

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

---



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

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Niclas Meier  
aus  
Wermelskirchen

2009

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2009

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2009

978-3-86955-046-6

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Rohling

2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Volker Turau

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 2009

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2009

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-046-6

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. An erster Stelle bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Hermann Rohling für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Volker Turau für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr. Wolfgang Meyer für seine Tätigkeit als Vorsitzender des Prüfungsausschusses. Ebenfalls danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Nachrichtentechnik für die schöne gemeinsame Zeit in Hamburg-Harburg.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich in allen Lebenslagen stets unterstützt und gefördert haben. Meinem guten Freund Dr.-Ing. Stefan Vogel danke ich für die vielen ernsthaften und doch nicht immer ganz ernst geführten Diskussionen über Freud und Leid des Promovierens. Größter Quell der Kraft während der Fertigstellung dieser Arbeit war meine Ehefrau Christine. Ihr danke ich von ganzem Herzen für ihre Geduld und Liebe.

München, im Juli 2009



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Der Mobilfunkkanal</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1. Pfaddämpfung . . . . .  | 5         |
| 2.1.1. Entfernungsabhängige Dämpfung . . . . .                                   | 5         |
| 2.1.2. Abschattung . . . . .   | 6         |
| 2.2. Mehrwegeausbreitung . . . . .   | 8         |
| 2.3. Zeitvarianz . . . . .   | 9         |
| <b>3. Die OFDM Übertragungstechnik</b>   | <b>13</b> |
| 3.1. Systemmodell . . . . .  | 13        |
| 3.2. Vielfachzugriff in OFDM-basierten Übertragungssystemen . . . . .            | 17        |
| 3.2.1. OFDM-FDMA . . . . .   | 18        |
| 3.2.2. OFDM-TDMA . . . . .   | 19        |
| 3.2.3. OFDM-CDMA . . . . .   | 20        |
| 3.3. Duplextechniken . . . . .   | 20        |
| <b>4. Das SO-RRM-Systemkonzept</b>   | <b>23</b> |
| 4.1. Zellulare Mobilfunksysteme . . . . .  | 23        |
| 4.2. RRM-Techniken . . . . .   | 25        |
| 4.2.1. Statische Ressourcenvergabe . . . . .                                     | 26        |
| 4.2.2. Dynamische Ressourcenvergabe . . . . .                                    | 29        |
| 4.3. SO-RRM . . . . .  | 33        |
| 4.3.1. Systemstruktur . . . . .  | 34        |
| 4.3.2. Zellübergreifende Synchronisation in Zeit- und Frequenzrichtung . . . . . | 35        |
| 4.3.3. Physikalische Übertragungsmodi und adaptive Modulation . . . . .          | 36        |
| 4.3.4. Ressourcenaufteilung mit FDMA . . . . .                                   | 37        |
| <b>5. Messung der Interferenz- und Nutzsignalleistung</b>                        | <b>39</b> |
| 5.1. Interferenzleistung der Gleichkanalstörer . . . . .                         | 39        |
| 5.2. Nutzsignalleistung . . . . .  | 40        |
| 5.3. Störabstände . . . . .  | 41        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6. Ressourcenauswahl im SO-RRM-System</b>                 | <b>43</b> |
| 6.1. Verbindungsaufbau                                       | 44        |
| 6.1.1. Messprozess   | 44        |
| 6.1.2. Ranglistenerstellung                                  | 45        |
| 6.1.3. Ressourcenauswahl und Aufnahmeentscheidung            | 46        |
| 6.2. Ressourcenumbelegungen                                  | 48        |
| <b>7. SO-RRM bei konstanten Datenraten</b>                   | <b>51</b> |
| 7.1. Zielsetzungen   | 51        |
| 7.2. Systemparameter   | 52        |
| 7.2.1. Verbindungsaufbau                                     | 53        |
| 7.2.2. Ressourcenumbelegungen bei QoS-Unterschreitung        | 53        |
| 7.2.3. Referenzsystem mit SRV                                | 54        |
| 7.3. Simulationsmodell                                       | 54        |
| 7.3.1. Kanalmodell   | 55        |
| 7.3.2. Räumliche Benutzerverteilung                          | 55        |
| 7.3.3. Benutzerankunftsprozess                               | 55        |
| 7.3.4. Kennzahlen für die Leistungsbewertung                 | 55        |
| 7.4. Gleichverteilte Benutzer innerhalb einer Zelle          | 57        |
| 7.4.1. Versorgung mit niedrigen Datenraten (32 kBit/s)       | 57        |
| 7.4.2. Versorgung mit hohen Datenraten (384 kBit/s)          | 59        |
| 7.4.3. Systemverhalten bei Überdeckung des Ressourcenbedarfs | 69        |
| 7.5. Hot-Spot-Szenario                                       | 70        |
| 7.6. Diskussion  | 73        |
| <b>8. SO-RRM im Downlink bei variablen Datenraten</b>        | <b>75</b> |
| 8.1. SO-RRM-Protokoll für den DL                             | 76        |
| 8.2. Deckungsgradbasierte Ressourcenauswahl                  | 77        |
| 8.2.1. Momentane Datenrate                                   | 78        |
| 8.2.2. Auswahl zusätzlicher Ressourcen                       | 78        |
| 8.2.3. Freigabe überschüssiger Ressourcen                    | 79        |
| 8.2.4. Auslegung der Deckungsgradschwellen                   | 80        |
| 8.2.5. Schedulingalgorithmus                                 | 82        |
| 8.2.6. Simulationsmodell                                     | 82        |
| 8.2.7. Simulationsergebnisse                                 | 84        |
| 8.3. Nutzenmaximierende Ressourcenzuordnung                  | 89        |
| 8.3.1. Nutzendefinition                                      | 91        |
| 8.3.2. Simulationsergebnisse                                 | 95        |
| 8.3.3. Fairnessanalyse                                       | 98        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 8.4. Diskussion . . . . .  | 100        |
| <b>9. Zusammenfassung</b>  | <b>103</b> |
| <b>A. Bündelungsgewinn in einem M/M/n-Verlustsystem</b>                        | <b>107</b> |
| <b>B. Entwickelte Simulationssoftware</b>                                      | <b>111</b> |
| <b>C. Diskreter Markov-Prozess zur Modellierung zeitvarianter Datenquellen</b> | <b>117</b> |
| <b>D. Algorithmus zur Senkung der PHY Modi bei Überdeckung</b>                 | <b>119</b> |
| <b>E. Verfahren zur Messung der subträgerspezifischen Störabstände</b>         | <b>121</b> |
| E.1. Voraussetzungen . . . . .   | 121        |
| E.2. Verfahren . . . . .   | 122        |
| E.3. Simulationsergebnisse . . . . .   | 126        |
| <b>Notation</b>  | <b>129</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>133</b> |





