Gebietsabdeckung, Systemkapazität und Verbindungsqualität in einem Mobilfunksystem mit Makrodiversität

Ulrich Weiss

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung (IND)
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Tel. +49/711/685-7992 Fax +49/711/685-7983, weiss@ind.uni-stuttgart.de

Zusammenfassung: Diese Arbeit untersucht den Einfluß von Makrodiversität auf die Gebietsabdeckung, die Systemkapazität und die Verbindungsqualität eines zellularen Mobilfunksystems. Für zwei verschiedene zellulare Anordnungen mit omnidirektionalen und gerichteten Antennen wird der Fall ohne Makrodiversität, mit Auswahl-Makrodiversität und mit Gleichwellenbetrieb betrachtet. Für makrodiversitätsfähige Mobilfunksysteme wird ein neues Ressourcenmanagement vorgeschlagen, das auf dynamischer Kanalvergabe und Zulassungskontrolle aufbaut. Es kann eine gewünschte minimale Verbindungsqualität für alle Mobilfunkteilnehmer gewährleisten. Durch gezielte Parametrisierung der Algorithmen kann je nach Wunsch eine höhere Verbindungsqualität oder eine höhere Systemkapazität erreicht werden.

1. Einleitung

Zukünftige Mobilfunksysteme sollen gegenüber heutigen Systemen ein höhere Gebietsabdeckung, höhere Systemkapazität und höhere Verbindungsqualität aufweisen. Im Hinblick darauf untersucht dieser Beitrag den Einsatz von Makrodiversität im zellularen System.

Makrodiversität (*macrodiversity*) ermöglicht den Mobilstationen über mehr als eine Feststation mit dem Zugangsnetz zu kommunizieren (Bild 1). Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen auf den Übertragungswegen von der Mobilstation zu den involvierten Feststationen sind die empfangenen Informationen von unterschiedlicher Qualität. Eine Kombination dieser einzelnen Informationen unter Berücksichtigung ihrer Qualität resultiert in einer höheren Qualität der gesamten empfangenen Information. Dies ist der sogenannte Makrodiversitätsgewinn.

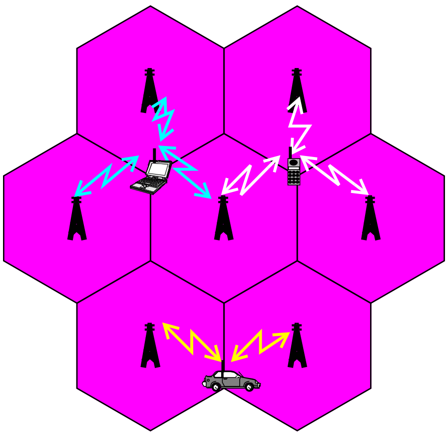

Bild 1: Makrodiversität in einem zellularen Mobilfunksystem

In der Richtung vom Festnetz zu den Mobilstationen (*downlink*) wird die zu übertragende Information vom Festnetz an alle involvierten Feststationen verteilt. Für die Übertragung über die Luftschnittstelle gibt es nun zwei Möglichkeiten: Es wird immer nur ein Signal von einer Feststation gesendet, wobei zu jedem Zeitpunkt die Feststation ausgewählt wird, die den besten Kanal (die geringste Dämpfung) zur Mobilstation hat. Dies bezeichnet man als Auswahl-Makrodiversität (*selection macrodiversity*).
Die zweite Möglichkeit besteht drain, daß alle involvierten Feststationen dasselbe Signal im selben Kanal (Frequenz/Zeitschlitz/Code) gleichzeitig senden. Man nennt dies auch Gleichwellenbetrieb (*simulcast*). Er erhöht künstlich die Mehrwegausbreitung des Signals. Es ist dann die Aufgabe des Empfängers, dies möglichst positiv auszunutzen. In digitalen FDMA/TDMA Systemen wird dies mit Hilfe eines Entzerrers erreicht, in CDMA Systemen dient dazu ein Rake-Empfänger. Im GSM verfügen die bereits heute in den Mobilgeräten verwendeten Entzerrer ein Entzerrfenster von 18,45 µs. Dies entspricht einer maximalen Pfadlängendifferenz von 5,5 km. Für kleinere bis mittlere Distanzen der Feststationen kann bei Gleichwellenbetrieb die Gesamt-Empfangsleistung P_{rec} als Summe der Einzelleistungen $P_{rec,i}$ berechnet werden:

$$P_{rec} = \sum_{i=1}^{n} P_{rec,i} \tag{1}$$

Dabei ist n ist die Anzahl der involvierten Feststationen. Messungen im GSM haben diese Annahme auch praktisch bestätigt [4].

