffenen Annahmen einer gleichen Zahl  $K$  von MSen pro BS und flächenmäßig gleichverteilten MSen können in der Realität nur im Mittel über ein unend-

lich ausgedehntes Zellnetz erzielt werden. Betrachtet man eine bestimmte Referenzzelle in einem realen Mobilfunknetz, so können die Zahlen  $K$  von MSen in den umliegenden BSen schwanken und die Positionen der MSen ungleich verteilt sein. Dies führt zu momentanen Schwankungen der zellularen Interferenzfunktion  $f$ . Damit diese Schwankungen nicht zu einer Überlastung des Mobilfunknetzes führen, muß ein Sicherheitsabstand von  $K$  zu  $K_{\text{pole}}$  gewahrt werden [HT02]. Aus diesem Grund wird ein Schwellwert  $\chi_{\text{th}}$  eingeführt, der beim Betrieb eines Mobilfunknetzes nicht überschritten werden soll, siehe Bild 3.21.

Mit einem vorgegebenen Schwellwert  $\chi_{\text{th}}$  kann aus (3.93) für das Szenario mit bekannter zellulärer Interferenzfunktion  $f$  die Kapazität  $K$  von pro BS versorgbaren MSen abgeschätzt werden, wobei angenommen wird, daß jeder BS gleich viele MSen zugeordnet sind. Ist die zellulare Interferenzfunktion  $f$  nicht bekannt, so kann im Betrieb oder bei der Simulation von Mobilfunknetzen durch den Noise Rise  $\chi$  entschieden werden, ob die Zahl  $K$  der MSen pro BS erhöht werden kann. Mit dem bei einer Auslastung des Mobilfunknetzes von  $K'$  MSen pro BS gemessenen Noise Rise  $\chi'$  kann mit (3.94) die Polkapazität

$$K_{\text{pole}} = \frac{K\chi'}{\chi' - 1} \quad (3.95)$$

bestimmt werden. Die Vorhersage für den Noise Rise  $\chi''$  beim Erhöhen der Zahl  $K'$  der MSen pro BS um 1 ist mit (3.94) und (3.95)

$$\chi'' = \frac{1}{1 - \frac{K+1}{K_{\text{pole}}}} = \frac{K\chi'}{K+1-\chi'}. \quad (3.96)$$

Ist diese Vorhersage  $\chi''$  kleiner als der Schwellwert  $\chi_{\text{th}}$ , so ist das Erhöhen von  $K$  möglich. Die dargelegte Vorgehensweise zum Entscheiden, ob das Erhöhen von  $K$  um eins möglich ist, wird in Bild 3.21 veranschaulicht. Solche Verfahren zum Entscheiden, ob weitere MSen im Mobilfunknetz zugelassen werden können, werden als Verfahren zur Zugangskontrolle bezeichnet.

## Kapitel 4

# Zusammenstellung wichtiger Koexistenzszenarien

Im vorliegenden Kapitel 4 werden die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Koexistenzszenarien erläutert. Wie in Kapitel 1.7 bereits erwähnt, werden Koexistenzuntersuchungen für den UMTS-Standard mit seinen beiden Teilstandards WCDMA und TD-CDMA durchgeführt. Durch diese Festlegung auf zwei bestimmte Mobilfunkstandards ist es möglich, sowohl die MAI zwischen Mobilfunknetzen gleichen Mobilfunkstandards als auch die MAI zwischen Mobilfunknetzen unterschiedlichen Mobilfunkstandards vor dem Hintergrund realistischer Mobilfunksysteme und Parameter zu untersuchen. Die in den späteren Kapiteln 5 bis 8 präsentierten Ergebnisse hängen also von dem jeweils betrachteten Mobilfunkstandard ab. Die prinzipielle Vorgehensweise bei Koexistenzuntersuchungen basierend auf den in Kapitel 3 erarbeiteten Techniken ist jedoch auch auf andere Mobilfunkstandards übertragbar. Zudem sind Tendenzen und Abhängigkeiten von Parametern auf ähnliche Mobilfunkstandards übertragbar, ebenso wie die grundlegenden Ideen zum Mindern von MAI zwischen Mobilfunknetzen in Kapitel 8.

Die 3G-Teilstandards WCDMA und TD-CDMA ermöglichen beide sowohl Dienste hoher als auch niedriger Datenrate [HT02]. TD-CDMA bietet jedoch Vorteile bei hohen Datenraten, die häufig in der Abwärtsstrecke stärker nachgefragt werden als in der Aufwärtsstrecke, und zwar durch die Möglichkeit einer Asymmetrie zwischen Auf- und Abwärtsstrecke [HT02]. Das Ausnutzen weiterer Vorteile von TD-CDMA wie Reziprozität des Kanals erfordern geringe Geschwindigkeit der MS [HT00], weshalb sich der Einsatz von TD-CDMA in Mikrozellen anbietet. In Mikrozellen werden, soweit diese verfügbar sind, typischerweise Teilnehmer mit hohen Ansprüchen an die Datenrate, aber geringer Geschwindigkeit eingebucht, vgl. Abschnitt 2.4. WCDMA ist besser für große Zellen und die Versorgung von Sprachdiensten geeignet als TD-CDMA [HT02], so daß sich eine flächendeckende Bedienung eines Versorgungsgebiets durch Makrozellen mit WCDMA und die Versorgung von Hotspots durch TD-CDMA in Mikrozellen anbietet. Hinsichtlich der Mikrozellen ist es auch möglich, diese durch WCDMA abzudecken; der Einsatz von TD-CDMA hat aber den Vorteil [HT02], daß dafür z.B. in Europa, aber auch in anderen Ländern ein weiteres Gesamtfrequenzband im Bereich 1900-1920 MHz, vgl. Bild 1.1, exklusiv zur Verfügung steht. Aufgrund der vorstehenden Überlegungen wird im folgenden der Einsatz des 3G-Teilstandards WCDMA in Makrozellen und TD-CDMA in Mikrozellen untersucht. Es werden folgende Koexistenzszenarien betrachtet:

- Koexistenz zwischen zwei WCDMA-Mobilfunknetzen in Makrozellen: Kapitel 5
- Koexistenz zwischen zwei TD-CDMA-Mobilfunknetzen in Mikrozellen: Kapitel 6



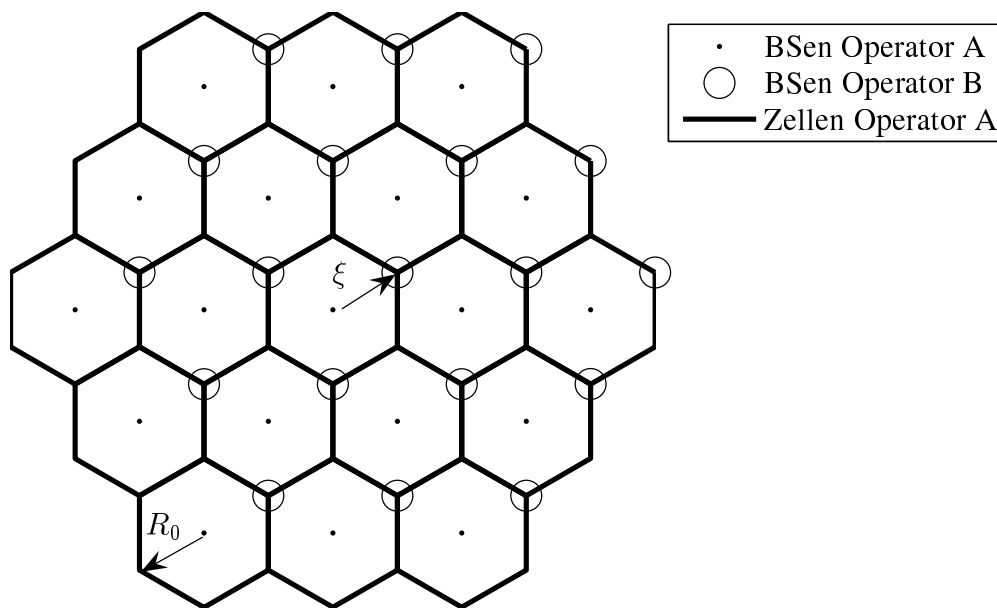


Bild 4.1. Koexistenzszenario für Mobilfunknetze in Makrozellen

- Koexistenz zwischen einem WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen und einem TD-CDMA-Mobilfunknetz in Mikrozellen: Kapitel 7

Für die Untersuchungen werden in der vorliegenden Arbeit die Koexistenzszenarien aus [3GP02] herangezogen, die im folgenden vorgestellt werden. Beim Untersuchen der Koexistenz von Mobilfunknetzen ist es erforderlich, sowohl geringe Dislokation, im Grenzfall Kollokation, als auch hohe Dislokation von BSen zu betrachten [3GP02]. Dazu wird in der vorliegenden Arbeit eine Variable  $0 \leq \xi \leq 1$  eingeführt, die den Grad der Dislokation beschreibt.

Für die Koexistenz von Mobilfunknetzen in Makrozellen in Kapitel 5 wird angenommen [3GP02], daß die betrachteten Mobilfunknetze hexagonale Zellen nach Bild 3.2 mit jeweils demselben Zellradius  $R_0$  haben. Die Versorgungsgebiete der Zellnetze beider betrachteter Operatoren A und B überlappen, wobei die BSen der unterschiedlichen Operatoren den Abstand  $\xi \cdot R_0$  voneinander haben. Dieses Koexistenzszenario für Makrozellen zeigt Bild 4.1 für den Fall  $\xi$  gleich 1. Bei  $\xi$  gleich 0 herrscht Kollokation, d.h. die BSen unterschiedlicher Operatoren sind am gleichen Ort, bei  $\xi$  gleich 1 herrscht maximale Dislokation, d.h. die BSen Operators B sind am äußersten Rande der Zellen des Operators A und haben somit maximale Distanz zu den umliegenden BSen des Operators A. Jeder Wert zwischen  $0 \leq \xi \leq 1$  kann für die Dislokation eingestellt werden.

Im Koexistenzszenario für Mobilfunknetze in Mikrozellen, eingesetzt in Kapitel 6, werden im Versorgungsgebiet des Operators A nach 3.3 BSen des Operators B in regelmäßiger Weise

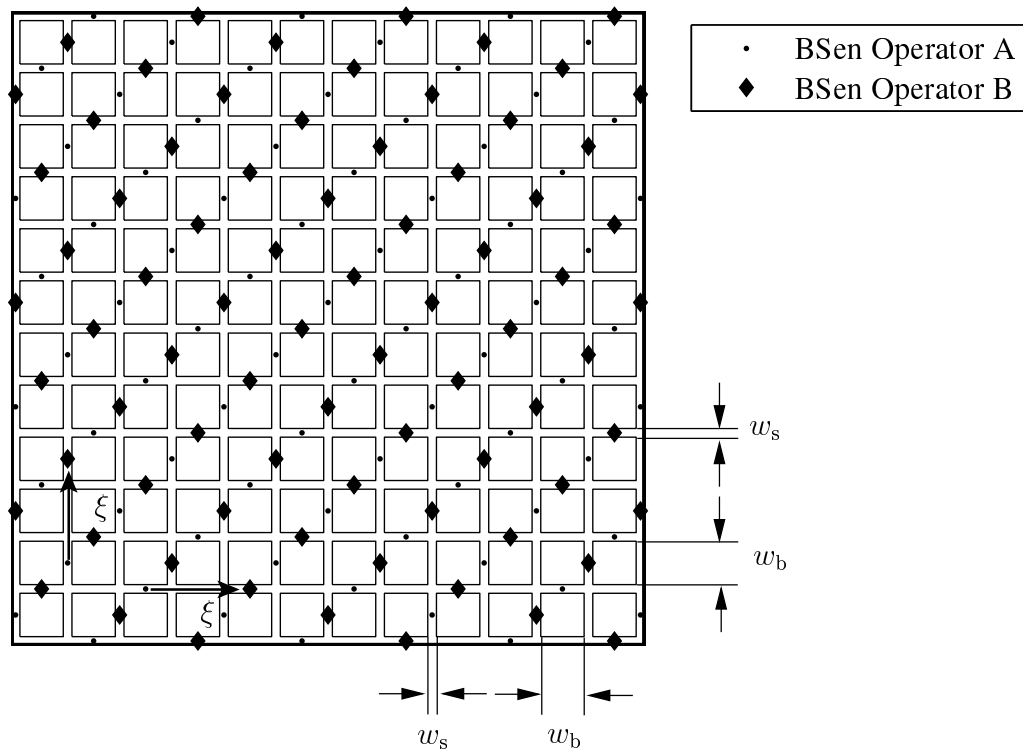


Bild 4.2. Koexistenzszenario für Mobilfunknetze in Mikrozellen

verteilt [3GP02], indem sie gegenüber den BSen des Operators A um  $2\xi(w_b + w_s)$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$ , in den Straßen verschoben werden, siehe Bild 4.2. Um die Grenzen des Versorgungsgebiets nicht zu verlassen, werden die BSen von Operator B beim Verschieben zyklisch rotiert. Der Fall  $\xi$  gleich 0 bedeutet Kollokation, während im Fall  $\xi$  gleich 1 maximale Dislokation herrscht.

Für das Untersuchen der Koexistenz in hierarchischen Zellstrukturen wird das Versorgungsgebiet eines Mobilfunknetzes in Mikrozellen von einem Mobilfunknetz in Makrozellen überlagert, wie in Bild 4.3 dargestellt. Auch hier kann Kollokation und Dislokation zwischen der Referenz-BS der Makrozellen und einer BS im Zellnetz der Mikrozellen durch den Parameter  $0 \leq \xi \leq 1$  beschrieben werden. Die Makro-BS wird dabei um  $\xi(w_b + w_s)$  gegen die Mikro-BS verschoben.

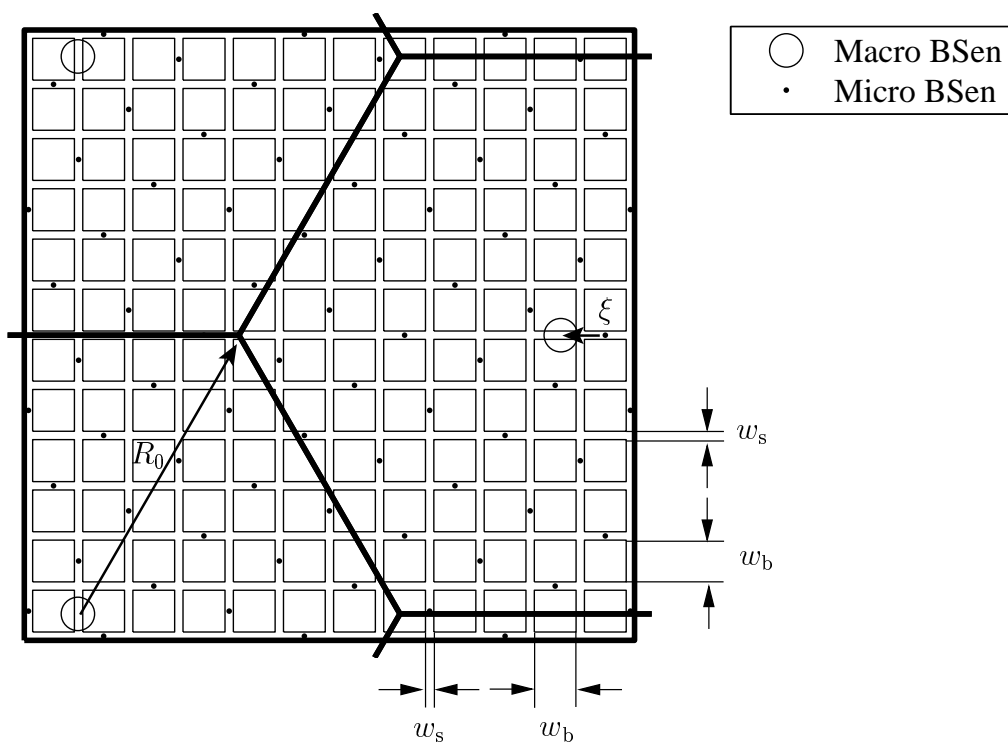


Bild 4.3. Koexistenzszenario für zwei Mobilfunknetze in verschiedenen Hierarchieebenen

## Kapitel 5

# MAI zwischen WCDMA-Mobilfunknetzen in Makrozellen

### 5.1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Kapitel 5 wird die MAI zwischen zwei WCDMA-Mobilfunknetzen in Makrozellen untersucht, wobei die betrachteten Mobilfunknetze in unterschiedlichen, direkt benachbarten Frequenzkanälen aktiv sind. Diese MAI der Art Intrasystem-Interoperator-Anderkanal-MAI wird mit der Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-MAI verglichen, wie bereits in Unterabschnitt 2.8.4 gesagt.

Die im vorliegenden Kapitel 5 verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt. Die Quellen dieser Parameter werden in der Tabelle 5.1 durch Referenzen angegeben. Der Bezug zwischen den Parametern in Tabelle 5.1 und den in Kapitel 3 eingeführten Techniken wird durch Querverweise angezeigt.

### 5.2 Aufwärtsstrecke

#### 5.2.1 Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$

Im vorliegenden Unterabschnitt 5.2.1 werden Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  untersucht. Mit diesen Verteilungsfunktionen sollen im folgenden grundlegende Unterschiede der betrachteten MAI-Arten und der Auswirkungen bestimmter Systemparameter aufgezeigt und veranschaulicht werden. In den Verteilungsfunktionen wird an der Ordinate die Wahrscheinlichkeit aufgetragen, daß das verfügbare SNR  $\gamma$  für einen Teilnehmer kleiner ist als der Wert  $\Gamma$  an der Abszisse. Als Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  bezeichnet man die Wahrscheinlichkeit, daß das verfügbare SNR  $\gamma$  kleiner ist als das benötigte SNR  $\gamma_{\text{target}}$ . In der vorliegenden Arbeit wird das von dem Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  angestrebte SNR  $\gamma_{\text{target}}$  aus dem zum Versorgen des betrachteten Dienstes benötigten  $E_b/N_0$  nach (3.83) berechnet. Bei der Situation, die z.B. in Bild 5.1 zugrundeliegt, ist für das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  in 1 % aller Fälle das SNR  $\gamma$  kleiner als -24 dB, und die Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  ist etwa 5 %, wenn das  $\gamma_{\text{target}}$  -20 dB beträgt. Je weiter rechts die

Tabelle 5.1. Parameter für die Simulationen im Kapitel 5

Parameter	betrachtete Werte durch ; getrennt für Ab-/Aufwärtsstrecke	Kommentar
Szenario	Makrozellen	zwei Mobilfunknetze mit dem 3G-Teilstandard WCDMA im gleichen Versorgungsgebiet, Bild 4.1
Leistungsregelung	$T = \text{const};$ $C = \text{const};$ $\gamma = \gamma_{\text{target}}$	siehe Abschnitt 3.7
$\gamma_{\text{target}} / \text{dB}$	-18 / -20	gewünschtes SNR des Leistungsregelungsverfahrens $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , Berechnung nach (3.83)
$T_{\text{max}} / \text{dBm}$	20 / 21	maximale Sendeleistung pro MS, siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$T_{\text{min}}$	0	minimale Sendeleistung, siehe Unterabschnitt 3.7.4
$\delta_s / \text{dB}$	0, 5	Schrittweite der iterativen Leistungsregelung auf $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$N / \text{dBm}$	-99 / -103	thermische Rauschleistung, [3GP02]
$f_0 / \text{MHz}$	$1925 \pm 2, 5$	Trägerfrequenz, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\sigma_a / \text{dB}$	10	Standardabweichung des Lognormal-Schwundes, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$h_r / \text{m}$	12	mittlere Gebäudehöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\Delta h_b / \text{m}$	15; 30	BS-Antennenhöhe über Hausdächern, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$h_{\text{MS}} / \text{m}$	1, 5	MS-Antennenhöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$G / \text{dBi}$	11	Antennengewinn der BSen, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$A_{\text{min}} / \text{dB}$	60; 70; 80; 90	kleinstmögliche Funkfelddämpfung, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\delta_{\text{ACIR}} / \text{dB}$	30; 33; 45	ACIR, siehe Unterabschnitt 3.4.5, [3GP02]
$R_0 / \text{m}$	577; 1154; 2308	Zellradius, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$r$	1	Clustergröße, siehe Abschnitt 1.4, [3GP02]
$\kappa$	1 / 1	Faktor zum Beschreiben des Detektionsverfahrens, 0=MUD, 1=SUD, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\zeta$	0, 4 / 1	Orthogonalitätsfaktor, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\xi$	0; 0, 5; 1	Dislokation, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$R_b / \text{kb/s}$	12,2	Bitrate für Sprachdienst, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$E_b/N_0 / \text{dB}$	7, 0 / 5, 1	minimal erforderlich, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$R_{\text{chip}} / \text{MHz}$	3, 84	Chiprate, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$\nu_s / \%$	100	Aktivitätsfaktor Sprache, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]

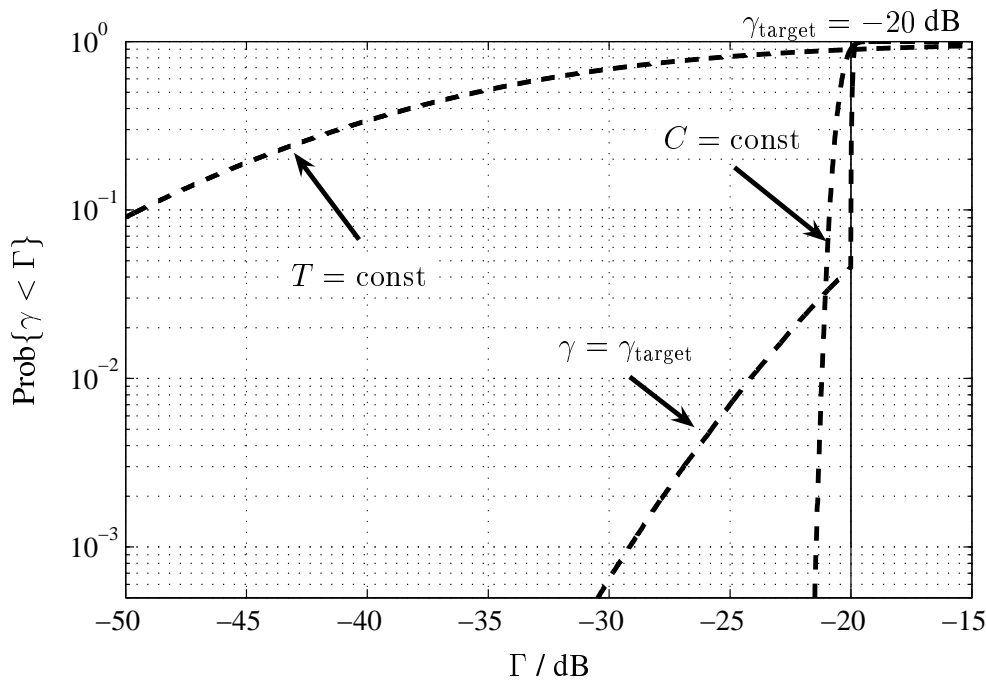


Bild 5.1. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein-Operator-Fall bei verschiedenen Leistungsregelungsverfahren, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\Delta h_b = 15$  m,  $K = 64$ ,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $N = 0$

Verteilungsfunktionen liegen, d.h. je größer das verfügbare SNR  $\gamma_{\text{target}}$  für einen bestimmten Anteil der Teilnehmer, umso besser ist die Performanz des Mobilfunknetzes.

In Bild 5.1 werden für den Ein-Operator-Fall, d.h. beim Betrachten nur der Intraoperator-MAI eines Mobilfunknetzes, die verschiedenen in Abschnitt 3.7 eingeführten Leistungsregelungsverfahren verglichen. Dabei sind im Mittel  $K$  gleich 64 Teilnehmer in jeder Zelle. Da das thermische Rauschen  $N$  zu  $-\infty$  dBm gesetzt wird, beschreibt das SNR  $\gamma$  das Verhältnis der Nutzleistung eines Teilnehmers zur Eigenstörung des Mobilfunknetzes. Für das Verfahren  $T = \text{const}$  ist die Verteilungsfunktion des SNRs  $\gamma$  in der betrachteten Aufwärtsstrecke wesentlich flacher als für das Verfahren  $C = \text{const}$ ; die Verteilungsfunktionen schneiden sich bei einem SNR  $\gamma$  von etwa -20 dB. Ein solch flacher Verlauf bedeutet, daß das verfügbare SNR  $\gamma$  der MSen im Mobilfunknetz sehr unterschiedlich ist. Manche MSen erhalten dabei ein wesentlich besseres SNR  $\gamma$  als sie benötigen, während viele andere ein sehr niedriges SNR  $\gamma$  haben. Möglichst steile Verteilungsfunktionen sind daher prinzipiell vorteilhaft, da dann alle MSen gleiche Versorgungsqualität erhalten, vgl. auch [Ste96]. An dem Vergleich der Fälle  $T = \text{const}$  und  $C = \text{const}$  erkennt man die negativen Auswirkungen des in Abschnitt 3.7 beschriebenen Near-Far-Effekts.

Während bei den Verfahren  $T = \text{const}$  und  $C = \text{const}$  bei  $K$  gleich 64 sehr hohe Outage-Wahrscheinlichkeiten  $P_{\text{out}}$  über 90 % auftreten, kann durch das Leistungsregelungsverfahren

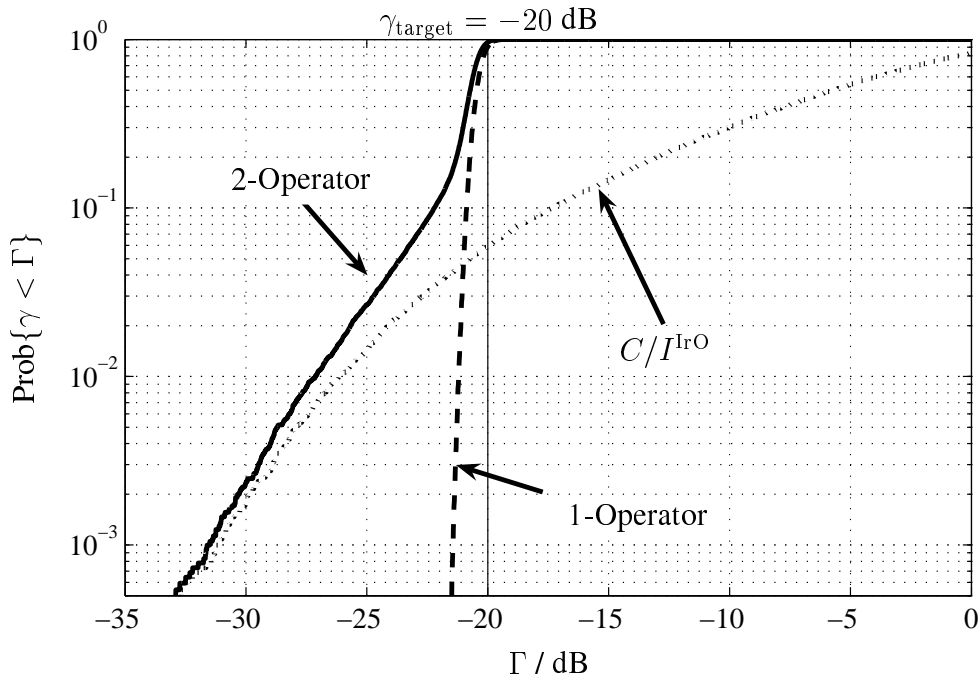


Bild 5.2. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall sowie Darstellung der Interoperator-MAI, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $C = \text{const}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $K = 64$ ,  $A_{\min} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = 0$

$\gamma = \gamma_{\text{target}}$  eine Outage-Wahrscheinlichkeit von nur 5 % erzielt werden. Durch das Verfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  können also wesentlich mehr MSen mit dem benötigten SNR  $\gamma_{\text{target}}$  versorgt werden. Die Verteilungsfunktion des SNR  $\gamma$  für das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  ist im Bereich  $\gamma$  größer  $\gamma_{\text{target}}$  extrem steil durch die Regelung auf das angestrebte SNR  $\gamma_{\text{target}}$ , während sie im Bereich  $\gamma$  kleiner  $\gamma_{\text{target}}$  relativ flach ist. Die MSen im letztgenannten Bereich senden alle mit der maximalen Sendeleistung  $T_{\max}$  und können daher die Sendeleistung nicht erhöhen, um das  $\gamma_{\text{target}}$  zu erreichen.

In der vorliegenden Arbeit ist, wie in Abschnitt 1.7 bereits gesagt, die MAI zwischen den Mobilfunknetzen verschiedener Operatoren von besonderem Interesse. In Bild 5.2 wird neben einer Verteilungsfunktion für den Ein-Operator-Fall auch eine Verteilungsfunktion für den Zwei-Operator-Fall gezeigt. Dabei wird das Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  verwendet, da sich daran die Eigenschaften und Auswirkungen der Interoperator-MAI sehr gut veranschaulichen lassen. Während im Ein-Operator-Fall ausschließlich Intraoperator-MAI auftritt, gibt es im Zwei-Operator-Fall zusätzlich die Interoperator-MAI. Die Eigenschaften von Intraoperator-MAI und Interoperator-MAI sind sehr verschieden, wie der Vergleich der Verteilungsfunktion für den Ein-Operator-Fall und der Verteilungsfunktion des Verhältnisses  $C/I^{\text{IrO}}$  von Nutzleistung  $C$  zu Interoperator-MAI  $I^{\text{IrO}}$  zeigt. Der Grund für den extrem flachen Verlauf der Verteilungsfunktion von  $C/I^{\text{IrO}}$  ist, daß zwar in man-

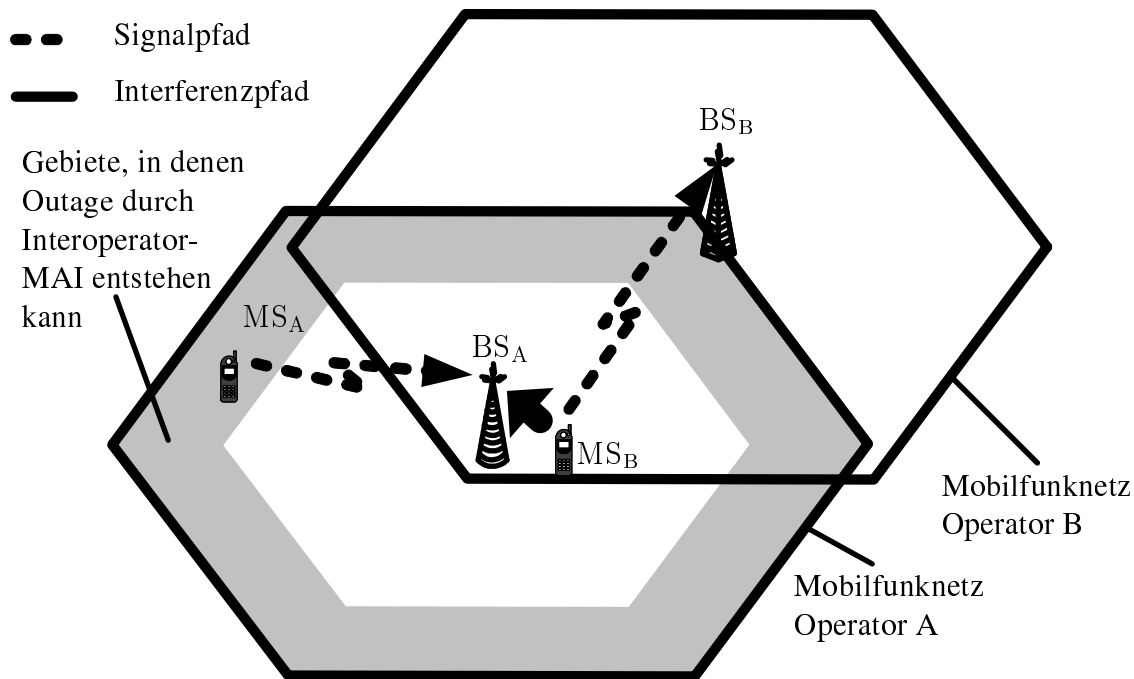


Bild 5.3. Kritisches Koexistenzszenario in der Aufwärtsstrecke

chen Schnappschüssen die Interoperator-MAI durch die hohe Anderkanalunterdrückung, beschrieben durch das  $\delta_{ACIR}$  von 33 dB, sehr klein ist, für andere Schnappschüsse aber extrem hohe Interoperator-MAI auftritt. Wie in Abschnitt 1.6 bereits beschrieben und in Bild 5.3 veranschaulicht, tritt eine solch hohe Interoperator-MAI auf, wenn bei hoher Dislokation  $\xi$  der BSen der verschiedenen Operatoren eine  $MS_B$  der Operators B sehr nahe an einer  $BS_A$  des Operators A ist und gleichzeitig aufgrund der hohen Distanz zu ihrer versorgenden  $BS_B$  des Operators B bedingt durch die hohe Dislokation  $\xi$  sehr hohe Sendeleistung verwenden muß. Eine einzige  $MS_B$  in der Nähe der  $BS_A$  kann die Outage vieler  $MS_A$ en am Zellrand verursachen, die aufgrund der hohen Interoperator-MAI nicht genügend Sendeleistung aufbringen können, um mit ausreichender Qualität versorgt zu werden. Aus Bild 5.2 kann abgelesen werden, daß bei der betrachteten Parametrisierung in etwa 5 % der Fälle die Interoperator-MAI genauso groß wie die Intraoperator-MAI, trotz der hohen Anderkanalunterdrückung von 33 dB. Die Beeinträchtigung durch hohe Interoperator-MAI betrifft hier also verhältnismäßig viele MSen. Der charakteristische abknickende Verlauf der Verteilungsfunktion der SNRs  $\gamma$  im Zwei-Operator-Fall in Bild 5.2 wird verursacht durch die Überlagerung der beiden verschiedenen MAI-Arten Intraoperator-MAI und Interoperator-MAI.

Verändert man die Zahl  $K$  von Teilnehmern, so ändert sich auch das verfügbare SNR  $\gamma$ . Dies wird in Bild 5.4 für das Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  gezeigt. Ein Verdoppeln der Teilnehmerzahl  $K$  verschiebt die Verteilungsfunktionen um etwa 3 dB nach links, da sich die MAI in etwa verdoppelt. Dabei werden die Verteilungsfunktionen sowohl im Ein-



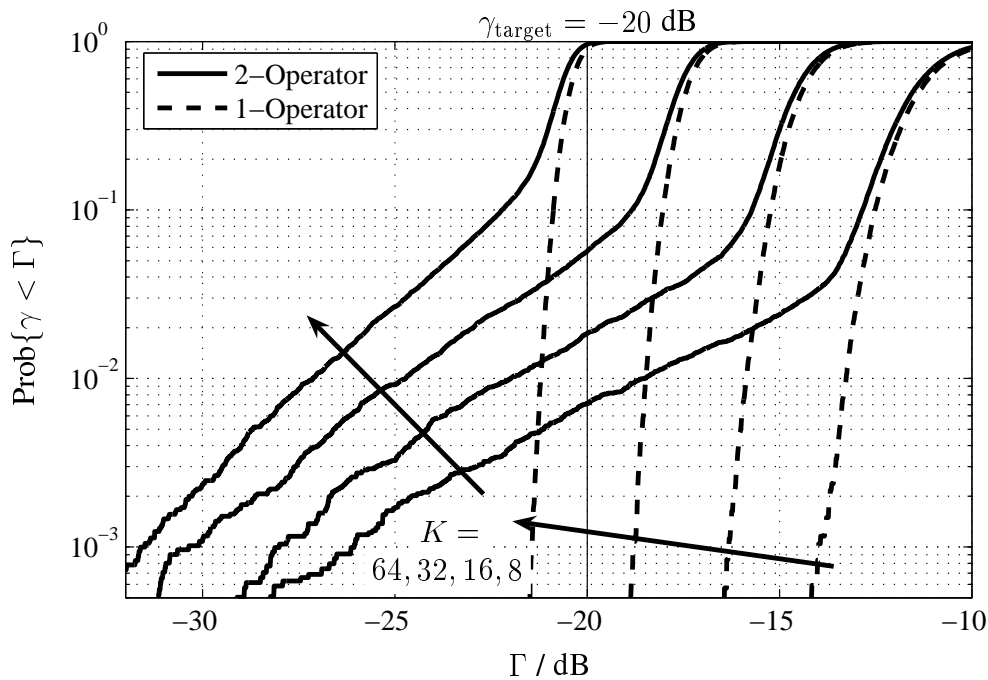


Bild 5.4. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall für unterschiedliche  $K$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $C = \text{const}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\min} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = 0$

als auch im Zwei-Operator-Fall etwas steiler, da mit mehr Teilnehmern pro Schnappschuß die Wahrscheinlichkeit steigt, daß sich von Schnappschuß zu Schnappschuß die Verteilung der SNRs  $\gamma$  nicht ändert. Der Knick der Verteilungsfunktion des SNRs  $\gamma_{\text{target}}$  wandert mit zunehmender Zahl  $K$  von Teilnehmern langsam in Richtung höherer Wahrscheinlichkeiten  $\text{Prob}\{\gamma < \Gamma\}$ , d.h. je höher die Zahl  $K$  der Teilnehmer, desto größer die Wahrscheinlichkeit, daß ein kritisches Interferenzszenario nach Abschnitt 1.6 auftritt, bei dem eine MS sehr nahe an einer BS des anderen Operators ist.

Während die unterschiedlichen Eigenschaften der Intraoperator-MAI und der Interoperator-MAI für das Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  aus den Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall erkennbar sind, sind diese für das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  nicht mehr zu unterscheiden, siehe Bild 5.5. Beim Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  äußert sich der Unterschied vom Zwei- zum Ein-Operator-Fall nur in einer höheren Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$ , da alle MSen in Outage — sowohl die im Mobilfunknetz des anderen Operators als auch die im eigenen Mobilfunknetz — mit maximaler Sendeleistung  $T_{\text{max}}$  senden.

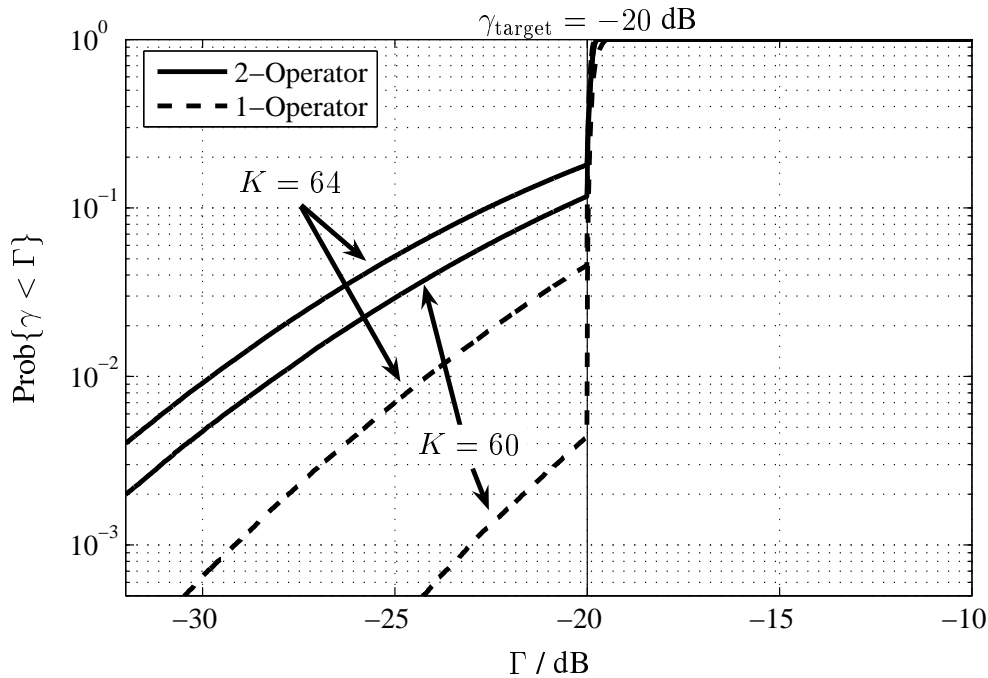


Bild 5.5. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall für unterschiedliche  $K$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = 0$

## 5.2.2 Analyse der Kapazität

Im vorliegenden Unterabschnitt 5.2.2 wird die Kapazität der betrachteten Mobilfunknetze untersucht. Das Ziel der Kapazitätsbetrachtungen ist dem Leser eine knappe, aber umfassende Übersicht über die Auswirkungen der wichtigsten Systemparameter auf die Kapazität zu vermitteln. Dabei ist besonders der Einfluß auf die Interoperator-MAI von Interesse. Eine solch umfassende Übersicht an Kapazitätsbetrachtungen in Kombination mit der Diskussion der Ursachen ist dem Verfasser der vorliegenden Dissertation aus der Literatur nicht bekannt.

Neben dem in Abschnitt 3.9 eingeführten Kapazitätskriterium Noise Rise  $\chi$  wird im folgenden auch das Kapazitätskriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  betrachtet. Die Kapazität  $C_{\text{out}}$  nach dem Kapazitätskriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  ist definiert als die Zahl  $K$  von Teilnehmern, die mit einer Outage-Wahrscheinlichkeit von bis zu

$$P_{\text{out}} = 5\% \quad (5.1)$$

versorgt werden können [3GP02].

Zum Bestimmen sowie zum Veranschaulichen der Kapazität  $C_{\text{out}}$  ist es sinnvoll, die Outage-Wahrscheinlichkeiten  $P_{\text{out}}$  über der Zahl  $K$  der Teilnehmer aufzutragen. Dazu werden in

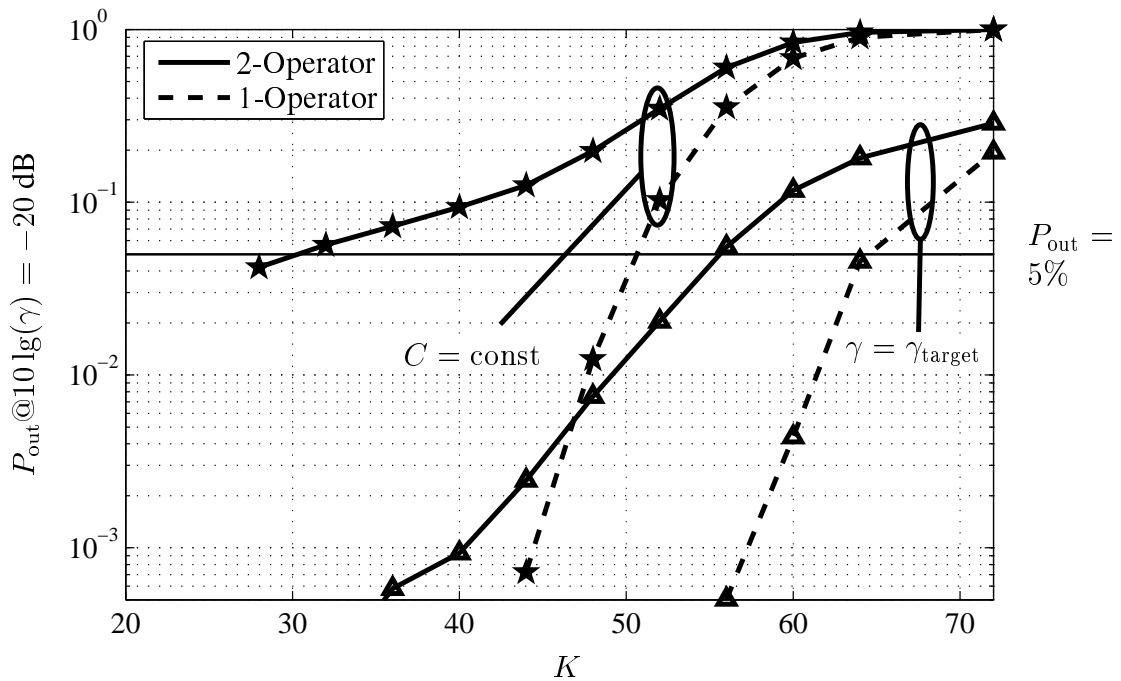


Bild 5.6. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall sowie für verschiedene Leistungsregelungsverfahren, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = 0$

Darstellungen der Verteilungsfunktionen des SNRs nach Bild 5.4 bzw. 5.5 die Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  bei dem erforderlichen SNR  $\gamma_{\text{target}}$  bestimmt und für verschiedene Zahlen  $K$  von Teilnehmern in Bild 5.6 übertragen. Hier kann die Kapazität  $C_{\text{out}}$  als die Zahl  $K$  von Teilnehmern abgelesen werden, die bei einer Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  von 5% versorgt werden können. Im folgenden wird für die Kapazität  $C_{\text{out}}$  im Ein-Operator-Fall die Bezeichnung  $C_{\text{out},1}$  und im Zwei-Operator-Fall die Bezeichnung  $C_{\text{out},2}$  verwendet. Der Kapazitätsverlust durch Interoperator-MAI nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  ist in der vorliegenden Arbeit definiert als

$$\Delta C_{\text{out}} = \frac{C_{\text{out},1} - C_{\text{out},2}}{C_{\text{out},1}}. \quad (5.2)$$

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Kapazitätsverlust ausschließlich für den relativen Verlust bezogen auf die Kapazität im Ein-Operator-Fall verwendet. Die Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  sowie die Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  werden für alle Ergebnisse im vorliegenden Unterabschnitt 5.2.2 in Tabelle 5.2 zusammengefaßt.

In Bild 5.6 werden unter Vernachlässigung des thermischen Rauschens  $N$  die beiden Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  und  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  verglichen. Es zeigt sich, daß man im Fall  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  eine wesentlich höhere Kapazität  $C_{\text{out}}$  erzielen kann als im Fall  $C = \text{const}$ ; im Ein-Operator-Fall ist  $C_{\text{out},1}$  etwa 63 bei  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  und 50 bei  $C = \text{const}$ , siehe Tabelle

Tabelle 5.2. Aufwärtsstrecke:  $C_{\text{out},1}$  bzw.  $C_{\text{out},2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$

Parameter	Wert	$C_{\text{out},1}$	$C_{\text{out},2}$	$\Delta C_{\text{out}}$	Ergebnisse aus Bild
Leistungsregelung	$C = \text{const}$	50,6	30,3	40,1 %	5.6
	$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	64,5	55,6	13,8 %	
$N$	$-\infty$	64,5	55,6	13,8 %	5.7
	-103	60,4	52,0	13,9 %	
$\xi$	0	60,4	60,4	0,0 %	5.8
	0,1	60,4	59,7	1,3 %	
	1	60,4	52,0	13,9 %	

5.2. Im Zwei-Operator-Fall degradiert die Kapazität  $C_{\text{out},2}$  im Vergleich zu  $C_{\text{out},1}$  im Ein-Operator-Fall durch die zusätzliche Interoperator-MAI. Der Kapazitätsverlust ist im Fall von  $C = \text{const}$  mit  $\Delta C_{\text{out}}$  von etwa 40 % wesentlich stärker als im Fall von  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  mit  $\Delta C_{\text{out}}$  von etwa 14 %. Das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  ist also resister gegenüber Interoperator-MAI als das Verfahren  $C = \text{const}$ , da MSen, die wegen der Interoperator-MAI bei  $C = \text{const}$  nicht mehr versorgt werden können, durch ein Erhöhen der Sendeleistung, wie es bei  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  möglich ist, das geforderte SNR  $\gamma_{\text{target}}$  in vielen Fällen noch erreichen können. Nur bei MSen am Zellrand, die bereits maximale Sendeleistung  $T_{\text{max}}$  verwenden, ist ein solches Erhöhen der Sendeleistung nicht möglich.

