Einsatz von Makrodiversität in der Breitband-Mobilkommunikation

Ulrich Weiss

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung (IND)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart

Zusammenfassung: Zukünftige zellulare Mobilfunksysteme sollen mehrere Forderungen gleichzeitig erfüllen. Sie sollen zahlreiche Dienste bei hoher Qualität und uneingeschränkter Verfügbarkeit für eine große Anzahl von Benutzern anbieten. Im Hinblick darauf ist Makrodiversität eine vielversprechende Technik, die die notwendigen Qualitäts- und Kapazitätsgewinne in einem Mobilfunksystem realisieren kann. Diese Studie untersucht den Einsatz von Makrodiversität für zukünftige Mobilfunksysteme.

1. Einleitung

Seit Beginn der neunziger Jahre erlebt die Mobilkommunikation durch Einführung der digitalen Systeme (der sogenannten „zweiten Generation“) weltweit ein ungeheures Wachstum. Vor allem das europäische GSM (*Global System of Mobile Communications*) hat stark zu diesem Erfolg beigetragen. Es bietet in erster Linie Telefondienste an. Die Sprachqualität ist geringfügig schlechter als die des Festnetzes. Desweiteren bietet GSM Fax- und Datendienste bis 9,6 oder 12 kbit/s an.

Die dritte Generation der Mobilkommunikations-Systeme soll nun die Sprachqualität verbessern sowie neue Dienste einführen. Gedacht wird dabei unter anderem an hochratigen Datentransfer, Bildtelefonie, Videoübertragung und *World Wide Web*-Anwendungen. Dazu sind höhere Datenraten nötig als sie die Systeme der zweiten Generation zur Verfügung stellen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch gerne von **breitbandiger Mobilkommunikation**. Im europäischen UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [3] und in dessen internationalem Pendant IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications system*, früher FPLMTS) wird dabei an Nutzer-Datenraten von maximal 2 Mbit/s gedacht. Dabei sollen Geschwindigkeiten des Mobilteilnehmers während der Kommunikation bis zur Reisegeschwindigkeit im Auto oder Zug unterstützt werden.

Andere drahtlose Systeme (z.B. wireless ATM) planen auch höhere Datenraten von 50 oder

eventuell 155 Mbit/s. Dies wird aber mit starker Einschränkung der Mobilität (bis zum Stillstand) während der Verbindung einhergehen.
Einen Überblick über heutige und zukünftige Systeme gibt Bild 1.

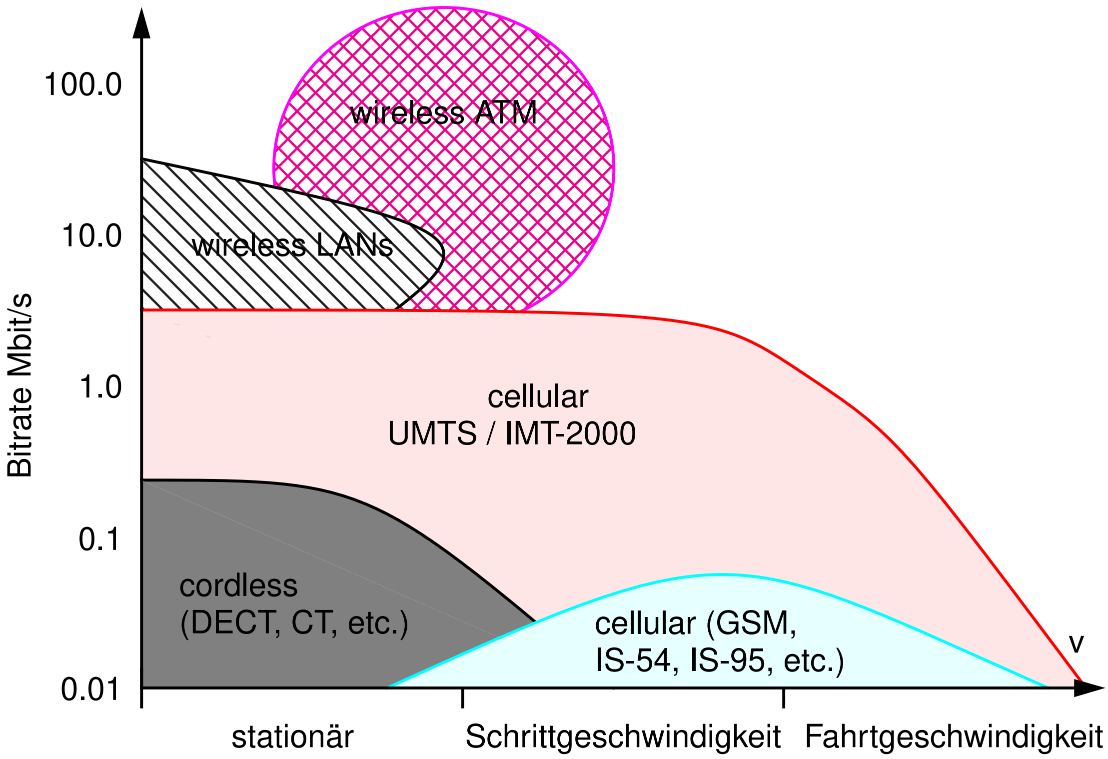

Bild 1: Überblick Mobilfunksysteme/drahtlose Systeme

Zukünftige zellulare Mobilfunksysteme sollen also mehrere Einschränkungen der heutigen Systeme gleichzeitig lösen. Sie sollen eine Vielzahl von schmal- und breitbandigen Diensten bei hoher Qualität für eine sehr hohe Benutzerzahl anbieten können.
Schwierigkeiten beim Entwurf solcher System entstehen vor allem im Bereich der Luftschnittstelle: Zum einen ist die zur Verfügung stehende Bandbreite begrenzt und zum anderen sind Funkübertragungen durch eine sehr hohe Fehlerrate gekennzeichnet. Die Qualität der Übertragungen über den radiomobilen Kanal wird durch Ausbreitungsdämpfung (*path loss*), Abschattung (*shadowing*) und Mehrwegausbreitung (*multipath propagation*) beeinträchtigt [8]. Letztere Faktoren führen bei einem sich bewegenden Terminal zu sich zeitlich langsam bzw. schnell ändernder Signaldämpfung (*slow/fast fading*).
Um die Wahrscheinlichkeit von Signaleinbrüchen (*signal outage*) aufgrund des Fadings zu verringern, kann auf der Luftschnittstelle **Makrodiversität** eingesetzt werden. Makrodiversität bietet desweitern die Möglichkeit, die Abdeckung einer Zelle zu verbessern [18] und ein *seamless handover* zu ermöglichen. Dies bedeutet, daß ein Mobilfunkteilnehmer den Übergang von einer Zelle in eine andere, bei dem unweigerlich ein Wechsel auf einen anderen Kanal stattfinden muß, nicht bemerkt (kein Klicken oder gar Wegfall der Verbindung). Dies ist eine wichtige Anforderung an die zellularen Mobilfunksysteme der dritten Generation.

2. Makrodiversität

Beim Einsatz von Makrodiversität (*macroscopic diversity*) auf der Luftschnittstelle werden die zwischen Quelle und Senke auszutauschenden Informationen über mehrere Pfade (n>=2) übertragen.
Im Falle des *Uplinks* (Mobilstation zum Festnetz) wird das von der Mobilstation gesendete Signal von mehreren Basisstationen aufgefangen. Diese fügen zu den empfangenen Dateneinheiten Qualitätsinformationen hinzu und leiten sie dann weiter an die Kombinationseinheit im Festnetz. Dort werden die Daten zu einer resultierenden Einheit kombiniert und dann an die Senke weitergeleitet.
Im *Downlink* (Festnetz zu Mobilstation) werden die Informationen am Verteilpunkt im Festnetz vervielfacht und an mehrere Basisstationen weitergeleitet. Diese senden dann das Funksignal in einem engen Zeitrahmen an die Mobilstation. Die Mobilstation kann dann die eingehenden Signale geeignet kombinieren.

2.1. Kombinationstechniken

Mehrere Kombinationstechniken sind aus der Literatur bekannt, z.B. [4],[9]. Kombiniert werden können Signale, Bits oder Informationsblöcke (Pakete). Alle zusammen werden im folgenden als zu kombinierende *Einheiten* bezeichnet. Zur Qualitätsbeurteilung einer Einheit können das Signal-Rausch-Verhältnis (*signal-to-noise ratio SNR*) oder die Bitfehlerrate (*bit error rate BER*) oder Kombinationen von beiden herangezogen werden.
Wir unterscheiden die Kombinationstechniken bezüglich zweier Eigenschaften: bezüglich des Kombinationsverfahrens und bezüglich des Zeitpunktes der Kombination.