# 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 berücksichtigt<sup>1</sup>. 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  $a$

---

<sup>1</sup>In 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  $\alpha$  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

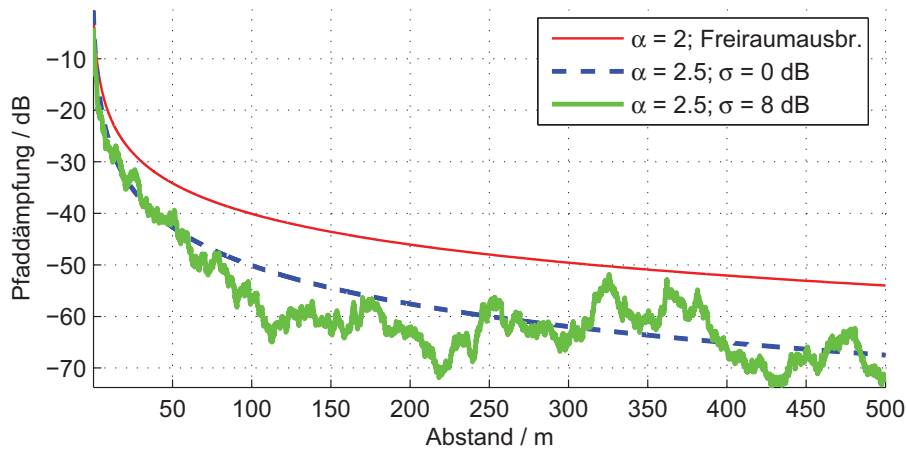


Bild 2.1.: Beispiel zur Auswirkung von Abschattungseffekten auf die mittlere Pfaddämpfung entlang einer geraden Strecke zwischen BS und MS unter Berücksichtigung des Korrelationsmodells aus [Gud91]

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

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  $\eta$  im logarithmischen Maßstab normalverteilt ist mit Mittelwert  $\mu_A = 0$  und Standardabweichung  $\sigma_A$ . Über die Standardabweichung  $\sigma_A$  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  $\sigma_A$  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



Beispiel in Bild 2.1 wird ersichtlich, dass die räumlich nächste BS nicht immer diejenige mit dem stärksten Signalpegel für eine MS sein muss. Dieser Fall tritt zum Beispiel in Randgebieten von Funkzellen auf, wenn eine weiter entfernte BS aufgrund geringerer Abschattung von einer MS besser als die im kürzesten Abstand befindliche BS empfangen werden kann. Im Simulationsmodell muss jedoch beachtet werden, dass die Pfaddämpfung nicht geringer als bei Freiraumausbreitung werden darf.