Das Vernachlässigen des thermischen Rauschens, d.h. die Annahme  $N$  gleich 0, in Unterabschnitt 5.2.1 und in Bild 5.6 ist eine vereinfachende Annahme interferenzbegrenzter Mobilfunksysteme, mit der die grundlegenden Effekte der Interoperator-MAI gezeigt werden können. Dabei hat wegen  $N$  gleich 0 die Wahl der gewünschten Empfangsleistung  $C_{\text{target}}$  in (3.75) bei dem Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  keinen Einfluß auf die Ergebnisse. Bei den betrachteten Makrozellen wird jedoch die Kapazität  $C_{\text{out}}$  durch das Vernachlässigen des thermischen Rauschens unterschätzt, da dieses erheblich zur gesamten Störung beiträgt. In Bild 5.7 wird der Einfluß des thermischen Rauschens auf die Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  gezeigt, aufgrund dessen bei der Annahme von  $N$  gleich -103 dB nach [3GP02] die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  von etwa 65 auf etwa 60 Teilnehmer abnimmt. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  wird durch das Vernachlässigen des Rauschens kaum beeinflusst.

Im Bild 5.8 wird der Fall betrachtet, daß die Dislokation  $\xi$  von 0 bis 1 verändert wird, wobei im folgenden ausschließlich das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  betrachtet wird. Im Fall von Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, sind die Outage-Wahrscheinlichkeiten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  im Ein- und Zwei-Operator-Fall quasi identisch. Daher ist im Maße der Simulationengenauigkeit kein Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  feststellbar, vgl. Tabelle 5.2. Bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 jedoch treten Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  in der Größenordnung von bis

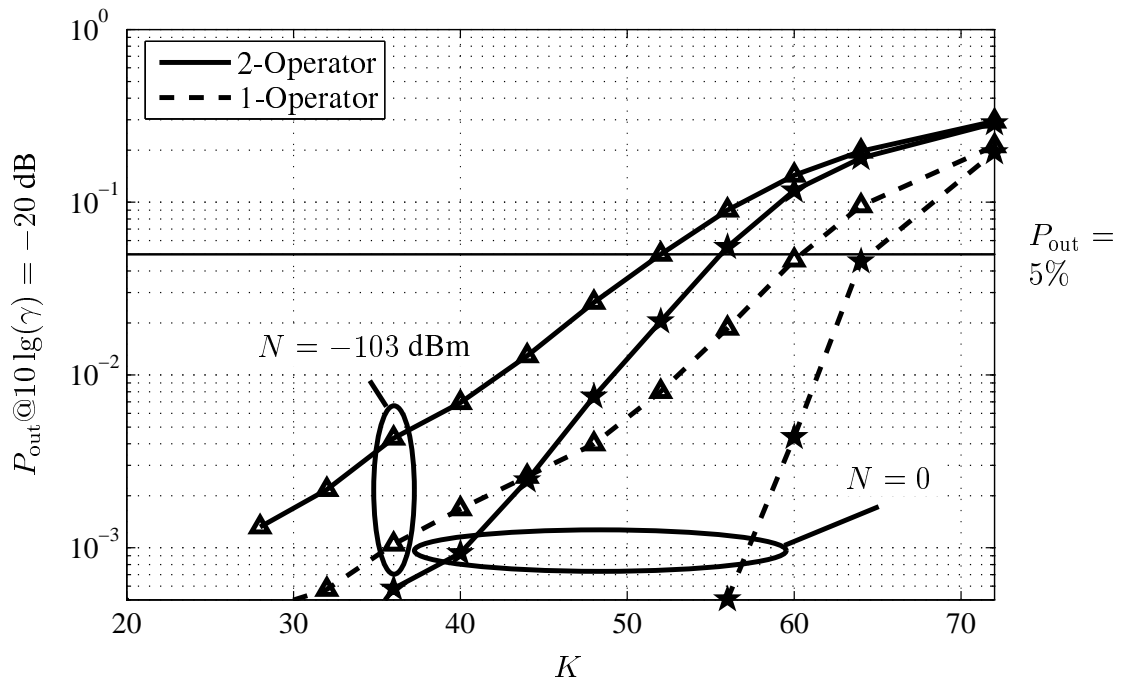


Bild 5.7. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $N$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB

zu 14 % bei der gewählten Parametrisierung auf. Solche hohen Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  werden durch den in Unterabschnitt 5.2.1 bereits gezeigten Effekt verursacht, daß eine MS des störenden Operators bei sehr hoher Sendeleistung sehr nahe an der BS des gestörten Operators sein kann. Für niedrige Dislokation  $\xi$  von 0,1 ist ein verhältnismäßig geringer Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  von 1,3 % feststellbar.

Da sich die Interoperator-Anderkanal-MAI für den Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, nicht von einer Intraoperator-Anderkanal-MAI unterscheidet, kann aus den Ergebnissen von Bild 5.8 die Schlußfolgerung gezogen werden, daß die Intrasystem-Intraoperator-Anderkanal-MAI einen verschwindend geringen Einfluß auf die Kapazität hat.

Für das in Abschnitt 3.9 eingeführte Kapazitätskriterium Noise Rise wird  $\chi$  nach (3.91) aus den Simulationen für eine bestimmte Zahl von Teilnehmern  $K$  bestimmt und über der Zahl  $K$  der Teilnehmer aufgetragen, siehe Bild 5.9. Die Kapazität  $C_\chi$  nach dem Kriterium Noise Rise wird bestimmt als die Zahl  $K$  von Teilnehmern, für die der simulativ ermittelte Noise Rise  $\chi$  den maximal erlaubten Noise Rise  $\chi_{\text{th}}$  erreicht. Der maximal erlaubte Noise Rise  $\chi_{\text{th}}$  wird für die betrachteten Makrozellen nach [3GP02] zu 6 dB angenommen. Im folgenden wird für die Kapazität  $C_\chi$  im Ein-Operator-Fall die Bezeichnung  $C_{\chi,1}$  und im Zwei-Operator-Fall die Bezeichnung  $C_{\chi,2}$  verwendet. Der Kapazitätsverlust durch Interoperator-MAI nach

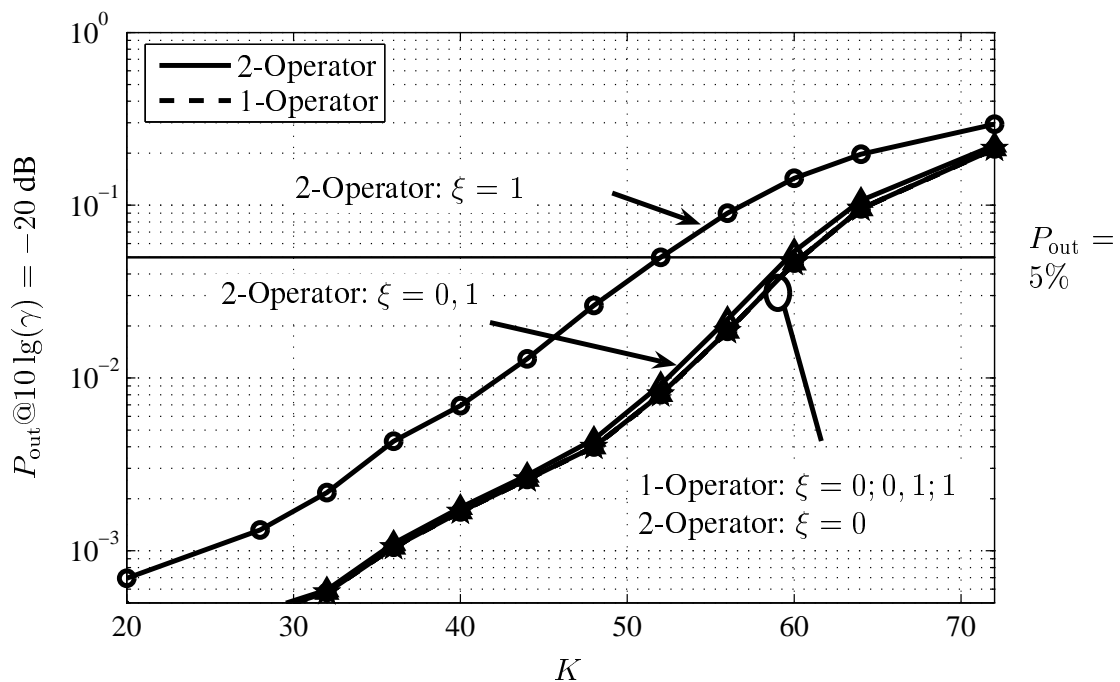


Bild 5.8. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\xi$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -103 \text{ dBm}$

dem Kriterium Noise Rise  $\chi$  ist in der vorliegenden Arbeit definiert als

$$\Delta C_\chi = \frac{C_{\chi,1} - C_{\chi,2}}{C_{\chi,1}}. \quad (5.3)$$

Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  wird relativ zur Kapazität  $C_{\chi,1}$  bestimmt. Die Kapazitäten  $C_{\chi,1}$  und  $C_{\chi,2}$  sowie die Kapazitätsverluste  $\Delta C_\chi$  werden für alle Ergebnisse im vorliegenden Unterabschnitt 5.2.2 in Tabelle 5.2 zusammengefaßt.

In Bild 5.9 wird nun die Kapazität  $C_\chi$  nach dem Kriterium Noise Rise  $\chi$  betrachtet. Die ermittelte Kapazität  $C_{\chi,1}$  beträgt etwa 43 Teilnehmer, im Vergleich zu  $C_{\text{out},1}$  von etwa 60 Teilnehmern. Dies Ergebnis zeigt, daß die beiden Kapazitätskriterien signifikante Unterschiede aufweisen. Dabei ist zu beachten, daß die ermittelten Kapazitäten sehr wesentlich von der Wahl des maximal erlaubten Noise Rise  $\chi_{\text{th}}$ , hier 6 dB, sowie von der Wahl der maximal erlaubten Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$ , hier 5 %, abhängen. Beim Vergleich von Bild 5.8 mit 5.9 zeigt sich ein ähnliches Verhalten der beiden Kapazitätskriterien Noise Rise  $\chi$  und Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  im Bezug auf den Kapazitätsverlust durch Interoperator-MAI bei zunehmender Dislokation  $\xi$ . Bei beiden Kriterien nimmt der Kapazitätsverlust mit steigender Dislokation  $\xi$  zu, wobei bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 der Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  mit etwa 20 % um einiges höher ist als der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  mit etwa 14 %.

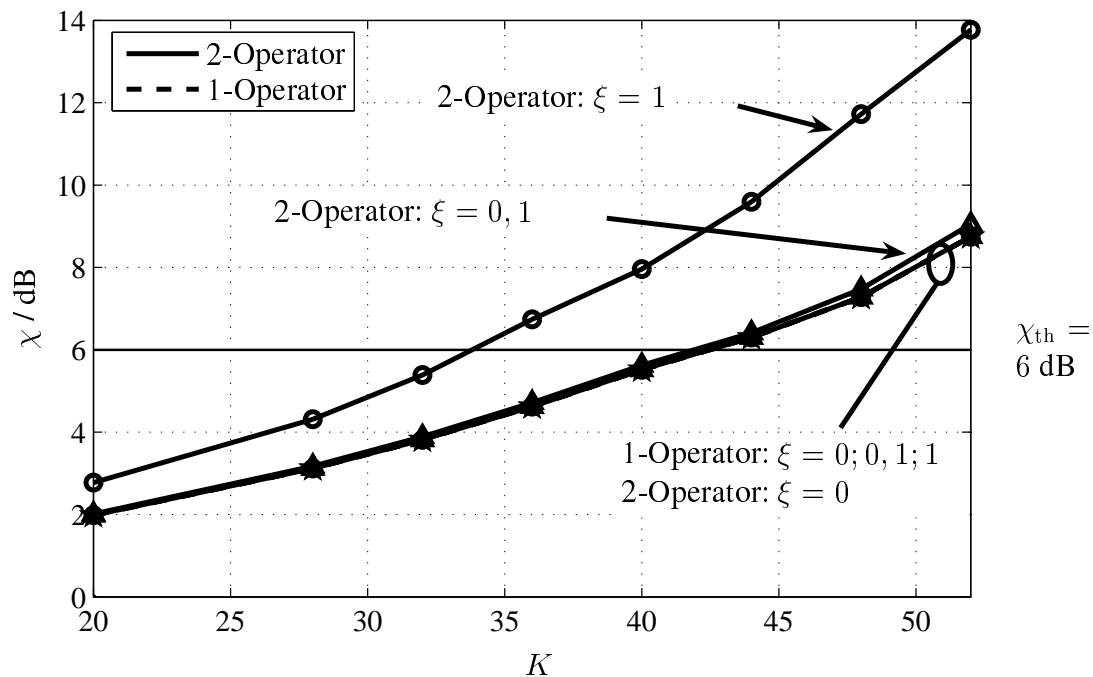


Bild 5.9. Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\xi$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -103 \text{ dBm}$

Tabelle 5.3. Aufwärtsstrecke:  $C_{\chi,1}$  bzw.  $C_{\chi,2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Noise Rise  $\chi$  sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_\chi$

Parameter	Wert	$C_{\chi,1}$	$C_{\chi,2}$	$\Delta C_\chi$	Ergebnisse aus Bild
$\xi$	0	42,5	42,5	0,0 %	5.9
	0,5	42,5	41,9	1,3 %	
	1	42,5	33,8	20,4 %	
$R_0$	577 m	42,4	41,5	2,1 %	5.10
	1154 m	42,4	39,4	7,2 %	
	2308 m	42,4	33,8	20,4 %	
$A_{\text{min}}$	60 dB	42,5	28,6	32,6 %	5.11
	70 dB	42,5	33,8	20,4 %	
	80 dB	42,5	38,9	8,5 %	
	90 dB	42,5	41,2	3,1 %	
$\Delta h_b$	15 m	42,5	33,8	20,4 %	5.12
	30 m	40,8	37,6	7,8 %	

Im folgenden wird in Anlehnung an [3GP02] nur noch das Kriterium Noise Rise  $\chi$  für die Aufwärtsstrecke betrachtet. Im Bild 5.10 wird die Kapazität  $C_\chi$  für verschiedene Zellradien  $R_0$  betrachtet. Die Kapazität  $C_{\chi,1}$  ändert sich nicht mit dem Zellradius  $R_0$ , der Kapa-

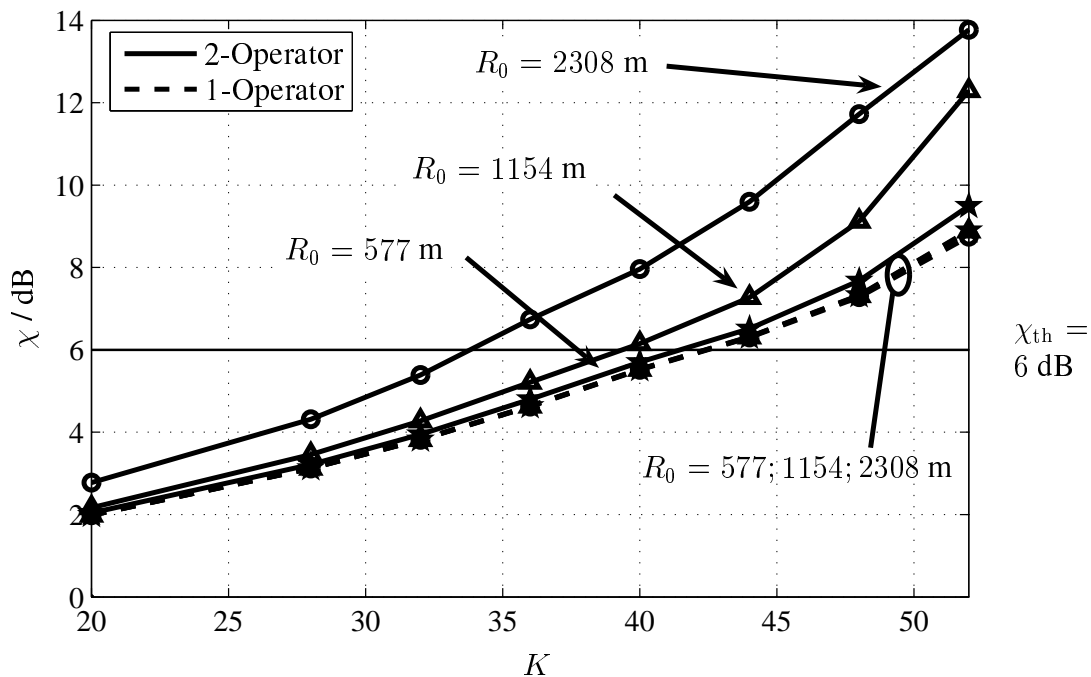


Bild 5.10. Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $R_0$ , Aufwärtsstrecke,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

zitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  jedoch steigt beim Erhöhen des Zellradius  $R_0$  sehr stark an, von etwa 2 % bei 577 m Zellradius  $R_0$  bis etwa 20 % bei 2308 m Zellradius  $R_0$ . Dieser Anstieg zeigt, daß das Problem der Interoperator-MAI vor allem bei hohen Zellradien  $R_0$  auftritt, da dann die Sendeleistungen der MSen am Zellrand wesentlich höher sind als bei niedrigen Zellradien  $R_0$ . Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können durch den Abgleich mit [3GP02] verifiziert werden, wo auch ein Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  von etwa 2% für einen Zellradius  $R_0$  von 577 m bei vergleichbarer Parametrisierung erzielt wird. Dort werden jedoch größere Zellradien  $R_0$  als 577 m nicht behandelt, während in der vorliegenden Arbeit vor allem vergleichsweise hohe Zellradien  $R_0$  bis zu 2308 m betrachtet werden.

Einen sehr wesentlichen Einfluß auf die Interoperator-MAI hat neben der Dislokation  $\xi$  und dem Zellradius  $R_0$  auch die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$ , siehe Abschnitt 3.3.2. Die Intraoperator-MAI hingegen wird durch den  $A_{\text{min}}$  nahezu überhaupt nicht beeinflusst, wie die Outage-Wahrscheinlichkeiten  $P_{\text{out}}$  des Ein-Operator-Falls in Bild 5.11 zeigen. MSen, die zur versorgenden BS die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  haben, verwenden nur geringe Sendeleistung und beeinflussen somit die Intraoperator-MAI kaum. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  ist jedoch nur für sehr hohes  $A_{\text{min}}$  von 90 dB mit etwa 3 % relativ gering; sehr kleine Werte für den  $A_{\text{min}}$  von etwa 60 dB verursachen eine sehr hohe Interoperator-MAI und damit extrem hohen Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  über 30 %. Der Grund



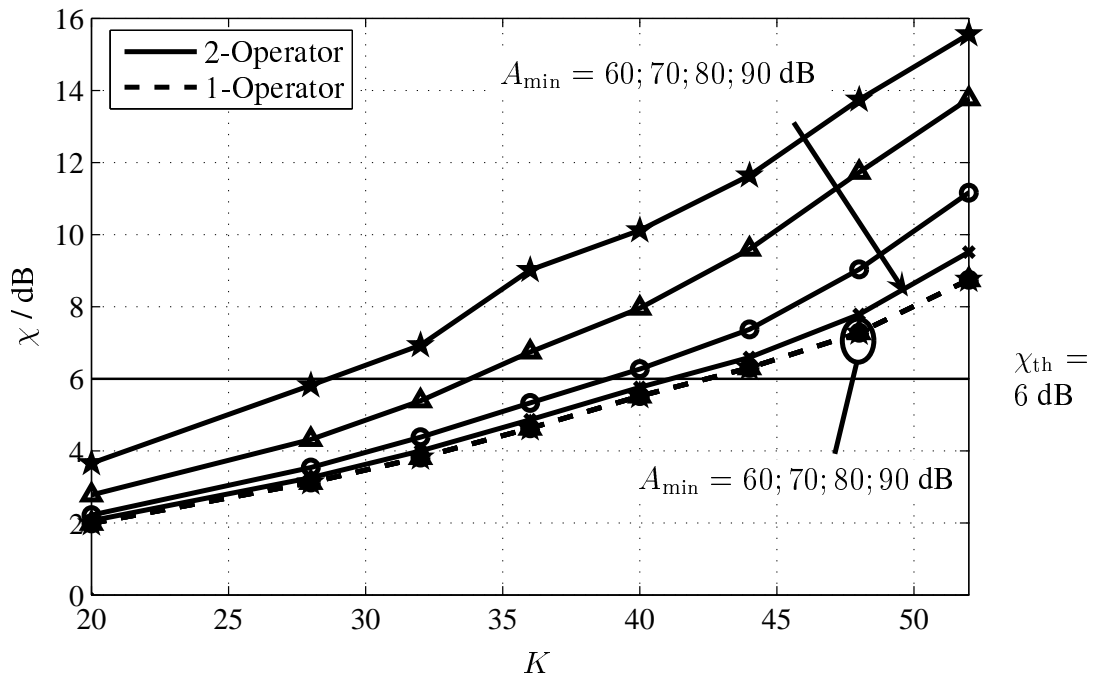


Bild 5.11. Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $A_{min}$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $\delta_{ACIR} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

für die hohe Interoperator-MAI ist, daß eine der gestörten BS nahegelegene MS des anderen Operators mit sehr geringer Funkfelddämpfung  $A$  empfangen wird. Die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{min}$  hängt von der Richtcharakteristik der verwendeten Antenne sowie von deren Höhe  $h_r + \Delta h_b$  über Grund ab [All99]. Nach [3GP02] kann bei der betrachteten Antennencharakteristik und einem  $\Delta h_b$  von 15 m  $A_{min}$  zu 70 dB angenommen werden.

In Bild 5.11 ist der Kurvenparameter  $A_{min}$  und die Antennenhöhe  $\Delta h_b$  ist fest. In Bild 5.12 ist der Kurvenparameter  $\Delta h_b$  und  $A_{min}$  ist fest. Anhand der Bilder 5.11 und 5.12 kann man den Gesamteinfluß des Veränderns der beiden Parameter abschätzen. In Bild 5.12 sind zwei Effekte feststellbar: Zum einen bewirkt das Vergrößern der Antennenhöhe  $\Delta h_b$  einen höheren Noise Rise  $\chi$  und damit geringere Kapazität  $C_{\chi,1}$ , da ferne MSen besser an den BSen empfangen werden können und so die Intraoperator-MAI-Leistung ansteigt. Diese MSen an den Zellrändern können zwar auch niedrigere Sendeleistung verwenden, jedoch wirkt der Effekt der erhöhten Intraoperator-MAI durch bessere Ausbreitungseigenschaften stärker auf das SNR  $\gamma$ , da dies die Interzell-MAI von vielen MSen erhöht. Zum anderen bewirkt das Vergrößern der Antennenhöhe  $\Delta h_b$  eine geringere Interoperator-MAI und damit geringeren Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$ , da für die Interoperator-MAI die geringeren Sendeleistungen der MSen an den Zellrändern einen mindernden Einfluß haben.

Aus den Bildern 5.11 und 5.12 ist zusammenfassend zu entnehmen, daß sich eine große

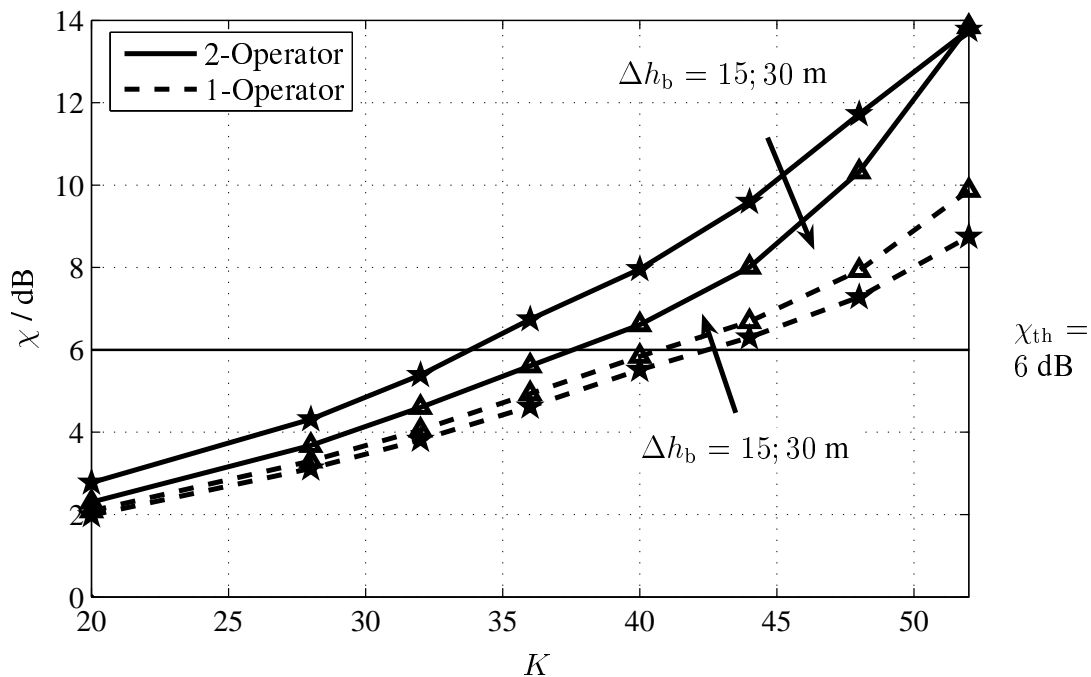


Bild 5.12. Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\Delta h_b$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

Antennenhöhe  $\Delta h_b$  mindernd auf den Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  durch Interoperator-MAI auswirkt, ungünstigerweise aber auch die Kapazität  $C_{\chi,1}$  vermindert. Ein Abwägen dieser beiden Effekte ist also erforderlich, bei dem auch berücksichtigt werden muß, daß eine sehr große Antennenhöhe in der Öffentlichkeit unter Umständen nur sehr schwer durchsetzbar ist.

## 5.3 Abwärtsstrecke

### 5.3.1 Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$

In Bild 5.13 werden für den Ein-Operator-Fall in der Abwärtsstrecke die verschiedenen in Abschnitt 3.7 eingeführten Leistungsregelungsverfahren verglichen. Während bei der Aufwärtsstrecke das Leistungsregelungsverfahren  $C = \text{const}$  wesentlich besser ist als das Verfahren  $T = \text{const}$ , siehe Bild 5.1, ist dies in der Abwärtsstrecke genau umgekehrt, siehe Bild 5.13. Der Grund ist, daß das in Abschnitt 3.7 eingeführte Ziel der optimalen Leistungsregelung, bei der möglichst alle Teilnehmerverbindung am Empfänger mit dem gleichen SNR  $\gamma$  empfangen werden können, durch das Verfahren  $T = \text{const}$  in der Abwärtsstrecke besser angenähert wird als durch das Verfahren  $C = \text{const}$ . Während beim Verfahren

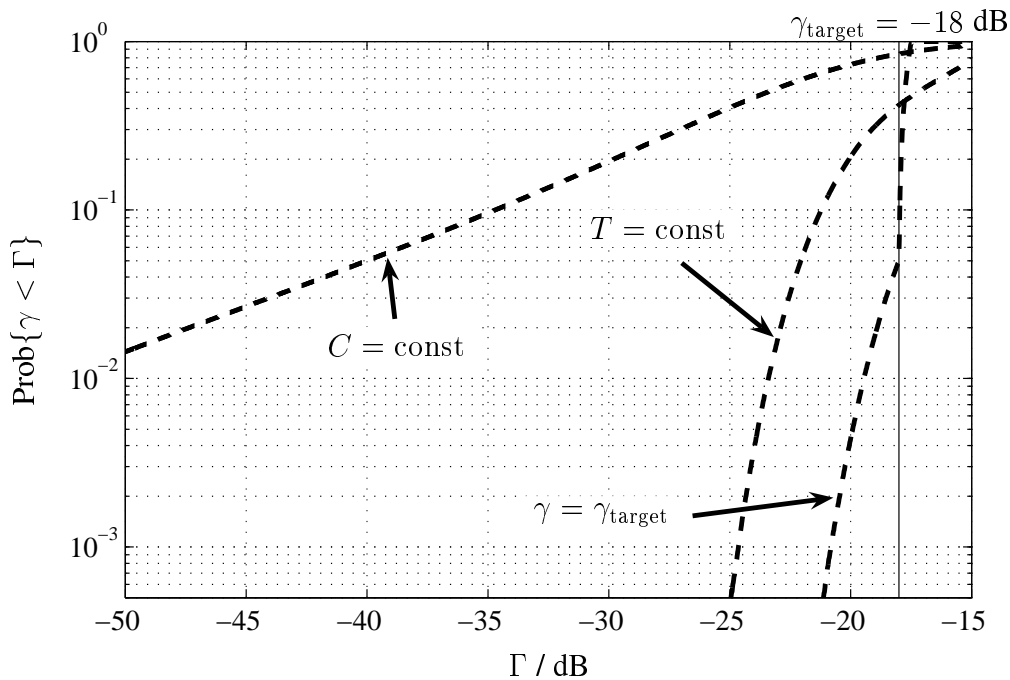


Bild 5.13. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein-Operator-Fall bei verschiedenen Leistungsregelungsverfahren, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\Delta h_b = 15$  m,  $K = 64$ ,  $A_{\min} = 70$  dB,  $N = 0$

$C = \text{const}$  MSen nahe ihrer versorgenden BS aufgrund hoher Sendeleistung der BS für weit entfernte MSen im Verhältnis zur Nutzleistung  $C$  sehr hohe Intrazell-MAI  $I^{\text{IrZ}}$  erfahren, haben beim Verfahren  $T = \text{const}$  alle MSen, ob nah oder fern zur versorgenden BS, das gleiche Verhältnis  $C/I^{\text{IrZ}}$  von Nutzleistung  $C$  zu Intrazell-MAI  $I^{\text{IrZ}}$ .

Wegen der Erkenntnisse aus Bild 5.13 wird in Bild 5.14 das Verfahren  $T = \text{const}$  betrachtet, um die Auswirkungen der Interoperator-MAI in der Abwärtsstrecke zu veranschaulichen. Ähnlich wie bei der Aufwärtsstrecke in Bild 5.2 erkennt man auch bei der Abwärtsstrecke den wesentlich flacheren Verlauf der Verteilungsfunktion des Verhältnisses  $C/I^{\text{IrO}}$  von Nutzleistung  $C$  zu Interoperator-MAI  $I^{\text{IrO}}$  im Vergleich zur Verteilungsfunktion für den Ein-Operator-Fall, die ausschließlich auf Interoperator-MAI beruht. Die auftretenden sehr niedrigen Werte von  $C/I^{\text{IrO}}$  werden verursacht durch Fälle, in denen eine  $MS_B$  sehr nahe an einer  $BS_A$  ist und gleichzeitig aufgrund der hohen Distanz zu ihrer versorgenden  $BS_B$  bedingt durch die hohe Dislokation  $\xi$  nur geringe Empfangsleistung hat, siehe Bild 5.15. Aus Bild 5.14 kann abgelesen werden, daß für etwa 0,5 % aller MSen die Interoperator-MAI genauso groß ist wie die Intraoperator-MAI. Der charakteristische abknickende Verlauf der Verteilungsfunktion der SNRs  $\gamma$  im Zwei-Operator-Fall in Bild 5.14 wird ebenso wie in der Aufwärtsstrecke auch in der Abwärtsstrecke durch die Überlagerung der beiden verschiedenen MAI-Arten Intraoperator-MAI und Interoperator-MAI verursacht. Im Vergleich zur

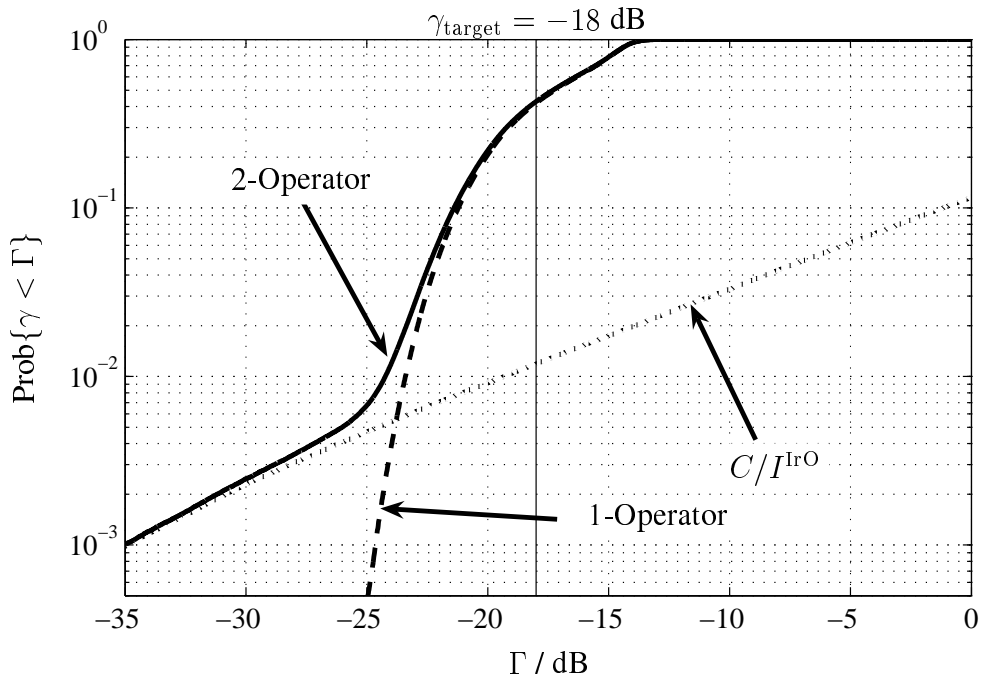


Bild 5.14. Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall sowie Darstellung der Interoperator-MAI, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $T = \text{const}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $K = 64$ ,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = 0$

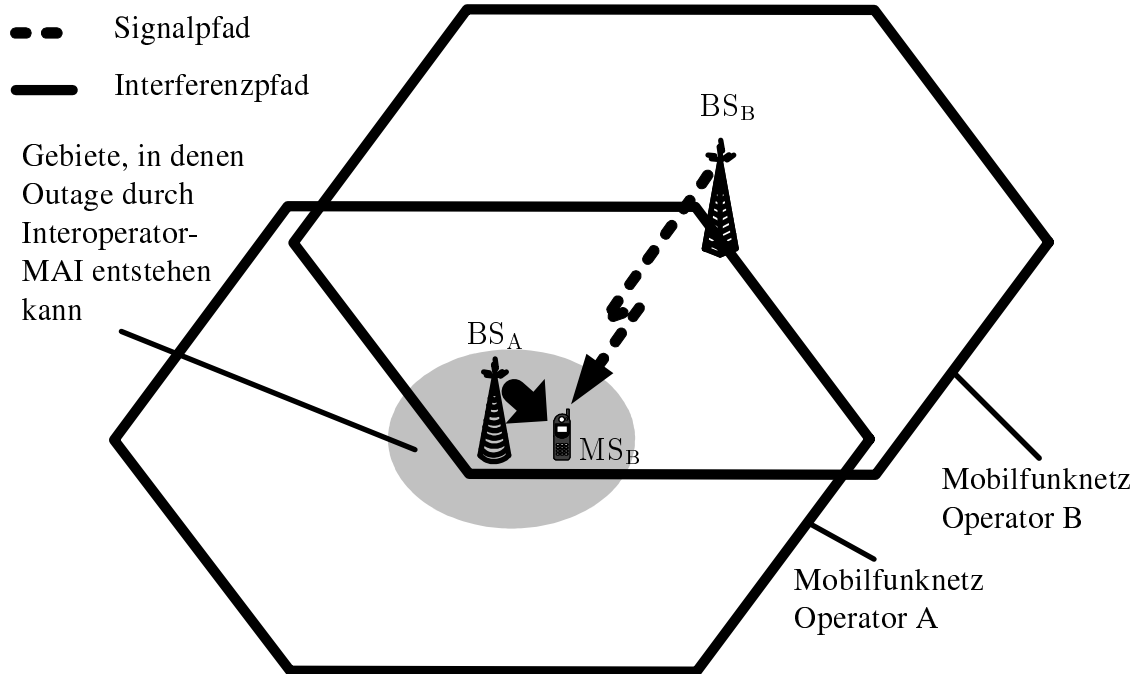


Bild 5.15. Kritisches Koexistenzszenario in der Abwärtsstrecke

Tabelle 5.4. Abwärtsstrecke:  $C_{\text{out},1}$  bzw.  $C_{\text{out},2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$

Parameter	Wert	$C_{\text{out},1}$	$C_{\text{out},2}$	$\Delta C_{\text{out}}$	Ergebnisse aus Bild
Leistungsregelung	$T = \text{const}$	25,8	24,2	6,2 %	5.16
	$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	64,0	62,4	2,5 %	
$N$	$-\infty$	64,0	62,4	2,5 %	5.17
	-99	63,4	61,3	3,4 %	
$\xi$	0	63,4	63,4	0,0 %	5.18
	1	63,4	61,3	3,4 %	
$R_0$	577 m	64,0	63,2	1,2 %	5.19
	1154 m	64,0	62,6	2,2 %	
	2308 m	63,4	61,3	3,4 %	
$A_{\text{min}}$	60 dB	63,4	61,2	3,4 %	5.20
	70 dB	63,4	61,3	3,4 %	
	80 dB	63,4	61,4	3,2 %	
	90 dB	63,4	62,0	2,2 %	
$\Delta h_b$	15 m	63,4	61,3	3,4 %	5.21
	30 m	60,6	59,3	2,2 %	

Aufwärtsstrecke ist in der Abwärtsstrecke die Zahl der Fälle, in denen die Interoperator-MAI genauso hoch wird wie in der Abwärtsstrecke, um etwa den Faktor 10 höher, vgl. die Bilder 5.2 und 5.14. Dieses Ergebnis ist zwar absolut gesehen nicht allgemeingültig, da es von der Parametrisierung der Simulation beeinflusst wird, die Tendenz zu wesentlich höherer Beeinträchtigung der Aufwärtsstrecke durch Interoperator-MAI im Vergleich zur Abwärtsstrecke aber ist allgemein gegeben. Der Grund hierfür ist, daß in der Aufwärtsstrecke eine einzelne  $MS_B$  die Outage vieler  $MS_A$ en am Zellrand verursachen kann, während in der Abwärtsstrecke nur vergleichsweise wenige  $MS_B$ en durch Interoperator-MAI in Outage geraten können, wenn sie sehr nahe an der  $BS_A$  sind.

### 5.3.2 Analyse der Kapazität

Im vorliegenden Unterabschnitt 5.3.2 wird die Kapazität der betrachteten Mobilfunknetze für die Abwärtsstrecke untersucht. Dabei wird nur das in Unterabschnitt 5.3.2 eingeführte Kapazitätskriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  betrachtet, so wie in [3GP02] vorgesehen. Die Ergebnisse aus dem vorliegenden Unterabschnitt 5.3.2 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  werden in Tabelle 5.4 zusammengefaßt. In Bild 5.16 werden unter Vernachlässigung des thermischen Rauschens  $N$  die beiden Lei-

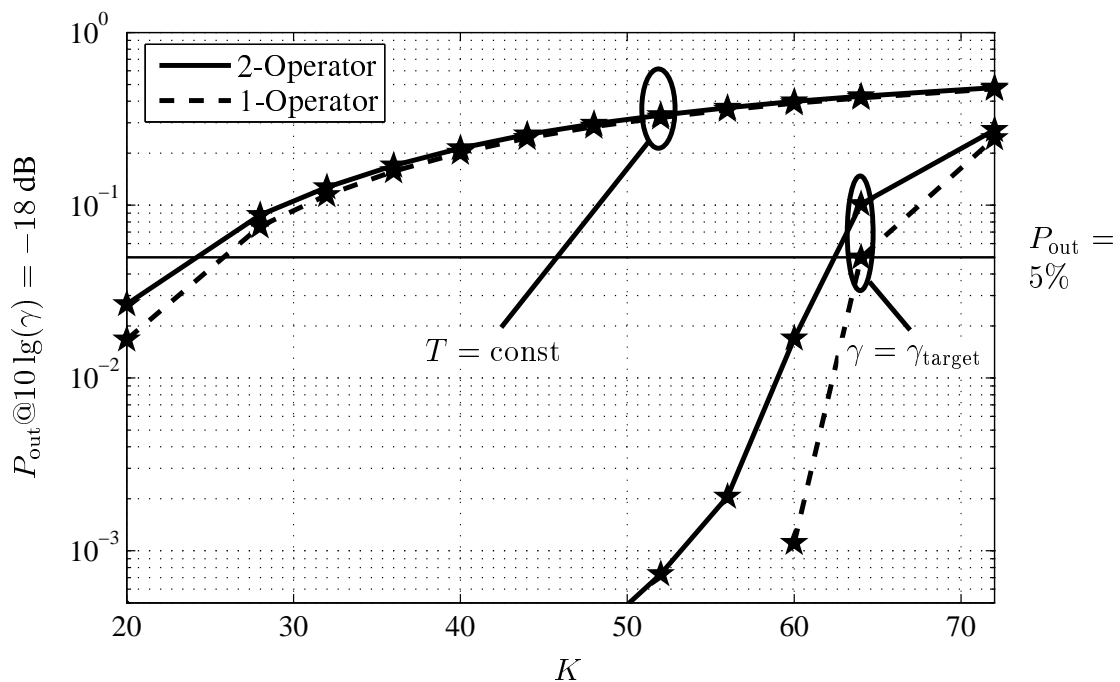


Bild 5.16. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall sowie für verschiedene Leistungsregelungsverfahren, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = 0$

Leistungsregelungsverfahren  $T = \text{const}$  und  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  verglichen. Das Leistungsregelungsverfahren  $T = \text{const}$  kann nur eine sehr geringe Kapazität  $C_{\text{out},1}$  von etwa 26 Teilnehmern erzielen, im Vergleich zu 64 Teilnehmern bei  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , siehe Tabelle 5.4. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI ist im Vergleich zur Aufwärtsstrecke, siehe Tabelle 5.2, für den Fall des Leistungsregelungsverfahrens  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  bei der Abwärtsstrecke mit 2,5 % sehr gering. Der Einfluß des thermischen Rauschens  $N$  in der Abwärtsstrecke wird in Bild 5.17 für das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  betrachtet; man erkennt eine geringe Beeinträchtigung der verfügbaren Kapazität  $C_{\text{out},1}$  von unter 1% durch das thermische Rauschen  $N$ .

Im Bild 5.18 wird die Dislokation  $\xi$  von 0 und 1 gezeigt, wobei im folgenden ausschließlich das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  betrachtet wird. Im Fall maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 ist der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  mit 3,4 % bei der betrachteten Abwärtsstrecke wesentlich geringer als bei der Aufwärtsstrecke mit etwa 14 %, vgl. Tabelle 5.2. Dieser Unterschied ist auf den in Unterabschnitt 5.3.1 beschriebenen Effekt zurückzuführen, daß in der Aufwärtsstrecke wesentlich mehr MSen durch von Interoperator-MAI verursachte Outage betroffen sind als in der Abwärtsstrecke. Für die Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, ist ebenso wie in der Aufwärtsstrecke der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  verschwindend gering, so daß die Kurven der Outage-Wahrscheinlichkeit im Ein- und Zwei-Operator-Fall exakt aufeinander

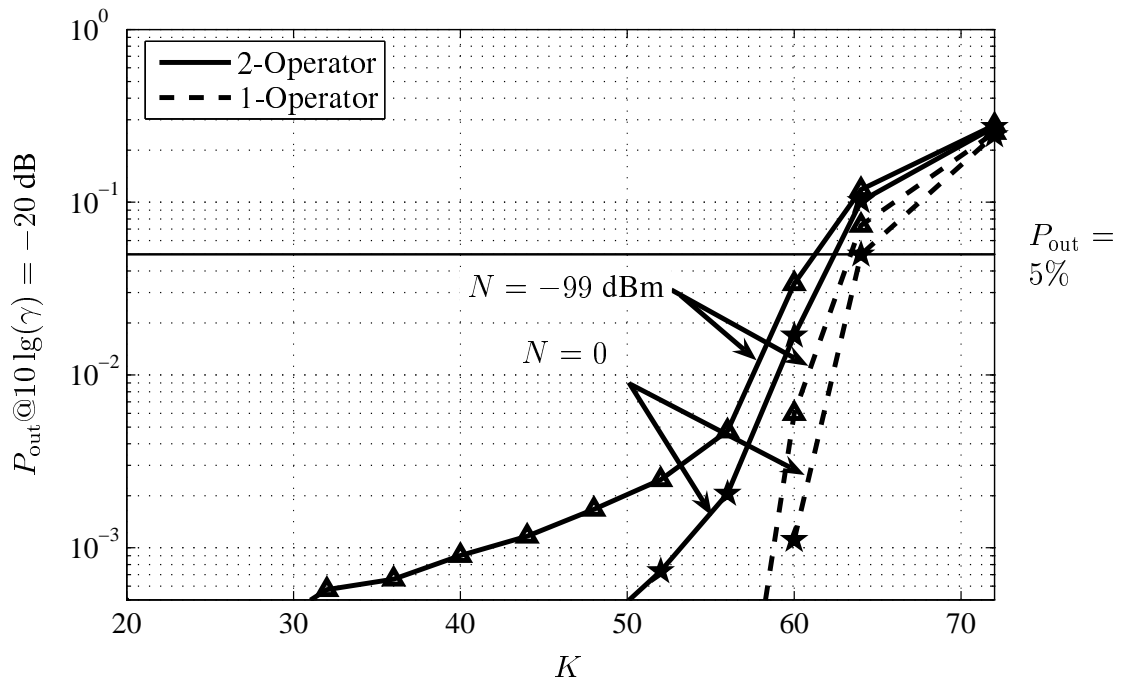


Bild 5.17. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $N$ , Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB

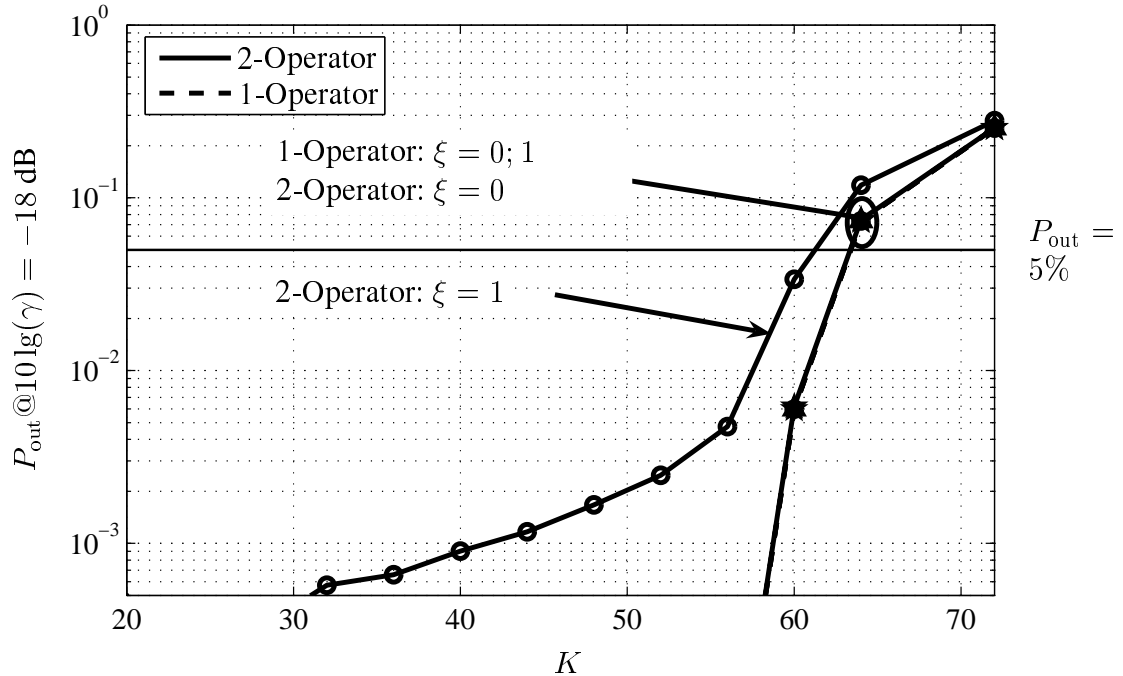


Bild 5.18. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\xi$ , Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

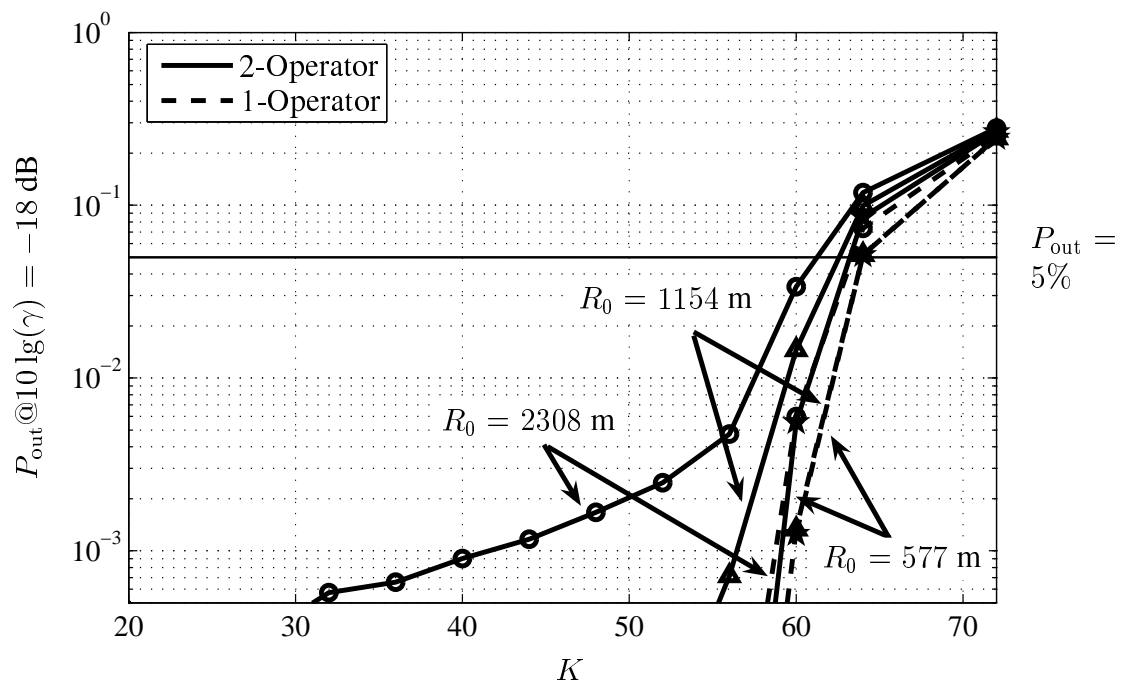


Bild 5.19. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $R_0$ , Abwärtsstrecke,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

liegen. Da sich die Interoperator-Anderkanal-MAI für den Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, nicht von einer Intraoperator-Anderkanal-MAI unterscheidet, kann aus Bild 5.18 die Schlußfolgerung gezogen werden, daß die Intrasystem-Intraoperator-Anderkanal-MAI einen verschwindend geringen Einfluß auf die Kapazität hat.