2.1.1. Kombinationsverfahren

- Auslese (*selective combinig*):
  die erste erhaltene Einheit, bei der die Qualität einen gegebenen Grenzwert übertrifft, wird weitergeleitet, die von anderen Pfaden danach ankommenden Einheiten werden ignoriert. Der Vorteil ist, daß hier keine unnötigen Verzögerungen entstehen.
- Auswählen (*selection combining*):
  jede Einheit hat eine ihr zugeordnete Qualitätsinformation, die ein Maß für die Korrektheit der übertragenen Information darstellt. Die Einheit mit der besten Qualität wird ausgewählt. Man erhält immer eine Grundverzögerung durch das Warten auf nacheinander eintreffende Einheiten.
- Konstruktives Kombinieren (*constructive combining*):
  Alle empfangenen Einheiten werden berücksichtigt. An Hand ihrer Qualitätsinformationen wird mit einem geeigneten Algorithmus eine möglichst korrekte Einheit berechnet, die dann weitergeleitet wird. Als Algorithmen sind zum Beispiel geeignet:
  - *maximal ratio combining*:
    Gewichtung mit dem Signal-Rausch-Verhältnis, dann Addition
  - *equal gain combining*:

Gewichtung mit eins (Gleich-Gewichtung), dann Addition

2.1.2. Kombinationszeitpunkt

- vor der Detektion (*pre-detection combining*)
- nach der Detektion (*post-detection combining*)

Diese Unterscheidung kommt noch aus der Analogtechnik, in der die Signaldetektion mit der Demodulation gleichzusetzen war. In der Digitaltechnik gibt es mehrere Stellen im Empfänger an denen kombiniert werden kann. [7] unterscheidet drei Möglichkeiten der Kombination: im Entzerrer (Basisbandsignale), im Kanaldecodierer (Brutto-Bitstrom) und im Sprachdecodierer (Netto-Bitsrom).
Werden bei der Bitdetektion weiche Entscheidungen (*soft decision*s) getroffen, können zur Kombination die Likelihood-Werte mitherangezogen und so ein größerer Kombinationsgewinn erreicht werden [5]. Allerdings muß ein großer Anteil von Zusatzinformationen über jedes Bit an die Kombinationseinheit weitergeleitet werden (z.B. vier zusätzliche Bits pro entschiedenes Bit). Da diese sich (im Uplink) im Festnetz befindet, wird so eine sehr große Bandbreite im Festnetz beansprucht. Das Kombinieren auf Bitebene unter Zuhilfenahme der Likelihood-Werte wird häufig auch als *soft combining* bezeichnet.
Nach der Detektion kann sinnvollerweise auf Blockebene kombiniert werden. Ein Block kann zum Beispiel ein Burst oder ein Luftschnittstellen-Datenrahmen (Datenpaket) sein. Bei diesem Verfahren muß nur eine Qualitätsinformation pro Block (und nicht pro Bit) mitgeliefert werden. Die Kombiniereinheit kann irgendwo im Festnetz sitzen. Die durch die Qualitätsinformation zusätzlich beanspruchte Übertragungsbandbreite ist gering. Im Unterschied zu oben wird dies auch als *hard combining* bezeichnet.

Prinzipiell hängt es von der Wahl des Kombinationszeitpunktes und des -verfahrens ab, wie groß der mit Makrodiversität zu realisierende Gewinn sein kann. Es gilt allgemein, daß der Gewinn umso höher ist je genauer die Informationen sind, die zur Kombination zur Verfügung stehen. Ein maximal ratio-combining Algorithmus vor der Signaldetektion ist also einem selection combinig auf Blockebene sicherlich überlegen. Allerdings erfordert ersteres Verfahren erheblichen Aufwand in der Signalverarbeitung [9] und die oben schon angesprochene hohe zusätzliche Übertragungsbandbreite im Festnetz.
In einem realen System muß man einen guten Kompromiß zwischen dem möglichen Gewinn und dem zu investierenden Aufwand (und damit auch den Kosten) finden. Dabei müssen im Up- und Downlink nicht diesselben Verfahren Verwendung finden.

2.2. Mikrodiversität

Ergänzend zur Makrodiversität gibt es weitere Formen von Diversität, die unter dem Namen Mikrodiversität (*microscopic diversity*) zusammengefaßt werden können [4]. Hierbei werden mehrere Antennen an derselben Basissation eingesetzt, die räumlich um nur wenige Wellenlängen getrennt stehen. Diese Technik wird benutzt, um Schwund, der durch die Mehrwegausbreitung verursacht wird (*fast or multipath fading*), zu bekämpfen [11].

Mikro- und Makrodiversität können auch gleichzeitig in einem Mobilfunksystem eingesetzt werden. Prinzipiell können beide Techniken jedoch getrennt untersucht werden. Hier beschäftigen wir uns im folgenden nur mit der Makrodiversität.

3. Systemvoraussetzungen

Um Makrodiversität zu ermöglichen muß die zellulare Architektur so gewählt werden, daß sich die Abdeckungsgebiete der Basisstationen überlappen. Je nach Überlappungsgrad der Zellen kann Makrodiversität nur in einem Teil des Mobilfunksystem oder im gesamten System angeboten werden. Eine mögliche Architektur für ein pico-zellulares System (zur Abdeckung in Gebäuden oder auf einem Campus) mit parametrisierbarem Überlappungsgrad findet sich in [16]. In [19] wird ein System bis zu 4 km Zellradius vorgestellt. Dieses kann im innerstädtischen Bereich eingesetzt werden, wobei die Gleichwellenversorgung an jedem Ort im Servicegebiet mit bis zu drei Basisstationen möglich ist. Verschiedene quadratische, dreieckige und sechseckige makrodiversitäts-fähige Zellstrukturen finden sich in [1].

Prinzipiell können wir zwei Realisierungen der Makrodiversität auf der Luftschnittstelle unterscheiden:

a) Mehrfache Übertragung der Information auf dem gleichen physikalischen Kanal
b) Mehrfache Übertragung der Information auf verschiedenen physikalischen Kanälen

In beiden Fällen muß die Information am Empfänger in einem sehr kurzen Zeitabstand ankommen. Uplink und Downlink müssen nicht notwendigerweise dieselbe Technik verwenden. Wir werden im folgenden auf die Unterschiede im Up- und Downlink eingehen.

3.1. Uplink

Durch ein zellulare Architektur mit überlappenden Abdeckungsgebieten der einzelnen Basisstationen erhält man die Möglichkeit zu einer “natürlichen” Makrodiversität im Uplink. Die sendende Mobilstation wird von mehreren Basisstationen empfangen. Da zwischen der Mobilstation und den verschiedenen Basisstationen verschiedene Ausbreitungswege liegen, ist die Empfangsqualität an jeder Basisstation unterschiedlich.
Fall a) benötigt zur Realisierung der Makrodiversität keine zusätzlichen Ressourcen, es genügt ein physikalischer Kanal, also zum Beispiel ein Zeitslot in einem TDMA [1] System oder ein Code in einem CDMA [2] System.
Im Fall b) überträgt die Mobilstation ihre Informationen auf zwei oder mehreren physikalischen Kanälen. In einem CDMA System würde sie so mehrere Codes benutzen, in einem TDMA System mehrere Zeitslots, in einem TDMA/FDMA [3] System auch verschiedene Zeitslots auf verschiedenen Frequenzen. Vor allem letzterer Fall hat den Vorteil, daß sich die Dämpfung (*fading*)

[1] Time Division Multiple Access
[2] Code Division Multiple Access
[3] Frequency Division Multiple Access

zum gleichen Zeitpunkt auf verschiedenen Frequenzen stark unterscheidet, und so die Wahrscheinlichkeit vollständigen Signalausfalls stark vermindert werden kann. Im Vergleich zur "natürlichen" Makrodiversität werden jedoch mehr Ressourcen auf der Luftschnittstelle benötigt. Der zur Realisierung von Fall b) nötige Aufwand (komplizierter Ressourcenvergabealgorithmus, mehr als eine Sende-/Empfangseinheit im Mobilgerät, Batterieleistung, etc.) lassen es als sinnvoller erscheinen im Uplink nur die "natürliche" Makrodiversität (Fall a) auszunutzen.

