



Niclas Meier (Autor)

**Zur Ressourcenvergabe in einem
selbstorganisierenden zellularen OFDM
Mobilfunksystem**

Niclas Meier

**Zur Ressourcenvergabe
in einem selbstorganisierenden
zellularen OFDM Mobilfunksystem**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1045>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Flexibilität und hohe Datenraten werden in zukünftigen zellularen Mobilfunksystemen eine entscheidende Rolle spielen. Es ist zu erwarten, dass sich die Palette der angebotenen Mobilfunkdienste kontinuierlich weiterentwickelt und eines Tages mit dem Dienstangebot leitungsgebundener Internetzugänge gleichziehen wird. Dass bereits heute ein hoher Bedarf an mobiler Kommunikation besteht, beweisen die aktuellen Teilnehmerstatistiken der kommerziellen Mobilfunkbetreiber eindrucksvoll.

Während derzeit noch in Mobilfunknetzen der zweiten Generation (2G) überwiegend Sprachdienste genutzt werden, wird die nächste entscheidende Herausforderung für die Mobilkommunikationsbranche darin bestehen, den Benutzern über die Mobilfunkschnittstelle eine ähnlich hohe Flexibilität und Leistungsfähigkeit anbieten zu können wie über leitungsgebundene Internetzugänge. Mit den UMTS-Netzen der dritten Mobilfunkgeneration (3G) werden derzeit die ersten Schritte in diese Richtung unternommen. Es ist jedoch unumstritten, dass auch diese Netze aufgrund der beschränkten Kapazität zur Befriedigung der wachsenden Benutzeranforderungen in ein paar Jahren nicht mehr ausreichen werden. Auf technischer Seite muss daher bereits heute nach Lösungen für Systeme der vierten Generation (4G) geforscht werden. Die effiziente Nutzung der zu einem äußerst knappen wirtschaftlichen Gut gewordenen Ressource Funkbandbreite wird dabei einen hohen Stellenwert einnehmen, es sei an die Milliardensummen bei der Versteigerung der UMTS-Lizenzen im europäischen Wirtschaftsraum erinnert.

Der erste wesentliche Gesichtspunkt für eine effiziente Nutzung des limitierten Funkpektrums ist die verwendete Übertragungstechnik. Die *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) Übertragungstechnik [RMBG99] hat sich als einer der am höchsten gehandelten Kandidaten für kommende 4G-Systeme herauskristallisiert. Diese besondere Form der Mehrträgerübertragungstechnik erreicht ihre hohe Effizienz durch eine geeignete Überlagerung der einzelnen Trägerspektren im Frequenzbereich, wodurch die genutzte Bandbreite in orthogonale, schmalbandige Subträger aufgeteilt wird. Eben in dieser Unterteilung liegt eine Stärke von OFDM im Hinblick auf die Bekämpfung der Widrigkeiten des realen Mobilfunkkanals mit Mehrwegeausbreitung. Die Kanalverzerrung kann für jeden Subträger individuell mit einer einfachen komplexen Multiplikation durchgeführt werden. Zudem können die Einflüsse von Inter-Symbol-Interferenzen (ISI) durch Hinzufügen eines im Verhältnis zur Gesamtsymbollänge kurzen Schutzintervalls (*engl.* guard interval) vor jedem OFDM Sendesymbol vollständig unterdrückt werden. Die Vorteile

der OFDM Übertragungstechnik sind also neben ihrer hohen spektralen Effizienz ihre Robustheit gegenüber Mehrwegeausbreitung sowie eine hinsichtlich der Kanalverzerrung aufwandsgünstige Implementierbarkeit. Aufgrund der genannten Vorzüge basiert der in dieser Arbeit entwickelte Systemvorschlag auf der OFDM Übertragungstechnik.

Der zweite, nicht minder wichtige Gesichtspunkt für das Erreichen einer hohen spektralen Effizienz in einem zellularen Mobilfunksystem ist die Organisation der Funkressourcenvergabe an die Mobilstationen (MS). In einem zellularen Mobilfunksystem wird die Gesamtheit der zur Verrichtung dieser vielschichtigen Aufgabe konzipierten Teilsysteme und Protokolle als Funkressourcenmanagement (*engl.* radio resource management, RRM) bezeichnet. Zur Erzielung einer hohen spektralen Effizienz ist es unabdingbar, die knappen Funkressourcen im Versorgungsgebiet des zellularen Netzes durch eine möglichst dichte räumliche Wiederverwendung von mehreren Sender-Empfänger-Paaren simultan nutzen zu lassen. Die mit wachsender Wiederverwendungsrate ansteigenden Gleichkanalinterferenzen (GKI) beeinträchtigen jedoch die Übertragungsgüte der beteiligten Funkverbindungen. Die wesentliche Aufgabe des RRM besteht folglich darin, einen im Sinne des Netzbetreibers möglichst guten Kompromiss zwischen Übertragungsgüte und hoher räumlicher Wiederverwendung der wertvollen Funkressourcen zu treffen.