Frühere Studien haben sich mit der Makrodiversität nur in Systemen mit fester Kanalvergabe beschäftigt [1, 4, 11]. Für piko- und mikrozellulare Systeme, das Haupteinsatzgebiet der Makrodiversität, ist jedoch ein flexibles Ressourcenmanagement von großer Bedeutung. Hier wird deshalb ein Ressourcenmanagement aus dynamischer Kanalvergabe und Zulassungskontrolle vorgeschlagen, das maximalen Nutzen aus der Möglichkeit der Makrodiversität ziehen kann. Dieses Verfahren kann flexibel auf zeitliche und räumliche Änderungen der Ausbreitungsbedingungen und des Verkehrsangebots reagieren. Durch geeignete Parametrisierung kann Verbindungsqualität gegen Systemkapazität abgewogen werden. Es kann zudem für alle Mobilfunkteilnehmer eine Verbindungsqualität größer als ein einstellbarer Minimalwert garantiert werden.

2. Systemmodell

Das betrachtete makrodiversitätsfähige Mobilfunksystem ist so ausgelegt, daß die Mobilstationen an jedem Ort und zu jeder Zeit Verbindung zu mehreren Feststationen unterhalten können. Dazu muß sowohl das Zugangsnetz entsprechend ausgerüstet (siehe [8,2]) als auch eine geeignete zellulare Anordnung vorhanden sein (siehe [9]).

Untersucht werden verschiedene Makrodiversitätsverfahren in zwei zellularen Architekturen. Die erste ordnet die Feststationen in der Mitte gleichseitiger Sechsecke an. Sie tragen omnidirektionale Antennen (Bild 2 links). Der Überlappungsgrad der Abdeckungsgebiete wird durch die Wahl der Sendeleistung bestimmt [10]. Die zweite setzt die Feststationen an jede zweite Ecke des symmetrischen Sechsecks und verwendet drei ideale 120 Grad Richtantennen (Bild 2 rechts). Der Antennengewinn für beide Typen wird gleichgesetzt, um einen fairen Vergleich der Architekturen zu ermöglichen.

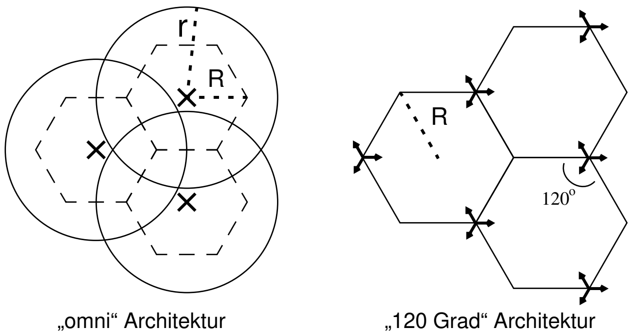

Bild 2: Zellulare Architekturen

Es wird angenommen, daß das Zugangsnetz so ausgelegt ist, daß Makrodiversität zwischen allen Feststationen im System möglich ist [8]. Die Kapazitätsbetrachtungen beschränken sich auf die Verbindungsebene. Für eine Betrachtung auf Paketebene siehe [10,3]. Mobilität wird in diesem Beitrag nicht betrachtet.

2.1 Ausbreitungsmodell

Für die folgenden Untersuchungen interessieren die mittlere Empfangsleistung (*local mean received power*) am Ort der Mobil- bzw. Feststation. Sie kann gemessen werde, indem lange genug (ca. 1 sec) über das Empfangssignal gemittelt wird. Das hier verwendete Ausbreitungsmodell berücksichtigt also die distanzabhängige Dämpfung und die Abschattung (langsamer Schwund). Letzterer kann mit Hilfe einer log-normal verteilten Zufallsvariablen beschrieben werden [5].
Die mittlere Empfangsleistung P_{rec} läßt sich wie folgt angeben:

$$P_{rec} = LG_tG_rP_t \tag{2}$$

mit der Sendeleistung P_t, den Antennengewinnen der Sende- bzw. Empfangsantenne G_t und G_r, und L dem Pfadverlust.
Die Verteilungsdichte von L in dB ist dann gegeben als:

$$f(L_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(L_{dB}-\bar{L}_{dB})^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

Dabei ist $\bar{L}_{dB}$ der Mittelwert der Dämpfung und σ die Standardabweichung in dB. $\bar{L}_{dB}$ läßt sich aus der entfernungsabhängigen Dämpfung berechnen. Ein allgemeines Modell beschreibt den Mittelwert $\bar{L}_{dB}$ als

$$\bar{L}_{dB} = 10\log_{10}\left(g_0\left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma}\right) \tag{4}$$

mit d_0 der Distanzeinheit im Abstand zum Sender, g_0 dem Leistungsübertragungsfaktor in der Distanz d_0, d der Distanz zwischen Sender und Empfänger und γ dem Dämpfungskoeffizienten. Der Koeffizient γ ist bei Freiraumausbreitung 2, bei Ausbreitung in bebauten Gebieten liegt γ zwischen 3 und 4 [5].