## 2.2. Mehrwegeausbreitung

Neben der zuvor diskutierten mittleren Pfaddämpfung unterliegt das Empfangssignal weiteren ausbreitungsbedingten Störungen, dem sog. schnellen Schwund (*engl.* fast fading). Die Amplitude des Empfangssignals kann sich bereits bei geringfügigen Ortsänderungen des Senders und/oder des Empfängers in der Größenordnung von wenigen Wellenlängen der Trägerfrequenz signifikant ändern [Pät99]. Die Übertragung über einen breitbandigen Mobilfunkkanal führt zu frequenzselektiven Einbrüchen des Empfangssignals. Findet zudem eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger statt, so weist das Empfangssignal zeitvarianten Verhalten auf.

In realen Umgebungen überlagert sich eine Vielzahl von Signalechos am Empfänger, die dort über unterschiedliche Ausbreitungspfade eintreffen. Auf jedem Pfad unterliegt das Signal einer pfadspezifischen Dämpfung sowie Phasenverschiebung. Durch konstruktive oder destruktive Überlagerung der Signalechos kann es in Abhängigkeit von deren relativen Phasendifferenzen sowohl zu Pegelanhebungen als auch zu starken Pegelbrüchen des Empfangssignals kommen. Unter der Annahme einer großen Anzahl von Ausbreitungspfaden addieren sich die eintreffenden Funkwellen zu einem komplexen Empfangssignal auf, dessen Einhüllende  $r$  nach dem zentralen Grenzwertsatz als komplexe Gauß'sche Zufallsvariable modelliert werden kann. Der Betrag des multiplikativ auf das Empfangssignal wirkenden Fading-Faktors  $r$  folgt in diesem Fall einer Rayleigh-WDF [Pät99],

$$p(|r|) = \frac{|r|}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{|r|^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (2.5)$$

Ein Funkkanal mit Mehrwegeausbreitung und  $N_P$  Ausbreitungspfaden kann systemtheoretisch über die Kanalimpulsantwort [Pro95] modelliert werden,

$$h(\tau) = \sum_{p=1}^{N_P} h_p \delta(\tau - \tau_p). \quad (2.6)$$

Die komplexen Faktoren  $h_p$  drücken die pfadspezifischen Dämpfungen und Phasendrehungen aus;  $\tau_p$  entspricht der zeitlichen Verzögerung der über den  $p$ -ten Ausbreitungspfad

eintreffenden Funkwelle. Die zugehörige Übertragungsfunktion [Lük95] lautet

$$H(f) = \sum_{p=1}^{N_P} h_p \exp \{-j2\pi f \tau_p\}. \quad (2.7)$$

Bild 2.2 zeigt eine solche Übertragungsfunktion eines Kanals mit  $N_P = 30$  Ausbreitungspfaden, dessen Parameter  $h_p$  und  $\tau_p$  mit einem WSSUS-Kanalmodell [Pät99] generiert wurden.

Eine wichtige Kennzahl zur Beschreibung der Frequenzselektivität eines Mobilfunkkanals ist die Kohärenzbandbreite  $B_K$ . Sie wird definiert als diejenige Bandbreite, für welche die Übertragungsfunktion  $H(f)$  einen näherungsweise konstanten Verlauf aufweist. In erster Näherung lässt sich die Kohärenzbandbreite aus der maximalen Pfadverzögerung  $\tau_{\max} = \max \{\tau_p\}_{p=1 \dots N_P}$  zu