In dieser Arbeit wird im Rahmen eines Systemvorschlages für ein Mobilfunksystem der vierten Generation (4G) ein auf dem Prinzip der Selbstorganisation beruhender RRM-Ansatz (SO-RRM) gewählt und ausgearbeitet. Ein solcher Ansatz bietet die maximale Flexibilität, weil vollständig auf eine statische Frequenzplanung sowie auf eine Koordination zwischen den einzelnen Basisstationen (BS) während des Netzbetriebs verzichtet werden kann. In einem solchen System entscheiden die BS autonom über die Belegung der Funkressourcen. Einzige Entscheidungsgrundlagen sind ihre eigenen Messungen, ggf. von den MS übermittelte Messwerte sowie die von den Benutzern geforderten Dienstgüteparameter. Sämtliche Funkressourcen können im Rahmen einer Selbstorganisation prinzipiell in allen Zellen genutzt werden. Sie werden immer dann und dort belegt, wo sie zum gegenwärtigen Zeitpunkt tatsächlich benötigt werden. Ein System mit SO-RRM kann daher auf effiziente Weise asymmetrische Verkehrsszenarien bedienen, die z.B. durch lokale Benutzerballungen (*engl.* hot spots) oder vereinzelte hochratige Dateidownloads entstehen. Eine solche Flexibilität wird in zukünftigen Anwendungsszenarien dringend benötigt werden.

Wichtige technische Voraussetzungen für das SO-RRM sind die Anwendung der OFDM-Übertragungstechnik und eine zellübergreifende Synchronisation aller BS und MS in Zeit und Trägerfrequenz. Fragen der Synchronisation sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, vielmehr wird stets eine perfekte Synchronität angenommen. Ein Ansatz zur Lösung der Synchronisationsaufgabe wird in [GMRW03] und [RG04] vorgestellt.

Für das SO-RRM-System werden Algorithmen für die Ressourcenauswahl vorgeschlagen, die auf Messungen der Nutzsignal- und Gleichkanalinterferenzleistungen basieren.

Anschließend wird das Systemverhalten auf zellularer Ebene mit Hilfe von System-Level-Simulationen untersucht. Das SO-RRM wird sowohl bei gleichverteiltem Benutzeraufkommen als auch in einem Hot-Spot-Szenario gegen herkömmliche Systeme mit statischer Ressourcenvergabe verglichen. In den Untersuchungen wird gezeigt, dass mit SO-RRM-Systemen eine effiziente selbstorganisierende Ressourcenvergabe möglich ist. Vor allem in asymmetrischen Verkehrsszenarien können durch die Flexibilität und die Adaptivität an das Benutzeraufkommen hohe Gewinne mit SO-RRM erzielt werden.

Im zweiten Schritt erfolgt eine genauere Betrachtung der Übertragungsstrecke von der BS zur MS (*engl.* downlink, DL) unter der Annahme variabler Datenraten pro Benutzer. Für den DL wird ein Protokoll vorgeschlagen, mit welchem die einmal für den DL ausgewählten Ressourcen in jedem Zugriffsrahmen flexibel zwischen den versorgten MS umverteilt werden können. Hierdurch kann ein Ausgleich zwischen den MS mit hohen und den MS mit niedrigen Momentandatenraten herbeigeführt werden. Für die Ressourcenauswahl im DL wird eine deckungsgradbasierte Steuerung eingeführt. Die Auswahl oder Freigabe von Ressourcen wird an das Verhältnis aus verfügbarer zu benötigter Gesamtdatenrate in der Zelle gekoppelt. Eine Besonderheit des vorgeschlagenen Verfahrens liegt in der Möglichkeit, bei niedriger Systemauslastung mehr Ressourcen zu belegen als minimal benötigt. Anhand von Simulationsergebnissen wird gezeigt, dass durch solch eine Ressourcenexpansion Effizienz und Versorgungsqualität (*engl.* quality of service, QoS) eines zellularen SO-RRM-Systems gesteigert werden.