2.2 Methoden der Leistungsuntersuchung

Zur Untersuchung der Gebietsabdeckung werden Monte Carlo Simulationen verwendet. Die Feststationen sind gleichmäßig nach den beiden Architekturen in Bild 2 angeordnet. Die Sendeleistung ist für alle Feststationen gleich und fest gewählt. Sie ist so gewählt, daß die minimal nötige Empfangsleistung für eine Mobilstation am Zellrand („omni“ Architektur) bzw. Zellmitte („120 Grad“ Architektur) in 97% der Fälle erreicht wird. Zum Vergleich der Makrodiversitätsverfahren wird über die rechteckige Fläche von ungefähr der Zellgröße um die Feststation die Verteilungsfunktion der Empfangsleistung aufgezeichnet. Dazu werden die sich ändernden Ausbreitungsbedingungen solange simuliert bis die 95%-Konfidenzintervalle ausreichend klein sind. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Abwärtsrichtung, die gleiche Methodik kann jedoch entsprechend für die Aufwärtsrichtung angewendet werden.
Wir vergleichen die oben erwähnten Makrodiversitäsverfahren. Im Falle ohne Makrodiversität wird immer die der Mobilstation nächstliegende Feststation gewählt und nur mit dieser eine Verbindung unterhalten. Im Falle der Auswahl-Makrodiversität wird zu jedem Zeitpunkt die Feststation gewählt, die die geringste Dämpfung zur Mobilstation „sieht“. Es sendet zu jedem Zeitpunkt nur eine Feststation. Bei Gleichwellenbetrieb senden zwei oder drei Feststationen gleichzeitig. Es werden auch hier diejenigen ausgewählt, die die geringste Dämpfung zur Mobilstation aufweisen. Ihre Leistungen werden wie in Gleichung (1) angegeben am Ort der Mobilstation addiert.
Zur Untersuchung der Systemkapazität und Verbindungsqualität werden ereignisgesteuert Simulationen durchgeführt. Sie berücksichtigen das sich zeitlich ändernde Verkehrsangebot und die räumliche Lage der Mobilstationen. Die Mobilstationen sind gleichverteilt über das Mobilfunkgebiet und setzen je einen Verbindungswunsch ab. Verbindungswünsche folgen einem Poisson-Prozeß mit Ankunftsrate λ. Die Verbindungsdauer ist negativ exponentiell verteilt mit Parameter ε=1/100sec. Das Verkehrsangebot in Erlang ergibt sich damit zu $A=\lambda/\varepsilon$. Zur Interferenzberechnung werden zwei Ringe von Störern betrachtet.
Die Parameter zur Leistungsbewertung sind im Falle der Abdeckung die Gesamtempfangsleistung an der Mobilstation P_{rec}, im Falle der Systemkapazität der Verkehrswert und im Falle der Verbindungsqualität das mittlere Gleichkanal-Interferenzverhältnis (*cochannel to interference ratio*, CIR) aller Verbindungen.

3. Ergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsstudien und die daraus gewonnenen Erkenntnisse aufgezeigt.

3.1 Gebietsabdeckung

Bild 3 zeigt beispielhaft die Gebietsabdeckung zu einem Zeitpunkt um eine zentrale Zelle für die „omni“ und die „120 Grad“ Architektur. Dunklere Flächen sind im Betrachtungsmoment schlechter abgedeckt als hellere, weisen also eine geringere Empfangsleistung P_{rec} auf. In der „omni“ Architektur (links) sind die Problemzonen vor allem am Zellrand, in der „120 Grad“ Architektur (rechts) in der Zellmitte zu erkennen. Aber auch an manchen anderen Stellen im Zellinneren ist die Empfangsleistung häufig nur sehr gering. Dies ist eine anschauliche Darstellung des Phänomens der Abschattung. Durch Auswahl-Makrodiversität lassen sich die schlecht abgedeckten Zonen sichtbar reduzieren, durch den Gleichwellenbetrieb (hier mit drei Verbindungen) erfolgt noch eine weitere Verbesserung der Abdeckung [7].