3.2. Downlink

Bisher wird Makrodiversität auf dem Downlink nur in CDMA Systemen (z.B. IS-95) eingesetzt, vor allem um ein *soft handover* zu realisieren. Im Falle, daß die Basisstationen mit dem selben Code senden, müssen sie zeitlich synchronisiert werden. Die Signale müssen an der Mobilstation in einem kurzen Zeitintervall ankommen. Ein RAKE-Empfänger kann sie dann kombinieren.

Prinzipiell ist auch im Downlink das Verwenden mehrere Codes denkbar. Dies führt aber wiederum zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch durch die Makrodiversität.

In FDMA/TDMA Systemen ist es vorstellbar, daß die Basisstationen denselben Zeitschlitz auf derselben Frequenz verwenden, um die Informationen an die Mobilstation zu übertragen. Dazu müssen die Basisstationen zeitlich synchronisiert sein. Da diese Technik im Prinzip einer künstlich erzeugten Mehrwegausbreitung entspricht, muß das Zeitintervall, in dem die Signale an der Mobilsstation ankommen müssen, den Möglichkeiten des Entzerrers entsprechen. Als Beispiel seien die üblicherweise in den mobilen GSM-Empfängern verwendeten Maximum-Likelihood-Entzerrer angeführt. Sie verfügen über 2^4=16 Zustände. Dies entspricht einem Entzerrfenster von (4+1) mal der Bitperiode T_b ($T_{b,GSM}$=3.69 µs) [7]. Ob solch ein kurzes Zeitintervall zur Realisierung von Makrodiversität ausreicht, oder ob es bereits durch die Laufzeitunterschiede auf den verschiedenen Pfaden aufgebraucht wird, hängt von der jeweiligen Systemarchitektur ab. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das in [2] vorgestellte Gleichwellenfunknetz für den UKW-Betriebsfunk. Überlegungen im Bereich der Antennendiversität (Mikrodiversität) finden sich in [17]. Dort werden mehrere Antennen am Sender verwendet, die zeitlich verzögert dasselbe Signal abstrahlen. Im Entzerrer des Empfängers werden die Signale kombiniert. Detaillierte Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Prinzips im Bereich des zellularen Mobilfunks sind jedoch nicht bekannt.

Zur Realisierung der Makrodiversität in FDMA/TDMA Systemen können die Informationen von den Basisstationen jedoch auch in verschiedenen Zeitschlitzen und sogar auf unterschiedlichen Frequenzen übertragen werden. Die Basisstationen müssen dann nicht zeitlich synchronisiert werden, es genügt die Zeitdifferenz zwischen ihnen zu kennen. Das RACE ATDMA Projekt [15] untersucht diese Art von Makrodiversität, um ein *seamless handover* zu ermöglichen. Hierbei werden die Zeitschlitze der verschiedenen Basisstationen so gewählt, daß sie sich zeitlich nicht überlappen.

4. Untersuchungsaspekte

Obwohl wie die obigen Kapitel zeigen, die einhellige Meinung in der Literatur vorherrscht, daß

Makrodiversität sowohl die Dienstequalität, als auch die Kapazität eines Mobilfunksystems stark erhöhen kann, sind ernsthafte Untersuchungen an einem Gesamtsystem bisher nicht durchgeführt worden. Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf den kurzzeitigen Einsatz von Makrodiversität, um ein *soft handover* zu ermöglichen (Qualcomm-CDMA [10] und RACE ATDMA [14], CODIT [12], MONET [6]).
Folgende Fragestellungen zum Einsatz vom Makrodiversität im zukünftigen UMTS sollen deshalb in dieser Studie beantwortet werden:

- Welche Anforderungen werden an das Festnetz gestellt?
- Für welche Dienste ist der Einsatz vom Makrodiversität sinnvoll (Sprach-, Echtzeit- oder auch Nicht-Echtzeit-Dienste)?
- Was ist der wirkliche Kapazitätsgewinn bei sich bewegenden Mobilteilnehmern? Welches der Reichweiten-/Abdeckungsgewinn?
- Ist der ständige Einsatz vom Makrodiversität oder ein nur zeitweiliger Einsatz sinnvoll?
- Wie weit läßt sich die Dienstequalität (*quality of service*) mit dem Einsatz vom Makrodiversität im gesamten Mobilfunknetz steigern?
- Wie sieht ein Kanalvergabe-Algorithmus aus? Wie hoch ist eventuell der zusätzliche Ressourcenverbrauch?
- Wie sieht ein Algorithmus aus, der das von UMTS geforderte *seamless handover* ermöglicht?

5. Bisherige Arbeiten und weitere Vorgehensweise

Die Anforderungen, die der Einsatz von Makrodiversität an das Festnetz stellt, werden am IND bereits im Rahmen einer Industriekooperation untersucht, an der der Autor beteiligt ist. Die Architektur des Zugangsnetzes für ein makrodiversitäts-fähiges UMTS-Netz sieht danach beispielhaft wie folgt aus (Bild 2). Der Architekturvorschlag gilt für ein innerstädtisches Szenario. Er benutzt dabei die von ETSI [13] vorgeschlagenen funktionalen Elemente.

Diese Zugangsnetzarchitektur dient als Grundlage für die weiteren Studien. Das Hauptaugenmerk soll auf der Luftschnittstelle liegen. Dazu soll im nächsten Schritt ein Modell entwickelt werden. Anhand dieses Modells sollen obige Fragestellungen mit Hilfe analytischer und simulativer Methoden untersucht werden.

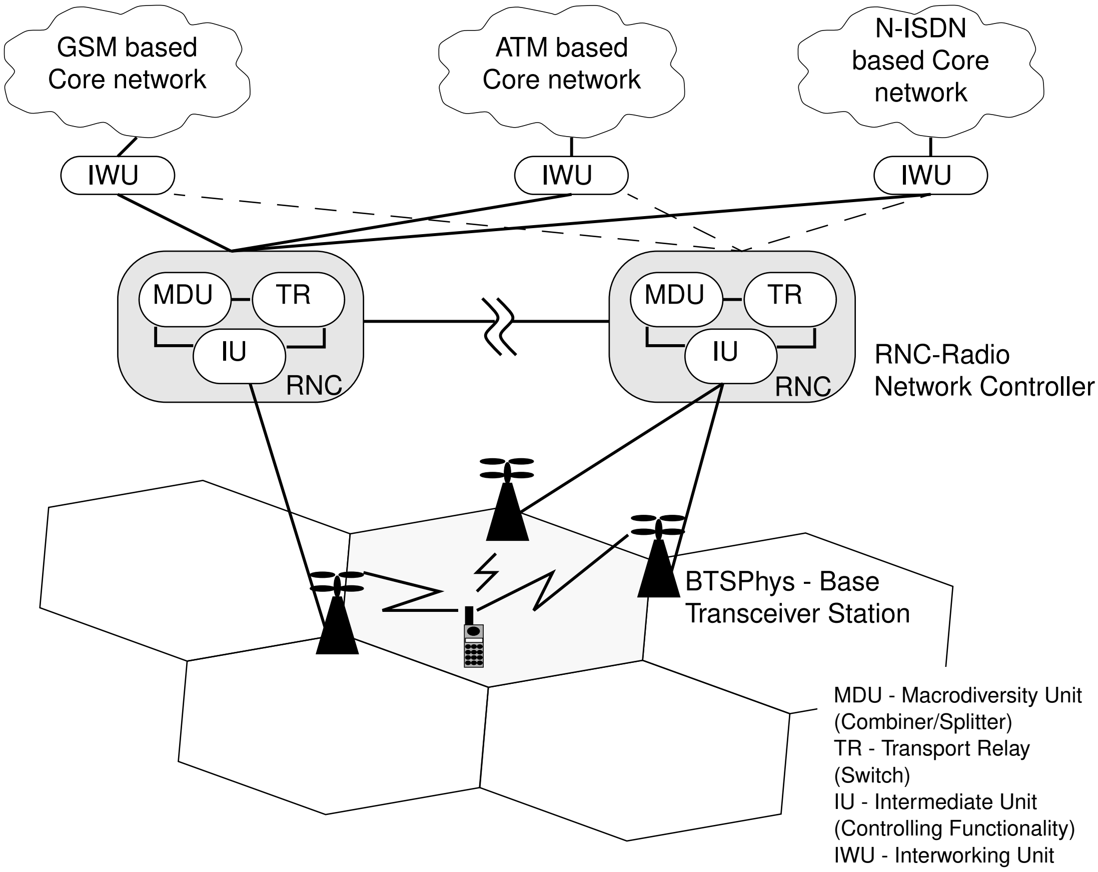

Bild 2: Festnetzarchitektur: Zugangsnetzwerk (innerstädtisches Beispiel)

5.1. Methode: diskrete ereignisgesteuerte Simulation

Zur simulativen Untersuchung wird die Methode der diskreten ereignisgesteuerten Simulation angewandt. Dazu müssen aufbauend auf der IND-Simulationsbibliothek in C++ mobilfunkspezifische Module entwickelt werden. Ein Überblick über die notwendigen Module und ihren Zusammenhang gibt Bild 3.