2. Der Mobilfunkkanal

Die vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Wellen unterliegen auf ihrem Weg zum Empfänger einer Reihe von physikalischen Effekten. Wichtig für systemtheoretische Untersuchungen ist die Abstraktion dieser Effekte in mathematische Modelle. Diesbezüglich hat sich die Modellierung des Mobilfunkkanals als zeitvariantes lineares System bewährt [Pät99]. In dieser Arbeit werden die beiden Phänomene Pfaddämpfung und Mehrwegeausbreitung berücksichtigt¹. Unter dem Begriff Pfaddämpfung werden diejenigen Kanaleigenschaften zusammengefasst, die den Mittelwert der Empfangsleistung beeinflussen. Hierzu gehören die entfernungsabhängige Amplitudendämpfung und Abschattungseffekte [Pra98]. Mehrwegeausbreitungseffekte hingegen haben Auswirkung auf die relativen zeitlichen Amplitudenschwankungen um den pfaddämpfungsabhängigen Mittelwert am Empfänger.

2.1. Pfaddämpfung

Pfaddämpfungseffekte lassen sich entweder mit deterministischen oder mit stochastischen Modellen beschreiben. Deterministische Modelle berücksichtigen die tatsächliche topologische Beschaffenheit des vom Funksystem zu versorgenden Gebiets wie z. B. Gebäudeanordnungen in städtischen Gebieten [Wal00]. Diese Art der Modellierung ist für Betreiber von Mobilfunknetzen von großer Bedeutung, damit sie ihre Systeme auf Basis konkreter Teraindaten effizient planen und erweitern können. Für theoretische Untersuchungen hingegen werden zumeist stochastische Ausbreitungsmodelle angewendet [BB02, Lin93, Rap02]. In dieser Arbeit werden ein entfernungsabhängiges Pfaddämpfungsmodell sowie ein Abschattungsmodell zur Bestimmung der mittleren Empfangsleistungen angenommen.

2.1.1. Entfernungsabhängige Dämpfung

Es werden ein Sender S und ein Empfänger E mit Abstand a voneinander betrachtet. Aus der Theorie der elektromagnetischen Wellen [Leh04] ist bekannt, dass bei Freiraumausbreitung die abgestrahlte Sendeleistung P_S umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands a

¹In der englischsprachigen Literatur wird Pfaddämpfung als *Large Scale Path Loss* und der mehrwegeausbreitungsbedingte Schwund als *Small Scale Path Loss* bezeichnet [Rap02].

abnimmt. Die von E empfangene Leistung beträgt

$$P_E = P_S \cdot G_S G_E \cdot a^{-2}. \quad (2.1)$$

In Gl. (2.1) sind G_S und G_E konstante Faktoren, die von der genutzten Funkwellenlänge und der physikalischen Beschaffenheit der Antennen von S und E abhängen [Lee95]. Der Übersicht halber wird für sämtliche in dieser Arbeit betrachteten Funkverbindungen vereinfachend $G_S = G_E = 1$ angenommen; folglich handelt es sich bei P_S und P_E um normierte Größen.

Zusätzlich zur Freiraumdämpfung gem. Gl. (2.1) geht den Funkwellen Energie durch Reflexion, Transmission und Beugung an Hindernissen entlang ihrer Ausbreitungspfade verloren. Von besonderer praktischer Relevanz für terrestrische Funkssysteme ist die Annahme einer am Boden reflektierten Wellenfront, die sich am Empfänger mit einer über die direkte Sichtverbindung (*engl.* line of sight, LOS) eintreffenden Wellenfront überlagert. Bei hinreichend großen Abständen a bewirkt die destruktive Überlagerung mit den am Boden reflektierten Funkwellen einen Abfall der mittleren Empfangsleistung mit $P_E \sim a^{-4}$ [Lin93, Lee95]. Verallgemeinert wird die Pfaddämpfung über

$$P_E = P_S \cdot a^{-\alpha} \quad (2.2)$$

modelliert. Der Pfaddämpfungskoeffizient α ist ein vom Geländetyp abhängiger Modellparameter, der zwischen 2 (Freiraumausbreitung) und 5 (starke Dämpfung, z. B. bei städtischer Bebauung) variieren kann [Wal00]. In [Rap02] wird dargelegt, dass innerhalb der ersten Fresnel-Zone (Rotationsellipsoid mit S und E in dessen Brennpunkten; geringe Distanzen a von einigen hundert Metern) bei direkter Sichtverbindung zwischen S und E nahezu Freiraumausbreitungsbedingungen ($2 < \alpha < 3$) vorliegen und für größere Distanzen aufgrund der destruktiven Überlagerung der direkten und den reflektierten Wellenfronten Dämpfungskoeffizienten mit $\alpha \approx 4$ angenommen werden können. Die genannten Werte wurden in zahlreichen auf realen Messungen basierenden Studien bestätigt, z. B. [Lin93, BHS05].