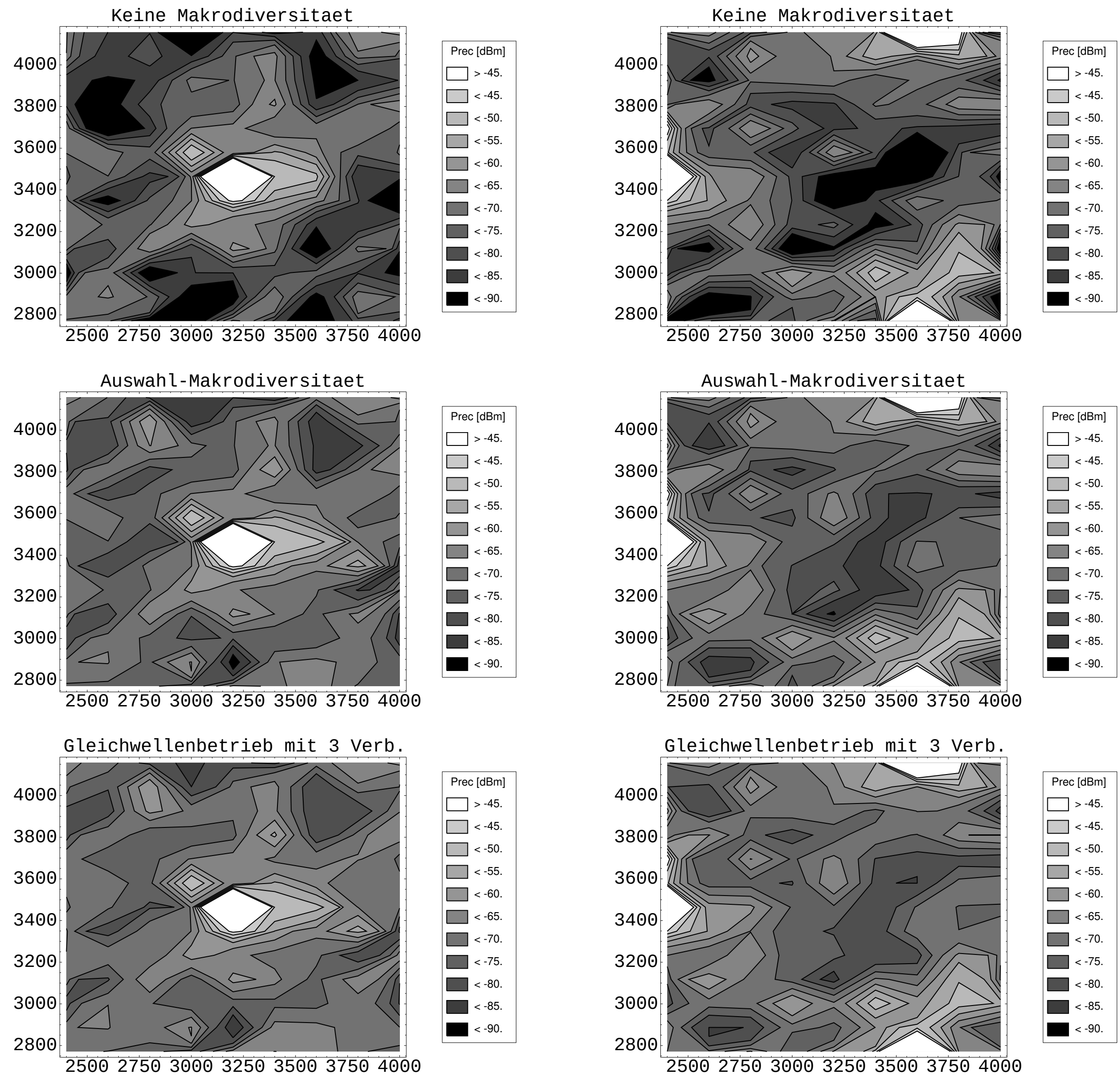

Bild 3: Gebietsabdeckung zu einem Zeitpunkt (Beispiel für γ=4, σ=10)

Zur Quantifizierung der Abdeckungsunterschiede bilden wir die Verteilungsfunktion der Empfangsleistung über die rechteckige Fläche von ungefähr der Zellgröße um die zentrale Feststation (Bild 4). Die Verteilungsfunktion der Empfangsleistung zeigt die Wahrscheinlichkeit an, daß die Empfangsleistung gemittelt über die betrachtete Fläche kleiner oder gleich einem bestimmten Wert ist (*Prob{P<=p}*). Die Abdeckungswahrscheinlichkeit ergibt sich dann zu *1-Prob{P<=p}*. Die Verteilungsfunktionen sind für beide Architekturen gleich, da die Antennengewinne für die idealen Richtantennen wie für die omnidirektionalen Antennen zu eins gewählt wurde. Mit einem höheren Antennengewinn realer Richtantennen sind die absoluten Empfangsleistung entsprechend höher (siehe Gleichung (2)). Die relativen Abstände der Kurven bleiben jedoch gleich. Dasselbe gilt auch für eine höhere Sendeleistung.