$$B_K \approx \frac{1}{\tau_{\max}}. \quad (2.8)$$

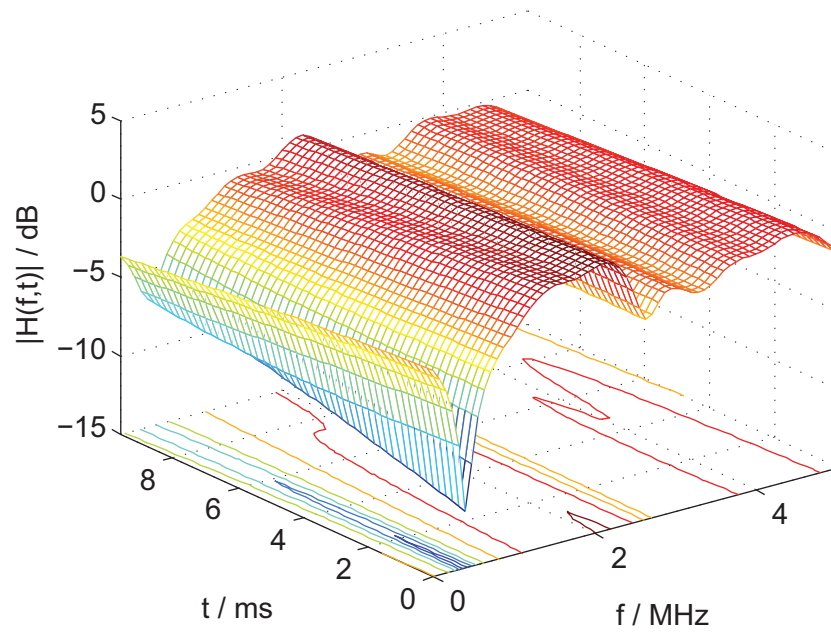
bestimmen [Pro95]. Bild 2.2 zeigt exemplarisch das Korrelationsverhalten für zwei unterschiedliche Werte von  $\tau_{\max}$ . Je höher  $\tau_{\max}$ , desto stärker sind die Schwankungen der Übertragungsfunktion in Frequenzrichtung.

## 2.3. Zeitvarianz

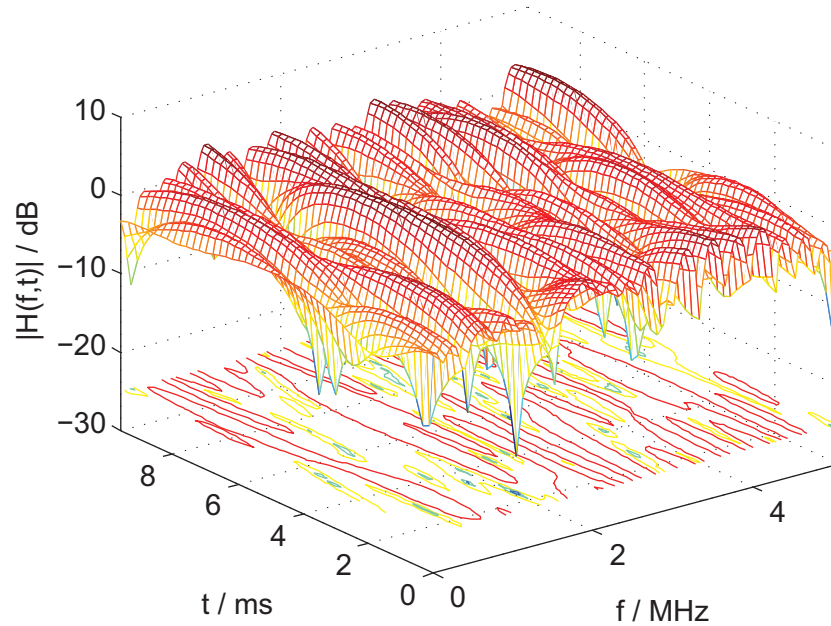
Findet zwischen Sender und Empfänger eine Relativbewegung mit der Geschwindigkeit  $v$  statt, so erfolgt auf jedem Ausbreitungspfad zusätzlich eine Dopplerverschiebung der empfangenen Teilsignale bezüglich der Trägerfrequenz  $f_T$ . Die Frequenzverschiebung  $f_{d,p}$  der  $p$ -ten Teilwelle hängt vom Winkel  $\alpha_p$  zwischen Einfallsrichtung der Welle und der Bewegungsrichtung sowie von der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ab,

$$\begin{aligned} f_{d,p} &= f_T \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \alpha_p \\ &= f_{d,\max} \cdot \cos \alpha_p. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Die maximalen Dopplerverschiebungen  $\pm f_{d,\max}$  entstehen bei  $\alpha_p = 0^\circ$  bzw.  $\alpha_p = 180^\circ$ , wenn sich z. B. der Empfänger entlang des betreffenden Ausbreitungspfades bewegt. Aus Gl. (2.9) ist ersichtlich, dass die maximale Doppler-Verschiebung sowohl proportional zur Trägerfrequenz als auch zur Geschwindigkeit  $v$  ansteigt. Aufgrund der bewegungsinduzierten Dopplerverschiebungen wird die Kanalimpulsantwort aus Gl. (2.6) zeitabhängig,  $h = h(\tau, t)$ . Folglich ist auch die Übertragungsfunktion  $H(f, t)$  eines breitbandigen Funkkanals sowohl zeit- als auch frequenzabhängig. Die Ausprägung der Zeitvarianz wird ebenfalls in Bild 2.2 für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten gezeigt.