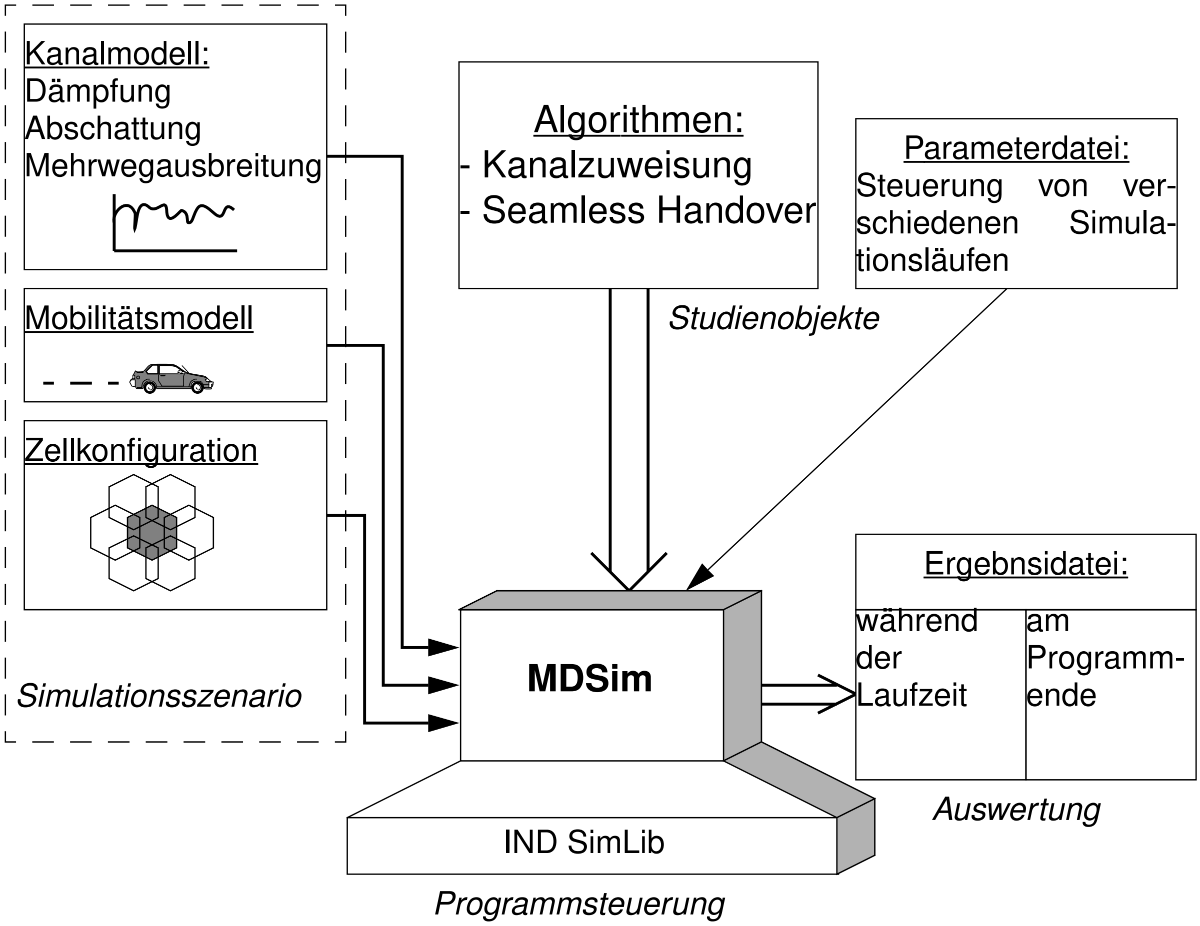

Bild 3: Simulationsumgebung

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ausführlich dargestellt, welche Chancen der Einsatz von Makrodiversität in der Mobilkommunikation bietet. Eine ausführliche Literaturstudie belegt, daß erste Untersuchungen bezüglich Makrodiversität theoretische Gewinne bei Qualität und Kapazität vorhersagen. Detaillierte Studien zum Einsatz in einem Mobilfunksystem der dritten Generation sind jedoch noch nicht gemacht worden.

Es wurde eine Reihe von Punkten dargelegt, deren Analyse eine Aussage erlauben soll, ob der Aufwand und der zu erzielende Gewinn den Einsatz von Makrodiversität rechtfertigt. Erste Überlegungen und Modellbildungen zur Unterstützung von Makrodiversität im UMTS-Zugangsnetz sind bereits unternommen worden. Im weiteren soll nun ein Systemmodell entwickelt werden, daß vor allem Aspekte auf der Luftschnittstelle zusammen mit der Mobilität von Teilnehmern berücksichtigt. Anhand diese Modelles sollen dann qualitative und quantitative Aussagen zum Einsatz von Makrodiversität im Mobilfunk erarbeitet werden. Ein Haupthilfsmittel wird dabei die diskrete ereignisgesteuerte Simulation sein.

Literatur

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

[2] Dallmann, H.; Langermann, H.-J. "Gleichwellenfunknetze", Funkschau, vol. 1997, no. 9, 1997, pp. 60-63

[3] ETSI Technical Report 271, Special Mobile Group (SMG), „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Objectives and overview“, DTR/SMG-050101

[4] Lee, W.C.Y. „Mobile Communications Design Fundamentals“, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., 1993

[5] Marchent, B.G.; McTiffin, M.J. „Handover and Macro Diversity for 3rd Generation Mobile Systems within ATM Fixed Networks“, Proc. of 1996 IEEE Clobal Telecommunications Conference (GLOBECOM ‘96), London

[6] Mitts, Hakan "Implications of Macro Diversity on UMTS / B-ISDN Integration", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '96, London, England, 18.-22.11.1996, IEEE, and 0-7803-3336-5/96,

[7] Papen, Wolfgang "Makrodiversität und Signalkombination in zellularen digitalen Mobilfunksystemen", Aachener Beiträge zur Digitalen Nachrichtentechnik, Aachen, Germany, Januar 1996

[8] Parsons, J.D. “The Mobile Radio Propagation Channel”, Penetch Press, London, ISBN 0-7273-1316-9, 1992

[9] Proakis J.G. “Digital Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-113814-5

[10] Ross, A.H.M.; Gilhousen K.S. „CDMA Technology and the IS-95 North American Standard“, in *The Mobile Communications Handbook*, Gibson, J.D. (editor), IEEE Press, 1996

[11] Sadri, Ali S.; Dholakia, Ajay "Equalization, Coding, and Diversity Combining for TDMA Digital Cellular Systems", Proc. of VTC '95 - the 1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference, Chicago, Illinois, July 25-28, 1995, pp. 404-408

[12] SIG2 of the RACE Mobile Project Line, „UMTS Transport and Control function allocation in a B-ISDN environment“, version 2.0 (final), Editor: Ermano Berruto (CSELT), October, 31 1995.

[13] SMG, „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Network principles“, UMTS 23.05, draft version, February 27, 1997

[14] Tatu, K.; Zhi-Chun, H. "Macrodiversity in ATDMA", Proc. of RACE '95 - the 1995 RACE Mobile Telecommunications Summit, Cascais, Portugal, 22-24 November, 1995, pp. 117-121

[15] Urie, A.; Koljonen, T.; Metzner, N.; Murray, E. „Potential Enhancements to the ATDMA system concept“, RACE R2084/AMCF/PM2/DS/P/060/b1, 10.10.95

[16] 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

[17] Winters, Jack H. "The Diversity Gain of Transmit Diversity in Wireless Systems with Rayleigh Fading", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '96, London, England, IEEE, and 0.7803-1825-0/94, pp. 1121-1125

[18] Zürbes, Stefan; Papen, Wolfgang "Versorgungswahrscheinlichkeit und Signalkombination in zellularen Mobilfunksystemen mit Makrodiversität", Proc. of Mobile Kommunikation (ITG-Fachtagung) '95, Neu Ulm, Germany, 26-28.9.1995, VDE-Verlag, pp. 289-300

[19] 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

Einsatz von Makrodiversität in der Breitband-Mobilkommunikation

Ulrich Weiss

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung (IND)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart

Zusammenfassung: Zukünftige zellulare Mobilfunksysteme sollen mehrere Forderungen gleichzeitig erfüllen. Sie sollen zahlreiche Dienste bei hoher Qualität und uneingeschränkter Verfügbarkeit für eine große Anzahl von Benutzern anbieten. Im Hinblick darauf ist Makrodiversität eine vielversprechende Technik, die die notwendigen Qualitäts- und Kapazitätsgewinne in einem Mobilfunksystem realisieren kann. Diese Studie untersucht den Einsatz von Makrodiversität für zukünftige Mobilfunksysteme.