2.1.2. Abschattung

Zieht man einen Kreis um den Sender, so haben im Modell Gl. (2.2) alle auf der Kreislinie befindlichen Empfänger E' dieselbe Empfangsleistung $P_{E'} = P_E$. Es ist jedoch einleuchtend, dass in der Realität aufgrund von unregelmäßigen Geländestrukturen die Signale der Funkstrecken S-E' unterschiedlich stark gedämpft werden. Zur Modellierung der Abschattungseffekte auf einer Funkstrecke S-E wird der Abschattungsfaktor $\eta_{S,E}$ verwendet. Mit P_E aus Gl. (2.2) erhält man die lokale mittlere Empfangsleistung

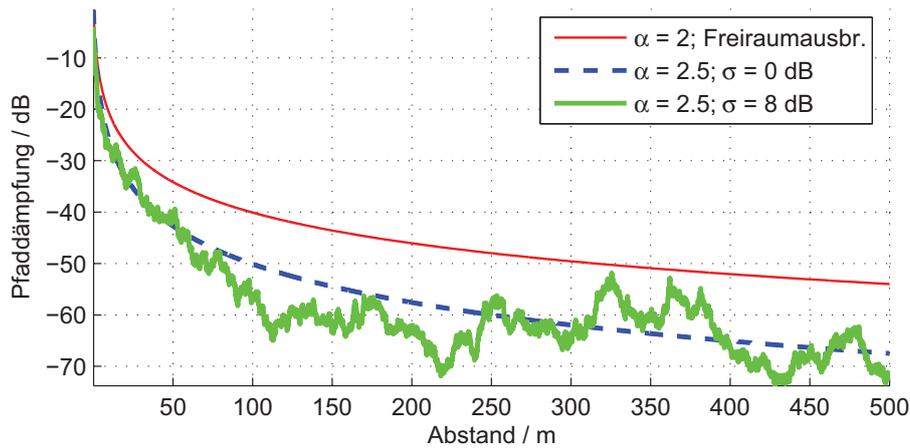


Bild 2.1.: Beispiel zur Auswirkung von Abschattungseffekten auf die mittlere Pfaddämpfung entlang einer geraden Strecke zwischen BS und MS unter Berücksichtigung des Korrelationsmodells aus [Gud91]

$$\bar{P}_E = \eta_{S,E} \cdot P_E. \quad (2.3)$$

Der Koeffizient $\eta_{S,E}$ beschreibt die Realisierung einer lognormalverteilten Zufallsvariablen $\eta > 0$ mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF)

$$p_\eta(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{\ln 10}{10}\sigma_A\right) \cdot \eta} \cdot \exp\left\{-\frac{(\ln \eta)^2}{2 \left(\frac{\ln 10}{10}\sigma_A\right)^2}\right\}. \quad (2.4)$$

Abschattungsbedingte Pegelschwankungen werden daher auch als Lognormal-Fading (*deutsch* Schwund) bezeichnet. Anschaulich liegt die Vorstellung zugrunde, dass η im logarithmischen Maßstab normalverteilt ist mit Mittelwert $\mu_A = 0$ und Standardabweichung σ_A . Über die Standardabweichung σ_A wird die Stärke der Abschattungsschwankungen charakterisiert, welche typischerweise zwischen $\sigma_A = 4 \dots 12$ dB liegt. In dicht bebauten Gebieten und innerhalb von Gebäuden ist σ_A in der Regel höher als beispielsweise in ländlichen Gebieten. Die hinreichend genaue Beschreibung der Wirklichkeit durch das Modell ist in einer großen Zahl von realen Messungen bestätigt worden [Gud91, Lin93, Pra98, Rap02, BHS05]. Der Median der Lognormalverteilung beträgt eins, sodass die Wahrscheinlichkeit jeweils 50% beträgt, dass der mittlere Pfadverlust durch das Abschattungsmodell zu- oder abnimmt.

Das Beispiel in Bild 2.1 zeigt den Einfluss von Lognormalfading auf die makroskopische Pfaddämpfung. Die Darstellung basiert auf dem in [Gud91] entwickelten räumlichen Korrelationsmodell, nach welchem die Dämpfung zwischen zwei benachbarten Punkten durch einen autoregressiven Prozess erster Ordnung modelliert werden kann. In [Gud91] wurde dieses Modell durch Messungen in europäischen Großstädten validiert. Aus dem