(a)  $v = 5 \text{ km/h}$ ,  $\tau_{\max} = 0.8 \mu\text{s}$



(b)  $v = 50 \text{ km/h}$ ,  $\tau_{\max} = 5 \mu\text{s}$

Bild 2.2.: Übertragungsfunktion eines Mobilfunkkanals mit Frequenzselektivität und Zeitvarianz

Auch in Zeitrichtung weisen die Übertragungsfunktionen  $H(f, t)$  Korrelation auf. Diese hängt von der Verteilung der Dopplerfrequenzen  $f_{d,p}$  der empfangenen Mehrwegekomponenten ab, die systemtheoretisch über das Doppler-Leistungsdichtespektrum beschrieben wird [Pro95]. Eine wichtige Größe zur Charakterisierung von Funkkanälen ist die Kohärenzzeit  $T_K$ . Sie gibt die maximale Breite eines Zeitfensters an, innerhalb dessen die Kanalübertragungsfunktion  $H(f, t)$  nahezu konstant bleibt. Die Kohärenzzeit lässt sich näherungsweise über den Kehrwert der maximalen Dopplerverschiebung angeben [Pro95],

$$T_K \approx \frac{1}{f_{d,\max}}. \quad (2.10)$$



# 3. Die OFDM Übertragungstechnik

Die im vorigen Kapitel betrachtete Mehrwegeausbreitung des Funkkanals stellt eine große Herausforderung für Funkübertragungssysteme dar. Ist die maximale Pfadverzögerung des Kanals größer als die Sendesymboldauer,  $\tau_{\max} > T_S$ , so treten am Empfänger mehrwegeausbreitungsbedingte Inter-Symbol-Interferenzen (ISI) auf. Eine äquivalente Beschreibung lautet, dass der Funkkanal bei gegebener Übertragungsbandbreite  $B$  aufgrund von  $B_K \approx 1/\tau_{\max} < B = 1/T_S$  frequenzselektives Verhalten aufweist und folglich das Sendesignal verzerrt empfangen wird [Pät99]. Für Einträgerübertragungsverfahren existiert eine Reihe von Verfahren, die auf Basis einer möglichst genauen Kanalschätzung mit geeigneten Kompensationsfiltern eine Entzerrung des Empfangssignals durchführen [Pro95, Kam96]. Die Ordnung der benötigten Filterstrukturen steigt jedoch mit zunehmendem Verhältnis  $\tau_{\max}/T_S$  überproportional an, sodass bei sehr hohen Datenraten (sehr kurzen Symboldauern  $T_S$ ) der Rechenaufwand des Entzerrers entsprechend hoch wird [BT02]. Eine Kanalentzerrung in Echtzeit kann damit zu einer echten Herausforderung für die Implementierung in Hardware werden und wirkt sich gerade bei den MS negativ auf die Batterielaufzeit aus.

Die OFDM-Übertragungstechnik [RMBG99] ist eine spezielle Form der Multiträgerübertragungstechnik, die bereits in den frühen 70er Jahren entwickelt wurde [WE71]. Ihre Besonderheit liegt darin, dass ISI in einem frequenzselektiven Kanal durch Anfügen eines Schutzintervalls vollständig vermieden werden können. Wie noch gezeigt wird, lässt sich durch Auffüllen des Schutzintervalls mit einem zyklischen Präfix eine rechnerisch besonders einfache und effiziente Kanalentzerrung durchführen.

## 3.1. Systemmodell

Zunächst wird die verfügbare Bandbreite  $B$  in  $N_S$  orthogonale Subträger der Bandbreite  $\Delta f_S = B/N_S$  aufgeteilt. Dies wird im Zeitbereich durch die Überlagerung von  $N_S$  komplexen Schwingungen erreicht, welche durch ein Rechteckfenster auf die zeitliche Länge eines Sendesymbols  $T_S$  begrenzt werden. Das im Intervall  $[nT_S, (n+1)T_S]$  gesendete OFDM-Symbol wird im Zeitbereich dargestellt als

$$s_n(t) = \sum_{k=0}^{N_S-1} S_{k,n} \cdot \exp \{j2\pi \cdot k \cdot \Delta f_S \cdot t\}, \quad t \in [nT_S, (n+1)T_S]. \quad (3.1)$$