1. Einleitung

Seit Beginn der neunziger Jahre erlebt die Mobilkommunikation durch Einführung der digitalen Systeme (der sogenannten „zweiten Generation") weltweit ein ungeheures Wachstum. Vor allem das europäische GSM (*Global System of Mobile Communications*) hat stark zu diesem Erfolg beigetragen. Es bietet in erster Linie Telefondienste an. Die Sprachqualität ist geringfügig schlechter als die des Festnetzes. Desweiteren bietet GSM Fax- und Datendienste bis 9,6 oder 12 kbit/s an.
Die dritte Generation der Mobilkommunikations-Systeme soll nun die Sprachqualität verbessern sowie neue Dienste einführen. Gedacht wird dabei unter anderem an hochratigen Datentransfer, Bildtelefonie, Videoübertragung und *World Wide Web*-Anwendungen. Dazu sind höhere Datenraten nötig als sie die Systeme der zweiten Generation zur Verfügung stellen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch gerne von **breitbandiger Mobilkommunikation**. Im europäischen UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [3] und in dessen internationalem Pendant IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications system*, früher FPLMTS) wird dabei an Nutzer-Datenraten von maximal 2 Mbit/s gedacht. Dabei sollen Geschwindigkeiten des Mobilteilnehmers während der Kommunikation bis zur Reisegeschwindigkeit im Auto oder Zug unterstützt werden.
Andere drahtlose Systeme (z.B. wireless ATM) planen auch höhere Datenraten von 50 oder

eventuell 155 Mbit/s. Dies wird aber mit starker Einschränkung der Mobilität (bis zum Stillstand) während der Verbindung einhergehen.
Einen Überblick über heutige und zukünftige Systeme gibt Bild 1.

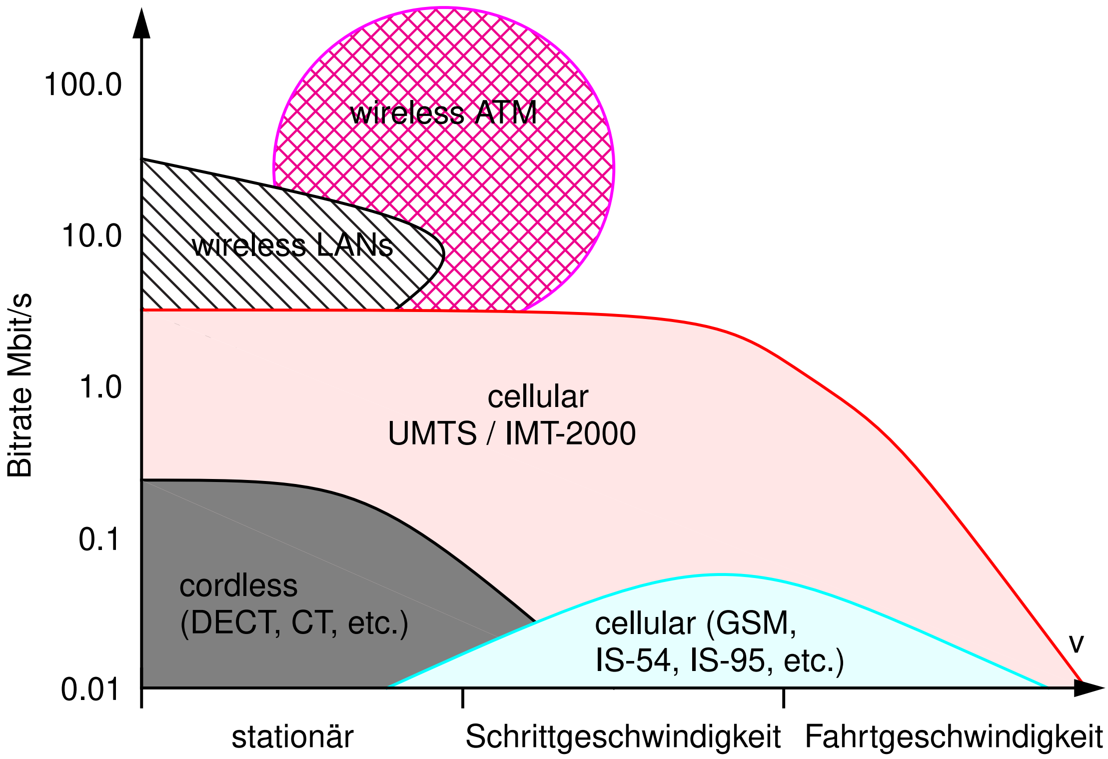

Bild 1: Überblick Mobilfunksysteme/drahtlose Systeme

Zukünftige zellulare Mobilfunksysteme sollen also mehrere Einschränkungen der heutigen Systeme gleichzeitig lösen. Sie sollen eine Vielzahl von schmal- und breitbandigen Diensten bei hoher Qualität für eine sehr hohe Benutzerzahl anbieten können.
Schwierigkeiten beim Entwurf solcher System entstehen vor allem im Bereich der Luftschnittstelle: Zum einen ist die zur Verfügung stehende Bandbreite begrenzt und zum anderen sind Funkübertragungen durch eine sehr hohe Fehlerrate gekennzeichnet. Die Qualität der Übertragungen über den radiomobilen Kanal wird durch Ausbreitungsdämpfung (*path loss*), Abschattung (*shadowing*) und Mehrwegausbreitung (*multipath propagation*) beeinträchtigt [8]. Letztere Faktoren führen bei einem sich bewegenden Terminal zu sich zeitlich langsam bzw. schnell ändernder Signaldämpfung (*slow/fast fading*).
Um die Wahrscheinlichkeit von Signaleinbrüchen (*signal outage*) aufgrund des Fadings zu verringern, kann auf der Luftschnittstelle **Makrodiversität** eingesetzt werden. Makrodiversität bietet desweitern die Möglichkeit, die Abdeckung einer Zelle zu verbessern [18] und ein *seamless handover* zu ermöglichen. Dies bedeutet, daß ein Mobilfunkteilnehmer den Übergang von einer Zelle in eine andere, bei dem unweigerlich ein Wechsel auf einen anderen Kanal stattfinden muß, nicht bemerkt (kein Klicken oder gar Wegfall der Verbindung). Dies ist eine wichtige Anforderung an die zellularen Mobilfunksysteme der dritten Generation.

2. Makrodiversität

Beim Einsatz von Makrodiversität (*macroscopic diversity*) auf der Luftschnittstelle werden die zwischen Quelle und Senke auszutauschenden Informationen über mehrere Pfade (n>=2) übertragen.
Im Falle des *Uplinks* (Mobilstation zum Festnetz) wird das von der Mobilstation gesendete Signal von mehreren Basisstationen aufgefangen. Diese fügen zu den empfangenen Dateneinheiten Qualitätsinformationen hinzu und leiten sie dann weiter an die Kombinationseinheit im Festnetz. Dort werden die Daten zu einer resultierenden Einheit kombiniert und dann an die Senke weitergeleitet.
Im *Downlink* (Festnetz zu Mobilstation) werden die Informationen am Verteilpunkt im Festnetz vervielfacht und an mehrere Basisstationen weitergeleitet. Diese senden dann das Funksignal in einem engen Zeitrahmen an die Mobilstation. Die Mobilstation kann dann die eingehenden Signale geeignet kombinieren.

2.1. Kombinationstechniken

Mehrere Kombinationstechniken sind aus der Literatur bekannt, z.B. [4],[9]. Kombiniert werden können Signale, Bits oder Informationsblöcke (Pakete). Alle zusammen werden im folgenden als zu kombinierende *Einheiten* bezeichnet. Zur Qualitätsbeurteilung einer Einheit können das Signal-Rausch-Verhältnis (*signal-to-noise ratio SNR*) oder die Bitfehlerrate (*bit error rate BER*) oder Kombinationen von beiden herangezogen werden.
Wir unterscheiden die Kombinationstechniken bezüglich zweier Eigenschaften: bezüglich des Kombinationsverfahrens und bezüglich des Zeitpunktes der Kombination.