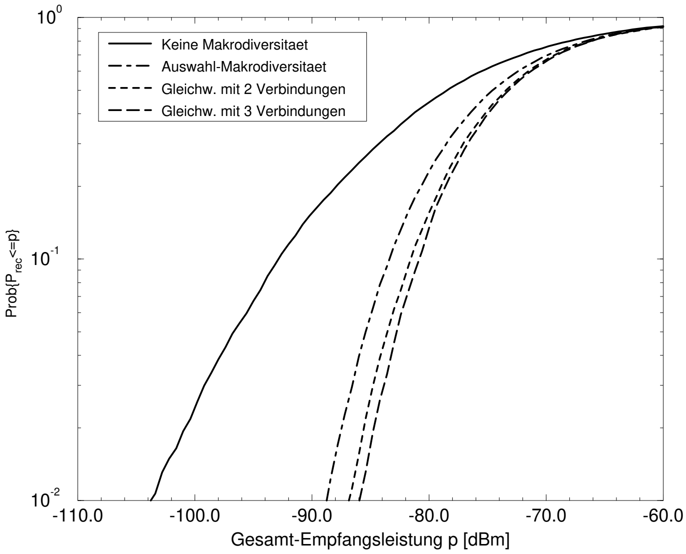

Bild 4: Verteilungsfunktionen der Empfangsleistung

Der Vergleich der Makrodiversitäts-Verfahren kann entweder bei einer festen Empfangsleistung oder bei einer festen Abdeckungswahrscheinlichkeit erfolgen. Wenn also in Bild 4 z. B. -84 dBm als minimal nötige Empfangsleistung festgelegt wird, so erreicht der Gleichwellenbetrieb mit drei bzw. zwei Feststationen eine Gebietsabdeckung von 97% bzw. 96%. Die Auswahl-Makrodiversität erreicht eine Abdeckung von 92%. Im Falle ohne Makrodiversität ist im Mittel nur 70% der Fläche abgedeckt.

Der Vergleich der Verfahren bei einer geforderten Abdeckungswahrscheinlichkeit von 90% ergibt einen Gewinn für die Auswahl-Makrodiversität gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität von 9,5 dB. Für den Gleichwellenbetrieb mit zwei Feststationen ist der Gewinn 11,3 dB und für den Gleichwellenbetrieb mit drei Feststationen 12 dB. Der relative Abdeckungsgewinn durch die Makrodiversität ist je größer desto höher die geforderte Abdeckungswahrscheinlichkeit ist.

Bild 4 zeigt auch, daß sich das Einsetzten von mehr und mehr Feststationen im Gleichwellenbetrieb zwar lohnt, daß die Gewinnzunahme jedoch immer geringer wird.

Für andere Werte der Standardabweichung σ der Abschattung ergeben sich Werte nach Tabelle 1.

Je höher σ desto höher der Abdeckungsgewinn durch Makrodiversität. Je größer also das Problem der Abschattung desto eher lohnt sich der Einsatz von Makrodiversität.

Relativer Gewinn in dB bei 90% Abdeckungswahrscheinlichkiet (im Vergleich zum Fall ohne Makrodiversität)	σ [dB]		
	2	6	10
Auswahl-Makrodiversität	0,8	3,8	9,5
Gleichwellenbetrieb mit 2 Feststationen	2,9	5,4	11,3
Gleichwellenbetrieb mit 3 Feststationen	3,6	6,2	12,0

Tabelle 1: Abdeckungsgewinn in Abhängigkeit von σ

Der Abdeckungsgewinn der Makrodiversität kann zum Senken der Sendeleistungen, zum Einsparen von Feststationen oder zur Realisierung einer besseren Empfangsqualität genutzt werden.