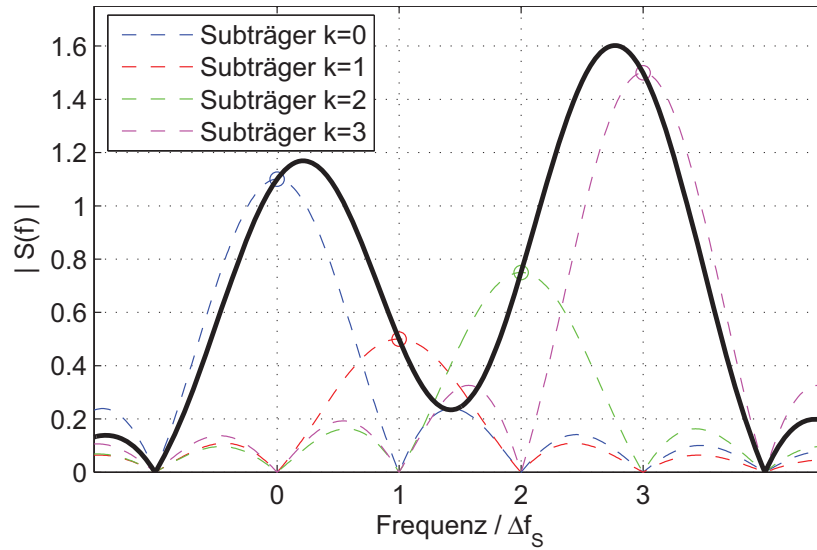


Bild 3.1.: Beispielhafter Amplitudengang eines OFDM-Systems mit  $N_S = 4$  Subträgern. Die durchgezogene Linie ergibt sich aus der Überlagerung der vier gestrichelt gezeichneten Subträgerspektren.

Dabei bezeichnet  $S_{k,n}$  das auf dem  $k$ -ten Subträger im  $n$ -ten OFDM-Symbol übertragene Modulationssymbol. Das Spektrum  $S_n(f)$  eines OFDM-Symbols ist folglich die Überlagerung von  $N_S$  si-förmigen Subträgerspektren. Für den Amplitudengang gilt

$$|S_n(f)| = T_S \cdot \left| \sum_{k=0}^{N_S-1} S_{k,n} \cdot \text{si}(\pi T_S \cdot [f - k \cdot \Delta f_S]) \right|. \quad (3.2)$$

Bild 3.1 zeigt beispielhaft den Amplitudengang  $|S_n(f)|$  für ein System mit  $N_S = 4$  Subträgern. Die si-Funktionen der Subträgerspektren sind orthogonal zueinander, wenn der Subträgerabstand zu

$$\Delta f_S = \frac{1}{T_S} \quad (3.3)$$

gewählt wird. Unter dieser Voraussetzung nimmt der  $k$ -te si-Term in Gl. (3.2) an der Stelle  $f = k \cdot \Delta f_S$  den Wert eins an, während alle anderen si-Terme an dieser Stelle einen Nulldurchgang aufweisen. Zur Rückgewinnung des auf dem  $k$ -ten Subträger ( $k = 0 \dots N_S - 1$ ) übertragenen Modulationssymbols  $S_{k,n}$  ist folglich allein die Kenntnis des Spektrums von  $S_n(f)$  an der diskreten Frequenz  $f = k \cdot \Delta f_S$  hinreichend.

Der grundlegende Aufbau eines OFDM-Übertragungssystems ist in Bild 3.2 dargestellt. Tastet man das OFDM-Spektrum aus Gl. (3.2) im Abstand  $\Delta f_S$  ab, so kann gezeigt werden [RMBG99], dass aus den resultierenden Abtastwerten mittels der Inversen Diskreten Fourier-Transformation (IDFT) die Abtastwerte des mit der Rate  $\Delta f_S$  abgetasteten