Im Bild 5.19 wird die Kapazität  $C_{\text{out}}$  für verschiedene Zellradien  $R_0$  betrachtet. Die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  bleibt für die Zellradien  $R_0 =$  von 577 und 1054 m unverändert, bei 2308 m ist eine geringe Verminderung feststellbar. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI ist für 577 m mit etwa 1 % sehr gering und erhöht sich auf über 3 % bei 2308 m. Somit ist der Einfluß des Zellradius  $R_0$  auf die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  sowie den Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  für Ab- und Aufwärtsstrecke vergleichbar.

Der Parameter  $A_{\text{min}}$  wird für die Abwärtsstrecke in Bild 5.20 betrachtet. Wie in der Aufwärtsstrecke, vgl. Unterabschnitt 5.2.2, hat dieser Parameter auch in der Abwärtsstrecke keinen Einfluß auf die Kapazität  $C_{\text{out},1}$ . Im Zwei-Operator-Fall ist jedoch ein deutlicher Einfluß des  $A_{\text{min}}$  zu erkennen, der sich vor allem bei niedrigen Outage-Wahrscheinlichkeiten unter 0,5 % in einer deutlichen Degradation der Zahl  $K$  der versorgbaren Teilnehmern äußert, wenn das  $A_{\text{min}}$  von 90 dB auf 60 dB vermindert wird. Da für die Kapazität die Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  von 5 % relevant ist, ist beim Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  nur ein relativ kleiner Einfluß des  $A_{\text{min}}$  feststellbar.



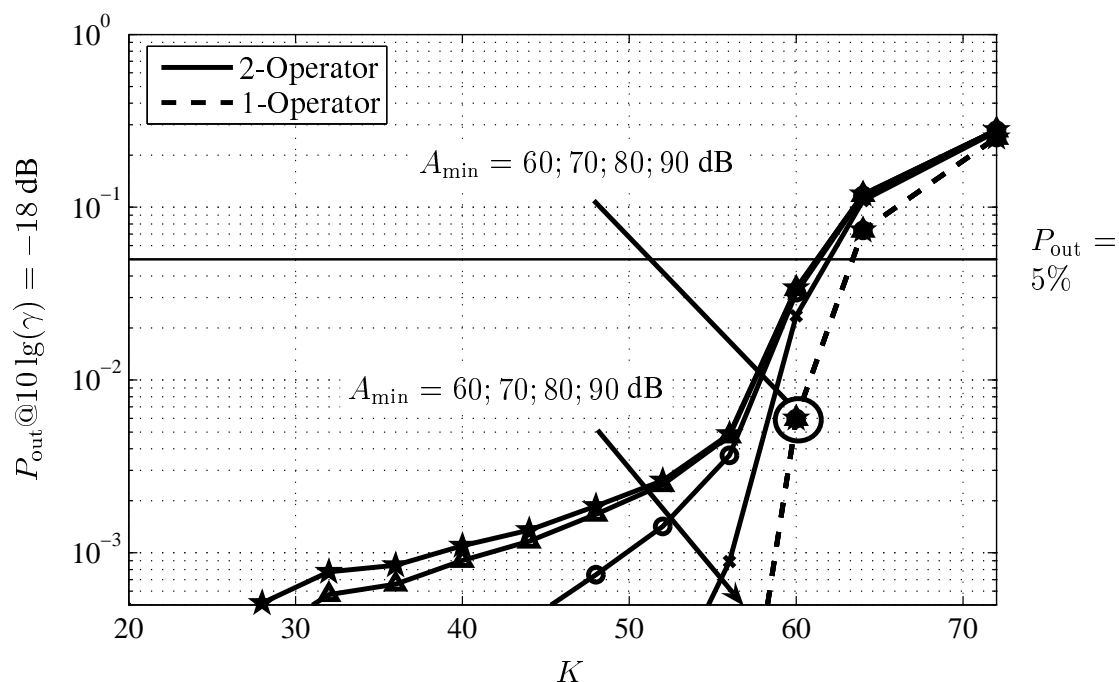


Bild 5.20. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $A_{\text{min}}$ , Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308\text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15\text{ m}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33\text{ dB}$ ,  $N = -99\text{ dBm}$

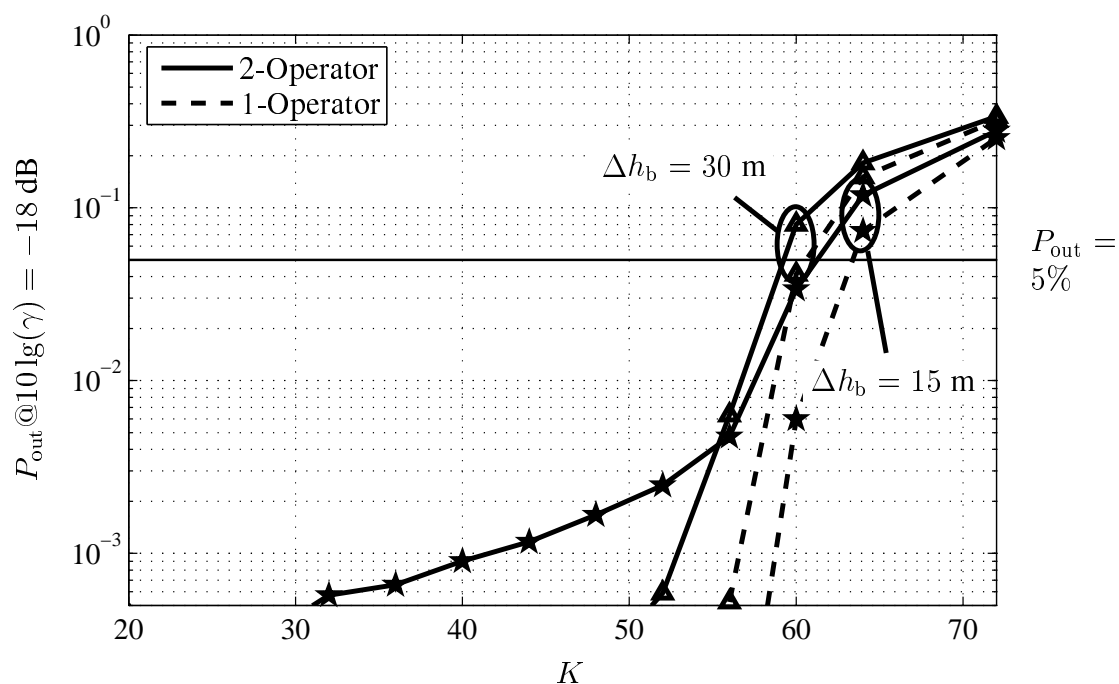


Bild 5.21. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\Delta h_b$ , Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308\text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $A_{\text{min}} = 70\text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33\text{ dB}$ ,  $N = -99\text{ dBm}$

Ändert man die Antennenhöhe  $\Delta h_b$ , so zeigt sich auch bei der Kapazität  $C_{\text{out}}$  nach Bild 5.21 für die Abwärtsstrecke ein ähnlicher Effekt wie bei der Kapazität  $C_\chi$  nach Bild 5.12 für die Aufwärtsstrecke: Das Erhöhen von  $\Delta h_b$  bewirkt eine geringere Kapazität  $C_{\text{out},1}$  aufgrund erhöhter Intraoperator-MAI. Gleichzeitig vermindert sich aber der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI, da geringere Sendeleistungen aufgewendet werden müssen.

## 5.4 Einfluß von Techniken zur Intraoperator-MAI-Minderung auf die Interoperator-MAI

### 5.4.1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Abschnitt 5.4 wird auf verschiedene Techniken zum Mindern des Einflusses von Intraoperator-MAI auf die Interoperator-MAI eingegangen. Die im folgenden betrachteten Techniken sind, wie schon in Abschnitt 1.6 angesprochen, Schutzbänder, der SHO, sowie der für den IFHO erforderlichen CM. Für alle diese Techniken sind zahlreiche Untersuchungen der Auswirkungen auf den Ein-Operator-Fall durchgeführt worden, vergleiche Abschnitt 1.6. Untersuchungen über die Auswirkungen der Techniken CM und SHO auf die Interoperator-MAI sind dem Verfasser jedoch nicht bekannt.

### 5.4.2 Schutzbänder

Zwischen den Frequenzkanälen in einem Mobilfunksystem kann Anderkanal-MAI auftreten, vgl. Abschnitt 3.4. Bei Kollokation der BSen, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, für die Mobilfunknetze, in denen die betrachteten Frequenzkanäle eingesetzt werden, wie z.B. wenn es sich um Frequenzkanäle ein und desselben Operators handelt, ist die Anderkanal-MAI sehr gering, vgl. die Unterabschnitte 5.2.2 und 5.3.2. Diesen Ergebnissen liegt der nominelle Frequenzabstand  $\Delta f_a$  von 5 MHz für zwei direkt benachbarte Frequenzkanäle zugrunde, für den das betrachtete  $\delta_{\text{ACIR}}$  von 33 dB aus Tabelle 3.3 abgeleitet wird, wobei die in der BS verursachte Anderkanal-MAI nach (3.22) und (3.23) vernachlässigbar ist.

Prinzipiell kann der Frequenzabstand  $\Delta f_a$  der betrachteten Frequenzkanäle mit dem Ziel eines geringeren Verbrauchs an Frequenzspektrum vermindert werden, was jedoch die auftretende Anderkanal-MAI erhöht, vgl. die spektrale Maske der erlaubten Störleistungsdichte in Abhängigkeit vom Frequenzabstand  $\Delta f_a$  nach Tabelle 3.2. Im Gegenzug kann Anderkanal-MAI prinzipiell durch das Erhöhen des Frequenzabstandes  $\Delta f_a$  von störendem und

Tabelle 5.5. Schutzbänder:  $C_{\chi,1}$  bzw.  $C_{out,1}$  nach den Kriterien Noise Rise  $\chi$  bzw. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  für den Ein-Operator-Fall sowie  $C_{\chi,2}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Zwei-Operator-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  bzw.  $\Delta C_{out}$

Parameter	Wert	Aufwärtsstrecke			Abwärtsstrecke			Ergebnisse aus Bildern
		$C_{\chi,1}$	$C_{\chi,2}$	$\Delta C_{\chi}$	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$	$\Delta C_{out}$	
$\delta_{ACIR}$	30 dB	42,5	28,6	32,6 %	63,4	59,9	5,5 %	5.23;5.22
	33 dB	42,5	33,8	20,4 %	63,4	61,3	3,4 %	
	43 dB	42,5	41,4	2,6 %	63,4	62,9	0,7 %	

gestörtem Frequenzkanal vermindert werden, was dem Einführen von Schutzbändern entspricht.

Im vorliegenden Unterabschnitt 5.4.2 wird der Einfluß des Frequenzabstandes  $\Delta f_a$  der Frequenzbänder verschiedener Operatoren auf die Interoperator-MAI bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 der BSen der betrachteten Mobilfunknetze untersucht. Solche Untersuchungen werden in ähnlicher Form auch in [3GP02] gezeigt. In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der Schutzbänder trotzdem der Vollständigkeit halber diskutiert, da Schutzbänder eine grundlegende Methode zum Vermindern von Anderkanal-MAI sind.

Verschiedene Frequenzabstände  $\Delta f_a$  werden im folgenden durch verschiedene Werte des  $\delta_{ACIR}$  modelliert. Dazu wird zusätzlich zu dem in den Unterabschnitten 5.2.2 und 5.3.2 verwendeten Wert von 33 dB für  $\Delta f_a$  gleich 5 MHz ein  $\delta_{ACIR}$  von 43 dB betrachtet, das nach Tabelle 3.3 ein  $\Delta f_a$  von 10 MHz modelliert. Weiterhin wird ein  $\delta_{ACIR}$  von 30 dB betrachtet, um den Einfluß des Verminderns von  $\Delta f_a$  auf Werte unter 5 MHz zu betrachten.

Die Ergebnisse des vorliegenden Unterabschnitts 5.4.2 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\chi,1}$  und  $C_{\chi,2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  für den Fall der Aufwärtsstrecke und bzgl. der Kapazitäten  $C_{out,1}$  und  $C_{out,2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{out}$  für den Fall der Abwärtsstrecke werden in Tabelle 5.5 zusammengefaßt.

In Bild 5.22 wird zunächst die Kapazität  $C_{\chi}$  nach dem Kriterium Noise Rise  $\chi$  für den Fall der Aufwärtsstrecke betrachtet. Im Vergleich zu dem in Unterabschnitt 5.2.2 betrachteten Wert  $\delta_{ACIR}$  von 33 dB bewirkt ein geringeres  $\delta_{ACIR}$  von 30 dB eine wesentlich höhere Anderkanal-MAI und damit ein Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\chi}$  von etwa 33 % statt etwa 20 % bei  $\delta_{ACIR}$  von 33 dB. Ein signifikantes Erhöhen des  $\delta_{ACIR}$  auf 43 dB vermindert den Kapazitätsverlust auf etwa 3 %. Dem Verdoppeln des Frequenzabstandes  $\Delta f_a$  von 5 auf 10 MHz, das auch als Einfügen eines Schutzbandes der Breite 5 MHz angesehen werden kann, entspricht ein Halbieren des genutzten Frequenzspektrums. Diesem Halbieren steht ein Erhöhen der Kapazität  $C_{\chi,2}$  von 34 auf etwa 40 gegenüber. Daher kann das Einführen von

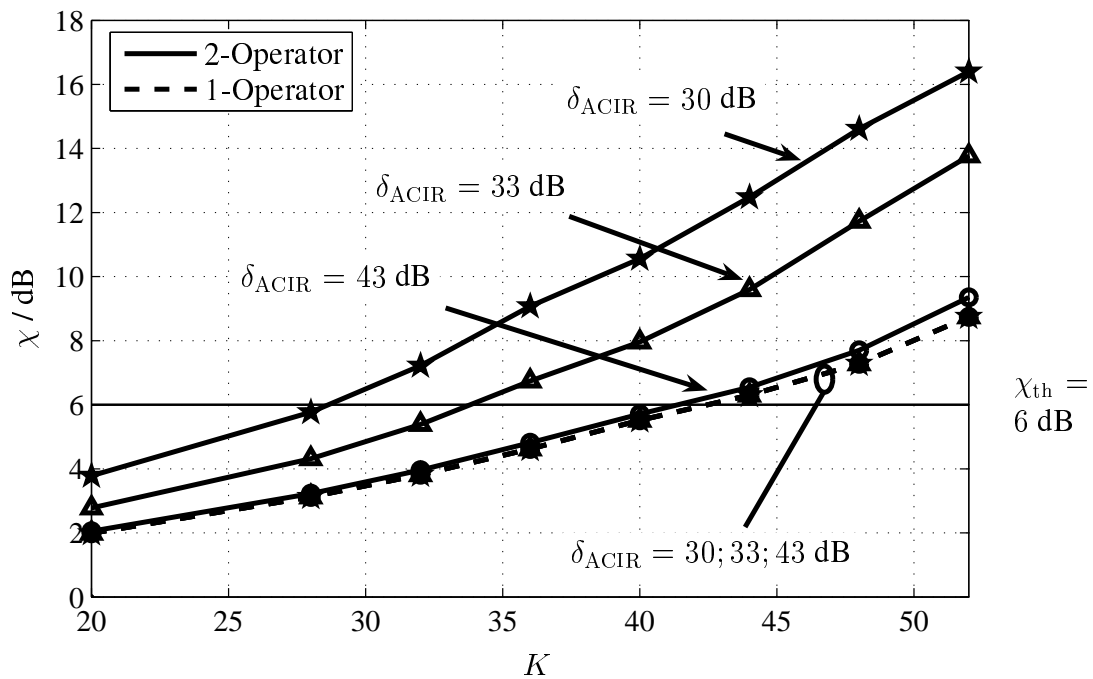


Bild 5.22. Schutzbänder: Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\delta_{ACIR}$ , Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $N = -103$  dBm

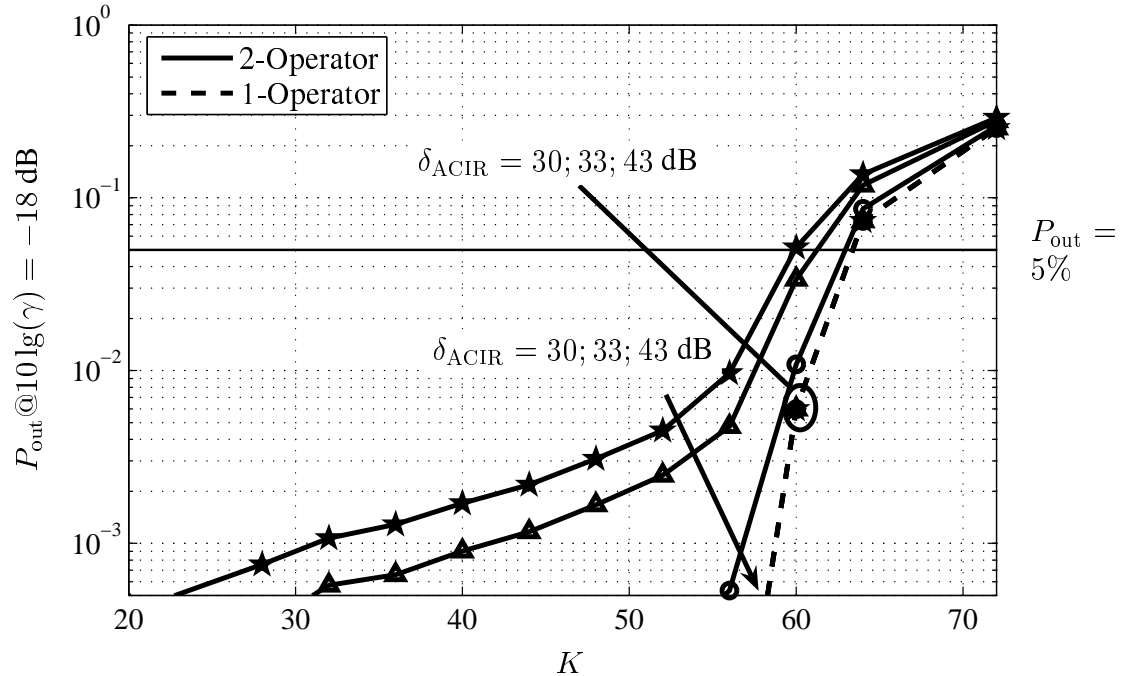


Bild 5.23. Schutzbänder: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter:  $\delta_{ACIR}$ , Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $N = -99$  dBm

Schutzbändern nicht die Lösung des Problems Interoperator-MAI sein. Jedoch reagiert die Interoperator-MAI sehr sensitiv auf den Parameter  $\delta_{\text{ACIR}}$  und damit auf den Frequenzabstand  $\Delta f_a$ , so daß auch ein geringfügiges Erhöhen dieses Frequenzabstandes die Interoperator-MAI spürbar mindern kann.

Für die Kapazität  $C_{\text{out}}$  im Fall der in Bild 5.23 gezeigten Abwärtsstrecke ist prinzipiell der gleiche Effekt beim Verändern des  $\delta_{\text{ACIR}}$  zu beobachten wie in der Aufwärtsstrecke. Ein niedriges  $\delta_{\text{ACIR}}$  von 30 dB bewirkt einen signifikant höheren Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  als ein  $\delta_{\text{ACIR}}$  von 33 dB, und das hohe  $\delta_{\text{ACIR}}$  von 43 dB bewirkt einen sehr geringen Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$ , vgl. Tabelle 5.5.

### 5.4.3 Compressed Mode zum Ermöglichen des IFHOs

In zellularen Mobilfunksystemen können jedem Operator mehrere Frequenzkanäle zur Verfügung stehen, z.B. erhielt bei der Aufteilung des Gesamtfrequenzbandes für den 3G-Teilstandard WCDMA in Deutschland jeder Operator zwei Frequenzkanäle jeweils für Auf- und Abwärtsstrecke [Reg04]. Da sich die Interferenzsituation im laufenden Betrieb der Mobilfunknetze durch Hinzukommen oder Wegfall sowie die Bewegung der MSen laufend ändert, kann es sinnvoll sein, bei zu hoher Verkehrslast eines Frequenzkanals durch den Wechsel einiger MSen in andere Frequenzkanäle geringerer Verkehrslast mögliche Outages zu vermeiden [Wal00b]. Ein solcher Wechsel einer MS in einen anderen Frequenzkanal wird als IFHO bezeichnet [3GP01e]. Die potentiellen Kandidaten für einen IFHO sind zweckmäßigerweise MSen, denen es besonders schlecht geht, d.h. die hohe Funkfelddämpfung zur versorgenden BS haben und hohe MAI erfahren. Solche MSen können durch das Messen der MAI in anderen, potentiell zur Verfügung stehenden Frequenzkanälen entscheiden, ob ein IFHO für sie sinnvoll ist oder nicht. Finden sie einen Frequenzkanal mit geringerer MAI, so können sie durch den IFHO die Wahrscheinlichkeit einer Outage, d.h. eines Verbindungsabbruchs, wesentlich vermindern.

In Mobilfunksystemen mit TDMA-Komponente wie z.B. im 3G-Teilstandard TD-CDMA ist das Messen der MAI in einem anderen Frequenzkanal trivial; hier kann für eine solche Messung einfach ein für die Übertragung von Nutzdaten nicht genutzter Zeitschlitz eingesetzt werden. In Mobilfunksystemen ohne TDMA-Komponente wie z.B. dem 3G-Teilstandard WCDMA jedoch werden kontinuierlich Nutzdaten übertragen, so daß zum Messen der MAI in einem anderen Frequenzkanal spezielle Vorkehrungen notwendig sind [Eri99a]:

- Einbau einer zweiten Empfängerstufe in der Empfangseinheit, oder
- Einfügen einer Übertragungspause in den Nutzdatenstrom, in der die Messung durchgeführt werden kann.

Die Vor- und Nachteile dieser beiden Maßnahmen hängen davon ab, welcher Mobilfunkstandard in dem zu überwachenden Frequenzkanal eingesetzt wird. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Vor- und Nachteile für verschiedene mögliche Handover-Kandidaten wie z.B. GSM900/1800, TD-CDMA und WCDMA wird in [Eri99a] gegeben. Im folgenden wird auf die grundlegenden Effekte eingegangen, die für alle betrachteten Mobilfunkstandards gelten.

Der Einsatz einer zweiten Empfängerstufe als erste Möglichkeit zum Messen der MAI in einem anderen Frequenzkanal ist an den BSen, d.h. für Messungen in der Aufwärtsstrecke, relativ einfach möglich. An der MS, d.h., für Messungen in der Abwärtsstrecke, verursacht ein zweiter Empfänger jedoch wesentliche Nachteile [GJD97, Eri99a]: Da beide Empfänger gleichzeitig arbeiten müssen, ist nahezu die doppelte Spitzenleistung der Stromversorgung erforderlich. Dies führt in Verbindung mit den anderen zusätzlichen Bauteilen zu einer substantiellen Erhöhung von Platzbedarf und Kosten. Zudem müssen zum Aufteilen der Signale auf die beiden Empfänger Diplexer eingesetzt werden, die verlustbehaftet sind. Dies führt zu einer erhöhten zusätzlichen Rauschzahl und beeinträchtigt die Performanz. An der MS ist somit das Einfügen einer Übertragungspause als zweite Möglichkeit zum Messen der MAI in einem anderen Frequenzkanal vorzuziehen [Eri99a]. Sowohl die Diplexer als auch die erhöhte Spitzenleistung sind beim Einsatz einer Übertragungspause nicht erforderlich, da das Messen der MAI und das Empfangen von Nutzdaten nicht gleichzeitig stattfinden.

Die meisten Anwendungsfälle erfordern eine Übertragungspause nur in einer Übertragungsrichtung, z.B.

- zum Messen des thermischen Rauschens in einer BS, notwendig zum Bestimmen des Noise Rise, vgl. Abschnitt 3.9, genügt eine Übertragungspause in der Aufwärtsstrecke, oder
- zum Messen der MAI in einem anderen Frequenzkanal für eine MS, die einen IFHO in Betracht zieht, genügt eine Übertragungspause in der Abwärtsstrecke [GJD97].

Zwecks einfacher Empfängerrealisierung wird jedoch angestrebt [Eri99a, GJD97], daß nur ein einziger, gemeinsamer Frequenzsynthesizer für Auf- und Abwärtsstrecke eingesetzt wird. Diese Vorgehensweise vermeidet ein weiteres Bauteil mit hoher Leistungsaufnahme, erzwingt aber auch einen festen Duplexabstand, so daß beim Messen der MAI auf einer anderen Frequenz sowohl Auf- als auch Abwärtsstrecke eine Übertragungspause benötigen.

Das Einfügen einer Übertragungspause ist im 3G-Teilstandard WCDMA in Form des CM vorgesehen [3GP00b], siehe Abschnitt 1.6. Im folgenden wird ein WCDMA-Mobilfunknetz betrachtet, in dem eine der MSen einen IFHO in Betracht zieht.

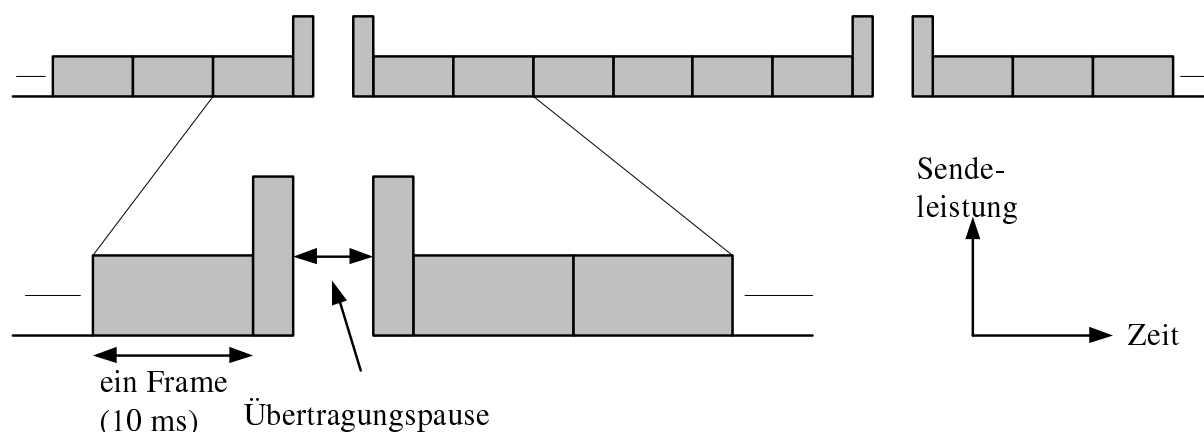


Bild 5.24. Veranschaulichung des CM nach der Ein-Frame-Methode

Wird ein IFHO als Intersystem-Handover von WCDMA zu TD-CDMA oder GSM-1800 in Erwägung gezogen, so muß zum Messen in den zugehörigen Frequenzkanälen die Aufwärtsstrecke der laufenden WCDMA-Verbindung selbst bei einer vorhandenen zweiten Empfängerstufe für TD-CDMA oder GSM 1800 in den CM [Eri99a], da der Duplexer zwischen dem WCDMA-Aufwärtsstrecken-Frequenzband und dem Abwärtsstrecken-Frequenzband des Handover-Kandidaten aufgrund des geringen Frequenzabstandes keine ausreichende Dämpfung hat. Anders ausgedrückt: Das Senden eines WCDMA-Signals und das gleichzeitige Messen der MAI auf einer Frequenz mit einem Frequenzabstand von 40 MHz oder weniger über die gleiche Antenne ist nicht möglich oder zumindest fehlerbehaftet. Daher ist für den Handover von WCDMA zu GSM 1800 oder zu TD-CDMA ein CM erforderlich.

Der CM beruht auf einer zeitlichen Komprimierung der zu übertragenden Daten in einem oder in zwei Frames, um eine Übertragungspause (engl. transmit gap, TG) zu realisieren [3GP00b]. In dieser Übertragungspause muß der Empfänger keine Daten empfangen und kann somit MAI-Messungen in anderen Frequenzkanälen durchführen. Die Länge der Übertragungspause (engl. transmit gap length, TGL) kann gemäß Standard 3,4,7,10 oder 14 Zeitschlitze sein [3GP00b]. Kurze TGLs bis zu 7 Zeitschlitze können sich über einen oder zwei Frames erstrecken, längere TGLs können nur in zwei Frames realisiert werden. Erstreckt sich die Übertragungspause über eine Framegrenze hinweg, so wird dies als Doppel-Frame-Methode bezeichnet; liegt die Übertragungspause innerhalb eines einzigen Frames, so bezeichnet man dies als Ein-Frame-Methode. Bild 5.24 veranschaulicht einen CM nach der Ein-Frame-Methode.

Verschiedene Methoden sind möglich, um die Übertragungspausen zu realisieren [GJD97, 3GP00b]:

- Reduzieren der zu erfüllenden Datenrate für die gesamte Ein- oder Zwei-Frame Zeitspanne aus höheren Schichten. Diese höheren Schichten haben Kenntnis davon, ob eine MS in den CM geht.
- Erhöhen der verfügbaren momentanen Datenrate in den betrachteten Frames durch Reduzieren des Spreizfaktors um den Faktor zwei. Dies verdoppelt die Zahl der in der gesamten Zeitspanne verfügbaren Datensymbole, so daß eine Übertragungspause möglich ist.
- Reduzieren der Datenrate durch Punktieren redundanter Bits in der Kanalcodierung. Diese Methode ist beschränkt auf kurze Übertragungspausen, da andernfalls die Leistungsfähigkeit der Kanalcodierung zu sehr vermindert würde. Vorteile der Punktierung gegenüber der Reduktion des Spreizfaktors sind die Möglichkeit zur flexiblen Verminderung der Datenrate, die bei der Spreizfaktor-Methode auf Zweierpotenzen beschränkt ist, sowie daß keine zusätzlichen Code-Ressourcen allokiert werden müssen.

Die erste Methode mit Steuerung aus höheren Schichten kann nur bei paketvermittelter Übertragung verlustlos eingesetzt werden; bei leitungsvermittelter Übertragung kann die Datenrate nicht verlustlos reduziert werden[GJD97]. Die Methoden des reduzierten Spreizfaktors und der Punktierung halten die mittlere Datenrate über die betrachteten Frames konstant, benötigen aber während der Zeit erhöhter Datenrate eine höhere Sendeleistung zum Versorgen der MS.

Beim Einsatz des CM für leitungsvermittelte Übertragung wird kurzzeitig die Sendeleistung erhöht. Dies verursacht höhere MAI-Leistung für andere MSen. Die in einem Frame abgestrahlte mittlere Leistung bleibt jedoch im Idealfall gleich, da die erhöhte Leistung im CM durch die Übertragungspause kompensiert wird. Nur durch parasitäre Effekte kann die erhöhte Leistung des CM Beeinträchtigungen der Systemkapazität verursachen [GJD97]:

- Wenn alle MSen in einem Mobilfunknetz gleichzeitig in den CM gehen und die Übertragungspausen an der gleichen Position innerhalb des Frames sind, so kann es kurzzeitig eine starke Erhöhung der auftretenden MAI geben. Da die Position der Übertragungspause innerhalb eines Frames nicht festgelegt ist, ist anzustreben, durch geeignete Algorithmen die Übertragungspausen verschiedener MS so zu streuen, daß eine kurzzeitige extreme Erhöhung der MAI vermieden werden kann. In der folgenden Untersuchung der Effekte des CM auf die MAI wird unterschieden zwischen
  - synchronem CM: die Übertragungspausen aller MSen im CM sind jeweils an den gleichen Position im Frame, und
  - asynchronem CM: die Übertragungspausen der MSen im CM sind zufällig auf die möglichen Positionen im Frame verteilt.



- Ein Vermindern des Spreizfaktors, das wohl effizienteste Verfahren für hohe Kompressionen wie sie bei großen TGLs erforderlich sind [GJD97], halbiert die Symboldauer und erhöht somit die durch Mehrwegeausbreitung entstehende Intersymbol-MAI (ISI).
- Durch die verminderte Übertragungszeit zum Übertragen der gleichen Datenmenge wie im normalen Modus erhöht sich die Anfälligkeit gegen Einbrüche der Empfangsleistung durch schnellen Schwund, d.h. Interleaving- und Codierungsgewinne sind geringer [GJD97].
- Das Erhöhen der Sendeleistung ist nur dann möglich, wenn die maximale Sendeleistung der betreffenden MS nicht bereits ausgenutzt wird [HT02]. Ein weiteres Erhöhen der Sendeleistung für MSen mit hoher Sendeleistung vermindert den zum Ausgleichen des schnellen Schwundes verfügbare Sendeleistung der MS, so daß durch schnellen Schwund verursachte Einbrüche der Empfangsleistung möglicherweise nicht mehr ausgeglichen werden können und die Bitfehlerrate der MS steigt.

Wie bereits zu Beginn des Unterabschnitts 5.4.3 gesagt, ist ein CM nur bei MSen notwendig, denen es besonders schlecht geht. In der vorliegenden Untersuchung wird als Kriterium zum Einleiten des CM der Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{BM}$  zwischen MS  $\mu_m$  und versorgender BS  $\beta_b$  herangezogen. Unterschreitet dieser Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{BM}$  einen vorgegebenen Schwellwert  $g_{th}$ , so wird ein CM eingeleitet. Der Schwellwert  $g_{th}$  muß entsprechend der Größe der Zelle sinnvoll gewählt werden, so daß nicht zuviele, aber auch nicht zu wenige MSen im CM sind. Durch eine solch sinnvolle Wahl wird erreicht, daß nur MSen an den Zellrändern mit geringen Empfangsleistungen in den CM müssen. Die für die MS spezifische MAI-Leistung wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Ein typischer Wert für die Anteil der MSen im CM sind etwa 10 % [HT02].

Für die folgende Untersuchung wird ein CM durch Reduzieren des Spreizfaktors um den Faktor zwei realisiert. Dadurch kann bei der Ein-Frame-Methode eine Übertragungspause von 7 Zeitschlitzen erzielt werden. Gleichzeitig verdoppelt sich die momentan erforderliche Sendeleistung in einem Frame mit CM. Diese Verdoppelung der erforderlichen Sendeleistung kann modelliert werden, indem das zum Versorgen der MS erforderliche SNR  $\gamma_{target}$  für die betrachtete MS um 3 dB erhöht wird. Eine Schlimmstfall-Abschätzung muß also davon ausgehen, daß alle MSen gleichzeitig im CM sind und daher mit erhöhter Leistung senden. Dieser Fall wird als synchroner CM bezeichnet, siehe oben.

Wie bereits am Beginn des Unterabschnitts 5.4.3 angesprochen, ist normalerweise davon auszugehen, daß nicht alle MSen gleichzeitig in den CM gehen. In diesem als asynchroner CM bezeichneten Fall gleicht sich die zusätzliche MAI der MSen mit erhöhter Sendeleistung im statistischen Mittel mit dem Wegfall der MAI von MSen in der Übertragungspause aus. Somit ist im Mittel prinzipiell keine Beeinträchtigung durch das Erhöhen der Sendeleistung von MSen im CM zu erwarten. Jedoch muß der Effekt in Betracht gezogen werden,

daß MSen, für die bereits ohne CM sehr hohe Sendeleistungen aufgebracht werden müssen, während eines CM ihre Sendeleistung aufgrund deren Beschränkung durch  $T_{\max}$  nicht mehr genügend erhöhen können, um versorgt zu werden, und daher in Outage geraten. Nehmen wir an, für eine MS wird die Sendeleistung  $T$  aufgebracht, ohne in dieser Bezeichnungswiese zwischen Auf- und Abwärtsstrecke zu unterscheiden. Wie stark sich ein CM auf die Performanz einer MS auswirkt, hängt vor allem von der als Headroom bezeichneten Größe

$$\Delta T = T_{\max}/T \quad (5.4)$$

ab: Laut [GJD97, HT00] verursacht der CM bei leistungsgeregelten Systemen bei geringem Headroom  $\Delta T$  einen Anstieg des erforderlichen mittleren SNRs  $\gamma_{\text{target}}$  um bis zu 2 dB. Dies kann auf die verminderte Einsatzfähigkeit der Leistungsregelung zurückgeführt werden, die wegen der begrenzten Sendeleistung Einbrüche in der Empfangsleistung durch schnellen Schwund nicht mehr ausgleichen kann. Bei einem Headroom  $\Delta T$  von weniger als 4 dB ist der Anstieg des erforderlichen SNRs  $\gamma_{\text{target}}$  dagegen sehr gering [HT00]. Im folgenden wird dieser Effekt untersucht, indem nur für MSen mit Headroom  $\Delta T$  kleiner als 4 dB ein erhöhtes SNR  $\gamma_{\text{target}}$  zugewiesen wird. Mit (5.4) wird ein linearer Anstieg des SNRs  $\gamma_{\text{target,CM}}$  von MSen im CM ab einem Schwellwert von 4 dB für den Headroom  $\Delta T$  modelliert durch

$$\gamma_{\text{target,CM}} = \gamma_{\text{target}} \cdot \begin{cases} 10^{2 \cdot (1 - \Delta T / \text{dB} / 4) / 10} & \text{für } \Delta T \leq 10^{4/10}, \\ 1 & \text{für } \Delta T > 10^{4/10}, \end{cases} \quad (5.5)$$

Im folgenden werden die beiden eingeführten Verfahren synchroner und asynchroner CM simulativ sowohl für Auf- als auch für Abwärtsstrecke untersucht. Die Ergebnisse des vorliegenden Unterabschnitts 5.4.3 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\chi,1}$  und  $C_{\chi,2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  für den Fall der Aufwärtsstrecke und bzgl. der Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  für den Fall der Abwärtsstrecke werden in Tabelle 5.6 zusammengefaßt.

Der synchrone CM wird in den Bildern 5.25 bzw. 5.26 für die Auf- bzw. die Abwärtsstrecke betrachtet. Dabei werden verschiedene Schwellwerte  $g_{\text{th}}$  angesetzt; für  $g_{\text{th}}$  gleich -129 dB sind etwa 10 % der MSen im CM, für  $g_{\text{th}}$  gleich -123 dB sind etwa 30 % der MSen im CM. Als Referenz wird ohne CM simuliert. Mit zunehmendem Anteil von MSen im CM verringern sich die Kapazitäten  $C_{\chi,1}$  bzw.  $C_{\text{out},1}$  für Auf- bzw. Abwärtsstrecke jeweils relativ stark. Eine solche Häufung der CMs sollte also nach Möglichkeit vermieden werden. Die Auswirkung des synchronen CM auf die Interoperator-MAI kann anhand der Kapazitätsergebnisse in Tabelle 5.6 bewertet werden. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\chi}$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI steigt beim Verwenden des CM an, nämlich von 20,4 % ohne CM auf 21,8 % für 10 % der MSen im CM bei der Aufwärtsstrecke und von 3,4 % ohne CM auf 4,0 % für 10 % der MSen im CM bei der Abwärtsstrecke. Der Grund ist ein überproportionales Anwachsen der Interoperator-MAI im Verhältnis zur Intraoperator-MAI durch die erhöhte Sendeleistung

Tabelle 5.6. Synchroner und asynchroner CM:  $C_{\chi,1}$  bzw.  $C_{out,1}$  nach den Kriterien Noise Rise  $\chi$  bzw. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  für den Ein-Operator-Fall sowie  $C_{\chi,2}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Zwei-Operator-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  bzw.  $\Delta C_{out}$

	MSen in CM	Aufwärtsstrecke			Abwärtsstrecke			Bilder
		$C_{\chi,1}$	$C_{\chi,2}$	$\Delta C_{\chi}$	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$	$\Delta C_{out}$	
synchroner CM	0%	42,5	33,8	20,4 %	63,4	61,3	3,4 %	5.26;5.25
	10%	40,0	31,3	21,8 %	61,8	59,3	4,0 %	
	30%	34,9	27,5	21,4 %	54,5	52,4	4,0 %	
asynchroner CM	0%	42,5	33,8	20,4 %	63,4	61,3	3,4 %	5.28;5.27
	10%	42,3	33,5	20,7 %	61,5	59,3	3,6 %	
	30%	42,3	33,3	21,1 %	57,9	55,7	3,8 %	

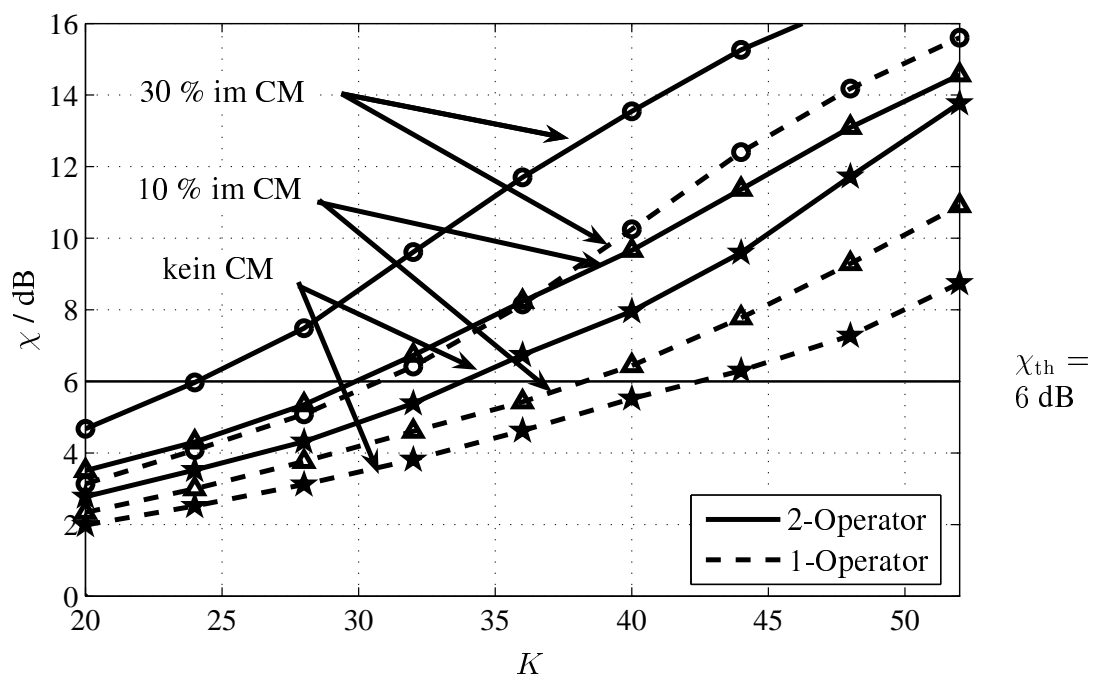


Bild 5.25. Synchroner CM: Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Anteil der MSen im CM, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $\delta_{ACIR} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

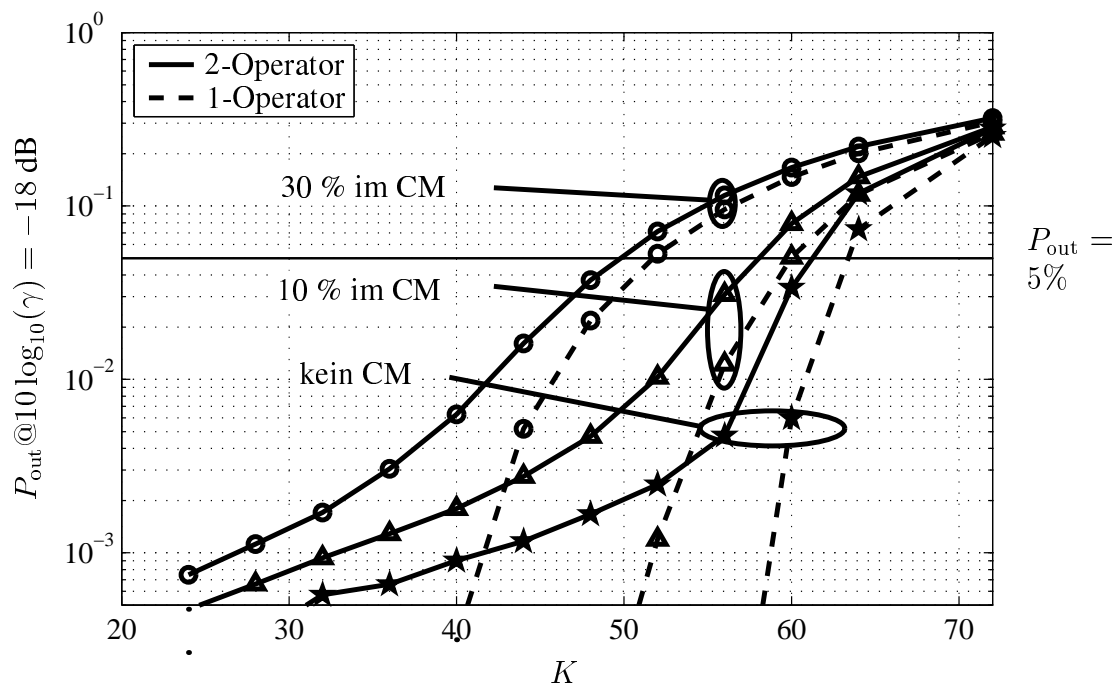


Bild 5.26. Synchroner CM: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Anteil der MSen im CM, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -99 \text{ dBm}$

von MSen vor allem am Zellrand. Dieser Anstieg ist jedoch moderat im Vergleich zu dem ohnehin ohne CM vorhandenen Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$  und angesichts der Tatsache, daß der synchrone CM eine Schlimmstfall-Abschätzung des Einflusses des CM ist.