2.1.1. Kombinationsverfahren

- Auslese (*selective combinig*):
  die erste erhaltene Einheit, bei der die Qualität einen gegebenen Grenzwert übertrifft, wird weitergeleitet, die von anderen Pfaden danach ankommenden Einheiten werden ignoriert. Der Vorteil ist, daß hier keine unnötigen Verzögerungen entstehen.
- Auswählen (*selection combining*):
  jede Einheit hat eine ihr zugeordnete Qualitätsinformation, die ein Maß für die Korrektheit der übertragenen Information darstellt. Die Einheit mit der besten Qualität wird ausgewählt. Man erhält immer eine Grundverzögerung durch das Warten auf nacheinander eintreffende Einheiten.
- Konstruktives Kombinieren (*constructive combining*):
  Alle empfangenen Einheiten werden berücksichtigt. An Hand ihrer Qualitätsinformationen wird mit einem geeigneten Algorithmus eine möglichst korrekte Einheit berechnet, die dann weitergeleitet wird. Als Algorithmen sind zum Beispiel geeignet:
  - *maximal ratio combining*:
    Gewichtung mit dem Signal-Rausch-Verhältnis, dann Addition
  - *equal gain combining*:

Gewichtung mit eins (Gleich-Gewichtung), dann Addition

2.1.2. Kombinationszeitpunkt

- vor der Detektion (*pre-detection combining*)
- nach der Detektion (*post-detection combining*)

Diese Unterscheidung kommt noch aus der Analogtechnik, in der die Signaldetektion mit der Demodulation gleichzusetzen war. In der Digitaltechnik gibt es mehrere Stellen im Empfänger an denen kombiniert werden kann. [7] unterscheidet drei Möglichkeiten der Kombination: im Entzerrer (Basisbandsignale), im Kanaldecodierer (Brutto-Bitstrom) und im Sprachdecodierer (Netto-Bitsrom).
Werden bei der Bitdetektion weiche Entscheidungen (*soft decision*s) getroffen, können zur Kombination die Likelihood-Werte mitherangezogen und so ein größerer Kombinationsgewinn erreicht werden [5]. Allerdings muß ein großer Anteil von Zusatzinformationen über jedes Bit an die Kombinationseinheit weitergeleitet werden (z.B. vier zusätzliche Bits pro entschiedenes Bit). Da diese sich (im Uplink) im Festnetz befindet, wird so eine sehr große Bandbreite im Festnetz beansprucht. Das Kombinieren auf Bitebene unter Zuhilfenahme der Likelihood-Werte wird häufig auch als *soft combining* bezeichnet.
Nach der Detektion kann sinnvollerweise auf Blockebene kombiniert werden. Ein Block kann zum Beispiel ein Burst oder ein Luftschnittstellen-Datenrahmen (Datenpaket) sein. Bei diesem Verfahren muß nur eine Qualitätsinformation pro Block (und nicht pro Bit) mitgeliefert werden. Die Kombiniereinheit kann irgendwo im Festnetz sitzen. Die durch die Qualitätsinformation zusätzlich beanspruchte Übertragungsbandbreite ist gering. Im Unterschied zu oben wird dies auch als *hard combining* bezeichnet.

Prinzipiell hängt es von der Wahl des Kombinationszeitpunktes und des -verfahrens ab, wie groß der mit Makrodiversität zu realisierende Gewinn sein kann. Es gilt allgemein, daß der Gewinn umso höher ist je genauer die Informationen sind, die zur Kombination zur Verfügung stehen. Ein maximal ratio-combining Algorithmus vor der Signaldetektion ist also einem selection combinig auf Blockebene sicherlich überlegen. Allerdings erfordert ersteres Verfahren erheblichen Aufwand in der Signalverarbeitung [9] und die oben schon angesprochene hohe zusätzliche Übertragungsbandbreite im Festnetz.
In einem realen System muß man einen guten Kompromiß zwischen dem möglichen Gewinn und dem zu investierenden Aufwand (und damit auch den Kosten) finden. Dabei müssen im Up- und Downlink nicht diesselben Verfahren Verwendung finden.

2.2. Mikrodiversität

Ergänzend zur Makrodiversität gibt es weitere Formen von Diversität, die unter dem Namen Mikrodiversität (*microscopic diversity*) zusammengefaßt werden können [4]. Hierbei werden mehrere Antennen an derselben Basissation eingesetzt, die räumlich um nur wenige Wellenlängen getrennt stehen. Diese Technik wird benutzt, um Schwund, der durch die Mehrwegausbreitung verursacht wird (*fast or multipath fading*), zu bekämpfen [11].

Mikro- und Makrodiversität können auch gleichzeitig in einem Mobilfunksystem eingesetzt werden. Prinzipiell können beide Techniken jedoch getrennt untersucht werden. Hier beschäftigen wir uns im folgenden nur mit der Makrodiversität.

3. Systemvoraussetzungen

Um Makrodiversität zu ermöglichen muß die zellulare Architektur so gewählt werden, daß sich die Abdeckungsgebiete der Basisstationen überlappen. Je nach Überlappungsgrad der Zellen kann Makrodiversität nur in einem Teil des Mobilfunksystem oder im gesamten System angeboten werden. Eine mögliche Architektur für ein pico-zellulares System (zur Abdeckung in Gebäuden oder auf einem Campus) mit parametrisierbarem Überlappungsgrad findet sich in [16]. In [19] wird ein System bis zu 4 km Zellradius vorgestellt. Dieses kann im innerstädtischen Bereich eingesetzt werden, wobei die Gleichwellenversorgung an jedem Ort im Servicegebiet mit bis zu drei Basisstationen möglich ist. Verschiedene quadratische, dreieckige und sechseckige makrodiversitäts-fähige Zellstrukturen finden sich in [1].

Prinzipiell können wir zwei Realisierungen der Makrodiversität auf der Luftschnittstelle unterscheiden:

a) Mehrfache Übertragung der Information auf dem gleichen physikalischen Kanal
b) Mehrfache Übertragung der Information auf verschiedenen physikalischen Kanälen

In beiden Fällen muß die Information am Empfänger in einem sehr kurzen Zeitabstand ankommen. Uplink und Downlink müssen nicht notwendigerweise dieselbe Technik verwenden. Wir werden im folgenden auf die Unterschiede im Up- und Downlink eingehen.

3.1. Uplink

Durch ein zellulare Architektur mit überlappenden Abdeckungsgebieten der einzelnen Basisstationen erhält man die Möglichkeit zu einer “natürlichen” Makrodiversität im Uplink. Die sendende Mobilstation wird von mehreren Basisstationen empfangen. Da zwischen der Mobilstation und den verschiedenen Basisstationen verschiedene Ausbreitungswege liegen, ist die Empfangsqualität an jeder Basisstation unterschiedlich.
Fall a) benötigt zur Realisierung der Makrodiversität keine zusätzlichen Ressourcen, es genügt ein physikalischer Kanal, also zum Beispiel ein Zeitslot in einem TDMA [1] System oder ein Code in einem CDMA [2] System.
Im Fall b) überträgt die Mobilstation ihre Informationen auf zwei oder mehreren physikalischen Kanälen. In einem CDMA System würde sie so mehrere Codes benutzen, in einem TDMA System mehrere Zeitslots, in einem TDMA/FDMA [3] System auch verschiedene Zeitslots auf verschiedenen Frequenzen. Vor allem letzterer Fall hat den Vorteil, daß sich die Dämpfung (*fading*)

[1] Time Division Multiple Access
[2] Code Division Multiple Access
[3] Frequency Division Multiple Access

zum gleichen Zeitpunkt auf verschiedenen Frequenzen stark unterscheidet, und so die Wahrscheinlichkeit vollständigen Signalausfalls stark vermindert werden kann. Im Vergleich zur “natürlichen” Makrodiversität werden jedoch mehr Ressourcen auf der Luftschnittstelle benötigt. Der zur Realisierung von Fall b) nötige Aufwand (komplizierter Ressourcenvergabealgorithmus, mehr als eine Sende-/Empfangseinheit im Mobilgerät, Batterieleistung, etc.) lassen es als sinnvoller erscheinen im Uplink nur die “natürliche” Makrodiversität (Fall a) auszunutzen.