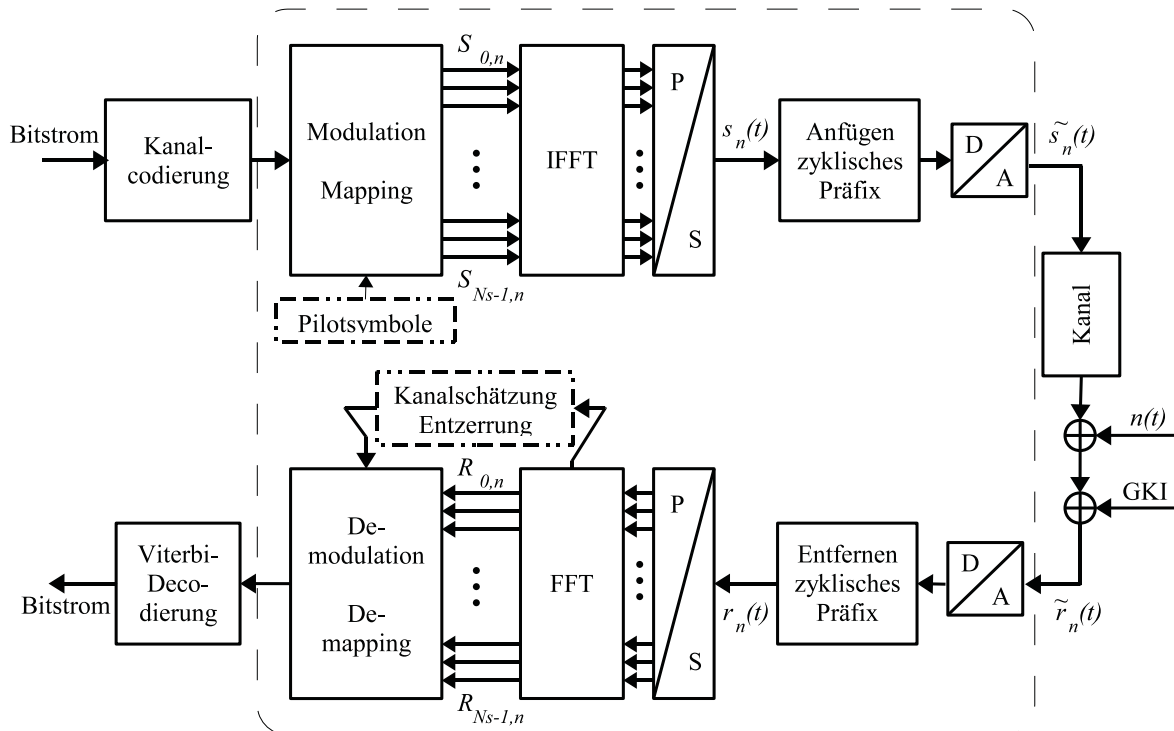


Bild 3.2.: Blockschaltbild eines digitalen OFDM-Übertragungssystems

Sendesignals  $s_n(t)$  berechnet werden können. Durch Digital-Analog-Wandlung mittels eines Rekonstruktionstiefpassfilters wird hieraus das analoge Sendesignal  $\tilde{s}_n(t)$  erzeugt.

Im Empfänger wird dieselbe Signalverarbeitungskette in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Aus dem abgetasteten Empfangssignal werden mittels der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) die Modulationssymbole  $R_{k,n}$  gewonnen. Diese sind jedoch durch Kanaleinflüsse gestört und müssen im Falle einer kohärenten Signalübertragung mit Hilfe von Kanalschätzwerten entzerrt werden. Eine Kanalschätzung kann im Empfänger entweder auf Basis von bekannten Pilotsymbolen oder mittels rückgekoppelter Symbolentscheidungen durchgeführt werden [Pro95, Kam96]. Alternativ können in OFDM-Systemen differentielle Modulationstechniken eingesetzt werden, die zur Entzerrung keine Kanalschätzung benötigen und dennoch eine vergleichbare Leistungsfähigkeit aufweisen wie OFDM-Systeme mit kohärenter Übertragung [May00].

Bei entsprechender Dimensionierung der Subträgerbandbreite [RMBG99] kann jedes  $\Delta f_S$  breite Subband des Übertragungskanals für die Dauer eines OFDM-Symbols mit einem konstanten komplexen Übertragungsfaktor  $H_{k,n}$  beschrieben werden. Die empfangenen Modulationssymbole ergeben sich bei perfekter Synchronisation zwischen Sender und Empfänger zu

$$R_{k,n} = S_{k,n} \cdot H_{k,n} + N_{k,n}. \quad (3.4)$$

Der Term  $N_{k,n}$  stellt in obiger Gleichung den spektralen Rauschanteil des als AWGR (additives weißes Gauß'sches Rauschen, [Pro95]) angenommenen Kanalrauschens  $n(t)$  im



$k$ -ten Subband dar. Vernachlässigt man letzteren, kann über

$$\hat{H}_{k,n} = \frac{R_{k,n}}{S_{k,n}} \quad (3.5)$$

bei bekanntem Sendesymbol  $S_{k,n}$  ein Kanalschätzwert für das  $k$ -te Teilband bestimmt werden. Durch eine komplexe Multiplikation des empfangenen Modulationssymbols  $R_{k,n}$  mit  $1/\hat{H}_{k,n}$  kann der Kanal für das jeweilige Teilband entzerrt werden.