Die anzustrebende Situation eines asynchronen CM, bei dem die Übertragungspausen der MSen im CM nicht alle gleichzeitig sind, wird in den Bildern 5.27 bzw. 5.28 für die Auf- bzw. die Abwärtsstrecke illustriert. Hier ist die Abnahme der Kapazität  $C_{\text{out},1}$  durch den CM wesentlich geringer als für den synchronen CM, vgl. Tabelle 5.6. Auch der Anstieg des Kapazitätsverlusts  $\Delta C_\chi$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$  durch die MSen im CM ist geringer als beim synchronen CM. Abschließend kann also festgehalten werden, daß der CM unter realistischen Annahmen den Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI zwar erhöht, diese Erhöhung aber moderat ist im Verhältnis zum ohnehin vorhandenen Kapazitätsverlust  $\Delta C_\chi$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$ .

#### 5.4.4 Soft Handover

Im vorliegenden Unterabschnitt 5.4.4 wird auf den Einfluß des SHOs, siehe Unterabschnitt 3.5.1, auf die Interoperator-MAI eingegangen. Ebenso wie für den CM ist auch für den SHO

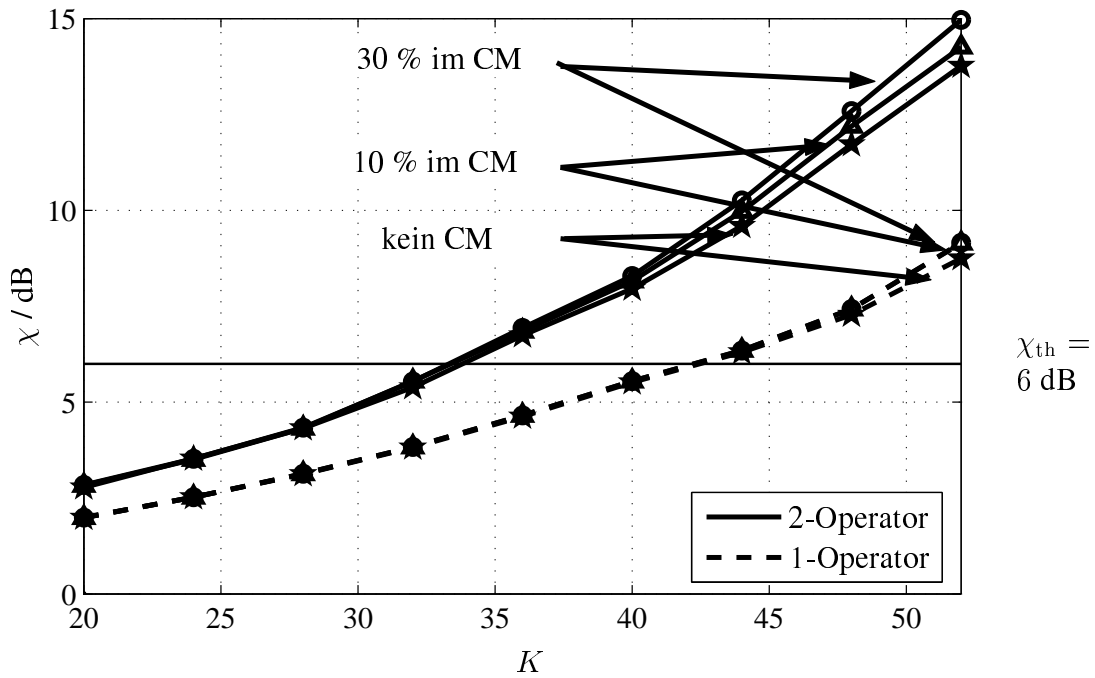


Bild 5.27. Asynchroner CM: Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Anteil der MSen im CM, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $\delta_{ACIR} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

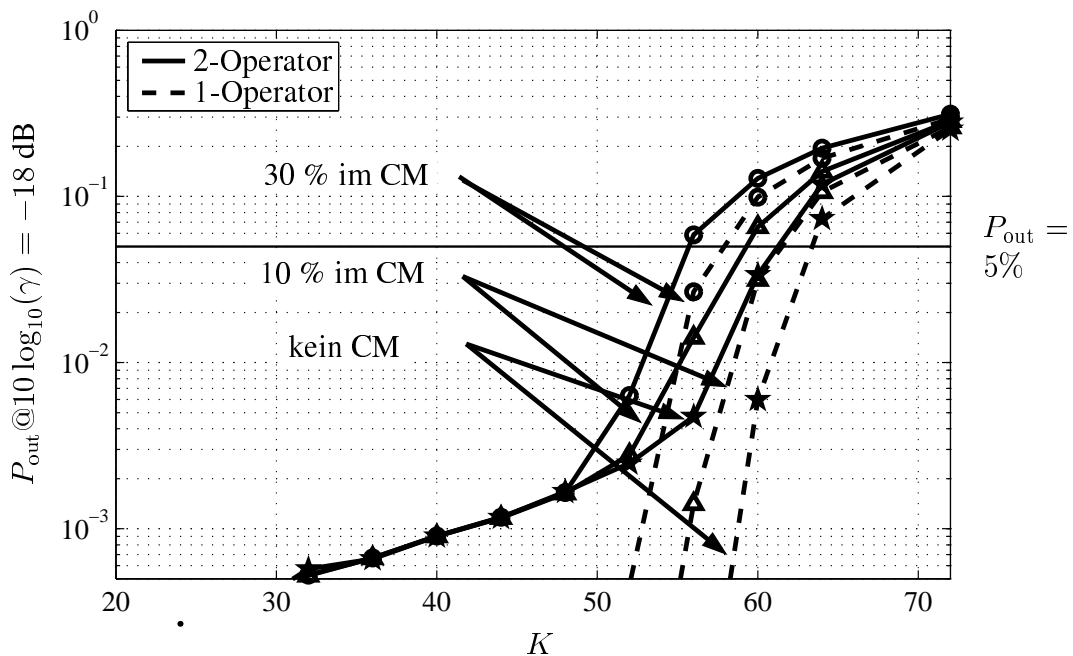


Bild 5.28. Asynchroner CM: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Anteil der MSen im CM, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $\delta_{ACIR} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

dem Verfasser der vorliegenden Dissertation aus der Literatur keine Untersuchung der Auswirkung auf die Interoperator-MAI bekannt.

Als Referenz dient der bisher ausschließlich betrachtete Fall, bei dem die Kardinalität des Active Sets  $S_m$  einer jeden MS gleich eins ist, d.h. eine jede MS ist nur einer einzigen BS zugeordnet. Da im bisher betrachteten Simulationsverfahren durch die Zuordnungskriterien nach Unterabschnitt 3.5.5 gewährleistet ist, daß eine jede MS ausschließlich derjenigen BS zugeordnet ist, zu der sie den höchsten Funkfeldgewinn hat, wird dieses Verfahren im folgenden als Ideal Handover (IHO) bezeichnet. In realen Mobilfunknetzen kann jedoch nicht gewährleistet werden, daß eine jede MS immer der BS zugeordnet ist, zu der sie den höchsten Funkfeldgewinn hat [WL97]. Bewegt sich nämlich eine MS relativ kleinräumig an der Zellgrenze oder parallel zur Zellgrenze, so kann es beim IHO zu einer Art „Ping-Pong“-Effekt kommen, bei dem die MS in kurzen Zeitabständen immer wieder zwischen zwei BSen hin- und hergereicht wird [VVGZ94, WL97, SB93]. Um diesen Effekt zu vermeiden, ist in realen Mobilfunknetzen ein Schwellwert notwendig, um den der Funkfeldgewinn zum Handoverkandidaten höher sein muß als zur aktuellen BS, bevor der Handover eingeleitet wird [VVGZ94]. Diese Vorgehensweise vermindert zwar die Performanz gegenüber dem IHO, ist aber im praktischen Betrieb eines Mobilfunknetzes aufgrund des hohen Signalisierungsaufwands für einen Handover unerlässlich [WL97]. In der vorliegenden Arbeit wird das beschriebene Verfahren mit einem Schwellwert bei nur einer Verbindung zwischen MS und BS als Hard Handover (HHO) bezeichnet.

Wegen der Performanznachteile des Verfahrens HHO gegenüber dem Verfahren IHO wurde das Verfahren SHO entwickelt, bei dem eine MS gleichzeitig mehreren BSen zugeordnet sein kann [SB93, VVGZ94], vgl. Unterabschnitt 3.5.1. Es hat folgende Vorteile gegenüber dem HHO [WL97]:

- Eine MS kann bei sich ändernden Funkfeldgewinnen sofort ohne Verzögerung von einer anderen BS versorgt werden [VVGZ94], wenn der Funkfeldgewinn zwischen der MS und dieser anderen BS höher wird als der Funkfeldgewinn zwischen der MS und der sie versorgenden BS. Die MSen werden somit immer von der jeweils optimal geeigneten BS versorgt, wodurch MAI vermieden werden kann.
- Durch Ausnutzen von Diversität gegenüber dem schnellen Schwund kann die MAI vermindert werden, wenn die auf mehreren unabhängigen Übertragungstrecken übertragenen Signale gewinnbringend kombiniert werden können [SB93].
- Verminderte Wahrscheinlichkeit eines Verbindungsabbruchs, da ein Handover schneller vonstatten gehen kann.

Es gibt jedoch auch Nachteile des SHO gegenüber dem HHO:

- Es werden mehr Netzwerk-Ressourcen allokiert [SB93], im wesentlichen CDMA-Codes, und
- es gibt einen zusätzlichen Overhead für Kontroll-Informationen, da auf allen Verbindungen zwischen MS und BS ein Kontrollkanal vorhanden sein muß [SB93].

Aufgrund der Nachteile des SHO sind die Kriterien für das Einleiten eines SHO an einer MS so zu wählen, daß nur eine begrenzte Zahl von MSen im SHO ist [WL97].

In der folgenden Untersuchung wird die Kardinalität des Active Sets  $\mathcal{S}_m$  einer jeden MS auf maximal zwei begrenzt, d.h. es wird neben der BS, zu der die MS den maximalen Funkfeldgewinn  $g_m^{\text{BM,max}}$  hat, noch die BS mit dem zweithöchsten Funkfeldgewinn zur MS ins Active Set  $\mathcal{S}_m$  aufgenommen, sofern (3.58) erfüllt ist. Für den Faktor  $\delta_{\text{th}}$  werden 3 dB angenommen [3GP02].

Für der Aufwärtsstrecke wird in der vorliegenden Arbeit das Verfahren SC zum Kombinieren der an den BSen im Active Set  $\mathcal{S}_m$  empfangenen Signale eingesetzt, siehe Unterabschnitt 3.5.2. Es wird davon ausgegangen, daß aufgrund der räumlichen Trennung der BSen das Verfahren MRC einen zu hohen Aufwand zum Übertragen der Daten zwischen den BSen erforderte [WL97]. Für die Abwärtsstrecke wird das Verfahren MRC eingesetzt, da davon ausgegangen wird, daß MRC in den MSen mit vertretbarem Aufwand realisierbar ist [WL97]. Somit sind in der Abwärtsstrecke Diversitätsgewinne möglich [SB93], da die Daten zu der MS über Übertragungskanäle mit unabhängigen Eigenschaften des schnellen Schwundes übertragen werden. Die erzielbaren Diversitätsgewinne hängen jedoch wesentlich von der auf jeder einzelnen Übertragungsstrecke bereits durch Mehrwegeausbreitung gegebenen Diversität ab [WL97].

Bei der Simulation des SHO werden zwei Extremfälle berücksichtigt: Zum einen ein SHO ohne Diversitätsgewinne gegenüber dem schnellen Schwund, ein Fall, der nur bei bereits vorhandener hoher Diversität auf den einzelnen Diversitätszweigen möglich ist. Dieser Fall wird in der vorliegenden Arbeit als SHOoG bezeichnet und kann bei Kanälen mit ausgeprägter Mehrwegeausbreitung sowie bei Verwenden mehrerer Sende- und/oder Empfangsantennen näherungsweise gegeben sein [HT00]. Zum anderen wird SHO betrachtet, wenn Diversitätsgewinne gegen schnellen Schwund auftreten. Dieser Fall wird als SHOmG bezeichnet. Die Diversitätsgewinne werden durch Link-Level-Simulationen [SL99] ermittelt, die auf einem ITU Pedestrian A Kanal für 3km/h [ITU97] beruhen. Bei diesem Kanalmodell ist der zeitlich kürzeste Pfad wesentlich stärker als alle anderen, so daß relativ geringe Diversität auf den einzelnen Übertragungsstrecken besteht. Die in [SL99] ermittelten Gewinne gegen schnellen Schwund sind umso kleiner, je größer der Verhältnis  $\delta_g$  des maximalen Funkfeldgewinns  $g_m^{\text{BM,max}}$  zum zweithöchsten Funkfeldgewinn zwischen der MS und den

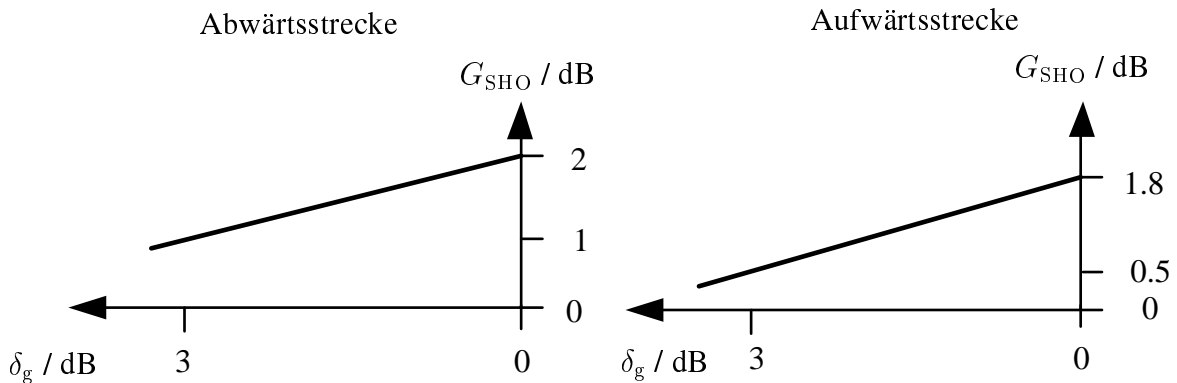


Bild 5.29. SHO-Gewinn  $G_{\text{SHO}}$  gegen schnellen Schwund aus [SL99] abhängig vom Verhältnis  $\delta_g$  des maximalen Funkfeldgewinns  $g_m^{\text{BM,max}}$  zum zweithöchsten Funkfeldgewinn zwischen der MS und den BSen im Active Set  $\mathcal{S}_m$

BSen im Active Set  $\mathcal{S}_m$  ist. Die SHO-Gewinne  $G_{\text{SHO}}$  gegen schnellen Schwund aus [SL99] zeigt Bild 5.29 abhängig von  $\delta_g$ .

Für das Modellieren des HHO als Referenzverfahren neben dem IHO wird berücksichtigt, daß der Handover einer MS zu einer anderen BS nicht sofort erfolgt, wenn die andere BS den höheren Funkfeldgewinn zur MS hat. Dazu wird für alle MSen, die einen zweithöchsten Funkfeldgewinn  $g_{b,m}^{\text{BM}}$  mit

$$g_{b,m}^{\text{BM}} \cdot \delta_{\text{th}} > g_m^{\text{BM,max}} \quad (5.6)$$

haben, also für MSen am Zellrand, zufällig eine der beiden BSen, die höchsten bzw. zweithöchsten Funkfeldgewinn zur MS haben, zum Versorgen der MS ausgewählt. Dabei wird die MS im Gegensatz zum SHO immer nur von einer einzigen BS versorgt, und in manchen Fällen auch von einer BS, die nicht den höchsten Funkfeldgewinn zur MS hat.

Die Simulationsergebnisse des vorliegenden Unterabschnitts 5.4.4 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\chi,1}$  und  $C_{\chi,2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  für den Fall der Aufwärtsstrecke und bzgl. der Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  für den Fall der Abwärtsstrecke werden in Tabelle 5.7 zusammengefaßt.

In Bild 5.30 wird der HHO mit dem SHOoG für die Aufwärtsstrecke verglichen. Dabei zeigt der SHOoG exakt die gleiche Kapazität wie der IHO, da die BS, deren Funkverbindung zur betrachteten MS den maximalen Funkfeldgewinn  $g_m^{\text{BM,max}}$  hat, in der Regel auch das höchste SNR  $\gamma$  empfängt. Somit wird das Empfangssignal dieser BS durch SC ausgewählt, und SHOoG ist identisch zu IHO in der Aufwärtsstrecke. Gegenüber dem HHO kann SHOoG die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  von 40,4 auf 42,5 erhöhen. Gibt es zusätzliche Gewinne gegenüber dem schnellen Schwund durch das Vermeiden von Einbrüchen der Empfangsleistung durch schnellen Schwund, modelliert durch das Verfahren SHOmG, so steigt die



Tabelle 5.7. Handover-Techniken:  $C_{\chi,1}$  bzw.  $C_{out,1}$  nach den Kriterien Noise Rise  $\chi$  bzw. Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  für den Ein-Operator-Fall sowie  $C_{\chi,2}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Zwei-Operator-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  bzw.  $\Delta C_{out}$

	Aufwärtsstrecke			Abwärtsstrecke			Bilder
	$C_{\chi,1}$	$C_{\chi,2}$	$\Delta C_{\chi}$	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$	$\Delta C_{out}$	
HHO	40,4	31,7	21,4 %	57,1	55,0	3,7 %	5.30,5.32
IHO	42,5	33,8	20,4 %	63,4	61,2	3,4 %	5.30,5.32
SHOoG	42,5	33,8	20,4 %	57,6	55,6	3,5 %	5.30,5.32
SHOmG	46,7	36,8	21,2 %	67,4	65,0	3,5 %	5.31,5.33

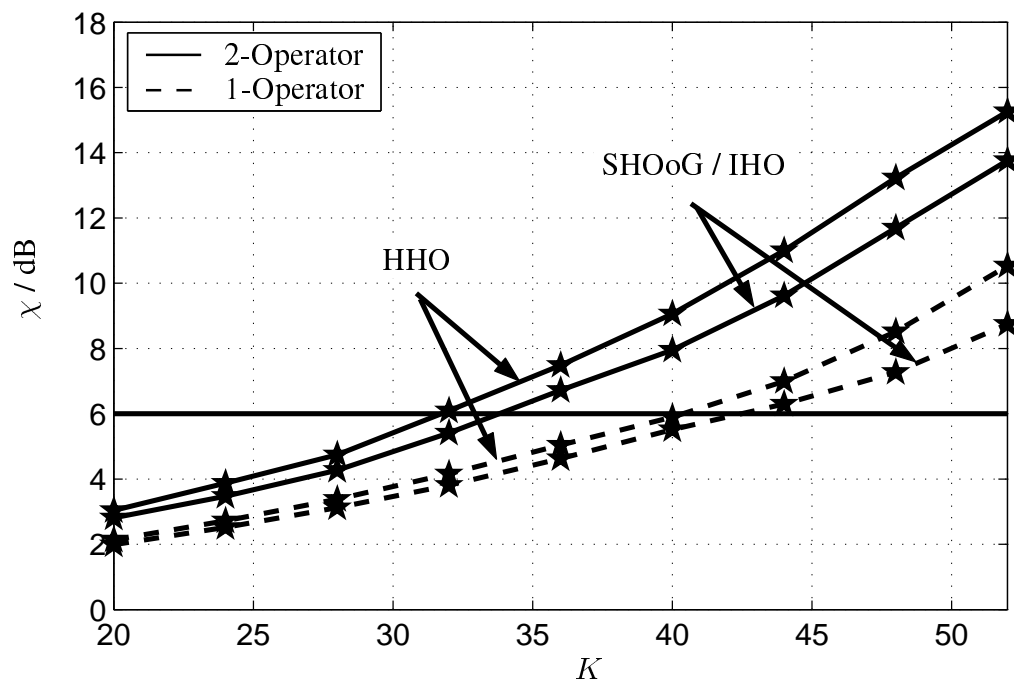


Bild 5.30. Handover-Techniken: Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, kein CM, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{target}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{min} = 70$  dB,  $\delta_{ACIR} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

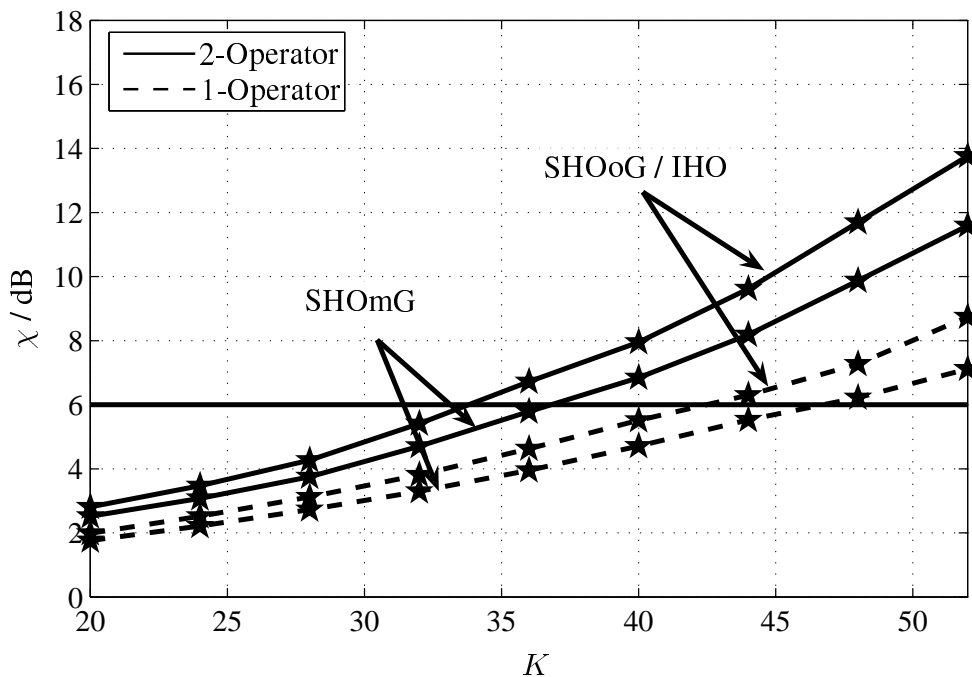


Bild 5.31. Handover-Techniken: Noise Rise  $\chi$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, kein CM, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

Kapazität  $C_{\text{out},1}$  von 42,5 für den SHOoG auf 46,7 für den SHOmG an, siehe Bild 5.31 und Tabelle 5.6.

In den Bildern 5.32 und 5.33 wird nun die Abwärtsstrecke betrachtet. In Bild 5.32 wird der SHOoG mit dem HHO und dem IHO für den Schwellwert  $\delta_{\text{th}}$  gleich 3 dB verglichen. Für den HHO ist die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  mit 57,1 wesentlich geringer als für den IHO mit 63,4. Für den SHOoG ist die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  mit 57,5 nur geringfügig höher als für den HHO. Die geringere Kapazität für den SHOoG im Vergleich zum IHO wird dadurch verursacht, daß bei der gewählten Vorgehensweise für den SHOoG die für die MS gesendete Leistung zu gleichen Teilen auf die beiden BSen aufgeteilt wird, vgl. Unterabschnitt 3.7.4. Da der SHOoG keine Diversitätsgewinne gegenüber schnellem Schwund modelliert, hat das Verfahren gegenüber dem IHO den Nachteil, daß ein Teil der an den BSen ankommenden Leistung mit einem niedrigeren Funkfeldgewinn übertragen wird als beim IHO. Dieser Nachteil des SHOoG gegenüber dem IHO wird jedoch durch die beim SHOmG modellierten Diversitätsgewinne nach Bild 5.29 mehr als kompensiert, wie in Bild 5.33 gezeigt wird: Die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  erhöht sich von 63,4 für den IHO auf 67,4 für den SHOmG.

Fazit ist, daß bei bereits vorhandener sehr hoher Diversität auf den Übertragungsstrecken zwischen BSen und der MS der Gewinn durch SHO gegenüber HHO relativ gering ist, und der SHO gegenüber dem IHO in der Abwärtsstrecke sogar nachteilig sein kann. In vielen

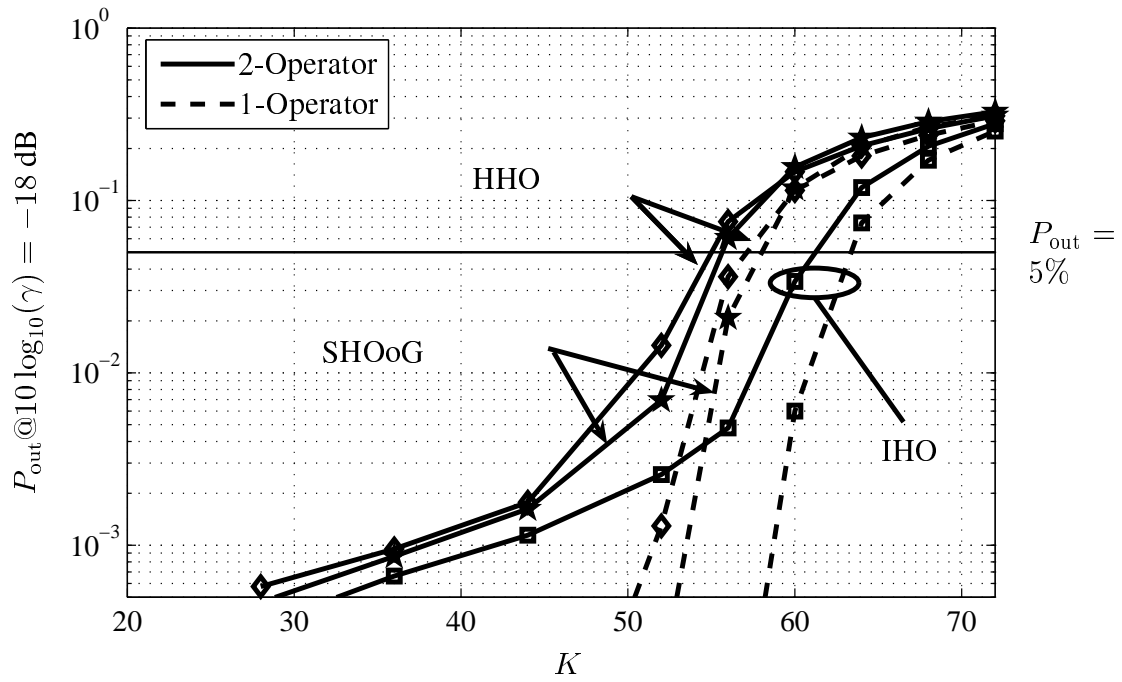


Bild 5.32. Handover-Techniken: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, kein CM, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -99 \text{ dBm}$

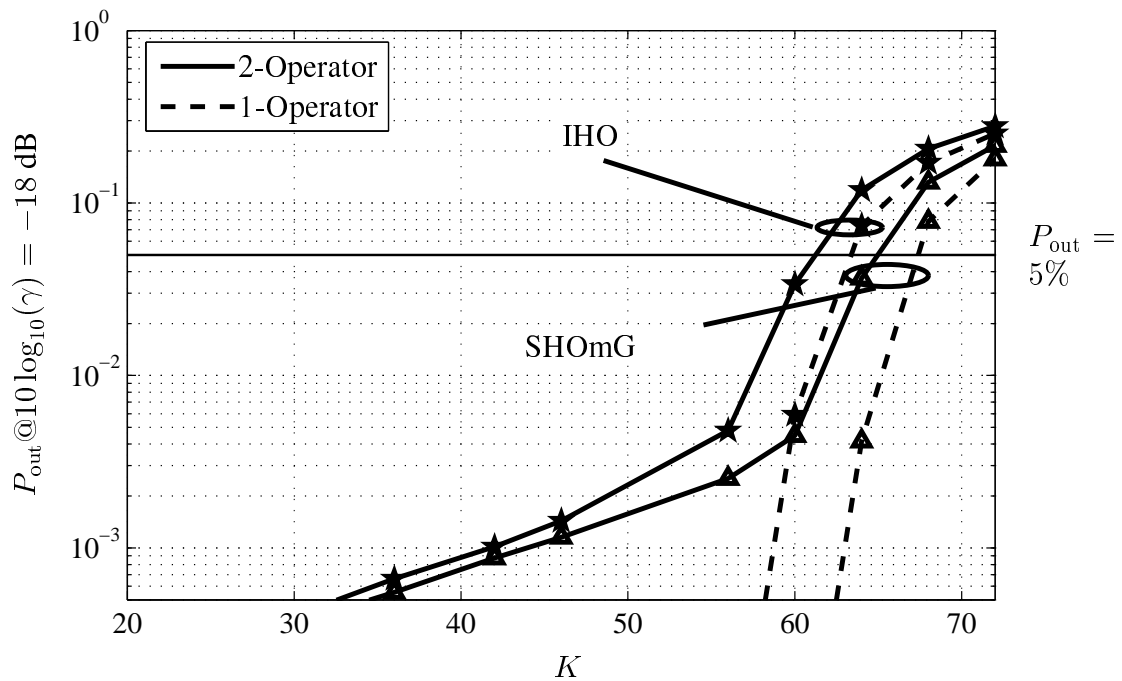


Bild 5.33. Handover-Techniken: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, kein CM, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -99 \text{ dBm}$

typischen Szenarien sind durch den SHO jedoch Diversitätsgewinne zu erwarten, die zu einer höheren Kapazität führen.

Die in der vorliegenden Arbeit besonders interessierende Frage nach dem Einfluß des SHO auf die Interoperator-MAI kann am besten anhand der in Tabelle 5.7 wiedergegebenen Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\chi}$  für die Aufwärtsstrecke und  $\Delta C_{\text{out}}$  für die Abwärtsstrecke diskutiert werden. Generell kann gesagt werden, daß für alle betrachteten Verfahren die Kapazitätsverluste nur sehr wenig schwanken. Tendenziell ist allerdings sowohl in der Auf- als auch in der Abwärtsstrecke bei den Verfahren SHOmG und HHO der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\chi}$  bzw.  $\Delta C_{\text{out}}$  etwas höher als bei den Verfahren IHO und SHOoG. Beim HHO sind vor allem an der Zellrändern höhere Sendeleistungen notwendig als beim IHO, was bei der Dislokation  $\xi$  von 1 eine erhöhte Interoperator-MAI verursacht.

## 5.5 Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke

In den Abschnitten 5.2 bis 5.4 werden die Auf- und die Abwärtsstrecke beim Untersuchen der Koexistenz der Mobilfunknetze zweier Operatoren getrennt betrachtet. Diese Vorgehensweise des getrennten Betrachtens von Auf- und Abwärtsstrecke ist für grundlegende Koexistenzuntersuchungen üblich und wird z.B. in Standardisierungsdokumenten [3GP02] von 3G-Systemen für die Evaluierung von Interoperator-MAI vorgeschlagen. Im Mobilfunk ist jedoch für Sprachanwendungen der Vollduplexmodus üblich [Wes02], und auch für Datenanwendungen ist in der Regel ein Rückkanal erforderlich, so daß eine Übertragung in der Abwärtsstrecke mit einer Übertragung in der Aufwärtsstrecke gepaart ist. Daher ist eine gemeinsame Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke erforderlich, durch die eine Abhängigkeit zwischen Auf- und Abwärtsstrecke entsteht. Diese Abhängigkeit wirkt sich auf die Interoperator-MAI aus. Betrachtet man z.B. eine  $MS_B$  des Operators B in unmittelbarer Nähe einer  $BS_A$  des Operators A bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 der  $BS_A$  und  $BS_B$ , siehe Bild 5.34, so verursacht die  $MS_B$  hohe Interoperator-MAI an der  $BS_A$  in der Aufwärtsstrecke, erfährt aber selbst auch hohe Interoperator-MAI von der  $BS_A$  in der Abwärtsstrecke.

Im vorliegenden Abschnitt 5.5 wird untersucht, wie sich diese Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke auf das in den Abschnitten 5.2 und 5.3 gefundene Ergebnis auswirkt, daß der Kapazitätsverlust durch Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke wesentlich größer ist als in der Abwärtsstrecke. Wie in Abschnitt 1.6 bereits gesagt, ist die Interoperator-MAI dann am größten, wenn die Sendeleistung des störenden Geräts maximal ist und gleichzeitig die Funkfelddämpfung  $A$  zwischen störendem Gerät und gestörtem Gerät minimal ist. Die im Schlimmstfall auftretende Interoperator-MAI kann also für ein bestimmtes Mobilfunksystem anhand der maximal erlaubten Sendeleistungen und der im betrachteten Szenario

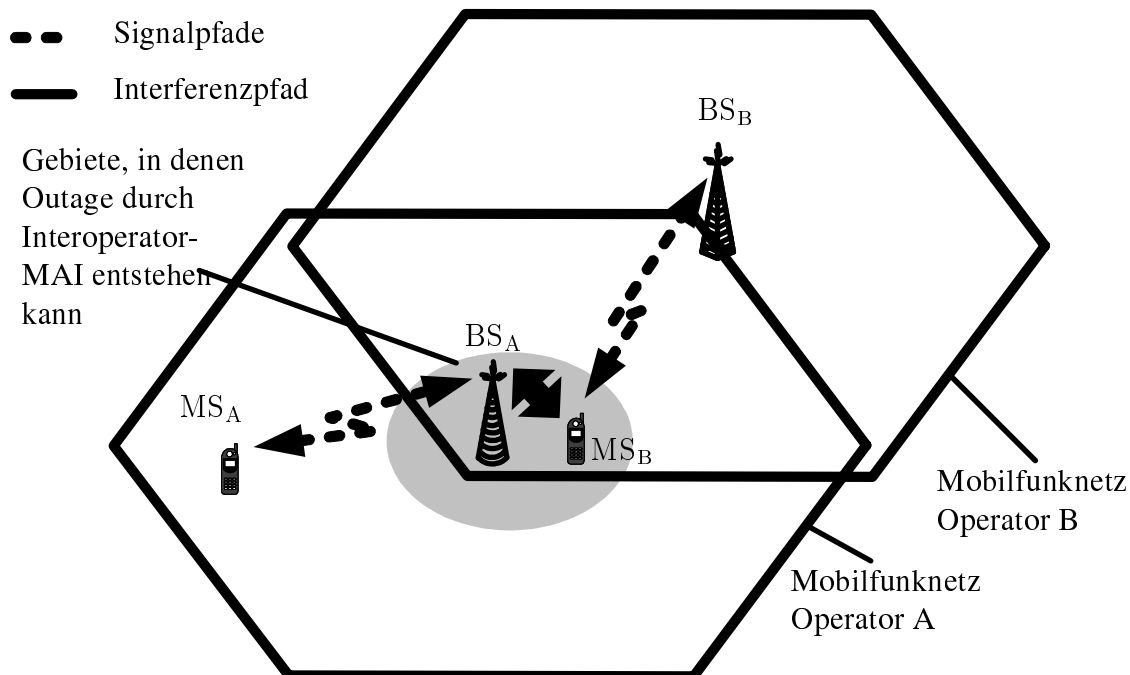


Bild 5.34. Kritisches Koexistenzszenario bei Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke: Operator A stört Operator B in der Abwärtsstrecke und Operator B stört Operator A in der Aufwärtsstrecke

anzunehmenden kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  mittels einer Leistungsbetrachtung abgeschätzt werden [HT02]. Dies wird in Bild 5.35 für den 3G-Teilstandard WCDMA beim Betrachten eines Makrozell-Szenarios getan. Wie angedeutet, sendet die  $MS_B$  in der Aufwärtsstrecke mit maximaler Leistung von 21 dBm. Die an der  $BS_A$  im Nachbarkanal empfangene Leistung ist die von  $MS_B$  gesendete Leistung, vermindert um das  $\delta_{ACIR}$  von 33 dB, welches die Filterdämpfung modelliert, sowie vermindert um den  $A_{\min}$  von 70 dB. An der  $BS_A$  entsteht somit eine Interoperator-MAI von -82 dBm. Die von einer einzigen  $MS_A$  maximal erzeugbare Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke ist damit um 19 dB höher als die Leistung  $N$  des thermischen Rauschens an der  $BS_A$  von -103 dB. Eine solche Anhebung der Störleistung ausgehend von der Leistung  $N$  des thermischen Rauschens durch einen starken Interferer bezeichnet man als Desensibilisierung des Empfängers.

In der Abwärtsstrecke ist die maximal erlaubte Sendeleistung des störenden Geräts, d.h. der  $BS_A$ , mit 43 dBm wesentlich höher als die Sendeleistung der  $MS_B$  in der Aufwärtsstrecke mit 21 dBm. Dadurch tritt in der Abwärtsstrecke eine wesentlich stärkere Desensibilisierung des Empfängers auf als in der Aufwärtsstrecke, im Schlimmstfall von 39 dB. Dies hat zur Folge, daß man bei gleichmäßiger Auslastung der Frequenzkanäle für Auf- und Abwärtsstrecke davon ausgehen kann, daß die  $MS_B$  bei Annäherung an die  $BS_A$  aufgrund der Interoperator-MAI in der Abwärtsstrecke in Outage gerät, lange bevor die  $MS_B$  an der  $BS_A$  eine kritische

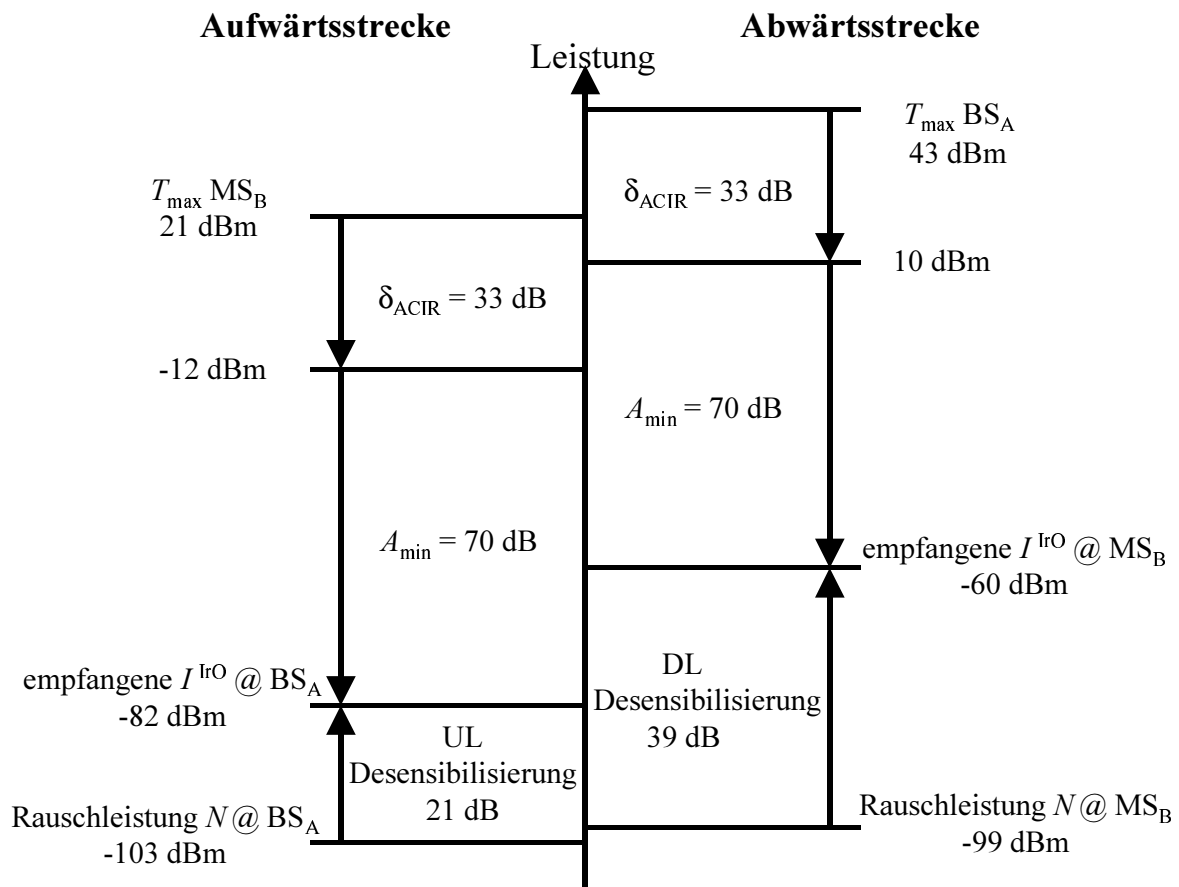


Bild 5.35. Abschätzung der Interoperator-MAI in Auf- und Abwärtsstrecke im Schlimmstfall für ein Makrozell-Szenario

Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke verursachen kann. Dies ist ein sehr vorteilhafter Effekt, da aufgrund dieses Effekts nur die Kapazitätsverluste durch Interoperator-MAI in der Abwärtsstrecke relevant sind. Diese sind im Vergleich zu den bei getrennter Betrachtung von Auf- und Abwärtsstrecke in der Aufwärtsstrecke möglichen Kapazitätsverlusten gering.

Die Abschätzung des Schlimmstfalls für ein Mikrozell-Szenario wird in Bild 5.36 gezeigt. Während die maximal erlaubte Sendeleistung der MSen in Mikro- und Makrozell-Szenarien gleich ist, darf die Mikro-BS wesentlich weniger Leistung senden als die Makro-BS. Dadurch ist der Unterschied zwischen der Desensibilisierung in Auf- und Abwärtsstrecke geringer als im Makrozell-Szenario, aber immer noch existent.

Die Betrachtungen in Bild 5.35 gelten für maximale Sendeleistungen sowohl in der Auf- als auch in der Abwärtsstrecke. Dieser Fall tritt jedoch in einem lebenden Szenario selten auf. Weiterhin gehen die Betrachtungen in Bild 5.35 davon aus, daß die Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke von nur einer einzigen MS erzeugt wird. Somit sind Situatio-

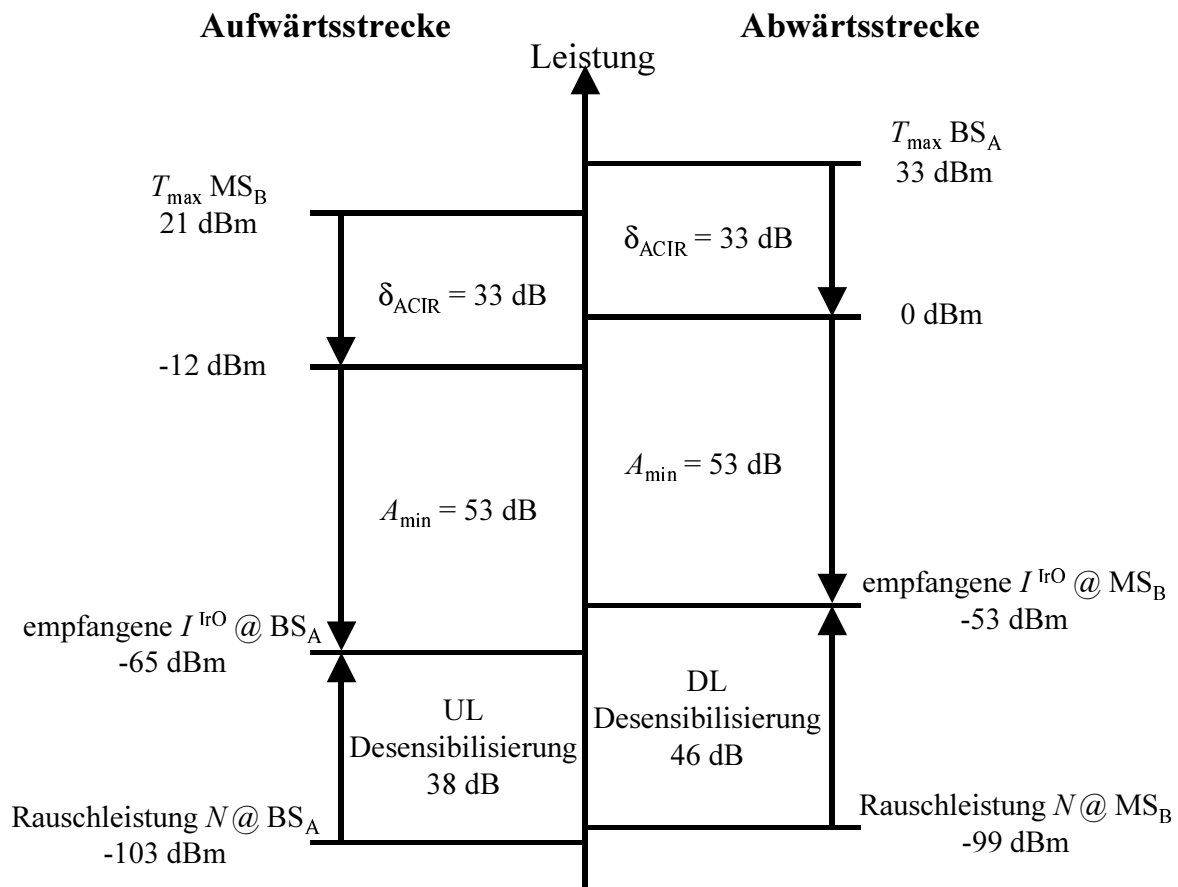


Bild 5.36. Abschätzung der Interoperator-MAI in Auf- und Abwärtsstrecke im Schlimmstfall für ein Mikrozell-Szenario

nen denkbar, bei denen die mit Bild 5.35 erläuterten Abhängigkeiten zwischen Auf- und Abwärtsstrecke nicht mehr die erwünschte Wirkung erzielen, daß nämlich die  $MS_B$  durch die Desensibilisierung in der Abwärtsstrecke in Outage gerät, bevor die  $MS_B$  eine signifikante Interoperator-MAI erzeugt. Im folgenden soll durch Simulation geklärt werden, ob der Einfluß der Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke auch in lebenden Szenarien gegenüber dem Einfluß in der Abwärtsstrecke vernachlässigbar ist. Eine solche simulative Verifikation der Erkenntnisse aus der Schlimmstfall-Abschätzung nach [HT02] zu den Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke ist nach Kenntnis des Verfassers in der Literatur nicht zu finden.