3.2. Downlink

Bisher wird Makrodiversität auf dem Downlink nur in CDMA Systemen (z.B. IS-95) eingesetzt, vor allem um ein *soft handover* zu realisieren. Im Falle, daß die Basisstationen mit dem selben Code senden, müssen sie zeitlich synchronisiert werden. Die Signale müssen an der Mobilstation in einem kurzen Zeitintervall ankommen. Ein RAKE-Empfänger kann sie dann kombinieren.

Prinzipiell ist auch im Downlink das Verwenden mehrere Codes denkbar. Dies führt aber wiederum zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch durch die Makrodiversität.

In FDMA/TDMA Systemen ist es vorstellbar, daß die Basisstationen denselben Zeitschlitz auf derselben Frequenz verwenden, um die Informationen an die Mobilstation zu übertragen. Dazu müssen die Basisstationen zeitlich synchronisiert sein. Da diese Technik im Prinzip einer künstlich erzeugten Mehrwegausbreitung entspricht, muß das Zeitintervall, in dem die Signale an der Mobilsstation ankommen müssen, den Möglichkeiten des Entzerrers entsprechen. Als Beispiel seien die üblicherweise in den mobilen GSM-Empfängern verwendeten Maximum-Likelihood-Entzerrer angeführt. Sie verfügen über 2^4=16 Zustände. Dies entspricht einem Entzerrfenster von (4+1) mal der Bitperiode T_b ($T_{b,GSM}$=3.69 µs) [7]. Ob solch ein kurzes Zeitintervall zur Realisierung von Makrodiversität ausreicht, oder ob es bereits durch die Laufzeitunterschiede auf den verschiedenen Pfaden aufgebraucht wird, hängt von der jeweiligen Systemarchitektur ab. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das in [2] vorgestellte Gleichwellenfunknetz für den UKW-Betriebsfunk. Überlegungen im Bereich der Antennendiversität (Mikrodiversität) finden sich in [17]. Dort werden mehrere Antennen am Sender verwendet, die zeitlich verzögert dasselbe Signal abstrahlen. Im Entzerrer des Empfängers werden die Signale kombiniert. Detaillierte Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Prinzips im Bereich des zellularen Mobilfunks sind jedoch nicht bekannt.

Zur Realisierung der Makrodiversität in FDMA/TDMA Systemen können die Informationen von den Basisstationen jedoch auch in verschiedenen Zeitschlitzen und sogar auf unterschiedlichen Frequenzen übertragen werden. Die Basisstationen müssen dann nicht zeitlich synchronisiert werden, es genügt die Zeitdifferenz zwischen ihnen zu kennen. Das RACE ATDMA Projekt [15] untersucht diese Art von Makrodiversität, um ein *seamless handover* zu ermöglichen. Hierbei werden die Zeitschlitze der verschiedenen Basisstationen so gewählt, daß sie sich zeitlich nicht überlappen.

4. Untersuchungsaspekte

Obwohl wie die obigen Kapitel zeigen, die einhellige Meinung in der Literatur vorherrscht, daß

Makrodiversität sowohl die Dienstequalität, als auch die Kapazität eines Mobilfunksystems stark erhöhen kann, sind ernsthafte Untersuchungen an einem Gesamtsystem bisher nicht durchgeführt worden. Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf den kurzzeitigen Einsatz von Makrodiversität, um ein *soft handover* zu ermöglichen (Qualcomm-CDMA [10] und RACE ATDMA [14], CODIT [12], MONET [6]).
Folgende Fragestellungen zum Einsatz vom Makrodiversität im zukünftigen UMTS sollen deshalb in dieser Studie beantwortet werden:

- Welche Anforderungen werden an das Festnetz gestellt?
- Für welche Dienste ist der Einsatz vom Makrodiversität sinnvoll (Sprach-, Echtzeit- oder auch Nicht-Echtzeit-Dienste)?
- Was ist der wirkliche Kapazitätsgewinn bei sich bewegenden Mobilteilnehmern? Welches der Reichweiten-/Abdeckungsgewinn?
- Ist der ständige Einsatz vom Makrodiversität oder ein nur zeitweiliger Einsatz sinnvoll?
- Wie weit läßt sich die Dienstequalität (*quality of service*) mit dem Einsatz vom Makrodiversität im gesamten Mobilfunknetz steigern?
- Wie sieht ein Kanalvergabe-Algorithmus aus? Wie hoch ist eventuell der zusätzliche Ressourcenverbrauch?
- Wie sieht ein Algorithmus aus, der das von UMTS geforderte *seamless handover* ermöglicht?

5. Bisherige Arbeiten und weitere Vorgehensweise

Die Anforderungen, die der Einsatz von Makrodiversität an das Festnetz stellt, werden am IND bereits im Rahmen einer Industriekooperation untersucht, an der der Autor beteiligt ist. Die Architektur des Zugangsnetzes für ein makrodiversitäts-fähiges UMTS-Netz sieht danach beispielhaft wie folgt aus (Bild 2). Der Architekturvorschlag gilt für ein innerstädtisches Szenario. Er benutzt dabei die von ETSI [13] vorgeschlagenen funktionalen Elemente.

Diese Zugangsnetzarchitektur dient als Grundlage für die weiteren Studien. Das Hauptaugenmerk soll auf der Luftschnittstelle liegen. Dazu soll im nächsten Schritt ein Modell entwickelt werden. Anhand dieses Modells sollen obige Fragestellungen mit Hilfe analytischer und simulativer Methoden untersucht werden.

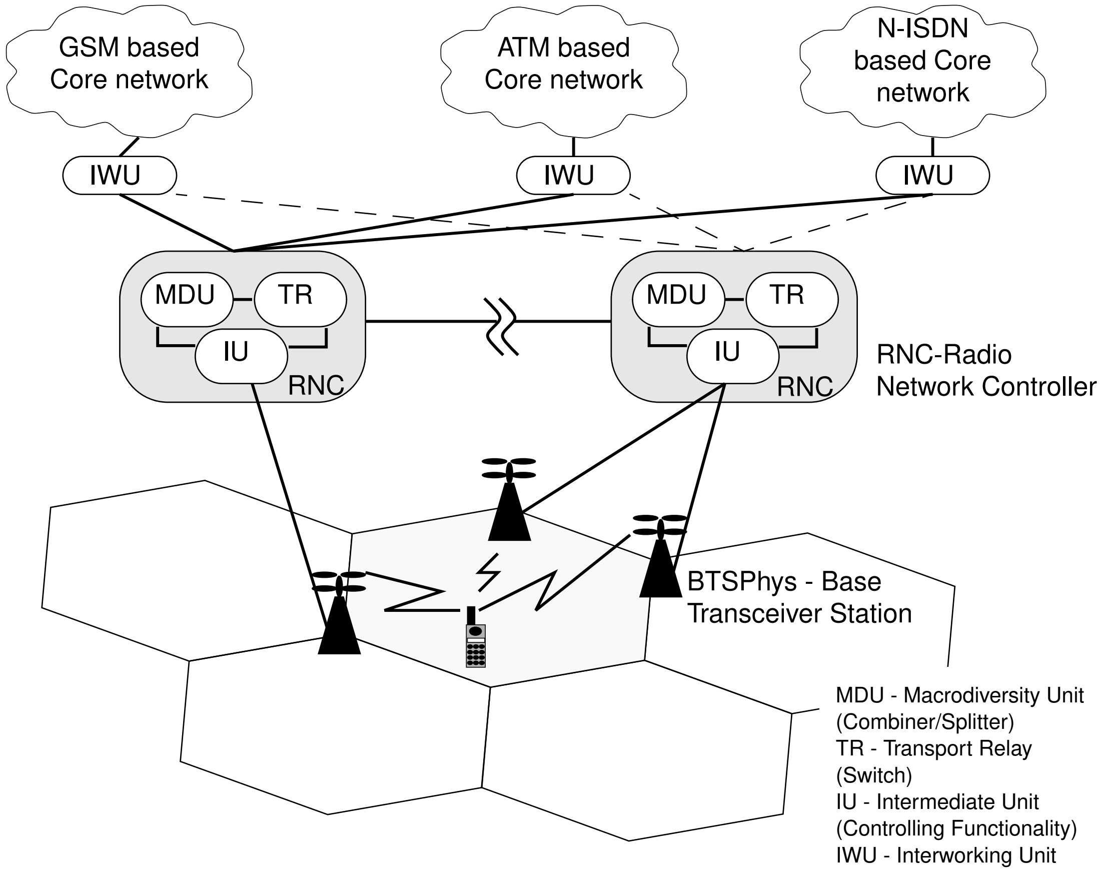

Bild 2: Festnetzarchitektur: Zugangsnetzwerk (innerstädtisches Beispiel)

5.1. Methode: diskrete ereignisgesteuerte Simulation

Zur simulativen Untersuchung wird die Methode der diskreten ereignisgesteuerten Simulation angewandt. Dazu müssen aufbauend auf der IND-Simulationsbibliothek in C++ mobilfunkspezifische Module entwickelt werden. Ein Überblick über die notwendigen Module und ihren Zusammenhang gibt Bild 3.