3.2 Systemkapazität und Verbindungsqualität

Um von der Möglichkeit der Makrodiversität maximal zu profitieren ist ein flexibles Ressourcenmanagement nötig. Für bestehende Verbindungen soll eine minimale Qualität, definiert durch ein minimales Gleichkanal-Interferenzverhältnis CIR, garantiert werden. Beides läßt sich durch dynamische Kanalvergabe gepaart mit einer geeigneten Zulassungskontrolle erreichen [6].
Dem hier verwendeten dynamischen Kanalvergabe-Verfahren stehen alle Systemressourcen (in einem FDMA/TDMA System sind dies z. B.die Zeitschlitze für die Nutzdaten) an jeder Feststation zur Verfügung. Die Ressourcen werden so wiederverwendet, daß jeder aktiven Verbindung ein minimales CIR_{min} und eine minimale Empfangsleistung $P_{rec,min}$ garantiert wird. Das Ziel ist es dabei, die Nutz-Empfangsleistung zu maximieren. Die Zulassungskontrolle unterstützt die Kanalvergabe so, daß beide Parameter $P_{rec,min}$ und CIR_{min} für sowohl aktive als auch neue Verbindungen eingehalten werden können. Sollte keine Ressource an keiner Feststation für einen neuen Verbindungswunsch zur Verfügung stehen, wird der Ruf blockiert. Für die folgenden Simulationsergebnisse wurde $P_{rec,min}$ =-105 dBm und CIR_{min}=9 dB gewählt. Im simulierten System mit 26 Zellen stehen 36 Downlink-Ressourcen zur Verfügung.
Das CIR wird für jede Mobilstation aus dem Quotient der Nutz-Empfangsleistung (oder der Summe der Nutz-Empfangsleistungen bei Gleichwellenbetrieb) und der Summe der Stör-Empfangsleistungen aller Feststationen, die dieselbe Ressource verwenden, gebildet. Um Randeffekte zu vermeiden werden Statistiken nur in der zentralen Zelle des Systems genommen.
Bild 5 (links) zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot pro Zelle für die „omni“ Architektur. Die senkrechten Striche bezeichnen die 95%-Konfidenzintervalle. Die Systemkapazität wird definiert als der Verkehrswert oder auch als das Verkehrsangebot bei fester Blockierwahrscheinlichkeit[1]. Nach Bild 5 ermöglicht Auswahl-Makrodiversität immer eine höhere Kapazität als im Fall ohne Makrodiversität. Für den Gleichwellenbetrieb ist die Kapazität immer geringer als im Fall der Auswahl-Makrodiversität. Für ein geringes Verkehrsangebot kann sie sogar geringer als im Fall ohne Makrodiversität sein.
Dies ist durch das gewählte Kanalvergabeverfahren begründet. Bei Gleichwellenbetrieb wird versucht möglichst drei Verbindungen zu unterhalten, so daß die Gesamt-Empfangsleistung maximiert wird. Ist es jedoch nicht möglich, drei Verbindungen zu nutzen, da dann andere aktive Verbindungen gestört würden (also deren CIR unter den Wert CIR_{min} fallen würde), werden nur zwei oder gar nur eine Verbindung unterhalten. Für ein sehr hohes Verkehrsangebot wird also im Mittel nur eine Verbindung genutzt. Dann geht der Gleichwellenbetrieb in den Fall der Auswahl-Makrodiversität über. Bei einem geringen Verkehrsangebot sind meistens drei Verbindungen aktiv. Dies führt zu einem geringeren mittleren Wiederverwendungsabstand der Ressourcen und damit zu geringerer Kapazität.
Die Verbindungsqualität wird mit Hilfe der Verteilungsfunktion des mittleren, mit der Verbindungsdauer gewichteten CIR aller aktiven Mobilstationen beurteilt. Bild 5 (rechts) zeigt diese Verteilungsfunktion bei einem Verkehrswert von 10 Erlang pro Zelle für die „omni“ Architektur.