Bei den Simulationen in den Abschnitten 5.2 bis 5.4 wird davon ausgegangen, daß für alle MSen in der Simulation Leistung gesendet wird, auch wenn diese in Outage sind. Um jedoch die erforderliche gemeinsame Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke simulieren zu können, ist es notwendig, eine MS, die in einer der beiden Übertragungsrichtungen in Outage gerät, auch für die andere Übertragungsrichtung abzuschalten. Um die Auswirkungen des

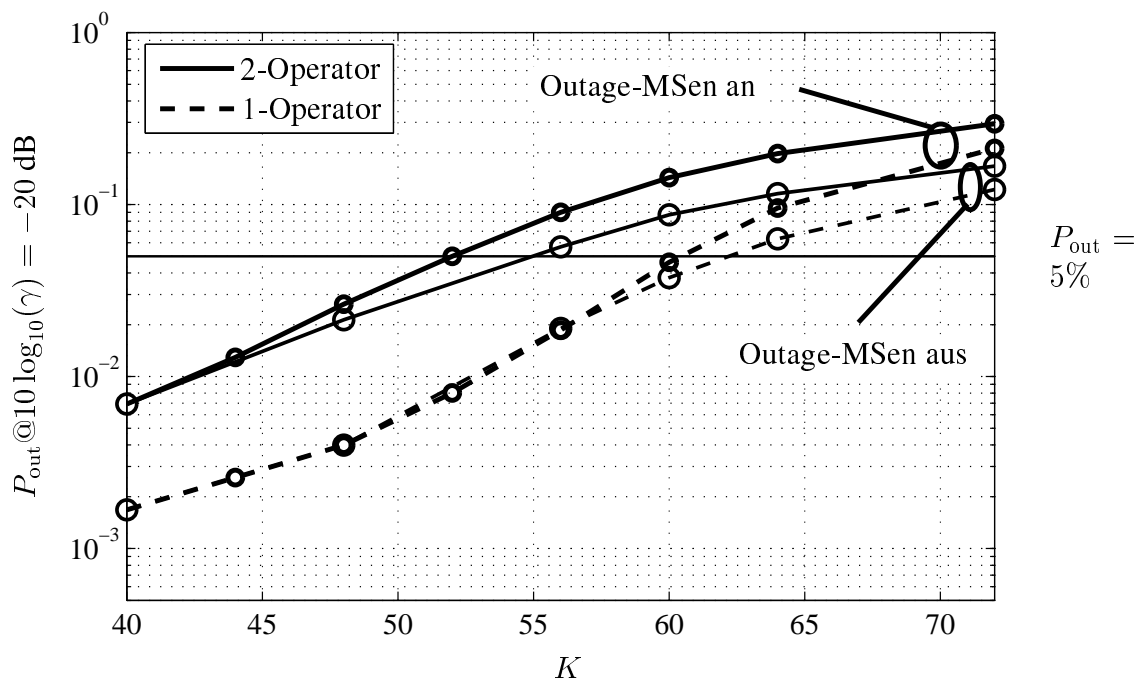


Bild 5.37. Zugangskontrolle unabhängig: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Outage-MSen an/aus, kein CM, IHO, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308 \text{ m}$ ,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15 \text{ m}$ ,  $A_{\text{min}} = 70 \text{ dB}$ ,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33 \text{ dB}$ ,  $N = -103 \text{ dBm}$

Tabelle 5.8. Zugangskontrolle unabhängig / gemeinsam:  $C_{\text{out},1}$  bzw.  $C_{\text{out},2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  sowohl für die Auf- als auch für die Abwärtsstrecke

Zugangskontrolle	Outage-MSen	Aufwärtsstrecke			Abwärtsstrecke			Bilder
		$C_{\text{out},1}$	$C_{\text{out},2}$	$\Delta C_{\text{out}}$	$C_{\text{out},1}$	$C_{\text{out},2}$	$\Delta C_{\text{out}}$	
unabhängig	an	60,4	52,0	13,9 %	63,4	61,3	3,4 %	5.37,5.38
	aus	62,2	55,0	11,6 %	65,1	62,9	3,4 %	
gemeinsam	aus	60,4	59,3	1,8 %	65,1	63,1	3,1 %	5.39,5.40

Abschaltens der Outage-MSen auf die Kapazität für das bisherige Verfahren des getrennten Betrachtens von Auf- und Abwärtsstrecke zu bestimmen, wird dieser Fall abgeschalteter Outage-MSen in den Bildern 5.37 für die Aufwärtsstrecke und 5.38 für die Abwärtsstrecke gezeigt.

Die Simulationsergebnisse des vorliegenden Unterabschnitts 5.4.4 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  bzw.  $C_{\text{out},2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  werden sowohl für die Auf- als auch für die Abwärtsstrecke in Tabelle 5.8 zusammengefaßt.



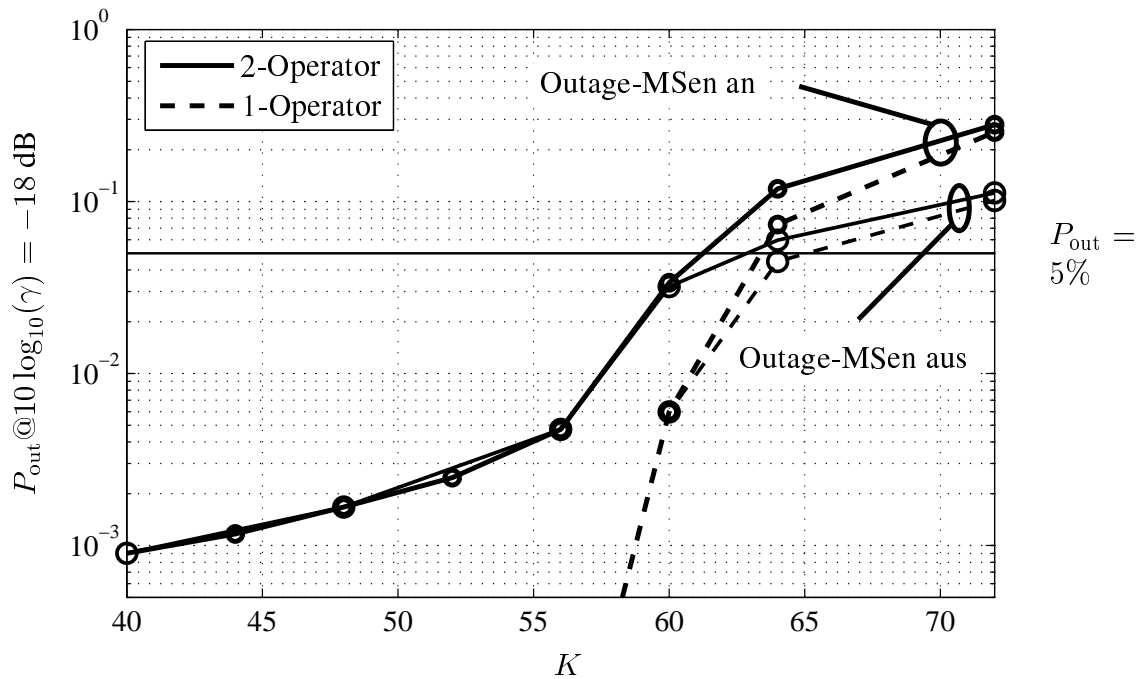


Bild 5.38. Zugangskontrolle unabhängig: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Outage-MSen an/aus, kein CM, IHO, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

Sowohl in der Auf- als auch in der Abwärtsstrecke erhöht sich durch das Abschalten der MSen in Outage die Kapazität  $C_{\text{out},1}$ , da die MAI im System abnimmt. In der Abwärtsstrecke gibt es keine Auswirkung auf den Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$ , in der Aufwärtsstrecke wird dieser etwas geringer.

Ausgehend von dem beschriebenen Verfahren, bei dem MSen in Outage abgeschaltet werden, kann nun die gemeinsame Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke simuliert werden. Dazu werden MSen, die in der Abwärtsstrecke in Outage geraten, auch in der Aufwärtsstrecke abgeschaltet, und umgekehrt. Der Effekt der gemeinsamen Zugangskontrolle in der Abwärtsstrecke, siehe Bild 5.40, ist sehr gering, fast nicht wahrnehmbar. In der Aufwärtsstrecke jedoch, siehe Bild 5.39, ist durch die gemeinsame Zugangskontrolle zwar eine geringfügig niedrigere Kapazität im Ein-Operator-Fall festzustellen, die Kapazität im Zwei-Operator-Fall ist jedoch bei Berücksichtigung der gemeinsamen Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke wesentlich höher. Somit ist beim Berücksichtigen der gemeinsamen Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  für die Aufwärtsstrecke durch Interoperator-MAI sehr gering, und, wie bereits mit den Erkenntnissen aus bei der Schlimmstfall-Betrachtung nach Bild 5.35 zu vermuten, geringer als in der Abwärtsstrecke. Somit ist es zulässig, bei der Untersuchung der Koexistenzfrage, d.h. des Kapazitätsverlusts durch Interoperator-MAI, ausschließlich die Abwärtsstrecke zu betrach-

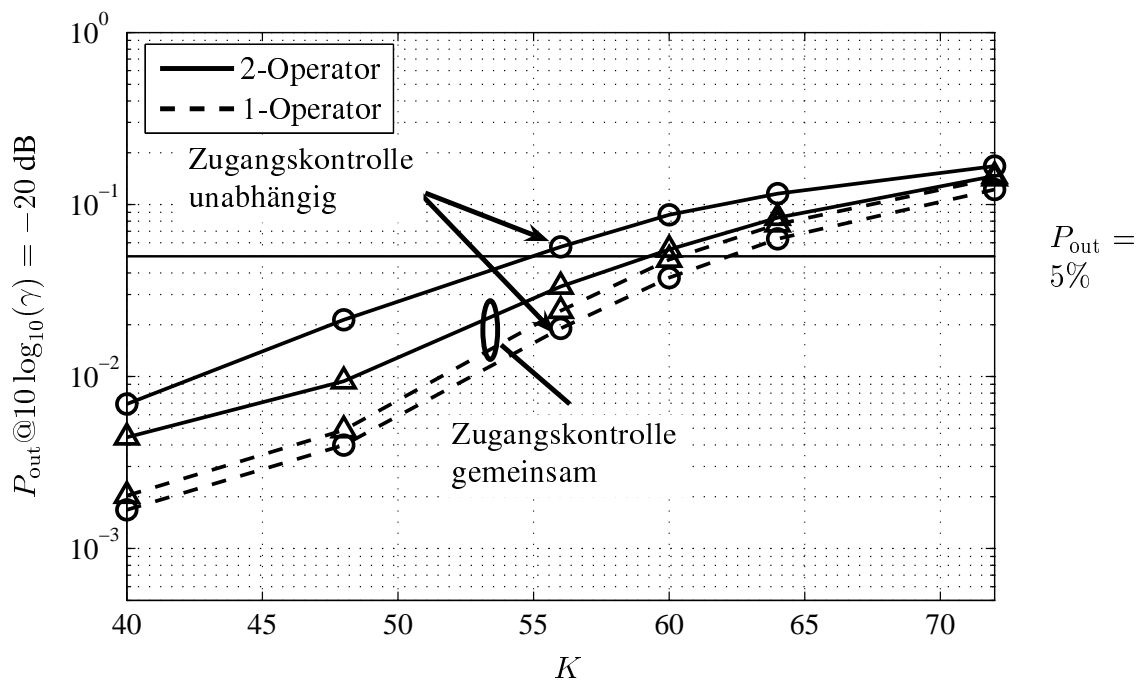


Bild 5.39. Outage-MSen aus: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Zugangskontrolle, kein CM, IHO, Aufwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -103$  dBm

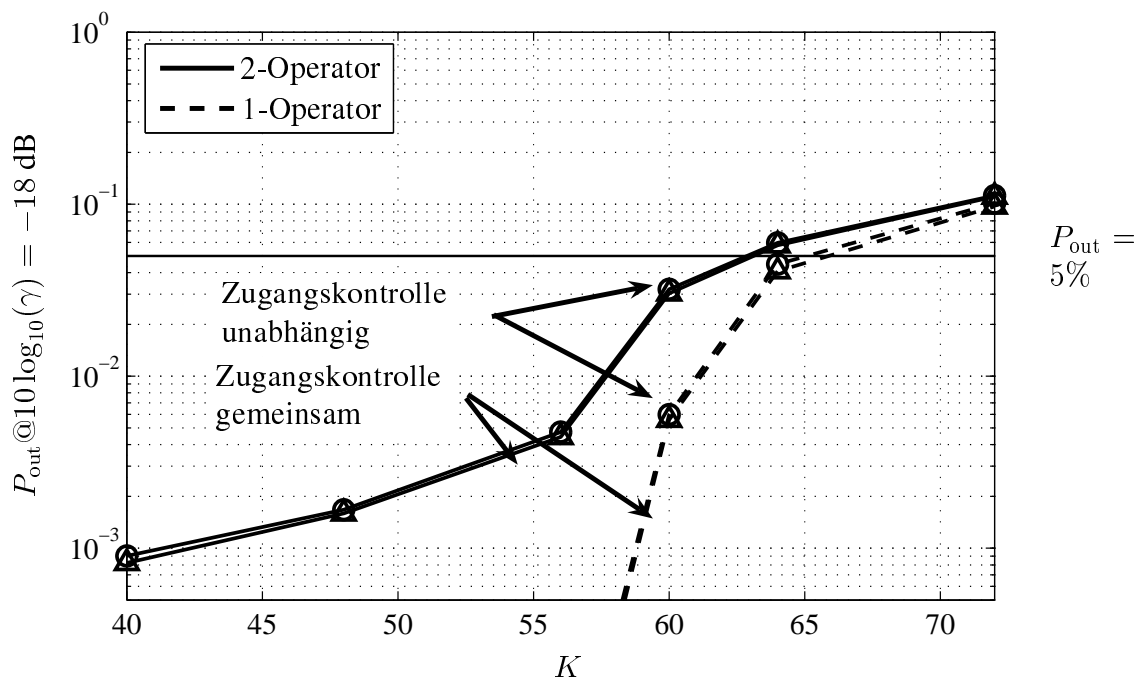


Bild 5.40. Outage-MSen aus: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Zugangskontrolle, kein CM, IHO, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 70$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

ten. Dies setzt jedoch voraus, daß jeder MS sowohl eine Auf- als auch eine Abwärtsstrecke zugeordnet ist. Weiterhin ist es zur Ausnutzung des beschriebenen Effekts bei der gemeinsamen Zugangskontrolle für Auf- und Abwärtsstrecke erforderlich, daß, wenn die Frequenzbänder zweier Operatoren in der Aufwärtsstrecke benachbart sind, diese auch in der Abwärtsstrecke benachbart sind. Ist dies nicht der Fall, wie z.B. beim Nutzen der vorgesehenen Erweiterungsbandes im Frequenzbereich 2500-2690 MHz als externes Frequenzband für die Abwärtsstrecke [HT02], dann kann hohe Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke auftreten. Für solche Fälle sind daher die Koexistenzuntersuchungen für die Aufwärtsstrecke nach Abschnitt 5.2 trotz der Erkenntnisse aus dem vorliegenden Unterabschnitt 5.5 erforderlich.

## Kapitel 6

# MAI zwischen TD-CDMA-Mobilfunknetzen in Mikrozellen

Im vorliegenden Kapitel 6 wird die MAI zwischen zwei TD-CDMA-Mobilfunknetzen in Mikrozellen untersucht, wobei die betrachteten Mobilfunknetze in unterschiedlichen, direkt benachbarten Frequenzkanälen aktiv sind. Das verwendete Koexistenzszenario wird in Bild 4.2 gezeigt. Die auftretende MAI der Art Intrasystem-Interoperator-Anderkanal-MAI wird mit der Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-MAI verglichen, wie in Unterabschnitt 2.8.5 klassifiziert. Die Koexistenzuntersuchungen im vorliegenden Kapitel 6 bewerten die Einflüsse der Interoperator-MAI anhand des auftretenden Kapazitätsverlusts und gehen somit weiter als frühere Untersuchungen in [Sie99]. Anhand dieser Ergebnisse werden die grundlegenden Unterschiede der Gleichstrecken- und Anderstrecken-MAI diskutiert.

Die im vorliegenden Kapitel 6 verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefaßt. Die Quellen dieser Parameter werden in der Tabelle durch Referenzen angegeben.

Für den TD-CDMA-Mobilfunkstandard muß beim Berechnen des benötigten SNRs  $\gamma_{\text{target}}$  die Vorgehensweise nach (3.83) angepaßt werden, um den Anteil  $\nu_t$  der von einem Teilnehmer genutzten Zeitschlitz eines Frames zu berücksichtigen. Mit der Informationsbitrate  $R_b$ , der Chiprate  $R_{\text{chip}}$  und dem Aktivitätsfaktor  $\nu_s$  ist das erforderliche SNR [HT00]

$$\gamma_{\text{target}} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{\nu_s R_b}{\nu_t R_{\text{chip}}}. \quad (6.1)$$

Während für die WCDMA-Mobilfunknetze in Kapitel 5 sowohl für Auf- als auch für die Abwärtsstrecke wegen der hohen Zahl gleichzeitig aktiver Teilnehmer SUD eingesetzt wird, kann bei den TD-CDMA-Mobilfunknetzen im vorliegenden Kapitel 6 MUD prinzipiell eingesetzt werden, da wesentlich weniger Teilnehmer gleichzeitig aktiv sind. In der Abwärtsstrecke jedoch ist der Orthogonalitätsfaktor  $\zeta$  bei den betrachteten Mikrozellen mit 0,06 sehr gering, so daß ohnehin nur geringe Intrazell-MAI zu erwarten ist und die MUD wegen der SNR-Degradation [Kle96] nachteilig sein kann. Daher wird in der Abwärtsstrecke SUD eingesetzt und durch die veränderten Eigenschaften des Mobilfunkkanals ist das erforderliche  $E_b/N_0$  für das TD-CDMA-Mobilfunknetz in Mikrozellen geringer als für das WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen, vgl. die Tabellen 6.1 und 5.1. In der Aufwärtsstrecke des TD-CDMA-Mobilfunksystemes wird jedoch MUD verwendet, so daß durch die SNR-Degradation das erforderliche  $E_b/N_0$  für das TD-CDMA-Mobilfunknetz in

Tabelle 6.1. Parameter für die Simulationen zum 3G-Teilstandard TD-CDMA in Mikrozellen in Kapitel 6

Parameter	Werte Ab- / Aufwärtsstrecke	Kommentar
Leistungsregelung	$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	siehe Abschnitt 3.7
$\gamma_{\text{target}} / \text{dB}$	-6,5 / -6,5	gewünschtes SNR des Leistungsregelungsverfahrens $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , Berechnung nach (6.1)
$T_{\text{max}} / \text{dBm}$	20 / 21	maximale Sendeleistung pro MS, siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$T_{\text{min}}$	0	minimale Sendeleistung, siehe Unterabschnitt 3.7.4
$\delta_s / \text{dB}$	0,5	Schrittweite der iterativen Leistungsregelung auf $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$N / \text{dBm}$	-99 / -103	thermische Rauschleistung, [3GP02]
$f_0 / \text{MHz}$	$1915 \pm 2,5$	Trägerfrequenz, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\sigma_a / \text{dB}$	10	Standardabweichung des Lognormal-Schwundes, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_r / \text{m}$	12	mittlere Gebäudehöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_{\text{Mikro-BS}} / \text{m}$	10	BS-Antennenhöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_{\text{MS}} / \text{m}$	1,5	MS-Antennenhöhe siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$w_s / \text{m}$	15	Breite der Straßen, siehe Unterabschnitt 3.2.3, [3GP02]
$w_b / \text{m}$	75	Breite der Häuserblöcke, siehe Unterabschnitt 3.2.3, [3GP02]
$G / \text{dBi}$	11	Antennengewinn der BSen, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$A_{\text{min}} / \text{dB}$	53	kleinstmögliche Funkfelddämpfung, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$r$	1	Clustergröße, siehe Abschnitt 1.4, [3GP02]
$\kappa$	1 / 0	Faktor zum Beschreiben des Detektionsverfahrens, 0=MUD, 1=SUD, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\zeta$	0,06 / 1	Orthogonalitätsfaktor, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\xi$	0; 1	Dislokation, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$\alpha_s$	0; 1	Synchronisationsfaktor, siehe Abschnitt 2.3 und Abschnitt 3.6
$R_b / \text{kb/s}$	12,2	Bitrate für Sprachdienst, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$E_b/N_0 / \text{dB}$	6,7 / 6,7	minimal erforderlich, siehe Abschnitt 3.9, [HT02], [3GP02]
$R_{\text{chip}} / \text{MHz}$	3,84	Chiprate, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$\nu_s / \%$	100	Aktivitätsfaktor Sprache, [HT02]
$\nu_t$	1/15	Anteil der von einem Teilnehmer genutzten Zeitschlitze eines Frames

Mikrozellen höher zu wählen ist als für das WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen, siehe die Tabellen 6.1 und 5.1. Durch die MUD kann jedoch die Intrazell-MAI komplett vermieden werden, weshalb der nachteilige Effekt der SNR-Degradation in Kauf genommen werden kann.

Für die Koexistenzsimulationen wird das Mikrozell-Szenario nach Bild 4.2 eingesetzt. SHO sowie CM werden nicht verwendet, d.h. es wird das in Unterabschnitt 5.4.4 beschriebene Verfahren IHO eingesetzt. Auf- und Abwärtsstrecke werden getrennt betrachtet.

Zum Untersuchen der in Mobilfunksystemen mit TDMA-Komponente auftretenden Anderstrecken-MAI werden die Funkfelddämpfungen  $A$  zwischen zwei BSen oder zwischen zwei MSen benötigt, vgl. Abschnitt 3.6. Zum Berechnen der Funkfelddämpfung zwischen zwei BSen kann das Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach Berg, siehe Unterabschnitt 3.3.3, herangezogen werden [3GP02]. Dabei ist aufgrund der Richtcharakteristik jeder der beiden BS-Antennen in (3.14) der Antennengewinn  $G$  zu 22 dBi zu setzen. Lognormal-Schwund wird verwendet, um sich ändernde Pfade durch das veränderliche Szenario um die BSen zu modellieren. Da die BSen ortsfest sind, ist die Standardabweichung  $\sigma_a$  des Lognormal-Schwundes mit 2 dB relativ gering zu wählen. Die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  zwischen zwei BSen wird nach [3GP02, HT02] zu 30 dB gewählt. Diese Annahme geht von geringem horizontalem Abstand  $\rho$  der beiden BS-Antennen auf gleicher Höhe  $h_{\text{Mikro-BS}}$  aus. Ähnlich geringe Werte wurden durch Messung in [All99] gefunden. Zum Berechnen der Funkfelddämpfung  $A$  zwischen zwei MSen kann ebenfalls das Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach Berg, siehe Unterabschnitt 3.3.3, herangezogen werden. Dabei ist in (3.14) der Antennengewinn  $G$  zu 0 dBi zu setzen, da für die MS-Antennen keine Gewinne durch Richtwirkung angenommen werden können [3GP02]. Der kleinstmögliche Abstand  $\rho$  zwischen zwei MSen wird nach [3GP02] zu 1 m angenommen, so daß sich mit (3.13) eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  von 38.4 dB ergibt.

In Tabelle 6.2 sind die Simulationsannahmen für die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  und das  $\delta_{\text{ACIR}}$ , das die Dämpfung des Nachbarkanals modelliert, für die möglichen Interferenzkonstellationen zusammengestellt. In Kombination mit der maximal zulässigen Sendeleistung  $T_{\max}$  der entsprechenden Störer läßt sich mit diesen Werten  $A_{\min}$  und  $\delta_{\text{ACIR}}$  analog zu den Abschätzungen in den Bildern 5.35 und 5.36 die maximale Interoperator-MAI-Leistung

$$I^{\max, \text{IrO}}/\text{dBm} = T_{\max}/\text{dBm} - \delta_{\text{ACIR}}/\text{dB} - A_{\min}/\text{dB} \quad (6.2)$$

bestimmen, die ein einzelner Störer an einem Empfänger des anderen Mobilfunknetzes verursachen kann. Diese maximale Interoperator-MAI-Leistung  $I^{\max, \text{IrO}}$  wird ebenfalls in Tabelle 6.2 gezeigt. Die von einem einzelnen Störer verursachte Interoperator-MAI-Leistung

Tabelle 6.2.  $T_{\max}$ , ACIR  $\delta_{\text{ACIR}}$ , kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  sowie die maximale Interoperator-MAI-Leistung  $I^{\max, \text{IrO}}$  von einem einzelnen Störer, d.h. BS oder MS

MAI-Quelle $\rightarrow$ MAI-Senke	$\alpha_S$	$T_{\max}/\text{dBm}$	$\delta_{\text{ACIR}}/\text{dB}$	$A_{\min}/\text{dB}$	$I^{\max, \text{IrO}}/\text{dBm}$
Aufwärtsstrecke					
MS $\rightarrow$ BS	0	21	33	53	-65
BS $\rightarrow$ BS	1	33	42	30	-39
Abwärtsstrecke					
BS $\rightarrow$ MS	0	33	33	53	-53
MS $\rightarrow$ MS	1	21	30	38,4	-47,4

$I^{\max, \text{IrO}}$  ist für die Abwärtsstrecke um 12 dB höher als für die Aufwärtsstrecke, wie bereits in Unterabschnitt 5.5 festgestellt. Der Unterschied zwischen Auf- und Abwärtsstrecke ist bei den Mikrozellen jedoch wesentlich geringer als bei den Makrozellen. In Tabelle 6.2 fällt besonders die Anderstrecken-Interoperator-MAI durch sehr hohe maximale Leistung  $I^{\max, \text{IrO}}$  von einem einzelnen Störer auf. In der Aufwärtsstrecke kann die Anderstrecken-MAI vom Typ BS $\rightarrow$ BS um 26 dB höher sein als die Gleichstrecken-MAI vom Typ MS $\rightarrow$ BS; in der Abwärtsstrecke kann die Anderstrecken-MAI vom Typ MS $\rightarrow$ MS um 5,6 dB höher sein als die Gleichstrecken-MAI vom Typ BS $\rightarrow$ MS. Somit erscheint die Anderstrecken-MAI als besonders kritisch.

Da die betrachteten Schlimmstfall-Situationen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit auftreten, werden im folgenden Simulationen durchgeführt, um den Einfluß der unterschiedlichen MAI-Klassen Gleichstrecken-MAI und Anderstrecken-MAI zu bewerten. Auf die Darstellung von Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  wird im vorliegenden Kapitel 6 verzichtet, da die bereits für die Makrozellen in Kapitel 5 aufgezeigten grundlegenden Unterschiede der betrachteten MAI-Arten und Leistungsregelungsverfahren in Auf- und Abwärtsstrecke für die Mikrozellen sehr ähnlich sind. Die Simulationsergebnisse des vorliegenden Kapitels 6 bzgl. der Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  bzw.  $C_{\text{out},2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  werden sowohl für die Auf- als auch für die Abwärtsstrecke in Tabelle 6.3 zusammengefaßt. Im Gegensatz zu den in Kapitel 5 behandelten WCDMA-Mobilfunknetzen wird für die im vorliegenden Kapitel 6 behandelten TD-CDMA-Mobilfunknetze statt des Noise Rise  $\chi$  die Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  als Kapazitätskriterium verwendet, da der Noise Rise in Mobilfunknetzen mit MUD nicht als das optimale Kriterium erachtet wird [Ita99]: Durch MUD wird die Intrazell-MAI vermieden, was aber im Kriterium Noise Rise  $\chi$  nicht berücksichtigt ist und somit die Ergebnisse verfälscht.

Die Aufwärtsstrecke wird in Bild 6.1 für den Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, der

Tabelle 6.3. Koexistenz von TD-CDMA-Mobilfunknetzen:  $C_{out,1}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{out}$  nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  sowohl für die Auf- als auch für die Abwärtsstrecke

MAI-Quelle → MAI-Senke	$\alpha_S$	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$		$\Delta C_{out}$		Bilder
			$\xi = 0$	$\xi = 1$	$\xi = 0$	$\xi = 1$	
Aufwärtsstrecke							
MS → BS	0	17,0	17,0	15,8	0,0 %	6,3 %	6.1,6.2
BS → BS	1		1,0	17,0	94,0 %	0,0 %	
Abwärtsstrecke							
BS → MS	0	16,7	16,7	15,7	0,1 %	5,6 %	6.3,6.4
MS → MS	1		15,2	15,6	8,8 %	6,2 %	

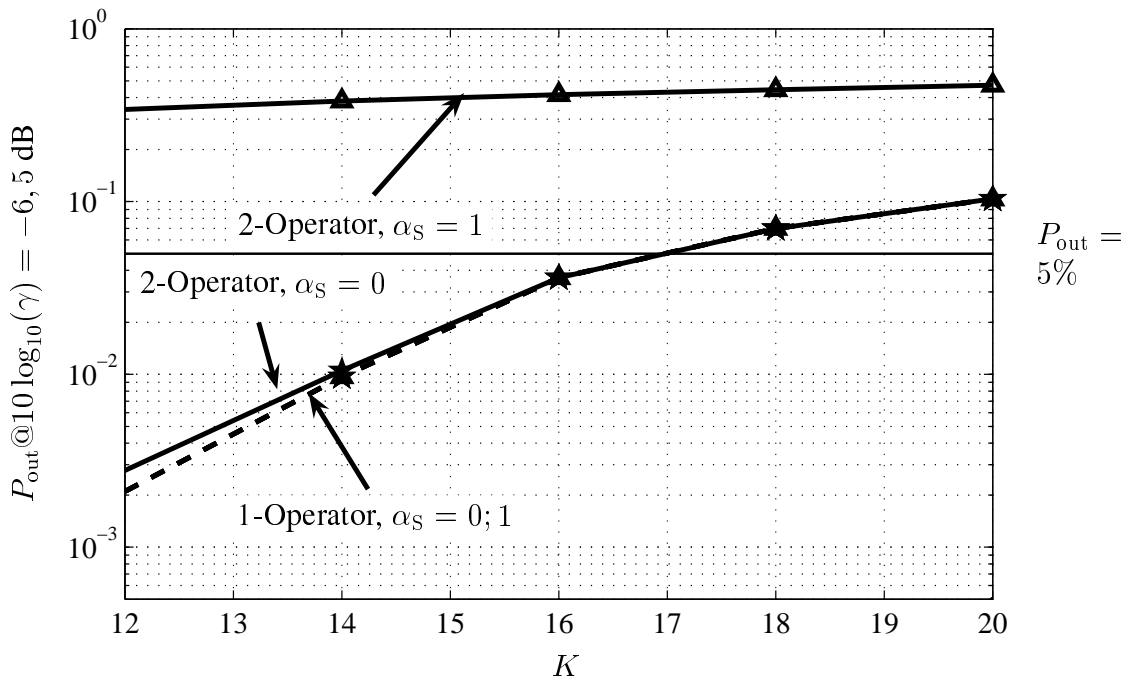


Bild 6.1. Aufwärtsstrecke,  $\xi = 0$ , Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall

BSen zweier verschiedener TD-CDMA-Mobilfunknetze und in Bild 6.2 für den Fall der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 betrachtet. Während für die Interoperator-Gleichstrecken-MAI, d.h. für  $\alpha_S = 0$ , nahezu kein meßbarer Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  auftritt, ist der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  mit 6,3 % bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 wesentlich höher. Diese Tendenz wurde auch in Makrozellen beobachtet, vgl. Unterabschnitt 5.2.2. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  in Mikrozellen ist geringer als in Makrozellen, da die Zellen kleiner sind. Für die Interoperator-Anderstrecken-MAI, d.h. für  $\alpha_S = 1$ , wirkt sich maximale Dislokation  $\xi$  von 1 exakt umgekehrt auf den Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  aus als für die



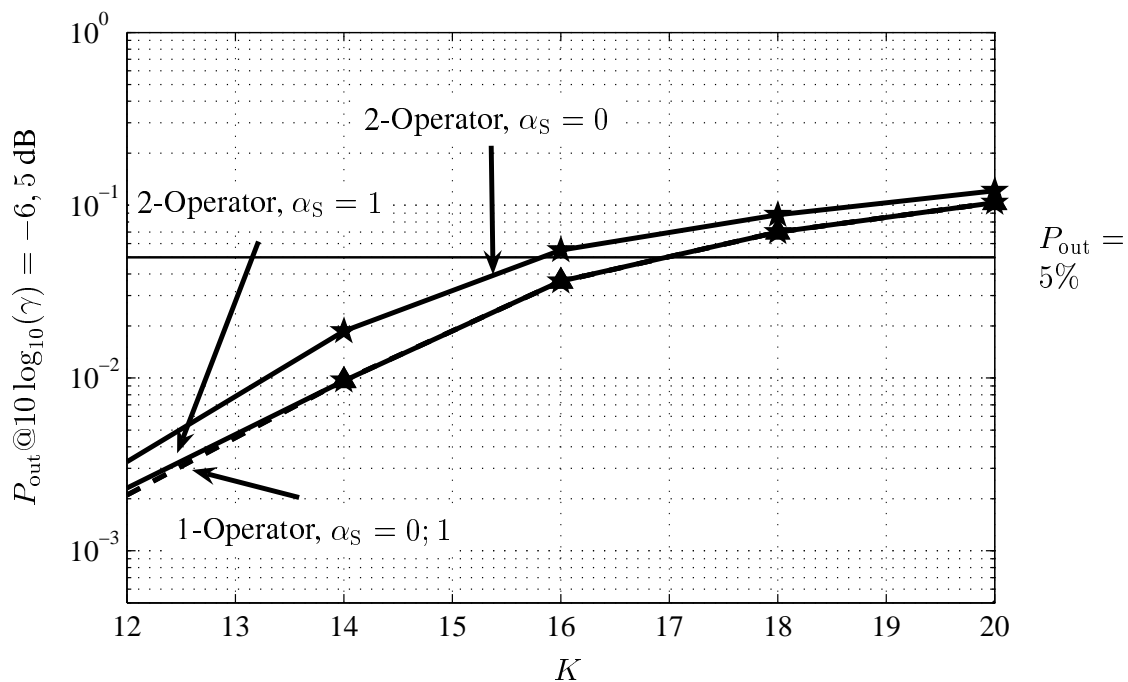


Bild 6.2. Aufwärtsstrecke,  $\xi = 1$ , Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall

Interoperator-Gleichstrecken-MAI: Bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 gibt es nahezu keinen Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$ , bei Kollokation, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, ist der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  mit 94 % extrem groß. Die BS→BS-MAI ist also bei den gewählten Simulationsannahmen so groß, daß statt 17 MSen nur noch eine einzige MS versorgt werden kann. Bei den im vorliegenden Kapitel 6 behandelten Simulationen werden jedoch Outage-MSen nicht abgeschaltet, so daß der Kapazitätsverlust durch BS→BS-MAI hier überschätzt wird. Trotzdem ist das Auftreten eines Synchronisationsfaktors  $\alpha_S$  ungleich 0 bei Kollokation der BSen von TD-CDMA-Mobilfunknetzen, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, unbedingt zu vermeiden, da die auftretende BS→BS-MAI extrem hoch sein kann.

Die Aufwärtsstrecke wird in Bild 6.1 für den Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, und in Bild 6.2 für den Fall der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 betrachtet. Ebenso wie in der Aufwärtsstrecke ist auch in der Abwärtsstrecke nahezu keine Interoperator-Gleichstrecken-MAI, d.h. für  $\alpha_S = 0$ , bei Kollokation, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, zu beobachten, bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 jedoch tritt ein signifikanter Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Interoperator-MAI von 5,6 % auf. Dieser Wert für  $\Delta C_{\text{out}}$  in Mikrozellen ist relativ hoch im Vergleich zum relativen Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  in Makrozellen von 3,4 %, vgl. Tabelle 5.4. Gründe hierfür sind, daß im Mikrozell-Szenario

- geringere kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  durch geringere Höhe der BS-Antennen auftritt, und

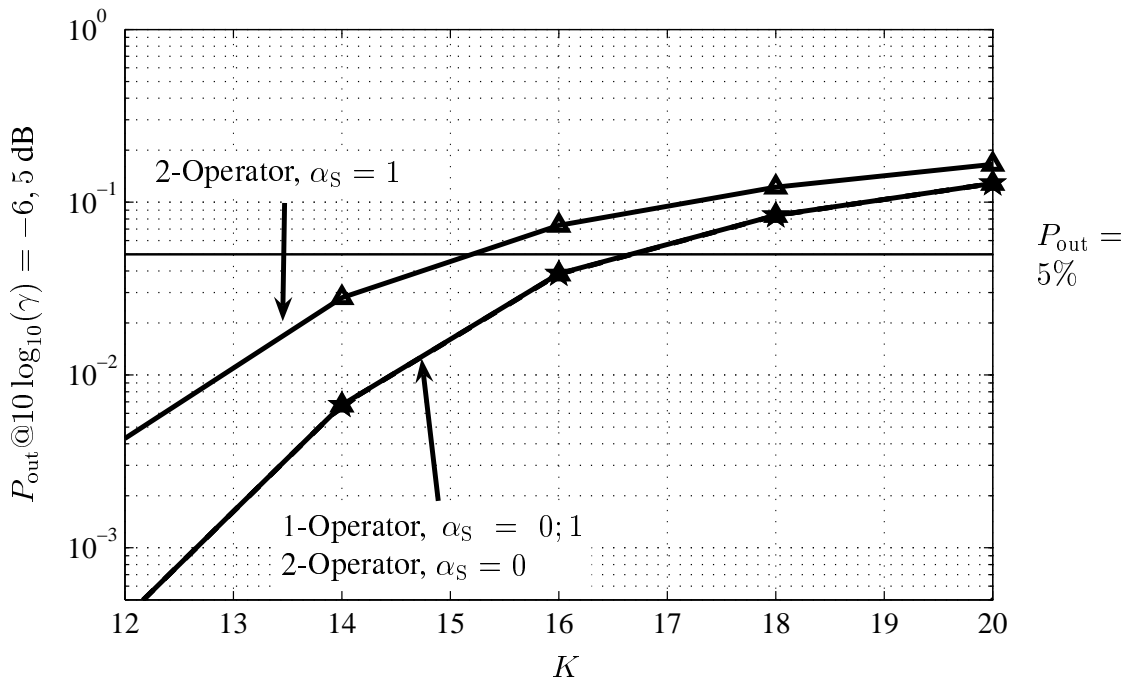


Bild 6.3. Abwärtsstrecke,  $\xi = 0$ , Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall

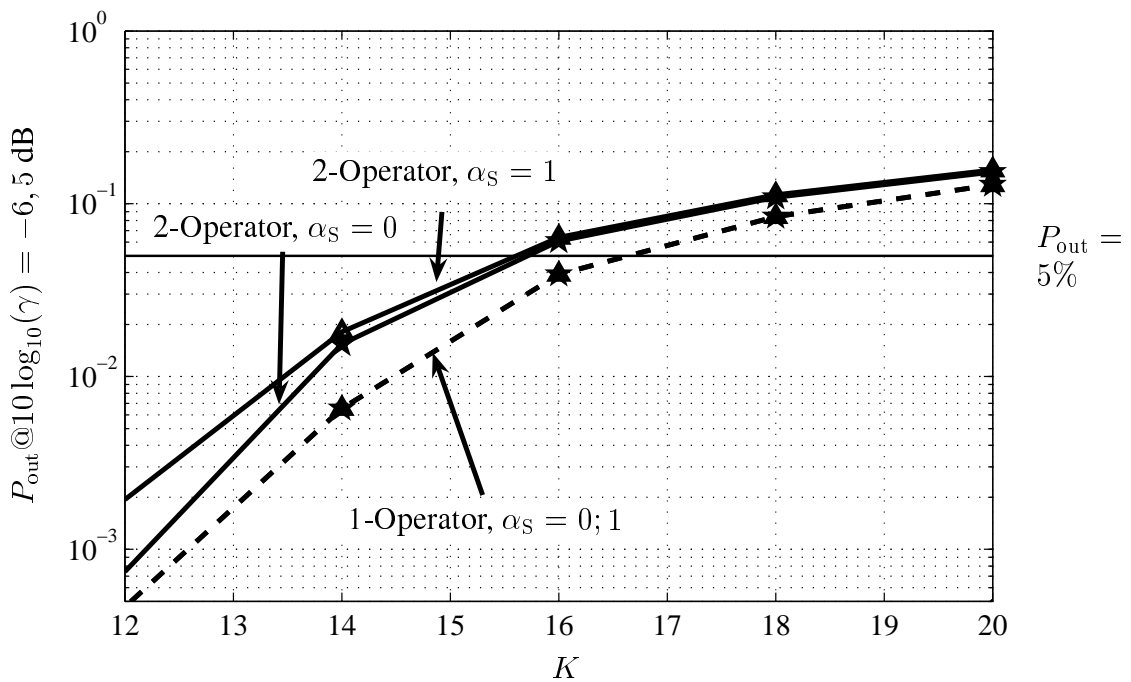


Bild 6.4. Abwärtsstrecke,  $\xi = 1$ , Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall

- MUD verwendet wird und somit die Intraoperator-MAI wesentlich geringer ist als in den Makrozellen, in denen SUD angenommen wird, wodurch in den Mikrozellen mehr Störer aktiv sind, die Interoperator-MAI verursachen können.

Die Anderstrecken-MAI vom Typ  $MS \rightarrow MS$ , die in der Abwärtsstrecke für  $\alpha_S$  gleich 1 auftritt, ist für die maximale Dislokation  $\xi$  von 1 etwa genauso hoch wie die Gleichstrecken-MAI für  $\alpha_S = 0$ ; beide verursachen einen Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  in der Größenordnung von 6 %. Auch für die  $MS \rightarrow MS$ -MAI gilt die bereits bei der  $BS \rightarrow BS$ -MAI festgestellte und für die Anderstrecken-MAI typische Eigenschaft, daß sie für Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, größer ist als für die maximale Dislokation  $\xi$  von 1. Der Grund ist, daß MSen am Zellrand mit maximaler Leistung in der Aufwärtsstrecke senden, in der Abwärtsstrecke aber geringe Leistung empfangen. Wenn zwei einander sehr nahe MSen verschiedener Operatoren sich jeweils am Zellrand befinden, d.h. für Kollokation bzw.  $\xi$  gleich 0, so ist die  $MS \rightarrow MS$ -Anderstrecken-MAI höher, als wenn eine der beiden MSen nahe ihrer BS wäre, wie dies bei der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 der Fall ist. Bei den auftretenden Kapazitätsverlusten  $\Delta C_{out}$  in der Größenordnung von 6 % bis 9 % für die Anderstrecken-MAI vom Typ  $MS \rightarrow MS$  ist zu beachten, daß in den Simulationen eine gleichförmige Verteilung der MSen in den Straßen betrachtet wird. Bei ungleichförmiger Verteilung der MSen, wie dies in der Realität z.B. durch das Warten von Fußgängern vor Ampeln oder sonstigen Menschenansammlungen auftritt, wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten hoher  $MS \rightarrow MS$ -MAI ungleich viel höher. Im Gegensatz zur Interoperator-Gleichstrecken-MAI, die bei sehr großen Zellen aufgrund hoher Sendeleistungen besonders schlimm ist, ist die  $MS \rightarrow MS$ -MAI bei sehr kleinen Zellen wegen der geringen Abstände zwischen den MSen besonders schlimm. Auf die  $MS \rightarrow MS$ -MAI kann jedoch durch Verfahren der dynamischen Kanalzuweisung [DV93, Haa00] reagiert werden, indem MSen mit besonders hoher MAI in einem anderen Zeitschlitz versorgt werden.

Abschließend ist zu sagen, daß Interoperator-Anderstrecken-MAI in Verbindung mit Kollokation, d.h. mit  $\xi$  gleich 0, in jedem Fall durch Synchronisation Zeitschlitze der Operatoren vermieden werden sollte, wobei hier vor allem die  $BS \rightarrow BS$ -MAI die Kapazität beeinträchtigt. Liegt Dislokation  $\xi$  größer als 0 bei  $\alpha_S \neq 0$  vor, so sind insbesondere sehr kleine Zellgrößen und ungleichförmige Verteilung der MSen kritisch durch hohe  $MS \rightarrow MS$ -MAI.

## Kapitel 7

# MAI zwischen einem WCDMA-Mobilfunknetz und einem TD-CDMA-Mobilfunknetz in einer hierarchischen Zellstruktur

### 7.1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Kapitel 7 wird die MAI zwischen einem WCDMA-Mobilfunknetz und einem TD-CDMA-Mobilfunknetz in einer hierarchischen Zellstruktur nach Bild 4.3 untersucht, wobei die betrachteten Mobilfunknetze in unterschiedlichen, direkt benachbarten Frequenzkanälen aktiv sind. Die auftretende MAI der Art Intersystem-Interoperator-Anderkanal-MAI wird mit der Intrasystem-Intraoperator-Gleichkanal-MAI verglichen, wie in Unterabschnitt 2.8.6 klassifiziert.

Die im vorliegenden Kapitel 7 verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 7.1 für das WCDMA-Mobilfunknetz und in Tabelle 7.2 für das TD-CDMA-Mobilfunknetz zusammengefaßt. Die Quellen dieser Parameter werden in den Tabellen durch Referenzen angegeben.

SHO sowie CM werden nicht eingesetzt, d.h. das in Unterabschnitt 5.4.4 beschriebene Verfahren IHO wird verwendet. Auf- und Abwärtsstrecke werden getrennt betrachtet.

Abweichend von den Betrachtungen in Kapitel 5 wird im vorliegenden Kapitel 7 für das WCDMA-Mobilfunknetz ein erforderliches  $E_b/N_0$  von 4,1 dB statt 5,1 dB angenommen. Der Grund hierfür ist, daß sich die Simulationsannahmen entsprechend den Vorgaben aus der Literatur [3GP02, HT02] im Laufe des Dissertationsvorhabens geändert haben und diese Abweichung wegen der begrenzten Zeit zum Abschließen des Dissertationsvorhabens nicht mehr berücksichtigt werden kann. Der veränderte Parameter wirkt sich auf die absolute Kapazität des Mobilfunknetzes aus. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß der Einfluß auf den im vorliegenden Kapitel 7 untersuchten Kapazitätsverlust durch Intersystem-MAI gering ist.

Im betrachteten Szenario mit hierarchischer Zellstruktur wird der Zellradius  $R_0$  der Makrozellen zu 577 m angenommen, da in Gebieten mit hoher Verkehrsdichte und somit der Notwendigkeit von Mikrozellen normalerweise auch der Zellradius der Makrozellen im gleichen Versorgungsgebiet relativ gering gewählt wird.