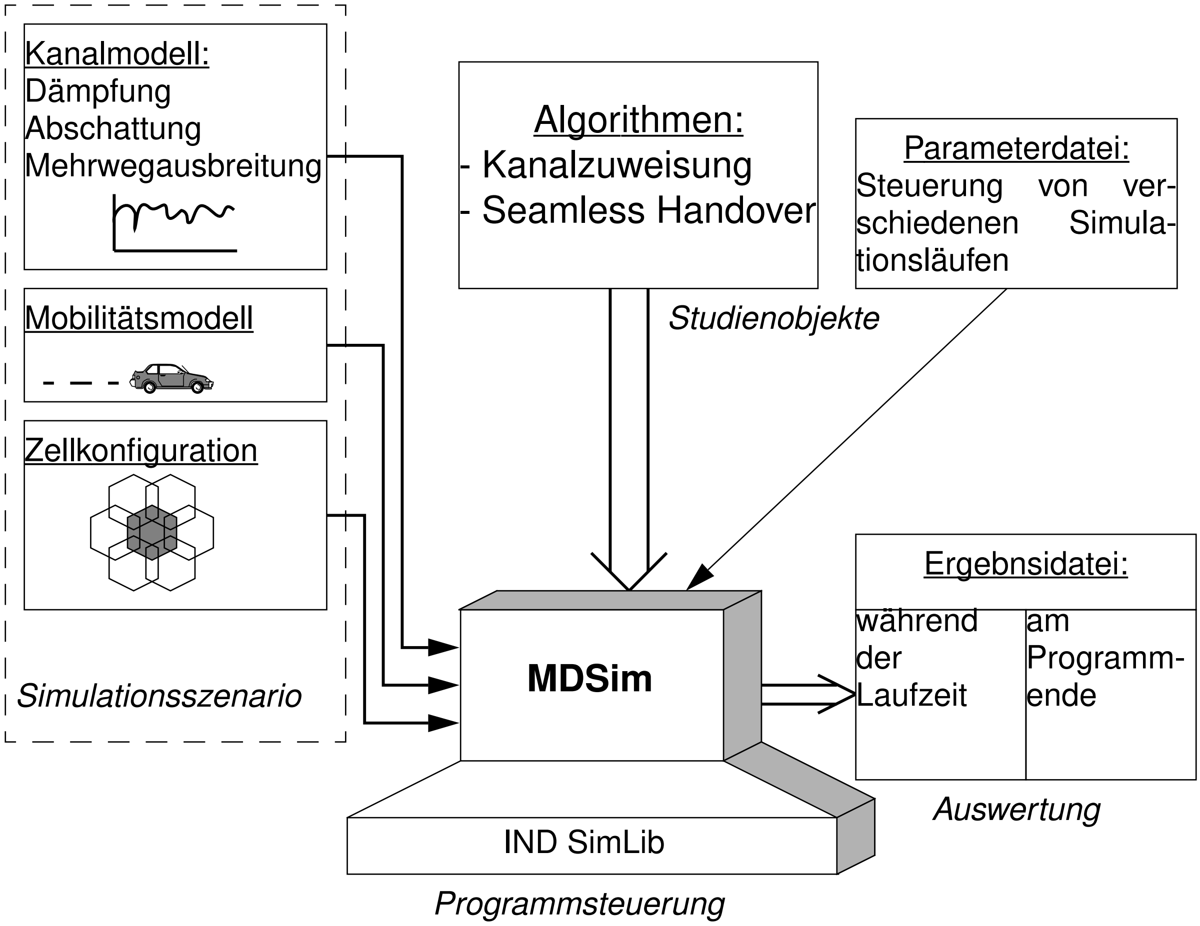

Bild 3: Simulationsumgebung

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ausführlich dargestellt, welche Chancen der Einsatz von Makrodiversität in der Mobilkommunikation bietet. Eine ausführliche Literaturstudie belegt, daß erste Untersuchungen bezüglich Makrodiversität theoretische Gewinne bei Qualität und Kapazität vorhersagen. Detaillierte Studien zum Einsatz in einem Mobilfunksystem der dritten Generation sind jedoch noch nicht gemacht worden.

Es wurde eine Reihe von Punkten dargelegt, deren Analyse eine Aussage erlauben soll, ob der Aufwand und der zu erzielende Gewinn den Einsatz von Makrodiversität rechtfertigt. Erste Überlegungen und Modellbildungen zur Unterstützung von Makrodiversität im UMTS-Zugangsnetz sind bereits unternommen worden. Im weiteren soll nun ein Systemmodell entwickelt werden, daß vor allem Aspekte auf der Luftschnittstelle zusammen mit der Mobilität von Teilnehmern berücksichtigt. Anhand diese Modelles sollen dann qualitative und quantitative Aussagen zum Einsatz von Makrodiversität im Mobilfunk erarbeitet werden. Ein Haupthilfsmittel wird dabei die diskrete ereignisgesteuerte Simulation sein.

Literatur

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

[2] Dallmann, H.; Langermann, H.-J. "Gleichwellenfunknetze", Funkschau, vol. 1997, no. 9, 1997, pp. 60-63

[3] ETSI Technical Report 271, Special Mobile Group (SMG), „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Objectives and overview“, DTR/SMG-050101

[4] Lee, W.C.Y. „Mobile Communications Design Fundamentals“, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., 1993

[5] Marchent, B.G.; McTiffin, M.J. „Handover and Macro Diversity for 3rd Generation Mobile Systems within ATM Fixed Networks“, Proc. of 1996 IEEE Clobal Telecommunications Conference (GLOBECOM ‘96), London

[6] Mitts, Hakan "Implications of Macro Diversity on UMTS / B-ISDN Integration", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '96, London, England, 18.-22.11.1996, IEEE, and 0-7803-3336-5/96,

[7] Papen, Wolfgang "Makrodiversität und Signalkombination in zellularen digitalen Mobilfunksystemen", Aachener Beiträge zur Digitalen Nachrichtentechnik, Aachen, Germany, Januar 1996

[8] Parsons, J.D. “The Mobile Radio Propagation Channel”, Penetch Press, London, ISBN 0-7273-1316-9, 1992

[9] Proakis J.G. “Digital Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-113814-5

[10] Ross, A.H.M.; Gilhousen K.S. „CDMA Technology and the IS-95 North American Standard“, in *The Mobile Communications Handbook*, Gibson, J.D. (editor), IEEE Press, 1996

[11] Sadri, Ali S.; Dholakia, Ajay "Equalization, Coding, and Diversity Combining for TDMA Digital Cellular Systems", Proc. of VTC '95 - the 1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference, Chicago, Illinois, July 25-28, 1995, pp. 404-408

[12] SIG2 of the RACE Mobile Project Line, „UMTS Transport and Control function allocation in a B-ISDN environment“, version 2.0 (final), Editor: Ermano Berruto (CSELT), October, 31 1995.

[13] SMG, „Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Network principles“, UMTS 23.05, draft version, February 27, 1997

[14] Tatu, K.; Zhi-Chun, H. "Macrodiversity in ATDMA", Proc. of RACE '95 - the 1995 RACE Mobile Telecommunications Summit, Cascais, Portugal, 22-24 November, 1995, pp. 117-121

[15] Urie, A.; Koljonen, T.; Metzner, N.; Murray, E. „Potential Enhancements to the ATDMA system concept“, RACE R2084/AMCF/PM2/DS/P/060/b1, 10.10.95

[16] 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

[17] Winters, Jack H. "The Diversity Gain of Transmit Diversity in Wireless Systems with Rayleigh Fading", Proc. of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '96, London, England, IEEE, and 0.7803-1825-0/94, pp. 1121-1125

[18] Zürbes, Stefan; Papen, Wolfgang "Versorgungswahrscheinlichkeit und Signalkombination in zellularen Mobilfunksystemen mit Makrodiversität", Proc. of Mobile Kommunikation (ITG-Fachtagung) '95, Neu Ulm, Germany, 26-28.9.1995, VDE-Verlag, pp. 289-300

[19] 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