---

1. Der Verkehrswert ergibt sich im reinen Verlustsystem zu $Y=A(1-P_{block})$

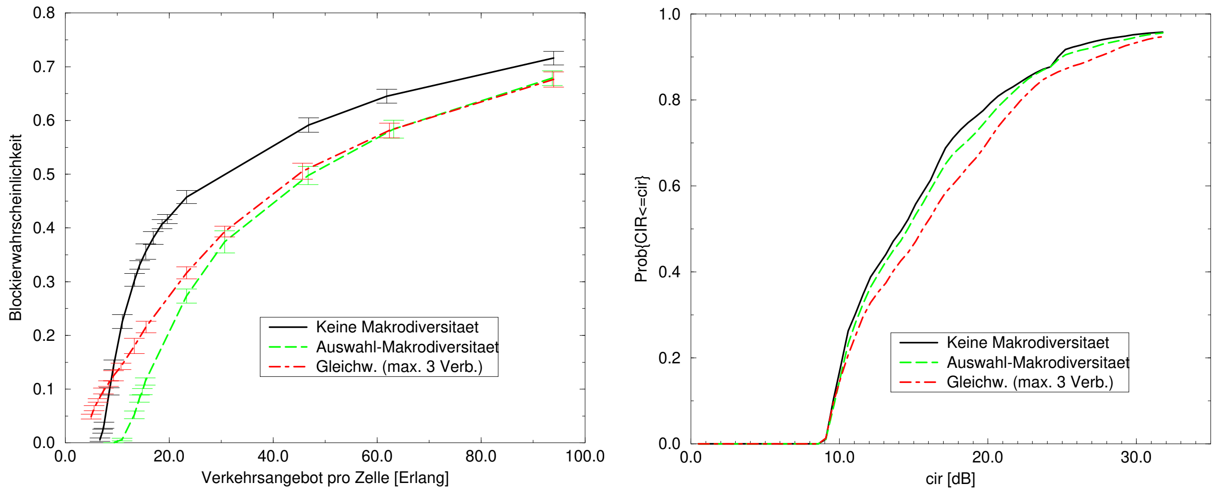

Bild 5: Blockierwahrscheinlichkeit und CIR Verteilung für die „omni"-Architektur

Bei einem festen Verkehrswert sind im Mittel gleich viele Verbindungen aktiv, so daß ein fairer Vergleich der Makrodiversitätsverfahren möglich ist. In diesem Betriebspunkt realisiert der Gleichwellenbetreib das höchste CIR vor der Auswahl-Makrodiversität und vor dem Fall ohne Makrodiversität.

Bild 6 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit (links) im Fall der „120 Grad" Architektur. Die Kurvenverläufe verhalten sich entsprechend der „omni" Architektur. Die absolute Systemkapazität

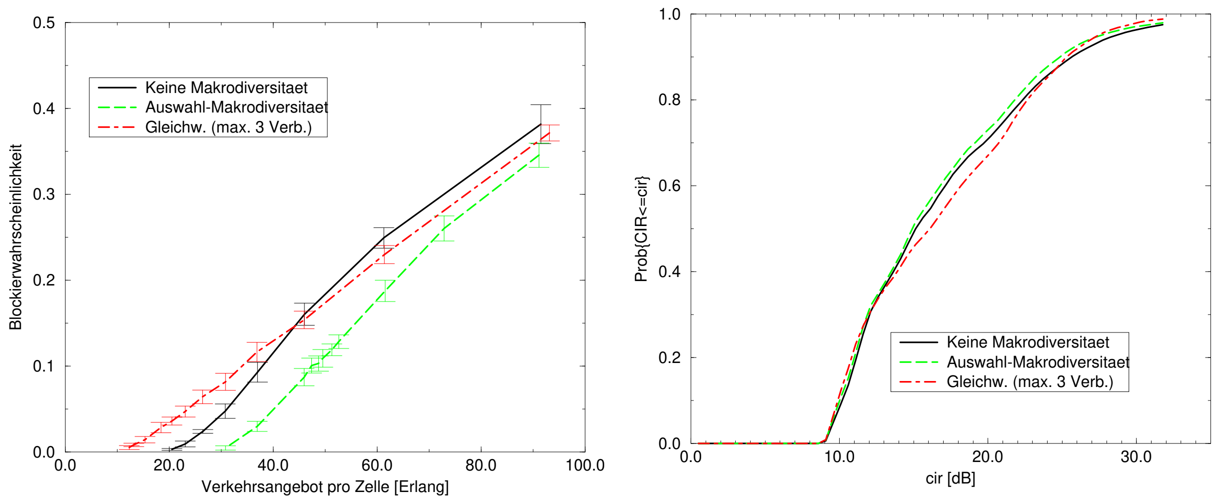

Bild 6: Blockierwahrscheinlichkeit und CIR Verteilung für die „120 Grad" Architektur

ist höher, da aufgrund der Interferenzunterdrückung der Richtantennen der Wiederverwendungsfaktor der Ressourcen steigt. Rechts im Bild 6 ist die CIR Verteilung bei einem Verkehrswert von 30 Erlang dargestellt. Die Kurven liegen sehr eng beisammen. Ein prinzipieller Vorteil bezüglich der Verbindungsqualität eines Verfahrens kann hier nicht ausgemacht werden.

Für beide Architekturen zeigen die Bilder 5 und 6 (rechts), daß jeder Verbindung ein minimales CIR von 9 dB garantiert wird. Dies ist der beim Ressourcemanagement eingestellte Parameter CIR_{min}. Wählt man hier einen höheren Wert, wird eine bessere Verbindungsqualität gewährleistet. Dies geht jedoch zur Lasten der Systemkapazität, da der Wiederverwendungsfaktor der Ressourcen sinkt und bei gleicher Kanalzahl mehr Verbindungswünsche blockiert werden. Mit diesem Ressourcenmanagement ist es also möglich Systemkapazität gegen Verbindungsqualität abzuwägen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung von Makrodiversität in einem zellularen System hilft dem Problem der Abschattung effektiv zu begegnen. Die Gebietsabdeckung erhöht sich drastisch. Bereits die Auswahl-Makrodiversität erzielt beträchtliche Gewinne. Mit Gleichwellenbetrieb sind nochmals höhere Gewinne möglich. Dabei wird jedoch im Gleichwellenbetrieb der Gewinnzuwachs beim Hinzufügen weiterer Verbindungen immer geringer.