Tabelle 7.1. Parameter für die Simulationen zum 3G-Teilstandard WCDMA in Makrozellen in Kapitel 7

Parameter	Werte Aufwärtsstrecke	Kommentar
Leistungsregelung	$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	siehe Abschnitt 3.7
$\gamma_{\text{target}} / \text{dB}$	-21	gewünschtes SNR des Leistungsregelungsverfahrens $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , Berechnung nach (3.83), [HT02]
$T_{\text{max}} / \text{dBm}$	21	maximale Sendeleistung pro MS, siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$T_{\text{min}}$	0	minimale Sendeleistung, siehe Unterabschnitt 3.7.4
$\delta_s / \text{dB}$	0,5	Schrittweite der iterativen Leistungsregelung auf $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$N / \text{dBm}$	-103	thermische Rauschleistung, [3GP02]
$f_0 / \text{MHz}$	1922,5	Trägerfrequenz, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\sigma_a / \text{dB}$	10	Standardabweichung des Lognormal-Schwundes, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$h_r / \text{m}$	12	mittlere Gebäudehöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\Delta h_b / \text{m}$	15	BS-Antennenhöhe über Hausdächern, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$h_{\text{MS}} / \text{m}$	1,5	MS-Antennenhöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$G / \text{dBi}$	11	Antennengewinn der BSen, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$A_{\text{min}} / \text{dB}$	70	kleinstmögliche Funkfelddämpfung, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$R_0 / \text{m}$	577	Zellradius, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$r$	1	Clustergröße, siehe Abschnitt 1.4, [3GP02]
$\kappa$	1	Faktor zum Beschreiben des Detektionsverfahrens, 0=MUD, 1=SUD, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\zeta$	1	Orthogonalitätsfaktor, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\xi$	1	Dislokation, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$R_b / \text{kb/s}$	12,2	Bitrate für Sprachdienst, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$E_b/N_0 / \text{dB}$	4,1	minimal erforderliches $E_b/N_0$ , siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$R_{\text{chip}} / \text{MHz}$	3,84	Chiprate, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$\nu_s / \%$	100	Aktivitätsfaktor Sprache, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]

Tabelle 7.2. Parameter für die Simulationen zum 3G-Teilstandard TD-CDMA in Mikrozellen in Kapitel 7

Parameter	Werte Ab- / Aufwärtsstrecke	Kommentar
Leistungsregelung	$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	siehe Abschnitt 3.7
$\gamma_{\text{target}} / \text{dB}$	-6,5 / -6,5	gewünschtes SNR des Leistungsregelungsverfahrens $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , Berechnung nach (6.1)
$T_{\text{max}} / \text{dBm}$	20 / 21	maximale Sendeleistung pro MS, siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$T_{\text{min}}$	0	minimale Sendeleistung, siehe Unterabschnitt 3.7.4
$\delta_s / \text{dB}$	0,5	Schrittweite der iterativen Leistungsregelung auf $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ , siehe Unterabschnitt 3.7.4, [3GP02]
$N / \text{dBm}$	-99 / -103	thermische Rauschleistung, [3GP02]
$f_0 / \text{MHz}$	1917,5	Trägerfrequenz, siehe Unterabschnitt 3.3.2, [3GP02]
$\sigma_a / \text{dB}$	10	Standardabweichung des Lognormal-Schwundes, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_r / \text{m}$	12	mittlere Gebäudehöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_{\text{Mikro-BS}} / \text{m}$	10	BS-Antennenhöhe, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$h_{\text{MS}} / \text{m}$	1,5	MS-Antennenhöhe siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$w_s / \text{m}$	15	Breite der Straßen, siehe Unterabschnitt 3.2.3, [3GP02]
$w_b / \text{m}$	75	Breite der Häuserblöcke, siehe Unterabschnitt 3.2.3, [3GP02]
$G / \text{dBi}$	11	Antennengewinn der BSen, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$A_{\text{min}} / \text{dB}$	53	kleinstmögliche Funkfelddämpfung, siehe Unterabschnitt 3.3.3, [3GP02]
$r$	1	Clustergröße, siehe Abschnitt 1.4, [3GP02]
$\kappa$	1 / 0	Faktor zum Beschreiben des Detektionsverfahrens, 0=MUD, 1=SUD, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\zeta$	0,06 / 1	Orthogonalitätsfaktor, siehe Abschnitt 3.5, [3GP02]
$\xi$	0; 1	Dislokation, siehe Kapitel 4, [3GP02]
$\alpha_s$	0; 1	Synchronisationsfaktor, siehe Abschnitt 2.3 und Abschnitt 3.6
$R_b / \text{kb/s}$	12,2	Bitrate für Sprachdienst, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$E_b/N_0 / \text{dB}$	6,7 / 6,7	minimal erforderlich, siehe Abschnitt 3.9, [HT02], [3GP02]
$R_{\text{chip}} / \text{MHz}$	3,84	Chiprate, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$\nu_s$	1	Aktivitätsfaktor Sprache, siehe Abschnitt 3.9, [HT02]
$\nu_t$	1/15	Anteil der von einem Teilnehmer genutzten Zeitschlitze eines Frames

Wegen der im vorliegenden Kapitel 7 zu betrachtenden Anderstrecken-MAI ist es erforderlich, die Funkfelddämpfung zwischen Mikro-BSen und Makro-BSen zu bestimmen. Dabei kann nicht das in Kapitel 6 verwendete Modell eingesetzt werden, da die Makro-BSen im Gegensatz zu den Mikro-BSen wesentlich höher angebracht sind als die Hausdächer, vgl. Abschnitt 3.3.2. Es kann davon ausgegangen werden, daß in vielen Fällen LoS zwischen Mikro- und Makro-BSen besteht, so daß das LoS-Funkfelddämpfungsmodell nach (3.2) mit einem Dämpfungsexponenten  $\alpha_d$  von 2,5 zum Beschreiben der Funkfelddämpfung  $A$  zwischen Mikro- und Makro-BSen geeignet ist. In (3.2) ist aufgrund der Richtcharakteristik jeder der beiden BS-Antennen ein Gewinn  $G$  von 22 dBi zu verwenden. Mit der Höhe  $h_r$  der Hausdächer, der Höhe  $\Delta h_b$  der Makro-BS-Antenne über den Hausdächern und der Höhe  $h_{\text{Mikro-BS}}$  der Mikro-BS ist der in (3.2) eingehende Höhenunterschied der BS-Antennen

$$\Delta h = h_r + \Delta h_b - h_{\text{Mikro-BS}}. \quad (7.1)$$

Lognormal-Schwund wird verwendet, um sich ändernde Pfade durch das veränderliche Szenario um die BSen zu modellieren. Da die BSen ortsfest sind, ist die Standardabweichung  $\sigma_a$  mit 2 dB relativ gering zu wählen. Durch den Parameter  $A_{\text{min}}$  wird die kleinstmögliche Funkfelddämpfung modelliert, so daß die resultierende Funkfelddämpfung

$$A_{\text{BS-BS}}/\text{dB} = \max(A_{\text{LoS}}/\text{dB} + \sigma_a/\text{dB} \cdot N(0, 1), A_{\text{min}}/\text{dB}). \quad (7.2)$$

ist. Zum Bestimmen der kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  für (7.2) werden die Szenarien der Kollokation, d.h.  $\xi$  gleich 0, und der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 nach Kapitel 4 herangezogen:

- $\xi = 0$ : Der minimale vertikale Abstand  $\Delta h$  der Mikro- und der Makro-BS-Antenne beträgt mit den Parametern in den Tabellen 7.1 und 7.2 17 m. Nach (3.2) ergibt sich eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  von 63 dB unter der Annahme  $\alpha_d$  gleich 2 und  $G$  gleich 0 dBi. Für die Wahl von  $G$  wird berücksichtigt, daß die eingesetzten Dipolantennen nach unten verschwindenden Gewinn haben.
- $\xi = 1$ : Der minimale horizontale Abstand  $\rho$  der Mikro- und der Makro-BS beträgt mit den Parametern in Tabelle 7.2 und Bild 4.3 90 m; zwischen den Antennen besteht direkte Sichtverbindung. Nach (3.2) ergibt sich eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  von 71 dB unter der Annahme  $\alpha_d$  gleich 2 und  $G$  gleich 16 dBi. Bei der Wahl von  $G$  wird aufgrund des vertikalen Versatzes  $\Delta h$  der BS-Antennen der Gewinn jeder Antenne von 11 dBi auf 8 dBi reduziert, vgl. [3GP02].

Zum Berechnen der Funkfelddämpfung  $A$  zwischen zwei MSen kann ebenso wie in Kapitel 6 das Mikrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach Berg, siehe Unterabschnitt 3.3.3, herangezogen werden. Dabei ist in (3.14) der Antennengewinn  $G$  zu 0 dBi zu setzen, da für die MS-Antennen keine Gewinne durch Richtwirkung angenommen werden können [3GP02]. Der

Tabelle 7.3.  $T_{\max}$ , ACIR  $\delta_{\text{ACIR}}$  und kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  sowie die maximale Intersystem-MAI-Leistung  $I^{\max, \text{IrS}}$  von einem einzelnen Störer, d.h. BS oder MS

MAI-Quelle → MAI-Senke	$T_{\max}/\text{dBm}$	$\delta_{\text{ACIR}}/\text{dB}$	$A_{\min}/\text{dB}$	$I^{\max, \text{IrS}}/\text{dBm}$
Mikro → Makro				
TD-CDMA MS → WCDMA BS Aufwärtsstrecke → Aufwärtsstrecke	21	33	70	-82
TD-CDMA BS → WCDMA BS Abwärtsstrecke → Aufwärtsstrecke	33	42	63	-72
Makro → Mikro				
WCDMA MS → TD-CDMA BS Aufwärtsstrecke → Aufwärtsstrecke	21	33	53	-65
WCDMA MS → TD-CDMA MS Aufwärtsstrecke → Abwärtsstrecke	21	30	38,4	-47,4

kleinstmögliche Abstand  $\rho$  zwischen zwei MSen wird nach [3GP02] zu 1 m angenommen, so daß sich mit (3.13) eine kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  von 38,4 dB ergibt.

In Tabelle 7.3 sind die Simulationsannahmen für die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  und das  $\delta_{\text{ACIR}}$ , das die Dämpfung des Nachbarkanals modelliert, für die möglichen Interferenzkonstellationen zusammengestellt. Dabei wird für das WCDMA-Mobilfunknetz nur die Aufwärtsstrecke betrachtet, da bei der gegenwärtigen Frequenzzuweisung in Europa Intersystem-MAI zwischen WCDMA- und TD-CDMA-Mobilfunknetzen nur für die WCDMA-Aufwärtsstrecke möglich ist, vgl. Abschnitt 1.1. In Kombination mit der maximal zulässigen Sendeleistung  $T_{\max}$  der entsprechenden Störer läßt sich mit diesen Werten  $A_{\min}$  und  $\delta_{\text{ACIR}}$  die maximale Intersystem-MAI-Leistung

$$I^{\max, \text{IrS}}/\text{dBm} = T_{\max}/\text{dBm} - \delta_{\text{ACIR}}/\text{dB} - A_{\min}/\text{dB} \quad (7.3)$$

bestimmen, die ein einzelner Störer an einem Empfänger des anderen Mobilfunknetzes verursachen kann. Diese maximale MAI-Leistung  $I^{\max, \text{IrS}}$  wird ebenfalls in Tabelle 7.3 gezeigt. Grundsätzlich ist festzuhalten, daß die maximalen MAI-Leistungen  $I^{\max, \text{IrS}}$  im Fall Makro→Mikro um etwa 20 dB höher sind als für den Fall Mikro→Makro. Aufgrund der Zugehörigkeit der betrachteten MAI-Art zur Klasse der Anderhierarchie-MAI muß jedoch beachtet werden, daß die Dichte der gleichzeitig aktiven MSen im Mikrozell-Mobilfunknetz wesentlich größer ist als im Makrozell-Mobilfunknetz, und daß nicht alle Störer maximale Sendeleistung  $T_{\max}$  verwenden. Aus diesem Grund ist das Abschätzen der Schlimmstfall-Situationen nicht ausreichend, um die gegenseitigen Beeinträchtigungen der Mobilfunknetze zu bewerten. Daher werden in den folgenden Abschnitten 7.2 und 7.3 die Ergebnisse von Simulationen ausgewertet, in denen die unterschiedlichen Dichten der MSen in Mikro- und Makrozellen berücksichtigt werden.



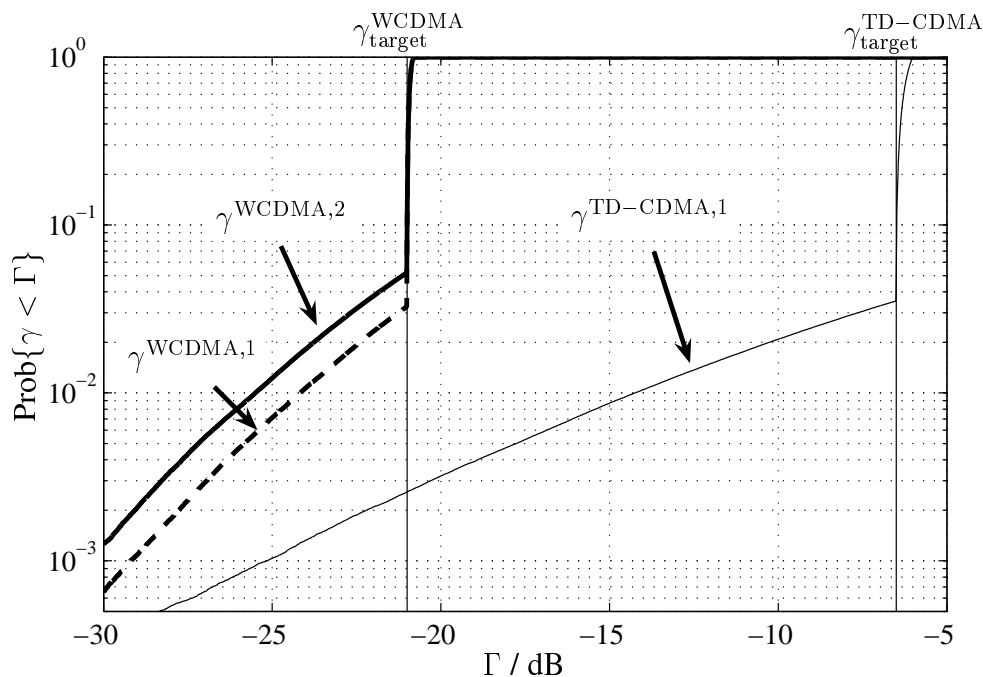


Bild 7.1. TD-CDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  WCDMA Aufwärtsstrecke, Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$ ,  $K^{\text{WCDMA}} = 80$ ,  $K^{\text{TD-CDMA}} = 16$ ,  $\xi = 1$

## 7.2 Analyse der Verteilungsfunktionen des SNRs $\gamma$

Im vorliegenden Abschnitt 7.2 werden zunächst die grundlegenden Vorgehensweisen zum Auswerten der Intersystem-MAI zwischen den betrachteten Mobilfunknetzen anhand von Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  gezeigt.

In den Bildern 7.1 und 7.2 werden jeweils Verteilungsfunktionen des SNRs für das WCDMA-Mobilfunknetz und das TD-CDMA-Mobilfunknetz gezeigt, wobei ausschließlich das Leistungsregelungsverfahren  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$  eingesetzt wird. Die Verteilungsfunktionen für den Ein-System-Fall, bei dem keine Intersystem-MAI berücksichtigt wird, werden durch die Bezeichner  $\gamma^{\text{WCDMA},1}$  und  $\gamma^{\text{TD-CDMA},1}$  gekennzeichnet. Die Zahl  $K^{\text{WCDMA}}$  bzw.  $K^{\text{TD-CDMA}}$  der MSen pro BS für das WCDMA- bzw. das TD-CDMA-Mobilfunknetz wird dabei so gewählt, daß das Mobilfunknetz mit ungefähr 5 % MSen in Outage an der Kapazitätsgrenze ist. Während für das WCDMA-Mobilfunknetz nur die Abwärtsstrecke betrachtet wird, wird für das TD-CDMA-Mobilfunknetz in Bild 7.1 die Aufwärtsstrecke und in Bild 7.2 die Abwärtsstrecke betrachtet. Beim Vergleich der Verteilungsfunktionen  $\gamma^{\text{TD-CDMA},1}$  für Auf- und Abwärtsstrecke erkennt man den typischen Unterschied der wesentlich flacheren Verteilungsfunktionen  $\gamma^{\text{TD-CDMA},1}$  für die Aufwärtsstrecke im Vergleich zu den Verteilungsfunktionen  $\gamma^{\text{TD-CDMA},1}$  für die Abwärtsstrecke, was durch die unterschiedlichen Aus-

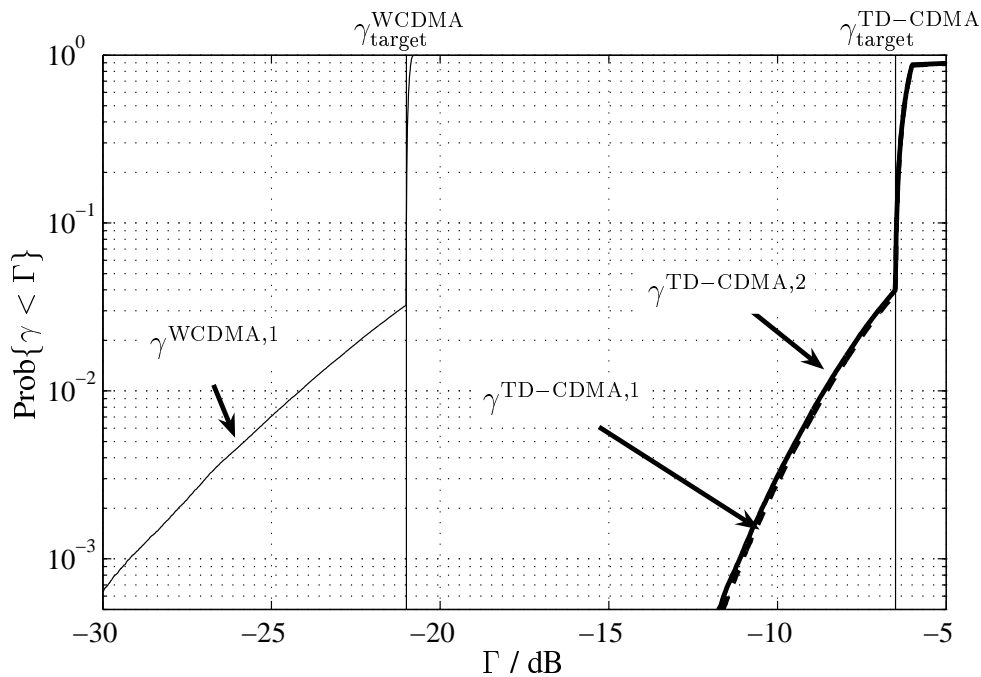


Bild 7.2. WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Abwärtsstrecke, Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$ ,  $K^{\text{WCDMA}} = 80$ ,  $K^{\text{TD-CDMA}} = 16$ ,  $\xi = 0$

wirkungen der MSen in Outage, die alle gleiche maximale Sendeleistung  $T_{\max}$  erhalten, bewirkt wird, vgl. Unterabschnitt 5.3.1.

Zum Auswerten der Intersystem-MAI wird in Bild 7.1 die Verteilungsfunktion  $\gamma^{\text{WCDMA},2}$  des WCDMA-Mobilfunknetzes gezeigt, das durch das TD-CDMA-Mobilfunknetz beeinflusst wird, und in Bild 7.2 die Verteilungsfunktion  $\gamma^{\text{TD-CDMA},2}$  des TD-CDMA-Mobilfunknetzes, das durch das WCDMA-Mobilfunknetz beeinflusst wird. Dies sind beispielhaft zwei der vier im vorliegenden Kapitel 7 betrachteten MAI-Typen nach Tabelle 7.3. Um eine Vermischung der auftretenden wechselseitigen Effekte durch Intersystem-MAI zu vermeiden, wird jede der vier Arten von Intersystem-MAI nach Tabelle 7.3 getrennt betrachtet. Durch die Darstellung sowohl der Verteilungsfunktion  $\gamma^{\text{WCDMA},1}$  als auch der Verteilungsfunktion  $\gamma^{\text{TD-CDMA},1}$  im gleichen Bild soll verdeutlicht werden, daß die Intersystem-MAI maßgeblich davon beeinflusst wird, wie stark das störende Mobilfunknetz ausgelastet ist. Die Höhe der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Intersystem-MAI wird in Abschnitt 7.3 diskutiert, da die Verteilungsfunktionen des SNRs  $\gamma$  zu deren Beurteilung nicht geeignet sind.

Tabelle 7.4. Koexistenz von WCDMA- und TD-CDMA-Mobilfunknetzen im Szenario mit hierarchischer Zellstruktur:  $C_{out,1}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Ein- bzw. Zwei-System-Fall sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{out}$  nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  für die vier betrachteten Koexistenzszenarien

MAI-Quelle → MAI-Senke		$\xi$	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$	$\Delta C_{out}$	Bilder
Mikro → Makro						
TD-CDMA MS Aufwärtsstrecke	WCDMA BS → Aufwärtsstrecke	1	81,2	79,9	1,6 %	7.3
TD-CDMA BS Abwärtsstrecke	WCDMA BS → Aufwärtsstrecke	0	81,2	80,0	1,5 %	7.4
		1		80,7	0,6 %	
Makro → Mikro						
WCDMA MS Aufwärtsstrecke	TD-CDMA BS → Aufwärtsstrecke	1	17,0	16,6	2,9 %	7.5
WCDMA MS Aufwärtsstrecke	TD-CDMA MS → Abwärtsstrecke	0	16,7	16,7	0,1 %	7.6

### 7.3 Analyse der Kapazität

Im vorliegenden Abschnitt 7.3 wird auf den Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  durch Intersystem-MAI eingegangen. Die Simulationsergebnisse des vorliegenden Abschnitts 7.3 bzgl. der Kapazitäten  $C_{out,1}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Ein- bzw. Zwei-System-Fall sowie bzgl. der Kapazitätsverluste  $\Delta C_{out}$  durch Intersystem-MAI werden für die vier betrachteten Koexistenzszenarien in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Diese Kapazitäten  $C_{out,1}$  bzw.  $C_{out,2}$  können aus den vier Bildern 7.3 bis 7.6 entnommen werden. Es wird jeweils für die Gleichstrecken-MAI vom Typ BS→MS bzw. MS→BS die maximale Dislokation  $\xi$  von 1 als Schlimmstfall und für die Anderstrecken-MAI vom Typ BS→BS bzw. MS→MS die Kollokation, d.h.  $\xi$  gleich 0, als Schlimmstfall betrachtet, vgl. Kapitel 6 und Abschnitt 2.3.

Beim Betrachten der von dem TD-CDMA-Mobilfunknetz in der Aufwärtsstrecke für das WCDMA-Mobilfunknetz verursachten Intersystem-MAI in Bild 7.3 wird ein Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  durch Intersystem-MAI von etwa 1,5 % festgestellt, siehe Tabelle 7.4. Im Vergleich zu dem Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\chi}$  durch ein zweites WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen nach Abschnitt 5.2.2 von etwa 2 %, siehe Tabelle 5.3, beim Zellradius  $R_0$  von 577 m ist somit die Beeinträchtigung durch das Mikrozellnetz in etwa der gleichen Größenordnung. Zwar sind im Mikrozellnetz wesentlich mehr MSen aktiv als im Makrozellnetz, aber die einzelnen MSen im Mikrozellnetz kommen mit weniger Sendeleistung aus als im Makrozellnetz.

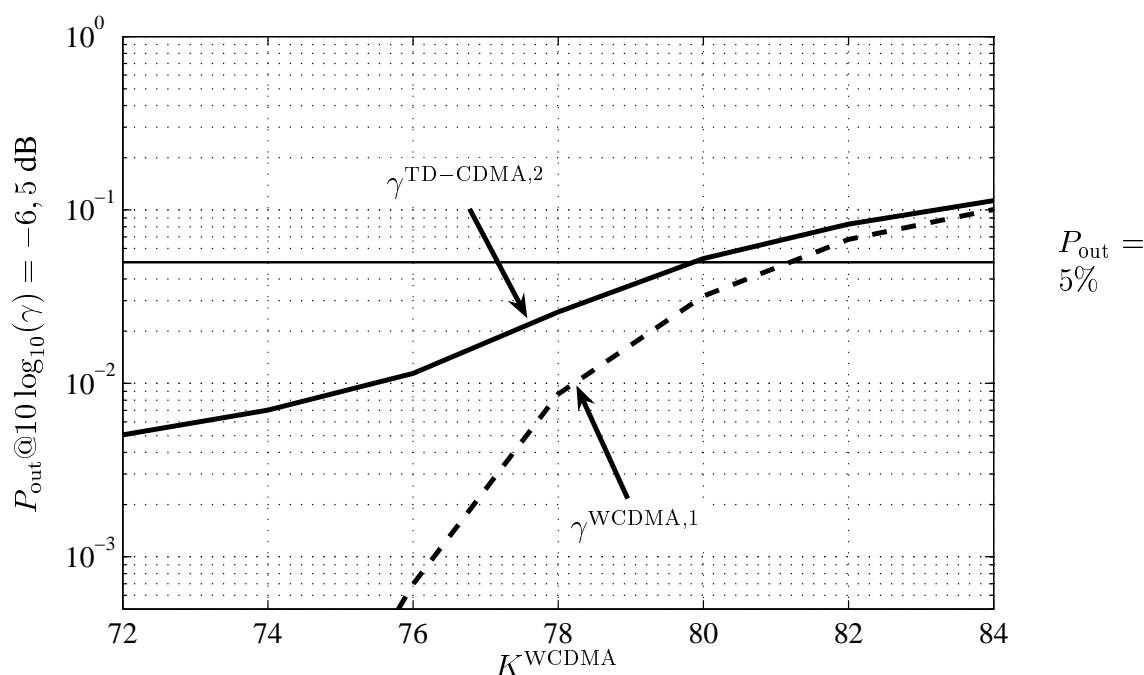


Bild 7.3. TD-CDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  WCDMA Aufwärtsstrecke, Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K^{\text{WCDMA}}$ ,  $K^{\text{TD-CDMA}} = 16$ ,  $\xi = 1$

Beim Betrachten der Anderstrecken-MAI vom Typ BS $\rightarrow$ BS wird in Kapitel 6 für die Koexistenz zweier Mobilfunknetze in Mikrozellen ein extrem hoher Kapazitätsverlust im gestörten Mobilfunknetz bei Kollokation der BSen, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, festgestellt. Für das Szenario mit hierarchischer Zellstruktur im vorliegenden Kapitel 7 ist dies nicht der Fall; die auftretende Intersystem-MAI vom Typ BS $\rightarrow$ BS wird nicht größer als die MAI vom Typ MS $\rightarrow$ BS, wie durch Vergleich der aus den Bildern 7.3 und 7.4 abgeleiteten Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  festgestellt werden kann. Die Anderstrecken-MAI vom Typ BS $\rightarrow$ BS ist bei Kollokation zwischen Mikro-BSen und Makro-BSen, d.h. bei  $\xi$  gleich 0, wesentlich ungefährlicher als zwischen zwei Mikro-BSen, da die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\text{min}}$  von 63 dB zwischen Mikro-BSen und Makro-BSen aufgrund des Höhenunterschieds wesentlich größer ist als der  $A_{\text{min}}$  von 30 dB zwischen zwei Mikro-BSen. Durch maximale Dislokation  $\xi$  von 1 statt Kollokation, d.h. statt  $\xi$  gleich 0, der Mikro- und Makro-BSen vermindert sich die Intersystem-MAI von etwa 1,5 % auf 0,6 %.

Für die Auswirkungen des WCDMA-Mobilfunknetzes auf das TD-CDMA-Mobilfunknetz wird zunächst in Bild 7.5 die Aufwärtsstrecke des TD-CDMA-Mobilfunknetzes betrachtet. Der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  im TD-CDMA-Mobilfunknetz von 2,9 %, siehe Tabelle 7.4, ist geringer als die Beeinträchtigung durch ein zweites TD-CDMA-Mobilfunksystem in Mikrozellen, das nach Tabelle 6.3 einen Kapazitätsverlust von 7,3 % verursachen kann. Der hohe Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  von 7,3 % für die Koexistenz zweier Mobilfunknetze in

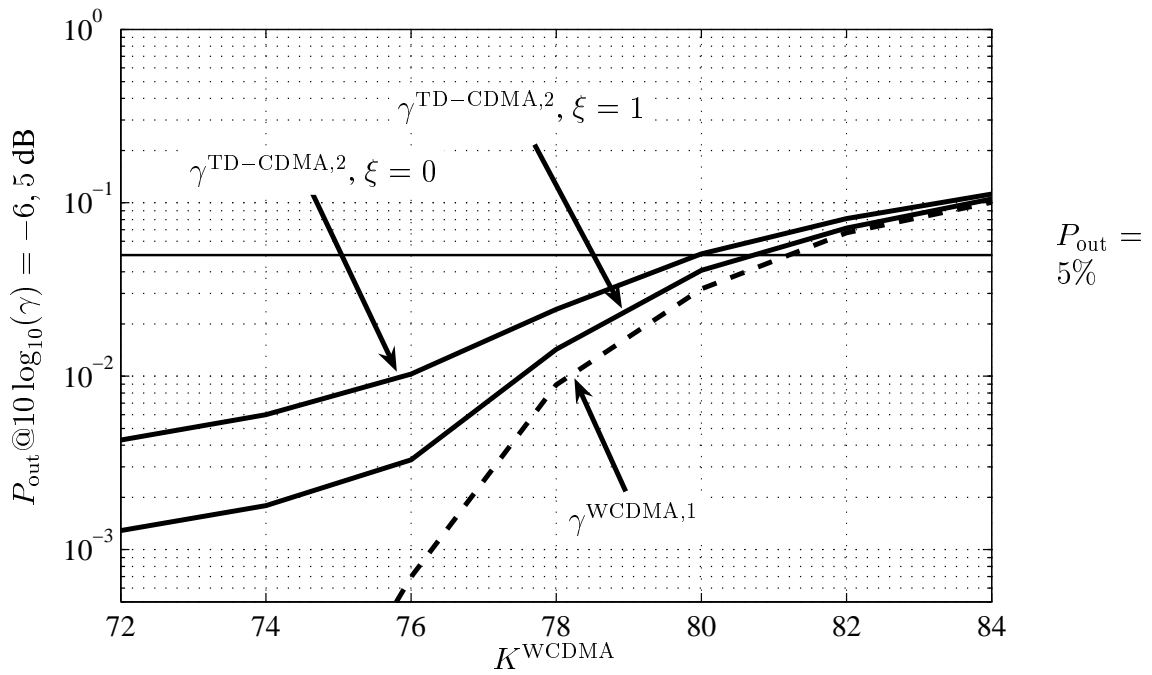


Bild 7.4. TD-CDMA Abwärtsstrecke → WCDMA Aufwärtsstrecke, Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K^{\text{WCDMA}}$ ,  $K^{\text{TD-CDMA}} = 16$ ,  $\xi = 0; 1$

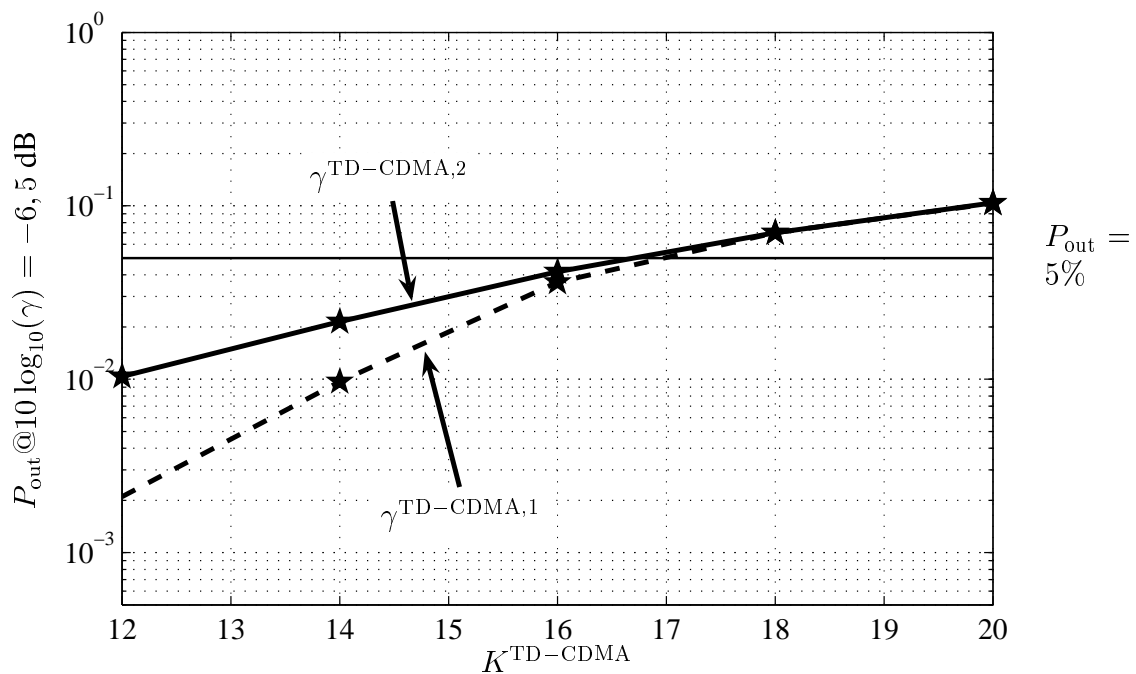


Bild 7.5. WCDMA Aufwärtsstrecke → TD-CDMA Aufwärtsstrecke, Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K^{\text{TD-CDMA}}$ ,  $K^{\text{WCDMA}} = 80$ ,  $\xi = 1$

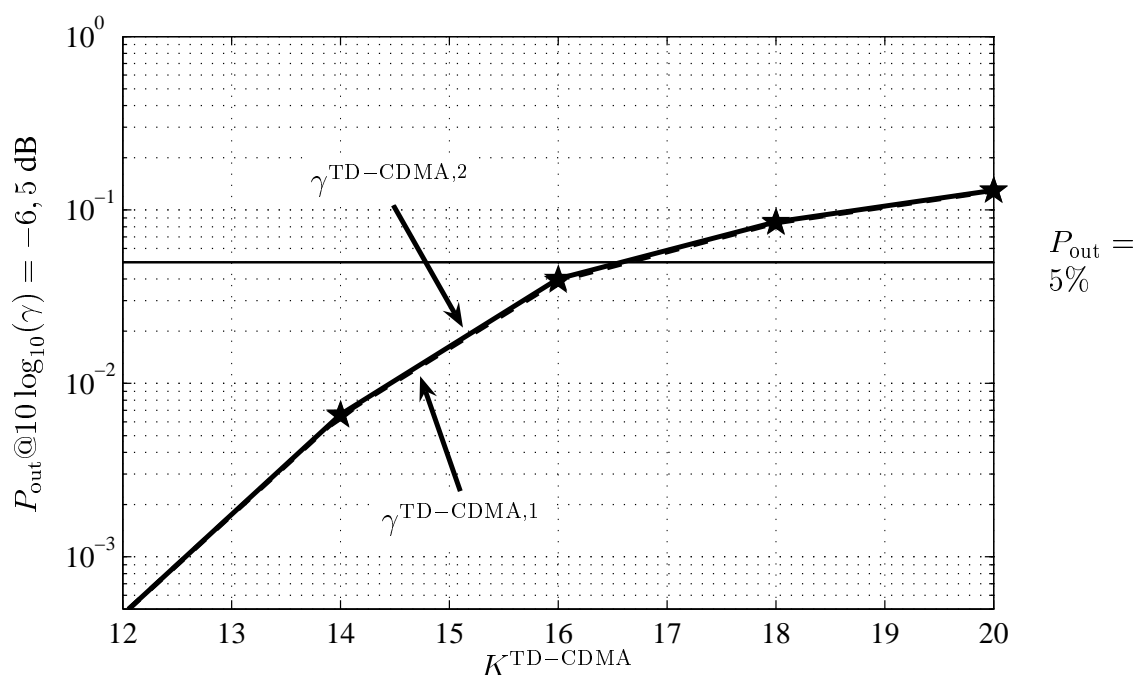


Bild 7.6. WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Abwärtsstrecke, Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K^{\text{TD-CDMA}}$ ,  $K^{\text{WCDMA}} = 80$ ,  $\xi = 0$

Mikrozellen ergibt sich jedoch nur bei maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 der BSen; für Kollokation, d.h. für  $\xi$  gleich 0, sinkt der Kapazitätsverlust auf 0,1 %. Damit ist auch der geringere Kapazitätsverlust von 2,9 % bei der Beeinträchtigung des TD-CDMA-Mobilfunknetzes in Mikrozellen durch das WCDMA-Mobilfunknetz in Makrozellen plausibel, da aufgrund der unterschiedlichen Größe von Mikrozellen und Makrozellen eine hohe Dislokation  $\xi$  hier geringeren Einfluß hat, denn ob eine Makro-MS am Rand oder in der Mitte der Mikrozelle ist, ändert an deren Sendeleistung nicht viel.

Für die Auswirkungen des WCDMA-Mobilfunknetzes auf das TD-CDMA-Mobilfunknetz wird nun in Bild 7.6 die Abwärtsstrecke des TD-CDMA-Mobilfunknetzes betrachtet. Durch die auftretende Anderstrecken-MAI vom Typ MS $\rightarrow$ MS wird ein kaum wahrnehmbarer Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  von nur 0,1 % verursacht. Auch dies ist wesentlich weniger als bei der Koexistenz zweier TD-CDMA-Mobilfunknetze in Mikrozellen, siehe Kapitel 6, da die Dichte der Makro-MSen wesentlich niedriger ist als die Dichte der Mikro-MSen und so die Wahrscheinlichkeit für eine sehr geringe Funkfelddämpfung zwischen zwei MSen sehr gering ist. Dies zeigt, daß das Betrachten von Schlimmstfall-Szenarien nicht ausreicht, um die Koexistenz zweier Mobilfunknetze ausreichend zu bewerten: Obwohl nach Tabelle 7.3 die von einem einzelnen Störer maximal mögliche Intersystem-MAI für den Fall WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Abwärtsstrecke etwa 10 dB höher ist als für den Fall WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Aufwärtsstrecke,

---

ist der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{\text{out}}$  durch Intersystem-MAI für den Fall WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Abwärtsstrecke wesentlich geringer als für den Fall WCDMA Aufwärtsstrecke  $\rightarrow$  TD-CDMA Abwärtsstrecke, wie aus den in den Bildern 7.5 und 7.6 dargestellten Ergebnissen der Simulationen abgeleitet werden kann.

## Kapitel 8

# Methoden zum Vermindern von Interoperator-MAI durch Antennentechniken

Im vorliegenden Abschnitt 8 wird ein Konzept zum Vermindern der Interoperator-MAI vorgestellt, das im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelt wurde. Dieser Ansatz wurde in [HM03] vom Verfasser bereits veröffentlicht.

Wie in Abschnitt 1.6 erläutert, tritt hohe Interoperator-MAI immer dann auf, wenn bei hoher Dislokation  $\xi$  der BSen zweier Operatoren A und B die  $MS_B$  des Operators B sehr nahe an der  $BS_A$  des Operators A ist. In der Aufwärtsstrecke verwendet die  $MS_B$  sehr hohe Sendeleistung wegen hohen Abstands zur versorgenden  $BS_B$  und verursacht hohe Interoperator-MAI an der  $BS_A$  wegen geringer Funkfelddämpfung zwischen  $MS_B$  und  $BS_A$ , vgl. Unterabschnitt 5.2.1; in der Abwärtsstrecke empfängt die  $MS_B$  sehr niedrige Nutzleistung wegen hohen Abstands zur versorgenden  $BS_B$ , empfängt aber hohe Interoperator-MAI von der  $BS_A$  wegen geringer Funkfelddämpfung zwischen  $MS_B$  und  $BS_A$ , vgl. Unterabschnitt 5.3.1. Der in Makrozellen zu beobachtende Kapazitätsverlust durch Interoperator-MAI ist bei getrenntem Betrachten von Auf- und Abwärtsstrecke für die Aufwärtsstrecke wesentlich höher als für die Abwärtsstrecke, vgl. die Unterabschnitte 5.2.2 und 5.3.2. Beim Berücksichtigen von Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke kann jedoch festgestellt werden, daß die in der Aufwärtsstrecke auftretenden Kapazitätsverluste durch solche Wechselwirkungen nicht größer werden können als die in der Abwärtsstrecke auftretenden Kapazitätsverluste. Aus diesem Grund genügt es, für das im vorliegenden Kapitel 8 vorgestellte Konzept zum Mindern von Interoperator-MAI die Abwärtsstrecke zu betrachten.

Mit der Erkenntnis, daß hohe Interoperator-MAI in der Abwärtsstrecke nur an relativ wenigen  $MS_B$ en sehr nahe an der  $BS_A$  auftritt, können Ansätze zum Vermindern der MAI gesucht werden. Das Vermeiden von Situationen, bei denen eine  $MS_B$  sehr nahe an der  $BS_A$  ist, ist nach Ansicht des Verfassers nicht möglich, da jeder Operator eine lückenlose Bedienung seines Versorgungsgebiets gewährleisten möchte. Dagegen ist es möglich, die Leistung der Interoperator-MAI zu vermindern, die an der  $MS_B$  von der  $BS_A$  empfangen wird. Ein nach Ansicht des Verfassers vielversprechender Ansatz zum Reduzieren der Leistung der Interoperator-MAI ist ein geschicktes Anpassen des vertikalen Strahlungsdiagramms der BS-Antennen, um die Antennengewinne in Richtung von nahen MSen zu vermindern, d.h., die Antennengewinne  $G(\vartheta)$  für Depressionswinkel  $\vartheta \gg 90^\circ$ . Diese Maßnahme hat zwei Effekte:



- Geringere Leistung der Interoperator-MAI, da die von der  $BS_A$  gesendete Leistung in Richtung der nahen  $MS_B$  mit geringerem Antennengewinn  $G(\vartheta)$  abgestrahlt wird.
- Höhere Leistung der Intraoperator-MAI, da die  $BS_A$  höhere Sendeleistung zum Versorgen ihrer eigenen nahen  $MS_A$ en aufbringen muß.

Wegen diesen beiden gegenläufigen Effekten führt die vorgeschlagene Maßnahme zu einem Kompromiß zwischen verminderter Leistung der Interoperator-MAI und erhöhter Leistung der Intraoperator-MAI. Das Potential zum Vermindern der Interoperator-MAI ist sehr hoch, da die wenigen  $MS_B$ en nahe der  $BS_A$  sehr hohe Interoperator-MAI erfahren. Im Gegensatz dazu ist der zu erwartende Anstieg der Intraoperator-MAI sehr gering, da die  $BS_A$  nur für wenige  $MS_A$ en die Sendeleistung erhöhen muß. Für diese wenigen  $MS_A$ en muß an der nahen  $BS_A$  zudem ohnehin nur geringe Sendeleistung aufgebracht werden, die auf die gesamte MAI im Mobilfunknetz der Operators A nur geringen Einfluß hat.

Um die vorgeschlagene Methode zum Vermindern von MAI durch Antennentechniken zu analysieren, wird im folgenden ein einfaches Brick-Wall-Modell zum Beschreiben des vertikalen Strahlungsdiagramms der BS-Antennen eingeführt. In diesem Brick-Wall-Modell können durch Variation weniger Parameter die Eigenschaften der Antenne verändert werden, um die grundlegenden Einflüsse der Antennenrealisierung auf die betrachteten MAI-Arten Intraoperator-MAI und Interoperator-MAI zu untersuchen.

Wie in Abschnitt 3.3.2 bereits gesagt, wird vom Einsatz einer horizontal omnidirektionalen Antenne ausgegangen, so daß der Antennengewinn  $G(\vartheta)$  nur vom Depressionswinkel  $\vartheta$  und nicht vom Azimutwinkel  $\varphi$  abhängt. Der Antennengewinn  $G(\vartheta)$  abhängig von Depressionswinkel  $\vartheta$  wird für das Brick-Wall-Modell in Bild 8.1 gezeigt.

In diesem Modell werden die Antennengewinne der Hauptkeule und der Nebenkeulen durch Rechtecke angenähert [Har02]. Die Hauptkeule hat den Gewinn  $G_h$  und die Öffnungsweite  $\alpha_h$ , die Nebenkeulen haben den Gewinn  $G_n$ . Der Antennengewinn  $G(\vartheta)$  ist somit

$$G(\vartheta) = \begin{cases} G_h & \text{für } |\vartheta - 90^\circ| \leq \alpha_h/2, \\ G_n & \text{für } |\vartheta - 90^\circ| > \alpha_h/2. \end{cases} \quad (8.1)$$

Da die gesamte von der Antenne abgestrahlte Leistung von der Realisierung der Antenne unabhängig ist, sind die drei die Brick-Wall-Antenne charakterisierenden Parameter  $G_h$ ,  $\alpha_h$  und  $G_n$  durch die Gleichung

$$G_n = \frac{1 - G_h \sin(\alpha_h/2)}{1 - \sin(\alpha_h/2)}. \quad (8.2)$$

verknüpft. (8.2) wird im Anhang A.2 hergeleitet.

Mit dem vertikalen Strahlungsdiagramm nach Bild 8.1 ergibt sich der vom Depressionswinkel  $\vartheta$  abhängige Antennengewinn  $G(\vartheta)$  nach (8.1), den man im Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach Unterabschnitt 3.3.2 einsetzen kann. Beim in den Kapiteln 5 und 7 verwendeten Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach [3GP02], vgl. Unterabschnitt 3.3.2, wird der Antennengewinn  $G$  über den gesamten Wertebereich des Depressionswinkels  $0 < \vartheta < 180^\circ$  zu 11 dBi gewählt, d.h. im Brick-Wall-Modell wären sowohl  $G_h$  als auch  $G_n$  gleich 11 dBi. Nach (8.2) ist eine solche Antenne physikalisch nicht realisierbar. Um der durch diese Vereinfachung unrealistisch niedrigen Funkfelddämpfung  $A$  für MSen nahe einer BS Rechnung zu tragen, wird im Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell [3GP02] eine Begrenzung der Funkfelddämpfung  $A$  auf den kleinstmöglichen Wert  $A_{\min}$  von 70 dB eingeführt.

Im vorliegenden Kapitel 8 wird eine durch das Erfüllen von (8.2) physikalisch mögliche BS-Antenne basierend auf dem Brick-Wall-Modell betrachtet. Eine Begrenzung der Funkfelddämpfung  $A$  ist nicht mehr nötig, so daß  $A_{\min}$  zu 0 dB gesetzt werden kann. Durch Vermindern des Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen kann die Leistungsfähigkeit des in Kapitel 8 vorgeschlagenen Konzepts zum Vermindern von Interoperator-MAI simulativ bewertet werden. Der Gewinn  $G_h$  der Hauptkeule wird bei 11 dBi festgehalten, um die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  im Ein-Operator-Fall möglichst nicht zu beeinflussen. Das angestrebte Vermindern des Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen kann nach (8.2) bei festgehaltenem  $G_h$  durch ein Erhöhen der Öffnungsweite  $\alpha_h$  erzielt werden, wie in Tabelle 8.1 dargelegt.

Simulationsergebnisse werden gezeigt für den Fall der Koexistenz zweier WCDMA-Mobilfunknetze in Makrozellen mit den grundlegenden Simulationsparametern nach Ta-

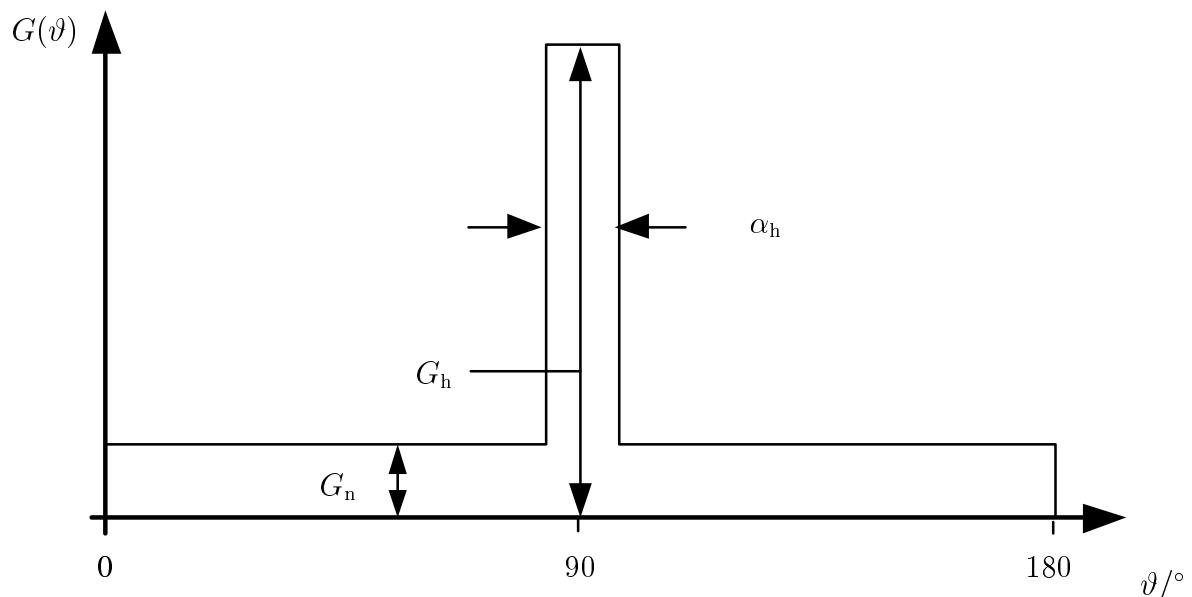


Bild 8.1. Brick-Wall-Modell für das vertikale Strahlungsdiagramm der BS-Antennen

Tabelle 8.1. Verhältnis zwischen Öffnungsweite  $\alpha_h$ , Antennengewinn  $G_h$  der Hauptkeule und Antennengewinn  $G_n$  der Nebenkeulen

$\alpha_h / ^\circ$	$G_h / \text{dBi}$	$G_n / \text{dBi}$
5	11	-3,3
7	11	-6,1
9	11	-18,8
9,11	11	-36,4

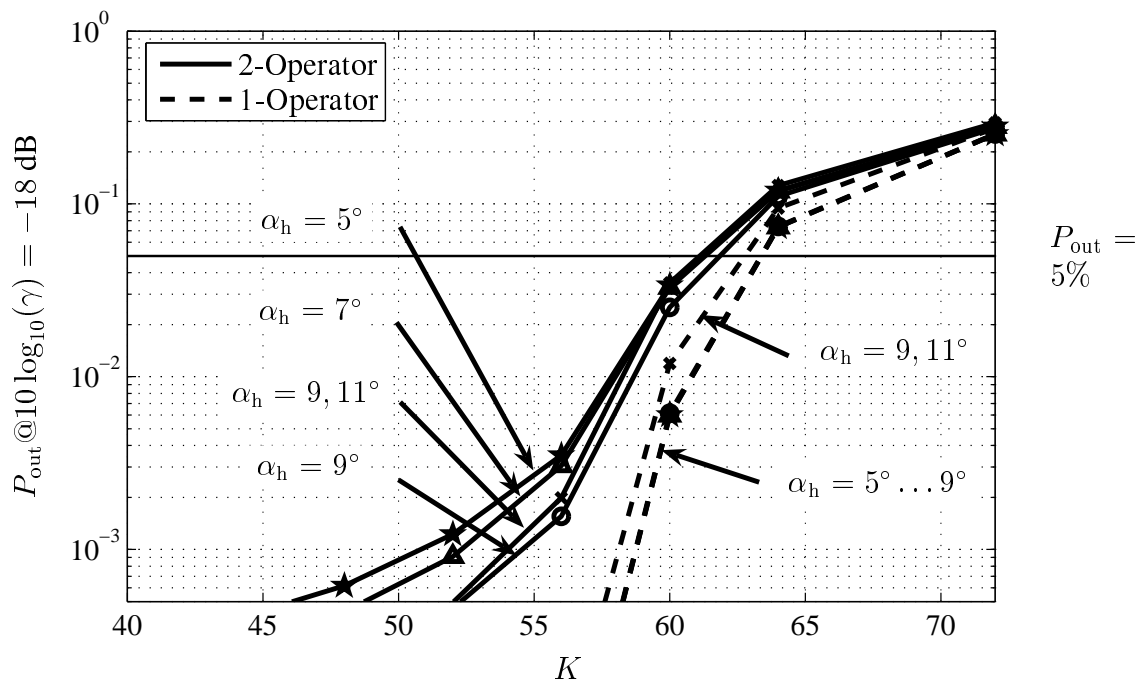


Bild 8.2. Brick-Wall-Modell: Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall, Parameter: Öffnungswinkel  $\alpha_h$ , kein CM, IHO, Abwärtsstrecke,  $R_0 = 2308$  m,  $\xi = 1$ ,  $\gamma = \gamma_{\text{target}}$ ,  $\Delta h_b = 15$  m,  $A_{\text{min}} = 0$  dB,  $\delta_{\text{ACIR}} = 33$  dB,  $N = -99$  dBm

belle 5.1. Aus den Darstellungen der Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{out}}$  über der Teilnehmerzahl  $K$  für den Ein- und Zwei-Operator-Fall in Bild 8.2 können die Kapazitäten  $C_{\text{out},1}$  und  $C_{\text{out},2}$  sowie die Kapazitätsverluste  $\Delta C_{\text{out}}$  bestimmt werden. Diese Kapazitäten und Kapazitätsverluste werden in Tabelle 8.2 gezeigt. Für den Fall des Makrozell-Funkfelddämpfungsmodells mit der vom Verfasser eingeführten Brick-Wall-Antenne und  $A_{\text{min}}$  von 0 dB ist bei einem Öffnungswinkels  $\alpha_h$  von  $5^\circ$  sowohl die Kapazität  $C_{\text{out},1}$  im Ein-Operator-Fall als auch die Kapazität  $C_{\text{out},2}$  im Zwei-Operator-Fall exakt genauso groß wie für den Fall des Makrozell-Funkfelddämpfungsmodells nach [3GP02] mit  $A_{\text{min}}$  von 70 dB, für den Kapazitätsergebnisse in Tabelle 5.4 dargelegt sind. Die beiden Verfahren sind also für einen Öffnungswinkel  $\alpha_h$  von  $5^\circ$  vergleichbar.

Tabelle 8.2. Brick-Wall-Modell:  $C_{out,1}$  bzw.  $C_{out,2}$  für den Ein- bzw. Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit  $P_{out}$  sowie Kapazitätsverluste  $\Delta C_{out}$  für die Abwärtsstrecke

Parameter	Wert	$C_{out,1}$	$C_{out,2}$	$\Delta C_{out}$	Ergebnisse aus Bild
$\alpha_h / ^\circ$	5	63,4	61,3	3,4 %	8.2
	7	63,4	61,4	3,3 %	
	9	63,4	61,9	2,4 %	
	9,11	62,8	61,1	2,5 %	

Durch das Erhöhen des Öffnungswinkels  $\alpha_h$  von  $5^\circ$  auf  $9^\circ$  bzw. das Vermindern des Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen von -3,3 dBi auf -18,8 dBi vermindert sich die Kapazität  $C_{out,1}$  nicht, da, wie bereits gesagt, eine BS nur für wenige nahe MSen die Sendeleistung geringfügig erhöhen muß und die Intraoperator-MAI somit nur geringfügig ansteigt. Die Kapazität  $C_{out,2}$  jedoch steigt beim Erhöhen des Öffnungswinkels von  $5^\circ$  auf  $9^\circ$  an, d.h. die Interoperator-MAI geht zurück und somit verringert sich auch der Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  von 3,4 % auf 2,4 %. Durch ein weiteres Erhöhen des Öffnungswinkels  $\alpha_h$  auf 9, 11° und damit durch ein weiteres Vermindern des Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen auf -36,4 dBi jedoch steigt die Intraoperator-MAI stärker an als sich die Interoperator-MAI vermindert, so daß die Kapazität  $C_{out,2}$  abnimmt. Damit wird die maximale Kapazität  $C_{out,2}$  als Kompromiß zwischen Intra- und Interoperator-MAI bei wesentlich niedrigerem Antennengewinn  $G_n$  für die Nebenkeulen von -18,8 dBi gefunden als dies bei normalen Antennen üblich ist, die durch das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell nach [3GP02] modelliert werden. Mit dem gewählten einfachen Brick-Wall-Modell kann das vorgeschlagene Konzept den Kapazitätsverlust  $\Delta C_{out}$  durch Interoperator-MAI um etwa ein Drittel vermindern und beweist somit seine Eignung zum Bekämpfen der Interoperator-MAI.

Zum Erzielen des gewünschten Effekts verminderter Antennengewinne  $G_n$  der Nebenkeulen bei realen Antennen gibt es aus der Sicht des Verfassers verschiedene Möglichkeiten:

- Erhöhen der Zahl vertikal übereinander angeordneter Antennendipole bewirkt einen höheren Antennengewinn  $G_h$  und gleichzeitig den erwünschten Effekt des geringeren Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen. Der höhere Antennengewinn  $G_h$  der Hauptkeule kann jedoch die Intraoperator-MAI erhöhen. Um dies zu vermeiden, ist zu prüfen, ob der Effekt höherer Intraoperator-MAI durch höheren Antennengewinn  $G_h$  der Hauptkeule durch eine Abwärtsneigung (engl. Downtilt) der Antenne, d.h. ein Verschieben der Hauptkeule nach unten, kompensiert werden kann. Solche Verfahren konnten jedoch aufgrund der Einfachheit der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Modelle nicht untersucht werden.
- Ein Erhöhen der Zahl der Antennendipole kann auch bei unverändertem Antennengewinn  $G_h$  durch Erhöhen der Zahl vertikal übereinander angeordneter Antennendipole

bei ungleicher Leistungsverteilung auf die Antennendipole erzielt werden, wodurch der gewünschte Effekt des geringeren Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen erreicht werden kann.

- Ein „Verbiegen“ des Strahlungsdiagramms der Antenne in einer solchen Art und Weise, daß der Antennengewinn  $G_h$  der Hauptkeule unverändert bleibt und der Antennengewinn der Nebenkeulen nach oben, d.h. im Bereich  $0^\circ < \vartheta < 90^\circ$ , ansteigen darf, könnte ebenfalls den gewünschten Effekt geringeren Antennengewinns  $G_n$  der Nebenkeulen nach unten, d.h. im Bereich  $90^\circ < \vartheta < 180^\circ$ , erzielen. Der Antennengewinn  $G_n$  der Nebenkeulen nach oben ist für die Leistungsfähigkeit des Mobilfunksystems normalerweise nicht relevant, wenngleich auch Leistung ohne Nutzen für das Mobilfunknetz abgestrahlt wird. Inwieweit ein solches Strahlungsdiagramm technisch realisierbar ist, hat der Verfasser der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

## Kapitel 9

# Allgemeine Regeln und Erkenntnisse

### 9.1 Vorbemerkung

Die Mobilfunk ist geprägt von der Entwicklung immer neuer Mobilfunkgenerationen, vgl. Abschnitt 1.1. Angespornt wird diese Entwicklung durch den Bedarf an immer höheren Datenraten für Multimediaanwendungen und durch die Entwicklung immer effektiverer Methoden zur Nutzung der knappen und teuren Übertragungsressource Frequenzspektrum. Durch firmenpolitische Interessen wie die Nutzung eigener Patente und Entwicklungsvorsprünge sowie nationale Interessen wie die Förderung inländischer Firmen ist die Einigung auf einen einzigen, weltweit einheitlichen Mobilfunkstandard praktisch nicht durchsetzbar [Web00]. So war z.B. bei der Standardisierung der 3G-Mobilfunksysteme in Europa keine Einigung auf eines der beiden Konzepte WCDMA und TD-CDMA möglich, so daß beide als Teilstandards mit z.T. grundverschiedenen Eigenschaften in den europäischen Mobilfunkstandard UMTS aufgenommen wurden. Zum nahtlosen Übergang von einer Generation zur nächsten wird häufig verlangt, daß die Endgeräte die Mobilfunksysteme der vorherigen Generation mitbenutzen können, vgl. Abschnitt 1.5. Es gibt also eine Vielzahl von Mobilfunkstandards, deren gleichzeitiger Betrieb im gleichen Versorgungsgebiet gefordert wird. Diese Forderung führt zu der Notwendigkeit umfassender Untersuchungen der Koexistenz der verschiedenen Mobilfunkstandards. Da ein Versorgungsgebiet oftmals von mehreren Operatoren versorgt wird, vgl. Abschnitt 1.3, ist neben der Koexistenz von Mobilfunknetzen verschiedenen Standards auch die Koexistenz von Mobilfunknetzen gleichen Standards zu gewährleisten.

Nach Ansicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit ist es für einen systematischen Zugang zur vielschichtigen Problematik der Koexistenz sinnvoll, die MAI in Klassen einzuteilen. Eine solche Klassifizierung mit der in der vorliegenden Arbeit dargebotenen Allgemeinheit ist dem Verfasser aus der Literatur nicht bekannt. Es werden folgende Klassen eingeführt, vgl. Kapitel 2:

- Intra- und Interzell-MAI,
- Gleich- und Anderstrecken-MAI,
- Gleich- und Anderhierarchie-MAI,
- Gleich- und Anderkanal-MAI,
- Intra- und Interoperator-MAI,
- Intra- und Intersystem-MAI.

Abhängig von den Charakteristiken der betrachteten Mobilfunksysteme können verschiedene Arten von MAI auftreten. Eine MAI-Art kann mehreren MAI-Klassen angehören. Verschiedene MAI-Klassen schließen sich gegenseitig aus, abhängig von den eingesetzten Duplex- und Vielfachzugriffsverfahren sowie der Zellstruktur, vgl. Abschnitt 2.1. Somit kann für zwei Mobilfunknetze zunächst anhand der MAI-Klassen bestimmt werden, welche MAI-Arten auftreten können. Durch die Kenntnis der Eigenschaften der MAI-Klassen, denen eine MAI-Art angehört, ist dann eine Bewertung der Gefährlichkeit einer jeden MAI-Art möglich. Die Gefährlichkeit einer MAI-Art ist durch Art und Anzahl der Störer sowie der mittleren Leistung und auch durch die Varianz der MAI-Leistung beeinflusst. Z.B. kann eine MAI-Art geringer mittlerer Leistung, aber hoher Varianz, durch in wenigen Fällen sehr hohe Leistung das Mobilfunknetz signifikant stören. Solche die Gefährlichkeit der MAI-Arten beeinflussenden Eigenschaften der MAI-Klassen werden in Kapitel 2 diskutiert. Die Kenntnis dieser Eigenschaften kann auch zum Bekämpfen einer MAI-Art hilfreich sein. Beispielhaft werden in Abschnitt 2.8 für die Koexistenz von Mobilfunknetzen gleichen oder verschiedenen Standards die auftretenden Ausschlüsse von MAI-Klassen und somit die resultierenden MAI-Arten dargelegt.

Die Gefährlichkeit der verschiedenen MAI-Arten kann in erster Näherung durch das Betrachten von Schlimmstfall-Szenarien abgeschätzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch gezeigt, daß durch das Abschätzen der Schlimmstfall-Szenarien die Gefährlichkeit einer MAI-Art nicht in allen Fällen richtig bewertet wird, wobei die Zugehörigkeit der MAI-Art zu bestimmten MAI-Klassen für die Gefahr solcher Fehleinschätzungen ein Indiz sein können. Simulative Verfahren sind notwendig, um zuverlässige Aussagen über die Gefährlichkeit der verschiedenen MAI-Arten zu machen. Die sich aus den simulativen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ergebenden Regeln und Erkenntnisse werden in den folgenden Abschnitten 9.2 bis 9.4 für die vier in Unterabschnitt 2.8.3 aufgeschlüsselten MAI-Arten

- Intrasystem-Intraoperator-MAI,
- Intrasystem-Interoperator-MAI,
- Intersystem-Interoperator-MAI,
- Intersystem-Intraoperator-MAI

zusammengetragen. Aufgrund der Vielfalt der in der Klassifizierung abgegrenzten MAI-Arten können nicht alle kombinatorisch möglichen Koexistenzszenarien untersucht werden. Grundsätzlich beschränkt sich die simulative Untersuchung auf die Koexistenz von Mobilfunknetzen in unterschiedlichen Frequenzkanälen.

## 9.2 Intrasystem-Intraoperator-MAI

Bei der Untersuchung der Intrasystem-Intraoperator-MAI ist festzustellen, daß die Anderkanal-MAI keine Rolle gegenüber der Gleichkanal-MAI spielt, vgl. die Ergebnisse in den Unterabschnitten 5.2.2 und 5.3.2 für Kollokation, d.h.  $\xi$  gleich 0. Daher müssen bei der Untersuchung von Anderkanal-MAI aus den direkt benachbarten Frequenzkanälen nur diejenigen Frequenzkanäle betrachtet werden, die einem anderen Operator angehören.

## 9.3 Intrasystem-Interoperator-MAI

Im vorliegenden Abschnitt 9.3 wird aufgrund der Wahl der Koexistenzszenarien ausschließlich Gleichhierarchie-MAI betrachtet.

Für die Gleichstrecken-MAI kann prinzipiell festgehalten werden, daß für den Fall hoher Dislokation  $\xi$  sehr kritische Interoperator-MAI auftreten kann, während für den Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi = 0$ , die Interoperator-MAI meist vernachlässigbar klein ist, vgl. die Kapitel 5 und 6. Die möglichen Kapazitätsverluste sind umso größer, je größer der Zellradius ist. Daher sind die Kapazitätsverluste in Makrozellen im Normalfall höher als in Mikrozellen. In Mikrozellen sind die BS-Antennen jedoch wesentlich niedriger angebracht als in Makrozellen. Deshalb ist die kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  zwischen MSen und BSen in Mikrozellen geringer, wodurch auch dort signifikante Interoperator-MAI auftreten kann. Grundsätzlich ist für das Erzielen einer maximalen Kapazität im Mehr-Operator-Fall immer ein Abwägen der zu wählenden Höhe der BS-Antennen notwendig, denn

- je höher die BS-Antennen, umso höher die Intraoperator-MAI wegen geringerer Abschattung der Interzell-Interferer, jedoch
- je höher die BS-Antennen, umso geringer die Interoperator-MAI aufgrund der geringeren kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\min}$ .

Für die Mikrozellen ist also das Anbringen der BS-Antennen möglichst hoch für geringe Interoperator-MAI, aber doch noch unterhalb der Hausdächer anzuraten, da die Intraoperator-MAI bei BS-Antennen oberhalb der Hausdächer sprunghaft ansteigen würde. In den Makrozellen ist für Fall sehr großer Zellradien von z.B. 2308 m eine Anbringung der BS-Antennen in einer Höhe von 15 m über den Hausdächern sinnvoll, da bei höherer Antenne zwar die Interoperator-MAI abnimmt, aber durch die Zunahme der Intraoperator-MAI die Kapazität im Zwei-Operator-Fall für die Abwärtsstrecke dennoch zurückgeht.



Basierend auf der Erkenntnis, daß besonders die den BSen des anderen Operators sehr nahen MSen mit geringer Funkfelddämpfung  $A$  zu diesen BSen des anderen Operators durch Interoperator-MAI beeinflußt werden, wird in der vorliegenden Arbeit ein Konzept zum Vermindern der Interoperator-MAI entwickelt. Dazu muß durch ein Anpassen der Strahlungsdiagramme der BS-Antennen angestrebt werden, daß die Funkfelddämpfung von einer BS zu nahen MSen möglichst hoch ist. Durch ein solches Konzept wird die Intraoperator-MAI kaum erhöht, während die Interoperator-MAI signifikant vermindert werden kann, vgl. Kapitel 8. Die notwendigen Anpassungen an den BS-Antennen sind statisch, müssen also nicht im laufenden Betrieb des Mobilfunknetzes verändert werden, so daß das Konzept mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden kann.

Für die zum Vermindern der Intraoperator-MAI verwendete Technik des SHO wird in der vorliegenden Arbeit gezeigt, daß deren Einfluß auf die Interoperator-MAI vernachlässigbar gering ist, vgl. Unterabschnitt 5.4.4. Gleiches gilt für den CM, eine Technik zum Ermöglichen des IFHO, vgl. Unterabschnitt 5.4.3.

Werden Auf- und Abwärtsstrecke getrennt betrachtet, so sind Schlimmstfall-Betrachtungen zum Abschätzen der Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke notwendig. Vor allem in Makrozellen treten beim getrennten Betrachten der Auf- und Abwärtsstrecke deutlich höhere Kapazitätsverluste durch Interoperator-MAI in der Aufwärtsstrecke auf als in der Abwärtsstrecke. Ist jedoch, wie bei der Übertragung im Vollduplex üblich, eine Aufwärtsstrecke immer mit einer Abwärtsstrecke gekoppelt, so kann durch eine Schlimmstfall-Abschätzung festgestellt werden, daß aufgrund der Interoperator-MAI, die eine MS in der Abwärtsstrecke erfährt, diese MS üblicherweise nicht bedient wird, so daß sie auch in der Aufwärtsstrecke keine kritische Interoperator-MAI verursachen kann. Dieser Einfluß der Ab- auf die Aufwärtsstrecke wird durch zwei Effekte verursacht:

- Die üblicherweise höhere Sendeleistung einer BS im Vergleich zur Sendeleistung einer MS, und
- die höhere Sensitivität der BS gegenüber der MS durch geringere Rauschzahl des Empfängers.

Diese beiden Effekte bewirken, daß der durch Interoperator-MAI auftretende Kapazitätsverlust im wesentlichen durch die Abwärtsstrecke und nicht durch die Aufwärtsstrecke bestimmt ist. Durch Simulation wird in der vorliegenden Arbeit verifiziert, daß Schlimmstfall-Abschätzungen zum Beurteilen der Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke zulässig sind.

Beim Betrachten der Anderstrecken-MAI muß zunächst berücksichtigt werden, daß diese nur bei Mobilfunknetzen mit TDD-Komponente auftritt, deren Zeitschlitze der Auf-

und Abwärtsstreckenübertragung nicht zueinander synchron sind. Für die Anderstrecken-MAI ist die Auswirkung der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 genau umgekehrt wie für die Gleichstrecken-MAI; im Fall der Kollokation, d.h. für  $\xi = 0$ , ist die Interoperator-MAI sehr groß, im Fall der maximalen Dislokation  $\xi$  von 1 ist die Anderstrecken-MAI geringer, vgl. Kapitel 6. Die Anderstrecken-MAI besteht aus den beiden Typen BS $\rightarrow$ BS-MAI und MS $\rightarrow$ MS-MAI, für die zu der im vorliegenden Abschnitt 9.3 betrachteten Interoperator-Gleichhierarchie-MAI die folgenden Erkenntnisse gewonnen wurden:

- Die BS $\rightarrow$ BS-MAI beeinträchtigt die Aufwärtsstrecke des gestörten Mobilfunknetzes. Die BS $\rightarrow$ BS-MAI ist für Kollokation, d.h. für  $\xi = 0$ , extrem kritisch wegen der sehr geringen kleinstmöglichen Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  bei sehr hoher Sendeleistung der BSen. Aus diesem Grund rät der Verfasser der vorliegenden Arbeit, trotz der eventuell unerwünschten Notwendigkeit einer gegenseitigen Rücksichtnahme der beteiligten Operatoren, eine solche Kollokation von BSen, d.h.  $\xi$  gleich 0, zu vermeiden. Diese Restriktion ist nicht notwendig, wenn die Operatoren sich auf die Verwendung einer gleichen Asymmetrie für Auf- und Abwärtsstreckenübertragung einigen und somit gewährleisten können, daß die Zeitschlitze der Auf- und Abwärtsstreckenübertragung alle zueinander synchron sind.
- Die MS $\rightarrow$ MS-MAI beeinträchtigt die Abwärtsstrecke des gestörten Mobilfunknetzes. Der Unterschied zwischen Kollokation, d.h.  $\xi = 0$ , und maximaler Dislokation  $\xi$  von 1 ist relativ gering, in beiden Fällen kann hohe MS $\rightarrow$ MS-MAI auftreten, da diese weniger von dem Grad der Dislokation  $\xi$  beeinflußt wird als vielmehr von der Wahrscheinlichkeit, daß zwei MSen einander sehr nahe kommen. Daher ist die MS $\rightarrow$ MS-MAI im Gegensatz zur Gleichstrecken-MAI besonders schlimm, wenn die Zellen besonders klein sind. In diesem Zusammenhang muß beachtet werden, daß Szenarien mit ungleichmäßiger Verteilung der MSen bzgl. der MS $\rightarrow$ MS-MAI noch kritischer sein können als die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Szenarien mit gleichmäßiger Verteilung der MSen, da die Wahrscheinlichkeit für geringen Abstand zweier MSen höher wird. Die MS $\rightarrow$ MS-MAI kann jedoch durch dynamische Kanalzuweisung [DV93, Haa00] bei TDD-Mobilfunksystemen sehr effektiv bekämpft werden. Sind solche Verfahren der dynamischen Kanalzuweisung implementiert, so kann einer besonders starken MS $\rightarrow$ MS-MAI durch Wechsel des verwendeten Zeitschlitzes ausgewichen werden, und somit diese MAI-Art nahezu vollständig vermieden werden.

## 9.4 Intersystem-Interoperator-MAI

Prinzipiell birgt die Koexistenz von Mobilfunknetzen verschiedenen Standards die Gefahr hoher Intersystem-MAI durch Unterschiede in den Vielfachzugriffsverfahren der Mobil-

funknetze. Bei der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Koexistenz von WCDMA- und TD-CDMA-Mobilfunknetzen ist in diesem Zusammenhang die Anderstrecken-MAI zu beachten, die das WCDMA-Mobilfunknetz beeinträchtigen kann. Da das WCDMA-Mobilfunknetz kontinuierlich Daten überträgt, gibt es keine Möglichkeit die Anderstrecken-MAI zu vermeiden, z.B. durch Synchronisation der Zeitschlitze wie bei der Koexistenz zweier TD-CDMA-Mobilfunknetze, vgl. Abschnitt 2.3.

Im vorliegenden Abschnitt 9.3 wird aufgrund der Wahl der untersuchten Koexistenzszenarien ausschließlich Anderhierarchie-MAI betrachtet. Die damit einhergehenden unterschiedlichen Dichten von MSen in den koexistierenden Mobilfunknetzen führen dazu, daß die Erkenntnisse aus den Schlimmstfall-Abschätzungen nicht unbedingt mit den simulativen Ergebnissen zur gegenseitigen Beeinträchtigung der Mobilfunknetze übereinstimmen. So ist die Anderstrecken-MAI, die die MSen eines WCDMA-Mobilfunknetz an den MSen eines TD-CDMA-Mobilfunknetzes verursachen, trotz kritischer Einstufung bei der Schlimmstfall-Abschätzung vernachlässigbar gering im Vergleich zur Gleichstrecken-MAI, verursacht von den BSen des WCDMA-Mobilfunknetzes, da die Dichte der MSen im WCDMA-Mobilfunknetz sehr gering ist. Im Umkehrschluß kann jedoch gefolgert werden, daß in Szenarien, in denen MSen des TD-CDMA-Mobilfunknetzes in Mikrozellen MAI für die MSen eines WCDMA-Mobilfunknetzes in Makrozellen verursachen, sehr kritische Anderstrecken-MAI entstehen kann, wie durch die Ergebnisse in [HRMS03] bestätigt wird. Dieser Fall könnte auftreten, wenn einem WCDMA-Abwärtsstrecken-Frequenzband ein TD-CDMA-Frequenzband direkt benachbart ist. Dies ist jedoch bei der derzeitigen Frequenzzuweisung für Europa nicht der Fall, vgl. Bild 1.1.

Allgemein kann gesagt werden, daß die untersuchte Intersystem-Anderhierarchie-MAI geringer ist als die Intrasystem-Gleichhierarchie-MAI. Wichtige Gründe hierfür sind:

- Die relativ hohe kleinstmögliche Funkfelddämpfung  $A_{\min}$  zwischen Makro-BSen und Mikro-BSen, durch den die Anderhierarchie-BS→BS-MAI wesentlicher niedriger ist als die Gleichhierarchie-BS→BS-MAI bei der Koexistenz von zwei Mobilfunksystemen in der gleichen Hierarchieebene, vgl. Abschnitt 6.
- Die Tatsache, daß die Anderhierarchie-MAI üblicherweise nicht durch klassische Dislokationsszenarien beeinflusst wird, bei denen in vielen Zellen die MSen am Zellrand eines Operators mit hoher Sendeleistung nahe den BSen des anderen Operators sind.

Wechselwirkungen zwischen Auf- und Abwärtsstrecke bestehen bei der Intersystem-MAI im allgemeinen nicht in der Form wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, da üblicherweise nur entweder die Auf- oder die Abwärtsstrecke einer Verbindung durch die Intersystem-MAI beeinflusst wird und nicht beide gleichzeitig.

## 9.5 Intersystem-Intraoperator-MAI

Obwohl die Untersuchungen in Kapitel 7 nominell für den Fall der Intersystem-Interoperator-MAI gemünzt sind, sind die in Abschnitt 9.4 zusammengefaßten Ergebnisse auch für den Fall der Intersystem-Intraoperator-MAI gültig. Werden jedoch wie im vorliegenden Abschnitt 9.5 zwei Mobilfunknetze zwar verschiedenen Standards, aber ein und desselben Operators betrachtet, so hat dieser Operator die folgenden Möglichkeiten zum Vermeiden der auftretenden Intersystem-MAI

- Durchführen eines Intersystem-Handovers, vgl. Unterabschnitt 2.8.7, für MSen, die in der Abwärtsstrecke stark gestört werden oder die in der Aufwärtsstrecke stark stören.
- Berücksichtigen der Koexistenzproblematik bereits bei der Funknetzplanung durch Vermeiden von Kollokation, d.h. von  $\xi = 0$ , und somit Mindern der auftretenden BS→BS-MAI. Dabei muß natürlich zwischen dem Aufwand zum Finden zusätzlicher Standorte für Mikro-BSen und der möglichen Beeinflussung durch Intersystem-MAI abgewogen werden, wobei letztere für das in Kapitel 7 betrachtete Szenario nicht allzu hoch ist.

Durch diese Vorgehensweisen kann die Intersystem-MAI effektiv vermindert oder gar vermieden werden, allerdings nur, wenn die beiden Mobilfunknetze wie im vorliegenden Unterabschnitt 9.5 vom ein- und demselben Operator betrieben werden.

---

# Kapitel 10

## Zusammenfassung

### 10.1 Deutsch

Der Trend zur Verfügbarkeit mehrerer Mobilfunknetze im gleichen Versorgungsgebiet nicht nur unterschiedlicher Operatoren, sondern auch unterschiedlicher Mobilfunkstandards in möglicherweise unterschiedlichen Hierarchieebenen führt zu einer Vielzahl von Koexistenzszenarien, in denen Intersystem- und Interoperator-MAI die einzelnen Mobilfunknetze beeinträchtigen können. In der vorliegenden Arbeit wird ein systematischer Zugang zur Koexistenzproblematik durch die Klassifizierung der MAI erarbeitet. Eine MAI-Art kann dabei mehreren MAI-Klassen angehören. Durch die Einteilung in Klassen wird angestrebt, zum einen die eine MAI-Art beeinflussenden Effekte anhand der Zugehörigkeit zu bestimmten MAI-Klassen besser verstehen zu können. Zum anderen dient die Einteilung der MAI in Klassen zum Abschätzen der Gefährlichkeit einer MAI-Art, über die sich Aussagen machen lassen anhand der Zugehörigkeit zu bestimmten MAI-Klassen. Der Begriff Gefährlichkeit einer MAI-Art schließt neben der mittleren Leistung auch weitere Eigenschaften wie Varianz oder Ursache der MAI ein. Einfache Schlimmstfall-Abschätzungen, wie sie in der Literatur gebräuchlich sind, können leicht zu Fehleinschätzungen der Gefährlichkeit einer MAI-Art führen. Durch die Kenntnis der zugehörigen MAI-Klassen einer MAI-Art wird die Gefahr solcher Fehleinschätzungen erkennbar. Neben den Schlimmstfall-Abschätzungen unter Berücksichtigung der MAI-Klassen werden in der vorliegenden Arbeit auch Simulationen durchgeführt, anhand derer die Abschätzungen verifiziert werden. Dazu werden Werkzeuge in Form von mathematischen Modellen zum Berechnen der Leistung der verschiedenen MAI-Arten unter Einbeziehen der verschiedenen betrachteten Verfahren zum Mindern von MAI erarbeitet. Dabei wird auch ein Konzept zum Vermindern der erforderlichen Rechenleistung vorgestellt. Anhand der Untersuchung der Koexistenz der beispielhaften Mobilfunksysteme WCDMA und TD-CDMA wird gezeigt, daß sich das Auftreten extrem hoher Intersystem- bzw. Interoperator-MAI durch geeignete Wahl der Systemparameter wie Zellradien und Antennenhöhen, sowie durch Verfahren zum Mindern von MAI wie effizienten Leistungsregelungsverfahren und dynamische Kanalzuweisung meist vermeiden läßt. Es ist jedoch essentiell, daß die Koexistenzproblematik bereits in der Phase der Funknetzplanung adäquat berücksichtigt wird. Dabei ist eine Kooperation der beteiligten Operatoren meist nicht notwendig, lediglich besonders kritische Fälle wie Kollokation von BSen verschiedener TDD-Mobilfunknetze z.B. nach dem 3G-Teilstandard TD-CDMA müssen von den Operatoren einvernehmlich vermieden werden. Da bei der Koexistenz von Mobilfunknetzen in Makrozellen aufgrund ihres hohen Zellradius besonders hohe Interoperator-MAI für den Fall der Gleichstrecken-MAI auftreten kann, wird in der vorliegenden Arbeit ein neuartiges Konzept zum Vermindern dieser MAI basierend auf Antennentechniken vorgestellt. Das Konzept zeigt ein vielversprechendes Potential zum Mindern der Interoperator-MAI.

## 10.2 Englisch

In the future more and more mobile radio networks will be active in the same geographic domain. These networks will be operated by different operators; they may rely on different standards and work on different hierarchical levels. Such situations result in a large number of different coexistence scenarios, in which the individual mobile radio networks may be hampered by intersystem and interoperator MAI. In this thesis a systematic access to the issue of coexistence is elaborated by resorting to a classification of MAI. It is shown that a certain type of MAI may belong to different MAI classes. By introducing MAI classes we follow the goal to better understand the effects constituting the different types of MAI. Said classification can also serve to assess the criticality of the different MAI types. The conception criticality of an MAI type relies for instance on the average MAI power, its variance and its origin. In literature, simple worst case MAI assessments are usual. Unfortunately, such assessments may lead to totally improper results concerning the criticality of an MAI type. By taking into account to which MAI class an MAI type of interest belongs, the risk of such mistakes can be reduced. In addition to worst case MAI assessments, simulation results are presented in the thesis with a view to verify these assessments. As a prerequisite for such simulations, simulation tools in the form of mathematical models are elaborated, which allow the calculation of the power of the different MAI types under inclusion of different approaches to reducing MAI. Basically, the simulations require a large computational effort. In order to reduce this effort, a concept to enhance the computational efficiency is presented in the thesis. As an example of the MAI investigations performed by the author, the coexistence of mobile radio networks following the 3G standards WCDMA and TD-CDMA is investigated. This investigation shows that extremely high intersystem and interoperator MAI can be avoided by a suitable choice of system parameters as for instance the cell radius and the antenna height above ground level, and by specific MAI combatting schemes like efficient power control and dynamic channel allocation. However, it is essential that the coexistence issue is already taken into account in the phase of radio network planning. The authors found that, when performing this planning, a cooperation between the different operators of the scenario is not required with the exception of some very critical cases. As an example of such a critical case which should be avoided, we mention the collocation of BSs of different TDD-networks using the 3G standard TD-CDMA. In the case of mobile radio networks coexisting in macro cells, due to the large cell radii, very high interoperator MAI may occur between same direction radio links. To mitigate this critical MAI problem, a novel MAI reduction scheme based on antenna pattern design is proposed in the thesis. It is shown that this scheme has a high potential to mitigate interoperator MAI in said situations.

## Anhang A

### Herleitungen und Erläuterungen

#### A.1 Erläuterungen zum RRC-Filter

Im folgenden Abschnitt A.1 werden die Impulsantwort und die Übertragungsfunktion der RRC- sowie der RC-Charakteristik gezeigt.

Mit dem Roll-Off-Faktor  $\alpha_r$  und der Chipdauer  $T_c$  ist die Impulsantwort  $\underline{g}_{\text{rrc}}(t)$  eines RRC-Filters [Pro95, 3GP01a]

$$\underline{g}_{\text{rrc}}(t) = \frac{\sin(\pi \frac{t}{T_c}(1 - \alpha_r)) + 4\alpha_r \frac{t}{T_c} \cos(\pi \frac{t}{T_c}(1 + \alpha_r))}{\pi \frac{t}{T_c} \left(1 - (4\alpha_r \frac{t}{T_c})^2\right)}. \quad (\text{A.1})$$

Die RC-Charakteristik ergibt sich durch Faltung von (A.1) mit sich selbst zu

$$\begin{aligned} \underline{g}_{\text{rc}}(t) &= \underline{g}_{\text{rrc}}(t) * \underline{g}_{\text{rrc}}(t) \\ &= \frac{\sin(\pi t/T_c)}{\pi t/T_c} \cdot \frac{\cos(\pi \alpha_r t/T_c)}{1 - 4(\alpha_r t/T_c)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

und ist in Bild A.1 dargestellt. Die Zeitfunktion  $\underline{g}_{\text{rc}}(t)$  hat zu den Abtastzeitpunkten im Abstand  $T_c$  mit Ausnahme des Zeitpunktes  $t = 0$  Nullstellen. Dadurch kann bei dieser Impulsform MAI zwischen im Abstand  $T_c$  aufeinanderfolgenden Impulsen weitgehend vermieden werden. MAI zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen entstehen bei der RC-Charakteristik nur durch Mehrwegeausbreitung im Mobilfunkkanal sowie durch ungenügende Synchronisation der Abtastzeitpunkte.

Die Fouriertransformierte  $\underline{G}_{\text{rc}}(f)$  der RC-Charakteristik  $\underline{g}_{\text{rc}}(t)$  nach (A.2) ist [Pro95]

$$\underline{G}_{\text{rc}}(f) = \begin{cases} T_c & \text{für } 0 \leq |f| < \frac{1-\alpha_r}{2T_c}, \\ \frac{T_c}{2} \left(1 + \cos \left[ \frac{\pi T_c}{\alpha_r} \left( |f| - \frac{1-\alpha_r}{2T_c} \right) \right] \right) & \text{für } \frac{1-\alpha_r}{2T_c} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha_r}{2T_c}, \\ 0 & \text{für } \frac{1+\alpha_r}{2T_c} < |f|, \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

und die Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{\text{rrc}}(f)$  des RRC-Filters läßt sich mit (A.3) darstellen als

$$\underline{G}_{\text{rrc}}(f) = \sqrt{|\underline{G}_{\text{rc}}(f)|}. \quad (\text{A.4})$$

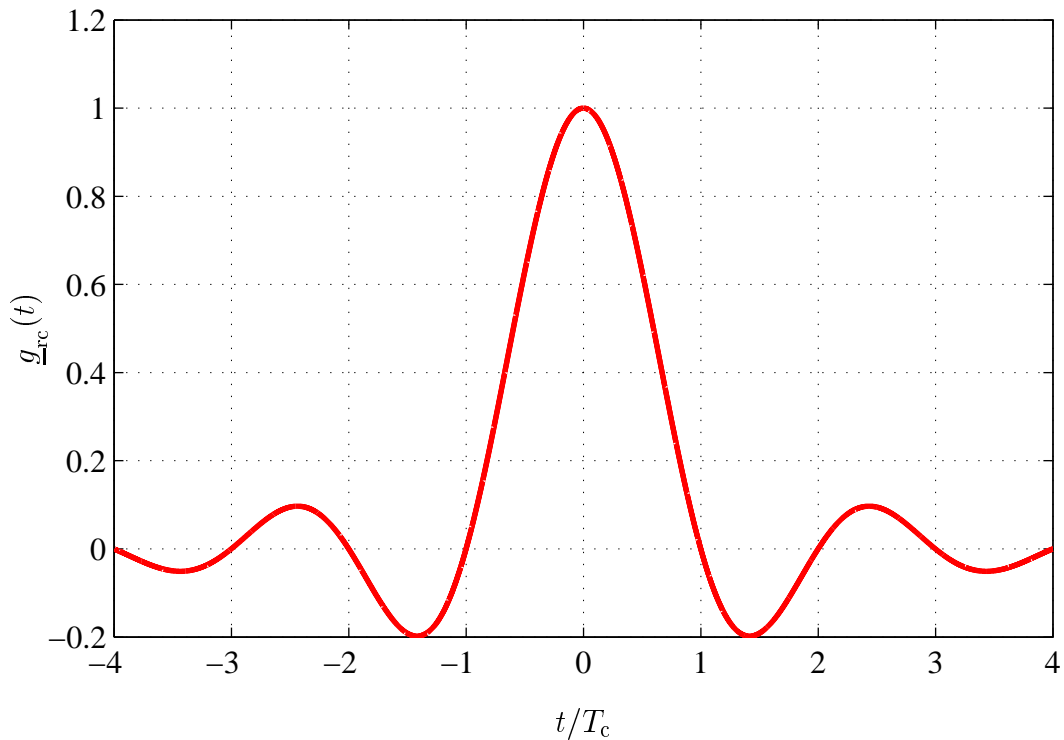


Bild A.1. RC-Charakteristik  $\underline{g}_{rc}(t)$  nach (A.2)

Das Leistungsdichtespektrum  $|\underline{G}_{rrc}(f)|^2$  der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{rrc}(f)$  des RRC-Filters nach (A.4) ist in Bild 3.7 dargestellt, das Leistungsdichtespektrum  $|\underline{G}_{rc}(f)|^2$  der Übertragungsfunktion  $\underline{G}_{rc}(f)$  des RC-Filters nach (A.3) ist in Bild 3.8 gezeigt. Die Darstellungen in den Bildern 3.7 und 3.8 unterscheiden sich von den Definitionen in (A.3) und (A.4) nur durch Skalierungsfaktoren.

## A.2 Herleitung von (8.2)

Mit der gesamten von einer Antenne abgestrahlten Leistung  $P$  und dem Antennengewinn  $G(\varphi, \vartheta)$  abhängig vom Azimutwinkel  $\varphi$  und dem Depressionswinkel  $\vartheta$  ist der Poyntingvektor im Fernfeld [MG86a]

$$P^+(r, \varphi, \vartheta) = G(\varphi, \vartheta) \frac{P}{4\pi r^2}. \quad (\text{A.5})$$

Für die gesamte von der Antenne abgestrahlte Leistung gilt [MG86a]

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P^+(r, \varphi, \vartheta) r^2 \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi. \quad (\text{A.6})$$



Einsetzen von (A.5) in (A.6) und die Annahme eines Antennengewinns  $G(\vartheta)$ , der über den gesamten Azimut  $\varphi = 0 \dots 2\pi$  konstant ist, ergibt die Beziehung

$$2 = \int_0^{\pi} G(\vartheta) \sin(\vartheta) d\vartheta. \quad (\text{A.7})$$

Durch Einsetzen des Antennengewinns  $G(\vartheta)$  für das Brick-Wall-Modell nach (8.1) in (A.7) folgt (8.2).

## Anhang B

# Liste häufig verwendeter Begriffe, Abkürzungen und Formelzeichen

### B.1 Begriffe

**Mobilfunkstandard** Von nationalen und internationalen Institutionen festgelegte Verfahren zum Übertragen von Informationen über eine Luftschnittstelle, wobei von Sende- und Empfangseinheit eine mobil ist.

**Mobilfunksystem** Technische Einrichtungen, bei denen die Verfahren zur Übertragung von Informationen über die Luftschnittstelle durch einen bestimmten Mobilfunkstandard festgelegt sind.

**Mobilfunknetz** Netzwerk von BSen, durch das ein Operator Funkanwendungen nach einem bestimmten Mobilfunkstandard zur Verfügung stellt

**Teilnehmerverbindung** Die Verbindung zwischen einem Mobilfunkteilnehmer, der eine MS zum Senden und Empfangen nutzt, und einer üblicherweise ortsfesten Versorgungseinheit, der BS

**Referenzverbindung** Teilnehmerverbindung, die MAI-mäßig ausgewertet wird

**Aufwärtsstrecke** Funkübertragungsstrecke von einer MS zu einer BS

**Abwärtsstrecke** Funkübertragungsstrecke von einer BS zu einer MS

**Funkfrequenzbereich, nutzbarer** Bereich der für Funkanwendungen technisch nutzbaren Frequenzen

**Frequenzressource, anwendungsspezifische** Der für eine bestimmte Anwendung reservierte Funkfrequenzbereich

**Gesamtfrequenzband** Frequenzband, das für ein Mobilfunksystem reserviert ist

**Teilfrequenzband, operatorspezifisches** Teil eines Gesamtfrequenzbandes, das für einen Operator reserviert ist

**Teilfrequenzband, zellspezifisches** Teil eines Gesamtfrequenzbandes, das in einer Zelle eines Operators und durch Frequenzwiederbenutzung auch in anderen Zellen benutzt wird.

**Frequenzkanal** Teil eines zellspezifischen Teilfrequenzbandes, das in jeder Gleichkanalzelle für eine Teilnehmergruppe verwendet wird, deren Mobilfunkteilnehmer nur durch Vielfachzugriffsverfahren wie CDMA oder TDMA getrennt werden, aber nicht mehr durch das FDMA-Verfahren

**Referenzkanal** Frequenzkanal, in dem die Referenzverbindung aktiv ist

**Gleichkanalzellen** Zellen, die das gleiche zellspezifische Teilfrequenzband und somit die gleichen Frequenzkanäle nutzen.