Das für das Ressourcenmanagement hier vorgeschlagene Verfahren aus dynamischer Kanalvergabe und Zulassungskontrolle kann eine gewünschte Verbindungsqualität für alle Mobilstationen garantieren. Die Qualität, die mindestens erreicht werden soll, läßt sich über den Parameter CIR_{min} frei einstellen.

Mit diesem flexiblen Ressourcenmanagement ist die Systemkapazität bei Auswahl-Makrodiversität für alle Lastfälle beträchtlich höher als im Fall ohne Makrodiversität. Im Gleichwellenbetrieb führt die erhöhte Interferenzerzeugung beim Aufrechterhalten mehrere gleichzeitig aktiver Verbindungen generell zu einem schlechteren Wiederverwendungsfaktor der Ressourcen und damit zu geringerer Systemkapazität. Mit Hilfe des hier vorgestellten Verfahrens im Gleichwellenbetrieb, das je nach Interferenzlage die Anzahl der gleichzeitig aktiven Verbindungen anpaßt, läßt sich jedoch für ein hohes Verkehrsangebot die Systemkapazität gegenüber dem Fall ohne Makrodiversität erhöhen; sie bleibt aber immer unter der der Auswahl-Makrodiversität. Für praktisch interessante Werte der Blockierwahrscheinlichkeit (1%-10%) ist die höchste Systemkapazität immer durch Auswahl-Makrodiversität zu erreichen.

Die Verbindungsqualität ist in dem hier gezeigten Fall für die „omni“ Architektur bei Gleichwellenbetrieb etwas besser als für die anderen Verfahren. Bei dem gezeigten Fall für die „120 Grad“ Architektur läßt sich das nicht bestätigen. Es ist in Zukunft zu untersuchen inwiefern dies vom Arbeitspunkt des Systems (Verkehrswert) und inwiefern von der Architektur abhängt. Ebenfalls interessant für weitere Studien ist das Verhalten einer am CIR orientierten Kanalvergabe anstelle der hier angewendeten, an der Empfangsleistung orientierten Kanalvergabe. In Zukunft soll auch noch die Mobilität der Teilnehmer mit Hilfe verschiedener Handoververfahren betrachtet werden.

Literatur

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

[2] Boldt, M.; Weiss, U.; Sigle, R.; Dropmann, U. „Modeling an ATM-Based Access Network for 3rd Generation Mobile Communication Networks“, Proc. of VTC‘98 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, 18.-21.5.1998, pp. 2590-2593

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

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

[5] Lee, William C.Y. „Mobile communications design fundamentals“, 1993, Editor(s): John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-57446-5

[6] Weiss, Ulrich „Designing Macroscopic Diversity Cellular Systems“, Proc. of VTC‘99 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, Texas, USA, 16.-20.5.1999

[7] Weiss, Ulrich „Improving Coverage and Link Quality by Macroscopic Diversity“, Proc. of EPMCC 99 - the 3rd European Personal Mobile Communications Conference, Paris, France, March 9-11, 1999, pp. 268-273

[8] Weiss, Ulrich „Makrodiversität in der Mobilkommunikation“, 5. Berichtskolloquium des GK PVS - Graduiertenkollegs Parallele und Verteilte Systeme, Stuttgart, Germany, 3. Juli 1998, pp. 83-90

[9] Weiss, Ulrich „Einsatz von Makrodiversität in der Breitband-Mobilkommunikation“, 4. Berichtskolloquium des GK PVS - Graduiertenkollegs Parallele und Verteilte Systeme, Stuttgart, Germany, 13.6.1997, pp. 71-81

[10] Weiss, Ulrich; Dropmann, Ulrich; Godlewski, Philippe „Admission Control Guranteeing Quality of Service in Packet Access based Pico-Cellular Networks“, Proc. of the 1996 ACTS Mobile Telecommunications Summit (ACTS 96), Granada, Spain, November 27-29, 1996, pp. 204-210

[11] Zürbes, Stefan; Papen, Wolfgang; Schmidt, Werner „A New Architecture for Mobile Radio with Macroscopic Diversity And Overlapping Cells“, Proc. of PIMRC 94 Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Den Haag, Holland, September 18-22, 1994, pp. 640-644