**Mobilfunkkanal** Gesamtheit der zwischen einer MS und einer BS bestehenden Ausbreitungspfade in dem Übertragungsmedium

**Vielfachzugriffsverfahren** Verfahren, die den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Teilnehmerverbindungen auf das gleiche Übertragungsmedium, d.h. den Raum, ermöglichen

**Duplexverfahren** Verfahren zum Trennen der Übertragung in Auf- bzw. Abwärtsstrecke

**MAI-Art** Eine bestimmte MAI, die sich aufgrund ihres Ursprungs und ihrer Eigenschaften mehreren MAI-Klassen zuordnen läßt

**MAI-Klasse** Übergeordneter Begriff für eine Gruppe von MAI-Arten, die alle eine bestimmte Eigenschaft gemeinsam haben, z.B. verursacht durch ein gemeinsames Vielfachzugriffsverfahren

## B.2 Abkürzungen

2G	2. Generation des zellularen Mobilfunks	S. 1
3G	3. Generation des zellularen Mobilfunks	S. 1
4G	4. Generation des zellularen Mobilfunks	S. 1
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio	S. 54
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio	S. 54
ACS	Adjacent Channel Selectivity	S. 54
AH	Anderhierarchie	S. 34
AK	Anderkanal	S. 34
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses	S. 2
AS	Anderstrecken	S. 34
BS	Basisstation	S. 1
CDMA	Code Division Multiple Access	S. 4
CM	Compressed Mode	S. 14
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research	S. 49
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications	S. 2

FCC	Federal Communications Commission	S. 2
FDD	Time Division Duplex	S. 2
FDMA	Frequency Division Multiple Access	S. 4
GH	Gleichhierarchie	S. 34
GK	Gleichkanal	S. 34
GS	Gleichstrecken	S. 34
GSM	Global System for Mobile Communications	S. 2
HCR	High Chip Rate	S. 2
HHO	Hard Handover	S. 132
IaAS	Intra-Active-Set	S. 68
IaO	Intraoperator	S. 34
IaS	Intrasystem	S. 34
IaZ	Intrazell	S. 34
IFHO	Interfrequency Handover	S. 14
IHO	Ideal Handover	S. 132
IrAS	Inter-Active-Set	S. 68
IrO	Interoperator	S. 34
IrS	Intersystem	S. 34
IrZ	Interzell	S. 34
IS-95	Interim Standard 95	S. 2
ISI	Intersymbol Interference	S. 54
ITU	International Telecommunications Union	S. 1
JD	Joint Detection	S. 20
LCR	Low Chip Rate	S. 2
LoS	Line of Sight	S. 23
MAI	Multiple Access Interference	S. 3
MCL	Minimum Coupling Loss	S. 12
ML	Maximum Likelihood	S. 20
MS	Mobilstation	S. 1
MSS	Mobile Satellite Services	S. 2
MRC	Maximum Ratio Combining	S. 70
MUD	Multiuser Detection	S. 20
NLoS	Non Line of Sight	S. 45
OCIS	Other Channel Interference Simulator	S. 41
PDC	Personal Digital Cellular	S. 2
PDF	Probability Density Function	S. 87
RegTP	Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post	S. 1
RC	Raised Cosine	S. 54
RRC	Root Raised Cosine	S. 54
SC	Selection Combining	S. 71
SDMA	Space Division Multiple Access	S. 5
SHO	Soft Handover	S. 13
SHOmG	Soft Handover mit Gewinn gegen schnellen Schwund	S. 133
SHOoG	Soft Handover ohne Gewinn gegen schnellen Schwund	S. 133
SNR	Signal to Noise Ratio	S. 17
SUD	Single User Detection	S. 20

TD-CDMA	Time Division Code Division Multiple Access	S. 2
TDD	Time Division Duplex	S. 2
TG	Transmit Gap	S. 125
TGL	Transmit Gap Length	S. 125
TDMA	Time Division Multiple Access	S. 4
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	S. 2
WARC	World Administrative Radio Conference	S. 1
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	S. 2
WLAN	Wireless Local Area Networks	S. 7
$C = \text{const}$	Leistungsregelungsverfahren auf konstante Empfangsleistung	S. 85
$T = \text{const}$	Leistungsregelungsverfahren auf konstante Sendeleistung	S. 84
$\gamma = \gamma_{\text{target}}$	Leistungsregelungsverfahren auf gewünschtes SNR $\gamma_{\text{target}}$	S. 85

## B.3 Mathematische Schreibweisen

$\mathbb{X}$	Menge
$ \mathbb{X} $	Kardinalität der Menge $\mathbb{X}$
$\emptyset$	leere Menge
$\setminus$	Differenzmenge
$\cap$	Schnittmenge
$\cup$	Vereinigungsmenge
$\subseteq$	Teilmenge (Inklusion)
$\{x_1, \dots, x_n\}$	Menge mit den Elementen $x_1$ bis $x_n$
$\{x_i \mid H(x_i)\}$	Menge aller Elemente $x_i$ , für die eine Eigenschaft $H(x_i)$ gilt
$\mathbb{N}_0$	Menge der nicht negativen ganzen Zahlen, $\{0, 1, 2, \dots\}$
$\wedge$	logisches UND
$\vee$	logisches ODER
$\in$	Element von
$\notin$	nicht Element von
$=$	gleich
$\neq$	ungleich
$<$	kleiner als
$\leq$	kleiner als oder gleich
$>$	größer als
$\geq$	größer als oder gleich
$\pi$	Kreiszahl Pi
$a \rightarrow b$	a sendet ein Signal, das von b als Nutz- oder Störleistung empfangen wird
$\infty$	unendlich
$\lg$	Logarithmus zur Basis 10

$\text{Prob}\{A\}$	Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis $A$
$ a $	Betrag der Größe $a$
$E\{a\}$	Erwartungswert der Größe $a$
$\text{Var}\{a\}$	Varianz der Größe $a$
$N(0, 1)$	normalverteilte Zufallsvariable des Mittelwerts null und der Standardabweichung eins
$p_{\Theta}^{(N_Q)}(\Theta)$	PDF der Variable $\Theta$ für $N_Q$ MSen im Mobilfunknetz

## B.4 Formelzeichen

$A$	Funkfelddämpfung
$A_{\text{Berg,dual}}$	Funkfelddämpfung für das Dual-Slope-Modell nach Berg
$A_{\text{LoS}}$	Funkfelddämpfung im LoS-Fall für das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell
$A_{\text{NLoS}}$	Funkfelddämpfung im NLoS-Fall für das Makrozell-Funkfelddämpfungsmodell
$A_{\text{Walfish}}$	Funkfelddämpfung nach dem COST231 Walfish-Ikegami-Modell
$A_{\text{min}}$	kleinstmögliche Funkfelddämpfung
$A_b$	Menge aller MSen, die einer BS $\beta_b$ zugeordnet sind, Ein-Operator-Fall
$b$	Index für eine BS
$\tilde{b}$	Hilfsindex für eine BS, die Störung verursacht
$B$	Bandbreite eines Frequenzkanals
$\mathbb{B}$	Menge der BSen, Ein-Operator-Fall
$\mathbb{B}_{\Omega}$	Menge der BSen von Operator $\Omega$ , Zwei-Operator-Fall
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit
$C$	Leistung eines Nutzsymbols
$C_{\text{target}}$	gewünschte Empfangsleistung beim Leistungsregelungsverfahren $C = \text{const}$
$C_{b,m}^d$	Nutzleistung für MS $\mu_m$ , aufgebracht von BS $\beta_b$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$C_{A,b,m}^d$	Nutzleistung für MS $\mu_{A,m}$ , aufgebracht von BS $\beta_{A,b}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$C_{b,m}^u$	Nutzleistung empfangen an BS $\beta_b$ von MS $\mu_m$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$C_{A,b,m}^u$	Nutzleistung empfangen an BS $\beta_{A,b}$ von MS $\mu_{A,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$C_{\text{out},1}$	Kapazität im Ein-Operator-Fall nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit $P_{\text{out}}$
$C_{\text{out},2}$	Kapazität im Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit $P_{\text{out}}$

$C_{\chi,1}$	Kapazität im Ein-Operator-Fall nach dem Kriterium Noise Rise $\chi$
$C_{\chi,2}$	Kapazität im Zwei-Operator-Fall nach dem Kriterium Noise Rise $\chi$
$E_b/N_0$	Energie eines Informationsbits relativ zur Störleistungsdichte
$f$	zellulare Interferenzfunktion
$f_0$	Mittenfrequenz des Referenzkanals
$g_{b,m}^{\text{BM}}$	Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_m$ und BS $\beta_b$ , Ein-Operator-Fall
$g_{A,\Omega,b,m}^{\text{BM}}$	Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_{\Omega,m}$ und BS $\beta_{A,b}$ , Zwei-Operator-Fall
$g_{A,\Omega,m,\tilde{m}}^{\text{MM}}$	Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_{A,m}$ und BS $\mu_{\Omega,\tilde{m}}$ , Zwei-Operator-Fall
$g_{A,\Omega,b,\tilde{b}}^{\text{BB}}$	Funkfeldgewinn zwischen BS $\beta_{A,b}$ und BS $\beta_{\Omega,\tilde{b}}$ , Zwei-Operator-Fall
$g_m^{\text{BM,max}}$	maximaler Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_m$ und BS $\beta_b$ , Ein-Operator-Fall
$g_{A,m}^{\text{BM,max}}$	maximaler Funkfeldgewinn zwischen MS $\mu_{A,m}$ und BS $\beta_{A,b}$ , Zwei-Operator-Fall
$g_{\text{th}}$	Schwellwert des Funkfeldgewinns zum Einleiten des CM
$G$	Gewinn der BS-Antennen
$G_h$	Gewinn der Hauptkeule im Brick-Wall-Modell
$G_n$	Gewinn der Nebenkeulen im Brick-Wall-Modell
$\underline{G}_{\text{re}}(f)$	Übertragungsfunktion eines realen Empfangsfilters im äquivalenten Tiefpaßbereich
$\underline{G}_{\text{rrc}}(f)$	Übertragungsfunktion eines RRC-Filters
$h_{\text{Mikro-BS}}$	Höhe der Antennen der Mikro-BSen
$h_{\text{MS}}$	Höhe der MS-Antennen im Makro- und Mikrozell-Szenario
$h_r$	mittlere Gebäudehöhe im Makro- und Mikrozell-Szenario
$I^{\text{IaZ}}$	Intrazell-MAI-Leistung
$I^{\text{IrZ}}$	Interzell-MAI-Leistung
$I^{\text{IrO}}$	Interoperator-MAI-Leistung
$I_{\text{ACLR}}$	in einen Anderkanal abgestrahlte Störleistung
$I_{\text{ACS}}$	aus einem Anderkanal empfangene Störleistung
$I_{b,m}^{\text{d}}$	MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{\text{d}}$	Intraoperator-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{b,m}^{\text{d,IaZ}}$	Intrazell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{\text{d,IaZ}}$	Intraoperator-Intrazell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{b,m}^{\text{d,IrZ}}$	Interzell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ beim Anwenden von SUD-Detektion, Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{\text{d,IrZ}}$	Intraoperator-Interzell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ beim Anwenden von SUD-Detektion, Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall

$I_{b,m}^{d,IaAS}$	Intra-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{d,IaAS}$	Intraoperator-Intra-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_m^{d,IrAS}$	Inter-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die MS $\mu_m$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,m}^{d,IrAS}$	Intraoperator-Inter-Active-Set-MAI-Leistung wirksam für die MS $\mu_{A,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,m}^{d,IrO,GS}$	Interoperator-Gleichstrecken-MAI-Leistung an der MS $\mu_{A,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,m}^{d,IrO,AS}$	Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung an der MS $\mu_{A,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,m}^{d,IrO}$	gesamte Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung an der MS $\mu_{A,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{b,m}^u$	MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^u$	Intraoperator-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{b,m}^{u,IaZ}$	Intrazell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{u,IaZ}$	Intraoperator-Intrazell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{b,m}^{u,IrZ}$	Interzell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$I_{A,b,m}^{u,IrZ}$	Intraoperator-Interzell-MAI-Leistung wirksam für die Verbindung $V_{A,b,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,b}^{u,IrO,GS}$	Interoperator-Gleichstrecken-MAI-Leistung an der BS $\beta_{A,b}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,b}^{u,IrO,AS}$	Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung an der BS $\beta_{A,b}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$I_{A,b}^{u,IrO}$	gesamte Interoperator-Anderstrecken-MAI-Leistung an der BS $\beta_{A,b}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$\mathbb{I}_m$	Menge aller MSen $\mu_{\tilde{m}}$ , die MAI für die MS $\mu_m$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Ein-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{A,m}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Zwei-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{b,m}^{IaZ}$	Menge aller MSen $\mu_{\tilde{m}}$ , die Intrazell-MAI für die Verbindung $V_{b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Ein-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{A,b,m}^{IaZ}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Intrazell-MAI für die Verbindung $V_{A,b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Zwei-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{b,m}^{IrZ}$	Menge aller MSen $\mu_{\tilde{m}}$ , die Interzell-MAI für die Verbindung $V_{b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Ein-Operator-Fall



$\mathbb{I}_{A,b,m}^{\text{IrZ}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Interzell-MAI für die Verbindung $V_{A,b,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Zwei-Operator-Fall
$\mathbb{I}_m^{\text{IaAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{\tilde{m}}$ , die Intra-Active-Set-MAI für die MS $\mu_m$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Ein-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{A,m}^{\text{IaAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Intra-Active-Set-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Zwei-Operator-Fall
$\mathbb{I}_m^{\text{IrAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{\tilde{m}}$ , die Inter-Active-Set-MAI für die MS $\mu_m$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Ein-Operator-Fall
$\mathbb{I}_{A,m}^{\text{IrAS}}$	Menge aller MSen $\mu_{A,\tilde{m}}$ , die Intraoperator-Inter-Active-Set-MAI für die MS $\mu_{A,m}$ verursachen, $m \neq \tilde{m}$ , Zwei-Operator-Fall
$K$	Zahl der MSen pro BS
$K_{\text{pole}}$	Polkapazität
$m$	Index für eine MS
$\tilde{m}$	Hilfsindex für eine MS, die Störung verursacht
$\mathbb{M}$	Menge der MSen, Ein-Operator-Fall
$\mathbb{M}_{\Omega}$	Menge der MSen von Operator $\Omega$ , Zwei-Operator-Fall
$N$	Thermische Rauschleistung
$N_{\text{Q}}$	Zahl der MSen in einem gesamten Mobilfunknetz
$P_{\text{out}}$	Outage-Wahrscheinlichkeit
$P_{\text{ACLR}}$	im Referenzkanal gesendete Nutzleistung
$P_{\text{ACS}}$	im Referenzkanal empfangene Nutzleistung
$r$	Clustergröße
$R_0$	äußerer Zellradius der hexagonalen Zellen
$R_b$	Informationsbitrate
$R_{\text{chip}}$	Symbol-Rate des Sendesignals, in CDMA-Mobilfunksystemen Chiprate
$S_{\text{id}}(f)$	Leistungsdichtespektrum eines CDMA-Signals bei Mittenfrequenz $f_0$ im äquivalenten Tiefpaßbereich nach Impulsformung mit einem RRC-Filter, am Ausgang eines idealen Leistungsverstärkers
$S_{\text{re}}(f)$	Leistungsdichtespektrum eines CDMA-Signals bei Mittenfrequenz $f_0$ im äquivalenten Tiefpaßbereich nach Impulsformung mit einem RRC-Filter, am Ausgang eines nicht-idealen Leistungsverstärkers
$\mathbb{S}_m$	Active Set der MS $\mu_m$ , Ein-Operator-Fall
$\mathbb{S}_{\Omega,m}$	Active Set der MS $\mu_{\Omega,m}$ von Operator $\Omega$ , Zwei-Operator-Fall
$t_{\text{off}}$	zeitliche Verschiebung der Zeitschlitzes zweier Teilnehmerverbindungen
$t_{\text{slot}}$	Dauer eines Zeitschlitzes
$T_c$	Dauer eines Sendesymbols, in CDMA-Mobilfunksystemen eines Chips
$T_{b,m}$	Sendeleistung für MS $\mu_m$ , aufgebracht von BS $\beta_b$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$T_{\Omega,b,m}$	Sendeleistung für MS $\mu_{\Omega,m}$ , aufgebracht von BS $\beta_{\Omega,b}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall

$T_m$	Sendeleistung der MS $\mu_m$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$T_{\Omega,m}$	Sendeleistung der MS $\mu_{\Omega,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$T_{\max}$	maximale Sendeleistung für eine MS
$V_{b,m}$	Verbindung zwischen BS $\beta_b$ und MS $\mu_m$ , Ein-Operator-Fall
$V_{\Omega,b,m}$	Verbindung zwischen BS $\beta_{\Omega,b}$ und MS $\mu_{\Omega,m}$ , Zwei-Operator-Fall
$w_b$	Breite der Häuserblöcke im Mikrozell-Szenario
$w_s$	Breite der Straßen im Mikrozell-Szenario
$\alpha_d$	Dämpfungsexponent der Funkwellenausbreitung
$\alpha_h$	Öffnungsweite der Hauptkeule im Brick-Wall-Modell
$\alpha_r$	Roll-Off-Faktor des RRC-Filters
$\alpha_s$	Synchronisationsfaktor
$\beta_b$	$b$ -te BS, Ein-Operator-Fall
$\beta_{\Omega,b}$	$b$ -te BS von Operator $\Omega$ , Zwei-Operator-Fall
$\gamma_{b,m}^u$	SNR an BS $\beta_b$ , zurückgehend auf Sendeleistung von MS $\mu_m$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$\gamma_{A,b,m}^u$	SNR an BS $\beta_{A,b}$ , zurückgehend auf Sendeleistung von MS $\mu_{A,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$\gamma_m^u$	Gesamt-SNR der MS $\mu_m$ , Aufwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$\gamma_{A,m}^u$	Gesamt-SNR der MS $\mu_{A,m}$ , Aufwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$\gamma_{b,m}^d$	SNR für MS $\mu_m$ , zurückgehend auf Sendeleistung aufgebracht von der BS $\beta_b$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$\gamma_{A,b,m}^d$	SNR für MS $\mu_{A,m}$ , zurückgehend auf Sendeleistung aufgebracht von der BS $\beta_{A,b}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$\gamma_m^d$	Gesamt-SNR der MS $\mu_m$ zurückgehend auf Sendeleistungen aufgebracht von allen BSen $\beta_b$ im Active Set $\mathcal{S}_m$ , Abwärtsstrecke, Ein-Operator-Fall
$\gamma_{A,m}^d$	Gesamt-SNR der MS $\mu_{A,m}$ zurückgehend auf Sendeleistungen aufgebracht von allen BSen $\beta_{A,b}$ im Active Set $\mathcal{S}_{A,m}$ , Abwärtsstrecke, Zwei-Operator-Fall
$\gamma_{\text{target}}$	gewünschtes SNR des Leistungsregelungsverfahrens $\gamma = \gamma_{\text{target}}$
$\delta_{\text{ACIR}}$	Adjacent Channel Interference Ratio
$\delta_{\text{ACLR}}$	Adjacent Channel Leakage Power Ratio
$\delta_{\text{ACS}}$	Adjacent Channel Selectivity
$\delta_s$	Schrittweite beim Leistungsregelungsverfahren $\gamma = \gamma_{\text{target}}$
$\delta_{\text{th}}$	SHO-Schwellwert
$\Delta C_{\text{out}}$	Kapazitätsverlust durch Interoperator- bzw. Intersystem-MAI nach dem Kriterium Outage-Wahrscheinlichkeit $P_{\text{out}}$
$\Delta C_{\chi}$	Kapazitätsverlust durch Interoperator- bzw. Intersystem-MAI nach dem Kriterium Noise Rise $\chi$
$\Delta h$	Höhenunterschied zwischen Sende- und Empfangsantenne
$\Delta h_b$	Höhenunterschied zwischen der mittleren Gebäudehöhe und den Antennen der Makro-BSen

---

$\Delta f_a$	Abstand der Mittenfrequenz des Referenzkanals von der Mittenfrequenz des betrachteten Anderkanals
$\Delta f_c$	Bandbreite, die der Symbol- bzw. Chip-Rate des Sendesignals entspricht
$\Delta f$	Abstand von der Mittenfrequenz des Referenzkanals
$\Delta f_n$	Abstand der Mittenfrequenzen zweier benachbarter Frequenzkanäle
$\zeta$	Orthogonalitätsfaktor
$\Theta$	auf die Nutzleistung an einem Empfänger normierte MAI-Leistung
$\vartheta_{\text{LoS}}$	Depressionswinkel im LoS-Fall
$\vartheta_{\text{NLoS}}$	Depressionswinkel im NLoS-Fall
$\kappa$	Faktor zum Beschreiben des Detektionsverfahrens
$\mu_m$	$m$ -te MS, Ein-Operator-Fall
$\mu_{\Omega, m}$	$m$ -te MS von Operator $\Omega$ , Zwei-Operator-Fall
$\nu_s$	Aktivitätsfaktor des betrachteten Dienstes
$\nu_t$	Anteil der von einem Teilnehmer genutzten Zeitschlitzze eines Frames
$\xi$	Grad der Dislokation
$\rho$	Abstand zwischen Sender und Empfänger
$\sigma_a$	Standardabweichung des Lognormal-Schwundes
$\chi$	Noise Rise
$\chi_{\text{th}}$	Schwellwert für den maximal zulässigen Noise Rise
$\Omega$	Index für einen der beiden Operatoren A oder B

## Literatur

- [3GP98] *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS*. Technischer Report TR 101.112, UMTS 30.03 Version 3.2.0, 04/1998.
- [3GP00a] *3rd Generation Partnership Project (3GPP); Technical Specification Group, Spreading and Modulation (FDD)*. Technische Spezifikation TS 25.213, Version 3.2.0, 03/2000.
- [3GP00b] *3rd Generation Partnership Project (3GPP); Technical Specification Group, Multiplexing and channel coding (FDD)*. Technische Spezifikation TS 25.212, Version 4.0.0, Release 4, 12/2000.
- [3GP01a] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks; UE Radio Transmission and Reception (FDD)*. Technische Spezifikation TS 25.101, Version 4.1.0, Release 4, 06/2001.
- [3GP01b] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks; UE Radio Transmission and Reception (TDD)*. Technische Spezifikation TS 25.102, Version 4.1.0, Release 4, 06/2001.
- [3GP01c] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks; BS Radio Transmission and Reception (FDD)*. Technische Spezifikation TS 25.104, Version 4.1.0, Release 4, 06/2001.
- [3GP01d] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks; BS Radio Transmission and Reception (TDD)*. Technische Spezifikation TS 25.105, Version 4.1.0, Release 4, 06/2001.
- [3GP01e] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Technical Specification Group Radio Access Networks; UMTS 1800/1900 Work Items Technical Report*. Technischer Report TR 25.885, Version 1.0.0, Release 5, 09/2001.
- [3GP02] *3rd Generation Partnership Projekt (3GPP); Universal Mobile Telecommunication System (UMTS); RF System scenarios*. Technischer Report TR 25.942, Version 4.2.0, Release 4, 06/2002.
- [All99] Allgon: *Antenna-to-Antenna-Isolation Measurements*. 3GPP TSG-RAN WG4 Dokument TSG R4 #8(99)631, Sophia Antipolis, France, 26. – 29. Oktober 1999.
- [AS97] Adachi, F.; Sawahashi, M.: Wideband multi-rate DS-CDMA for next generation mobile communications systems. *Proc. Wireless Communications Conference WCC'97*, Boulder, 1997, S. 57–62.
- [AS99] Althoff, M.; Seidenberg, P.: A method for simulation of spectral compatibility of mobile communication systems. *Proc. Wireless (EW'99)*, Munich, Germany, 1999, S. 357–360.

- [ASS98] Adachi, F.; Sawahashi, M.; Suda, H.: Wideband DS-CDMA for next generation mobile communications systems. *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, 1998, S. 56–69.
- [BBL92] Berg, J. E.; Bownds, R.; Lotse, F.: Path loss and fading models for microcells at 900 MHz. *Proc. IEEE 42th Vehicular Technology Conference (VTC'92)*, Bd. 2, Denver, USA, 1992, S. 666–671.
- [BEGV02] Blaise, F.; Elicegui, L.; Goeusse, F.; Vivier, G.: Power control algorithms for soft handoff users in UMTS. *Proc. IEEE 56th Vehicular Technology Conference (VTC'02)*, Bd. 2, Vancouver, Canada, 2002, S. 1110–1114.
- [Ber95] Berg, J. E.: A recursive method for street microcell path loss calculations. *Proc. IEEE 6th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'95)*, Bd. 1, Toronto, Canada, 1995, S. 140–143.
- [BHC00] Binucci, N.; Hiltunen, K.; Caselli, M.: Soft handover gains in WCDMA. *Proc. IEEE 52th Vehicular Technology Conference (VTC'00)*, Bd. 3, Boston, 2000, S. 1467–1472.
- [Bin01] Bing, T.: *Zeitduplexbasierte Mobilkommunikation, untersucht am Beispiel eines TD-CDMA-Mobilfunksystems*. Dissertation, Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung, Universität Kaiserslautern, 2001.
- [BJ96] Baier, P. W.; Jung, P.: CDMA myths and realities revisited. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Bd. 79, 1996, S. 1930–1937.
- [BJK96] Baier, P. W.; Jung, P.; Klein, A.: Taking the challenge of multiple access for third generation cellular mobile radio systems – a european view. *IEEE Communications Magazine*, Bd. 34, 1996, S. 82–89.
- [BM00] Baker, M.; Moulisley, T.: Power control in UMTS Release 99. *IEE 3G Mobile Communication Technologies*, 2000, S. 36–40.
- [BRS03] Bettstetter, C.; Resta, G.; Santi, P.: The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Bd. 2, 2003, S. 257–269.
- [BS87] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt/Main: Verlag Harry Deutsch, 1987.
- [BW98] Baier, P. W.; Weber, T.: CDMA for UMTS and IMT-2000. *Proc. 10th International Conference on Wireless Communications*, Calgary, 1998.
- [BWW99] Baier, P. W.; Weber, T.; Weckerle, M.: Spreading techniques, a far-reaching technology. Swarts, F.; van Rooyan, P.; Oppermann, I.; Lötter, M. P. (Hrsg.): *CDMA-Techniques for Third Generation Mobile Systems*. Kap. 1, S. 1–22. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Car90] Carson, R. S.: *Radio Communication Concepts: analog*. John Wiley & Sons, 1990.

- [CPA99] Cátedra, M. F.; Pérez-Arriaga, J. (Hrsg.): *Cell planning for Wireless Communications*. Mobile Communications Series. Artech House, 1999.
- [DB96] David, K.; Benkner, T.: *Digitale Mobilfunksysteme*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1996.
- [DBK<sup>+</sup>98] Dahlman, E.; Beming, P.; Knutsson, J.; Ovesjö, F.; Persson, M.; Roobol, C.: WCDMA-the radio interface for future mobile multimedia communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 47, 1998, S. 1105–1117.
- [DV93] Dimitrijevic, D.; Vucetic, J.: Design and performance analysis of the algorithms for channel allocation in cellular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 42, 1993, S. 526–534.
- [Edr94] Edrich, M.: *Einsatz computergestützter Methoden im nachrichtentechnischen Systementwurf, gezeigt an Beispielen aus der Spread-Spectrum-Technik*. Fortschrittberichte VDI, Reihe 10, Nr. 276. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- [Egl57] Egli, J.: Radio propagation above 40Mc over irregular terrain. *Proc. IRE*, Bd. 45, 1957, S. 1383–1391.
- [ENS97] Esmailzadeh, R.; Nakagawa, M.; Sourour, E. A.: Time-division duplex CDMA communications. *IEEE Personal Communications*, Bd. 4, 1997, S. 51–56.
- [ERC99] ERC: *A Comparison of Minimum Coupling Loss Method, Enhanced Minimum Coupling Loss Method and the Monte-Carlo Simulation*. Technischer Report ERC Report 101, European Radio communications Committee (ERC), Menton, 1999.
- [Eri98] Ericsson: *UTRA FDD Guard Band Analysis*. ETSI SMG2 UMTS L1#3 Tdoc 101/98, Bocholt, Germany, 18. – 20. Mai 1998.
- [Eri99a] Ericsson: *Compressed Mode impact on handover measurement complexity*. 3GPP TSG-RAN WG1 Dokument TSG R1 #6(99)851, Espoo, Finland, 13. – 16. Juli 1999.
- [Eri99b] Ericsson: *Evaluation of up- and downlink adjacent channel performance*. 3GPP TSG-RAN WG4 Dokument TSG R4 #2(99)048, Turin, 15. – 19. Februar 1999.
- [EV97] Eberspächer, J.; Vögel, H. J.: *GSM Global System for Mobile Communication*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1997.
- [FA94] Furukawa, H.; Akaiwa, Y.: A microcell overlaid with umbrella cell system. *Proc. IEEE 44th Vehicular Technology Conference (VTC'94)*, Bd. 1, 1994, S. 1455–1459.
- [Far96] Faruque, S.: *Cellular Mobile Systems Engineering*. Boston: Artech House, 1996.
- [FJ99] Faure, C.; Johnson, C.: The evaluation of UMTS system level performance including the interaction between uncoordinated operators. *Proc. IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99)*, Bd. 2, Amsterdam, Netherlands, 1999, S. 904–908.

- [For98] Forum, U.: *UMTS / IMT-2000 Spectrum*. Technischer Bericht, UMTS Forum Report 6, 1998.
- [FST<sup>+</sup>96] Fukasawa, A.; Sato, T.; Takizawa, Y.; Kato, T.; Kawabe, M.; Fisher, R. R.: Wideband CDMA system for personal radio communications. *IEEE Communications Magazine*, Bd. 34, 1996, S. 116–123.
- [GCSA03] Ghorashi, S.; Cheung, H.; Said, F.; Aghvami, A.: Performance of a CDMA-based HCS network with hybrid speed/overflow-sensitive handover strategy. *IEE Proc. Comm.*, Bd. 150, 2003, S. 293–297.
- [Gib99] Gibson, J. D. (Hrsg.): *The Mobile Communications Handbook*. 2 Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [GIL<sup>+</sup>98] Guntzsch, A.; Ibnkahla, M.; Losquadro, G.; Mazzella, M.; Roviras, D.; Timm, A.: EU's R&D activities on third generation mobile satellite systems (S-UMTS). *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, 1998, S. 104–110.
- [GJD97] Gustafson, M.; Jamal, K.; Dahlmann, E.: Compressed mode techniques for inter-frequency measurements in a wide-band DS-CDMA system. *Proc. IEEE 8th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97)*, Bd. 1, Helsinki, 1997, S. 231–235.
- [GJP<sup>+</sup>91] Gilhousen, K. S.; Jacobs, I. M.; Padovani, R.; Viterbi, A. J.; Weaver, L. A.; Wheatley, C. E.: On the capacity of a cellular CDMA system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, S. 303–312.
- [GM05] Giuliano, R.; Mazzenga, F.: On the coexistence of power-controlled ultrawideband systems with UMTS, GPS, DCS1800, and fixed wireless systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 54, 2005, S. 62–81.
- [GVGZ93] Grandhi, S.; Vijayan, R.; Goodman, D. J.; Zander, J.: Centralized power control in cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 42, 1993, S. 466–468.
- [GZ94] Grandhi, S.; Zander, J.: Constrained power control in cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 44, Stockholm, 1994, S. 824–828.
- [Haa00] Haas, H.: *Interference analysis of and dynamic channel algorithms in TD-CDMA/TDD systems*. Dissertation, Department of Electronics and Electrical Engineering, University Of Edinburgh, Scotland, 2000.
- [Har02] Hartmann, C.: On capacity and blocking of multi service CDMA systems with smart antennas. *Proc. IEEE 56th Vehicular Technology Conference (VTC'02)*, Bd. 1, Vancouver, 2002, S. 72–76.
- [HBH96] Hall, M.; Barclay, L.; Hewitt, M. (Hrsg.): *Propagation of Radiowaves*. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [HH64] Hammersley, J.; Handscom, D.: *Monte Carlo Methods*. John Wiley & Sons, 1964.

- [HHT<sup>+</sup>02] Hamalainen, M.; Hovinen, V.; Tesi, R.; Iinatti, J.; Latva-aho, M.: On the UWB system coexistence with GSM900, UMTS/WCDMA, and GPS. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 20, 2002, S. 1712–1721.
- [HL99] Holma, H.; Laakso, J.: Uplink admission control and soft capacity with MUD in CDMA. *Proc. IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99)*, Bd. 1, Amsterdam Netherlands, 1999, S. 431–435.
- [HLH99] Hämäläinen, S.; Lilja, H.; Hämäläinen, A.: WCDMA adjacent channel interference requirements. *Proc. IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99)*, Bd. 5, Amsterdam, Netherlands, 1999, S. 2591–2595.
- [HM03] Heilmann, S.; Meurer, M.: Mitigation of interference between co-existing WCDMA systems. *Proc. IEEE 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'03)*, Bd. 1, Beijing, China, 2003, S. 341–345.
- [HMP00a] Haas, H.; McLaughlin, S.; Povey, G. J. R.: The effects of interference between the TDD and FDD mode in UMTS at the boundary of 1920 MHz. *Proc. IEEE 6th International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications (ISSSTA'00)*, Bd. 2, New Jersey, USA, 2000, S. 486–490.
- [HMP00b] Haas, H.; McLaughlin, S.; Povey, G. J. R.: An investigation on capacity versus guard-bands in the TDD mode of UMTS. *Proc. IEEE 52th Vehicular Technology Conference (VTC'00)*, Bd. 4, 2000, S. 1820–1824.
- [HMP00c] Haas, H.; McLaughlin, S.; Povey, G.: The effects of inter-system interference in UMTS at 1920 MHz. *First International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, Bd. 2, London, UK, 2000, S. 103–107.
- [HMP02] Haas, H.; McLaughlin, S.; Povey, G. J. R.: Capacity - coverage analysis of TDD and FDD mode in UMTS at 1920 MHz. *IEE Proc. Comm.*, Bd. 149, 2002, S. 51–57.
- [HP98] Haas, H.; Povey, G. J. R.: Outage probability of CDMA-TDD micro cells in a CDMA-FDD environment. *Proc. IEEE 9th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'98)*, Bd. 1, Boston, MA, USA, 1998, S. 94–98.
- [HP99a] Haas, H.; Povey, G. J. R.: Capacity analysis of a TDD underlay applicable for UMTS. *Proc. IEEE 10th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'99)*, 1999, S. 142–146.
- [HP99b] Haas, H.; Povey, G. J. R.: The effect of adjacent channel interference on capacity in a hybrid TDMA/CDMA-TDD system using UTRA-TDD parameters. *Proc. IEEE 50th Vehicular Technology Conference (VTC'99)*, Bd. 2, Amsterdam, The Netherlands, 1999, S. 1086–1090.
- [HP99c] Haas, H.; Povey, G.: A capacity investigation on UTRA-TDD utilising underused UTRA-FDD uplink resources. *IEE Colloquium on UMTS Terminals and Software Radio*, Glasgow, UK, 1999, S. 7/1–7/6.



- [HRMS03] Heiska, K.; Rikkinen, K.; Muszynski, P.; Schwarz, U.: Modeling of UE-UE interference at 2.5 GHz WCDMA. *Proc. IEEE 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'03)*, Bd. 1, Beijing, China, 2003, S. 69–73.
- [HT00] Holma, H.; Toskala, A.: *WCDMA for UMTS*. John Wiley & Sons, 2000.
- [HT02] Holma, H.; Toskala, A.: *WCDMA for UMTS, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, 2002.
- [Hul94] Hulbert, A.: Comprehensive rake – a novel and practical receiver architecture offering improved performance. *Proc. IEEE 3rd International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA '94)*, Bd. 2, Oulu, 1994, S. 470–474.
- [HV02] Holma, H.; Velez, F.: Performance of WCDMA1900 in the presence of uncoordinated narrow-band GSM interference. *Proc. IEEE 56th Vehicular Technology Conference (VTC'02)*, Bd. 2, 2002, S. 821–824.
- [IEE01] IEEE: *Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems*. Technischer Report IEEE Std 802.16.2-2001, The Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, 09/2001.
- [IFSPH01] I. Forkel, P.; Seidenberg, R.; Pabst, G.; Heidelberger: Performance evaluation of power control algorithms in cellular UTRA systems. *Proceedings of 3G 2001 - Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, London, UK, 2001, S. 11–15.
- [Ita99] Italtel: *Call admission criterion in UpLink for TDD mode*. 3GPP TSG-RAN WG4 Dokument TSG R4 #8(99)623, Sophia Antipolis, France, 26. – 29. Oktober 1999.
- [ITU97] ITU: *Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000*. Technischer Report ITU-R M.1225, International Telecommunications Union (ITU), 02/1997.
- [ITU01] ITU: *Spurious Emissions*. Technischer Report SM 329-8, International Telecommunications Union (ITU), 03/2001.
- [Jak74] Jakes, W.: *Microwave Mobile Communications*. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [JBS92] Jeruchim, M. C.; Balaban, P.; Shanmugan, K. S.: *Simulation of Communication Systems – Modeling, Methodology, and Techniques*. New York: Plenum Press, 1992.
- [JKH02] Johnson, C.; Khalab, J.; Hoglund, A.: Inter and intra operator coexistence of WCDMA HCS layers. *Proc. IEEE 55th Vehicular Technology Conference (VTC'02)*, Bd. 1, Birmingham, AL, USA, 2002, S. 115–119.

- [KBPY97] Knutsson, J.; Butovitsch, P.; Persson, M.; Yates, R.: Evaluation of admission control algorithms for CDMA system in a Manhattan environment. *Proceedings of 2nd CDMA International Conference, CIC '97*, 1997, S. 414–418.
- [KBPY98] Knutsson, J.; Butovitsch, P.; Persson, M.; Yates, R.: Downlink admission control strategies for CDMA systems in a Manhattan environment. *Proc. IEEE 48th Vehicular Technology Conference (VTC'98)*, Bd. 2, Ottawa, Canada, 1998, S. 1453–1457.
- [Ken00] Kensington, P. B.: *High-linearity RF amplifier design*. Norwood: Artech House, 2000.
- [KHR<sup>+</sup>01] Kurjenniemi, J.; Hämäläinen, S.; Ristaniemi, T.; Lehtinen, O.; Patronen, P.: Convergence of UTRA TDD uplink power control. *Proc. IEEE 53th Vehicular Technology Conference (VTC'01)*, Bd. 4, Rhodes, Greece, 2001, S. 2908–2912.
- [Kle96] Klein, A.: *Multi-user detection of CDMA signals – algorithms and their application to cellular mobile radio*. Fortschrittberichte VDI, Reihe 10, Nr. 423. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [KPD02] Koul, S.; Patronen, P.; Daqing, W.: Investigation of FDD and TDD coexistence in indoor environment. *European Wireless (EW2002)*, Florence, Italy, 2002.
- [KSK<sup>+</sup>99] Kwon, D. S.; Shin, M.; Kim, M.; Yoon, Y. J.; Park, H.-K.: Performance evaluation between CDMA systems by mobile system interference simulator. *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference TENCN 90*, Bd. 2, 1999, S. 1201–1204.
- [Lee91] Lee, W.: Overview of cellular CDMA. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 40, 1991, S. 291–302.
- [LEK<sup>+</sup>97] Leite, F.; Engelman, R.; Kodama, S.; Mennenga, H.; Towaij, S.: Regulatory considerations relating to IMT-2000. *IEEE Personal Communications*, Bd. 4, 1997, S. 14–19.
- [LL86] Lange, K.; Löcherer, K.-H.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [LLS91] Lee, T.; Lin, J.; Su, Y.: Downlink power control for cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 40, 1991, S. 323–332.
- [Man00] Mangold, S.: Game theoretical approaches for spectrum sharing in wireless communication. *Seventh Viennese Workshop on Optimal Control, Dynamic Games and Nonlinear Dynamics: Theory and Applications in Economics and OR/MS*, 2000.
- [MD79] Mac Donald, V. H.: The cellular concept. *The Bell System Technical Journal*, Bd. 58, 1979, S. 15–41.
- [Meu03] Meurer, M.: *Gemeinsame Empfangssignalverarbeitung in CDMA-Mobilfunksystemen mit infiniten oder quasi-infiniten Datenübertragung*. Dissertation, Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung, Universität Kaiserslautern, 2003.

- [MG86a] Meinke, H.; Gundlach, F. W.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [MG86b] Meinke, H.; Gundlach, F. W.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik: Grundlagen*. Bd. 1. 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [MG86c] Meinke, H.; Gundlach, F. W.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik: Komponenten*. Bd. 2. 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [MP92] Mouly, M.; Pautet, M.-B.: *The GSM-System for Mobile Communications*. von den Autoren verlegt, 1992.
- [MS99] Meurer, M.; Schmalenberger, R.: System level modeling and simulation of mobile radio scenarios including terminal mobility. *Proc. IEEE 10th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'99)*, Osaka, 1999, S. 332–336.
- [MWB00] MacLeod, J. R.; Warr, P.; Beach, M.: Dimensioning of a software defined radio receiver. *Proc. 1st Karlsruhe Workshop on Software Radios*, 2000, S. 75–80.
- [Naß95] Naßhan, M. M.: *Realitätsnahe Modellierung und Simulation nachrichtentechnischer Systeme, gezeigt am Beispiel eines CDMA-Mobilfunksystems*. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10, Düsseldorf: Nr. 384, 1995.
- [OP98] Ojanperä, T.; Prasad, R.: *Wideband CDMA for third Generation Mobile Communications*. Boston: Artech House, 1998.
- [Ost01] Oster, J.: *Ein Beitrag zur Interzellinterferenzreduktion in zeitgeschlitzten CDMA-Systemen*. Dissertation, Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung, Universität Kaiserslautern, 2001.
- [Pad94] Padovani, R.: Reverse link performance of IS-95 based cellular systems. *IEEE Personal Communications*, Bd. 1, 1994, S. 28–34.
- [Pap91] Papoulis, A.: *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 3. Auflage. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- [Par92] Parsons, J.: *The mobile radio propagation channel*. London: Pentech Press, 1992.
- [Pho99] Photecary, N.: *Feedforward Linear Power Amplifiers*. Norwood: Artech House Publishers, 1999.
- [Pro95] Proakis, J. G.: *Digital Communications*. 3. Auflage. New York: Mc Graw-Hill, 1995.
- [Rap96] Rappaport, T. S.: *Wireless Communications*. Communications Engineering and Emerging Technologies. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 1996.

- [Reg00] RegTP: *Entscheidung der Präsidentenkammer vom 18.02.2000 über die Festlegungen und Regeln im Einzelnen zur Vergabe von Lizenzen für Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)/International Mobile Telecommunications 2000 (IMT-2000) Mobilkommunikation der dritten Generation*; Aktenzeichen: BK-1b-98/005 - 1, Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post RegTP, www.regtp.de, Bonn, 2000.
- [Reg04] RegTP: *Übersicht über die Zuordnung der UMTS/IMT-2000 Frequenzblöcke*. www.regtp.de/reg\_tele/start/fs\_05.html, Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post RegTP, Bonn, gelesen am 23.05.2004.
- [RK01] Rikkinen, K.; Koul, S.: TDD/FDD system coexistence at 1920 MHz border. *Proc. 13th International Conference on Wireless Communications*, 2001.
- [Rup93] Rupperecht, W.: *Signale und Übertragungssysteme*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [SAS<sup>+</sup>99a] Seidenberg, P.; Althoff, M.; Schulz, E.; Herbster, G.; Kottkamp, M.: Analysis of mutual interference in UMTS/IMT-2000 mixed-mode scenarios. *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'99)*, Rio de Janeiro, Brazil, 1999, S. 2689–2693.
- [SAS<sup>+</sup>99b] Seidenberg, P.; Althoff, M.; Schulz, E.; Herbster, G.; Kottkamp, M.: Statistics of the minimum coupling loss in UMTS/IMT-2000 reference scenarios. *Proc. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'99)*, Amsterdam, The Netherlands, 1999, S. 963–967.
- [SB93] Simmonds, C.; Beach, M.: Network planning aspects of DS-CDMA with particular emphasis on soft handoff. *Proc. IEEE 8th International Conference on Antennas and Propagation*, Bd. 2, Edinburgh, 1993, S. 1007–1010.
- [Sch01] Schmalenberger, R. M.: *Modell und Simulation der Abwärtsstrecke eines CDMA-Mobilfunksystems mit gemeinsamer Detektion der teilnehmersignale und adaptie Sendeantennen*. Dissertation, Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung, Universität Kaiserslautern, 2001.
- [SG91] Salmasi, A.; Gilhousen, K. S.: On the system design aspects of code division multiple access CDMA applied to digital cellular and personal communications networks. *Proc. IEEE 41th Vehicular Technology Conference (VTC'91)*, St. Louis, 1991, S. 57–62.
- [Sha48] Shannon, C. E.: A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, Bd. 27, 1948, S. 623–656.
- [Sie98] Siemens: *Coupling Loss Analysis for UTRA*. ETSI SMG2 UMTS L1#8 Tdoc 548/98, Sophia Antipolis, France, 9. – 11. November 1998.
- [Sie99] Siemens: *TDD/FDD co-existence investigation — summary of results*. 3GPP TSG-RAN WG4 Dokument TSG RAN WG4 #3(99)096, Tokyo, Japan, 29. – 31. März 1999.

- [SL99] Salonaho, O.; Laakso, J.: Flexible power allocation for physical control channel in Wideband CDMA. *Proc. IEEE 49th Vehicular Technology Conference (VTC'99)*, Bd. 2, Houston, 1999, S. 1455–1458.
- [SOSL88] Simon, M. K.; Omura, J. K.; Scholtz, R. A.; Levitt, B. K.: *Spread spectrum communications*. Bd. 1–3. Rockville: Computer Science Press, 1988.
- [Ste92] Steele, R.: *Mobile Radio Communications*. London: Pentech Press, 1992.
- [Ste96] Steil, A.: *Spektrale Effizienz digitaler CDMA–Mobilfunksysteme mit gemeinsamer Detektion*. Fortschrittberichte VDI, Reihe 10, Nr. 437. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [Stu96] Stueber, G. K.: *Principles of Mobile Communication*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [TRV98] Tripathi, N.; Reed, J.; Vanalandinoham, H.: Handoff in cellular systems. *IEEE Personal Communications*, Bd. 5, 1998, S. 26–37.
- [Ver98] Verdú, S.: *Multiuser detection*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [Viz95] Vizmuller, P.: *RF Design Guide: Systems, Circuits, and Equations*. Norewood: Artech House Publishers, 1995.
- [VVGZ94] Viterbi, A. J.; Viterbi, A. M.; Gilhousen, K. S.; Zehavi, E.: Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 12, 1994, S. 1281–1288.
- [Wal00a] Walke, B.: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle: Bündelfunk, schnurlose Telefonsysteme, W-ATM, HIPERLAN, Satellitenfunk, UPT*. Bd. 2. Stuttgart: B. G. Teubner, 2000.
- [Wal00b] Walke, B.: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle: Grundlagen, GSM, UMTS und andere zellulare Mobilfunknetze*. Bd. 1. Stuttgart: B. G. Teubner, 2000.
- [Web00] Weber, T.: *Signalverarbeitungskonzepte für Mobilfunksysteme der dritten Generation, gezeigt am Beispiel eines JD-CDMA-Mobilfunksystems*. Dissertation, Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung und -verarbeitung, Universität Kaiserslautern, 2000.
- [Wes02] Wesolowski, K.: *Mobile Communication Systems*. John Wiley & Sons, 2002.
- [WH00] Wegmann, B.; Hellmann, M.: Analysis of power control target levels in UTRA-TDD. *Proc. IEEE 11th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'00)*, London, UK, 2000, S. 1216–1220.
- [WL97] Wong, D.; Lim, T.: Soft handoffs in CDMA systems. *IEEE Personal Communications*, Bd. 4, 1997, S. 6–17.

- [WL01] Wacker, A.; Laiho, J.: Mutual impact of two operators' WCDMA radio networks on coverage, capacity and QoS in a macro cellular environment. *Proc. IEEE 54th Vehicular Technology Conference (VTC'02)*, Bd. 4, Atlantic City, NJ USA, 2001, S. 2077–2081.
- [WMJ00] Wieslera, A.; Machauer, R.; Jondral, F.: Parameter representations for air interfaces of 2G and 3G mobile systems. *Proc. 1st Karlsruhe Workshop on Software Radios*, 2000, S. 27–30.
- [XBM<sup>+</sup>93] Xia, H.; Bertoni, H.; Marciel, L.; Lindsay-Stewart, A.; Rowe, R.: Radio propagation characteristics for Line-of-Sight microcellular and personal communication. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Bd. 41, 1993, S. 1439–1447.
- [Yac93] Yacoub, M.: *Foundations of mobile radio engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [Zan92a] Zander, J.: Distributed cochannel interference control in cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 41, 1992, S. 305–311.
- [Zan92b] Zander, J.: Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 41, 1992, S. 57–62.

---

## Tabellarischer Lebenslauf

Name: Stefan Heilmann  
Adresse: Hauptstraße 72  
67304 Eisenberg

geboren: 29. November 1976 in Grünstadt / Pfalz

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung: 1983–1987 Grundschule Eisenberg  
1987–1996 Nordpfalzgymnasium Kirchheimbolanden

Schulabschluß: Abitur

Studium: 1996–2001  
Studium der Elektrotechnik  
an der Universität Kaiserslautern  
Vertiefungsrichtung Nachrichtentechnik

Studienabschluß: Diplom

Berufstätigkeit: seit Oktober 2001  
wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Lehrstuhl für hochfrequente Signalübertragung  
und -verarbeitung an der Universität Kaiserslautern