Bei gleicher Datenrate erhöht sich mit OFDM die Symboldauer  $T_S$  durch die parallele Übertragung von  $N_S$  Modulationssymbolen gegenüber Einträgerübertragungssystemen um den Faktor  $N_S$ . Dadurch nimmt das Verhältnis  $\tau_{\max}/T_S$  im Vergleich zur Einträgerübertragung ab und der Einfluss der Mehrwegeausbreitung wird verringert. Zur endgültigen Bekämpfung der kanalbedingten ISI wird in OFDM-Übertragungssystemen vor jedem Sendesymbol ein Schutzintervall (*engl.* guard intervall) der Länge  $T_G$  eingefügt. Dieses wird wie in Bild 3.3 gezeigt mit einem zyklischen Präfix aufgefüllt. Das zyklische Präfix ist eine Signalkopie des Teilintervalls  $[T_S - T_G, T_S]$  eines im Intervall  $[0, T_S]$  liegenden OFDM-Zeitsignals. Zur Vermeidung von ISI ist die Schutzzeit  $T_G$  mindestens so lang wie die maximale Pfadverzögerung  $\tau_{\max}$  des Funkkanals zu wählen,

$$T_G \geq \tau_{\max}. \quad (3.6)$$

Wegen Gl. (3.6) treffen alle mehrwegeausbreitungsbedingten Signalechos des  $(n-1)$ ten OFDM-Symbols innerhalb des Schutzintervalls des  $(n)$ ten OFDM-Symbols ein. Im Empfänger wird daher zunächst wie in Bild 3.2 gezeigt das Schutzintervall abgeschnitten und dessen Inhalt verworfen. Die Echos des  $n$ -ten Sendesymbols sind wie in Bild 3.3 dargestellt gegenüber dem auf dem Pfad mit der kürzesten Laufzeitverzögerung  $\tau_1$  ankommenden Teilsignal zyklisch-phasenverschoben. Bei der FFT äußert sich eine solche zyklische Phasenverschiebung lediglich in einem konstanten Phasenterm der FFT-Ausgangswerte [OSB04]. Die komplexen Dämpfungsfaktoren der empfangenen Teilpfade überlagern sich zu einem komplexen Dämpfungsfaktor  $H_{k,n}$ , der für jeden Subträger mittels Gl. (3.5) geschätzt werden kann.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die OFDM-Übertragungstechnik durch die orthogonale Überlagerung mehrerer Subträger eine hohe spektrale Effizienz erreicht. OFDM bietet effektive Mechanismen zur Bekämpfung der Mehrwegeausbreitung des Funkkanals. Wird die Subträgeranzahl als Zweierpotenz gewählt, so ist eine effiziente Systemimplementierung mittels IFFT- (Schnelle Inverse Diskrete Fourier-Transformation, [OSB04]) bzw. FFT-Filterbänken möglich. Zudem ermöglicht OFDM eine algorithmisch einfache sowie aufwandsgünstige Kanalentzerrung.

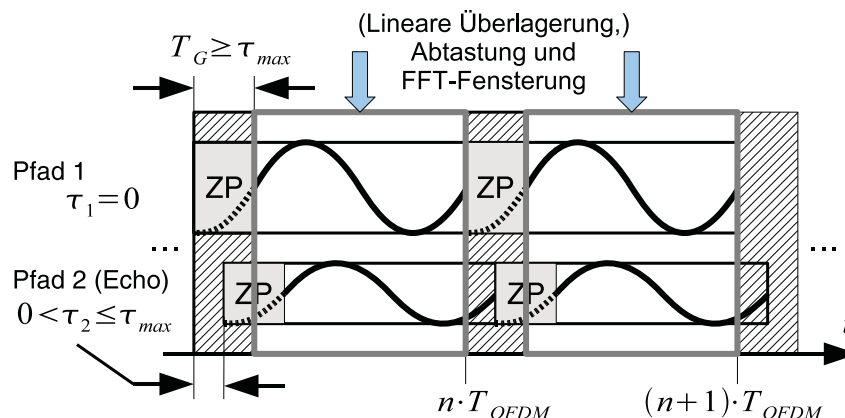


Bild 3.3.: Funktionsweise des Schutzintervalls bzw. des zyklischen Präfixes (ZP) in einem OFDM-Funkübertragungssystem

## 3.2. Vielfachzugriff in OFDM-basierten Übertragungssystemen

In zellularen Funkssystemen müssen mehrere Teilnehmer simultan auf die Luftschnittstelle zugreifen können. Zur Koordination der simultanen Zugriffe wird ein geeignetes Vielfachzugriffsverfahren benötigt.

Beim Entwurf eines Vielfachzugriffsverfahrens für ein Funkkommunikationssystem sind zwei Aspekte zu berücksichtigen. Zunächst muss beim Systemdesign festgelegt werden, wie die begrenzte Bandbreite effizient in Funkressourcen unterteilt wird, sodass mehrere Verbindungen im Multiplex konfliktfrei auf das Medium zugreifen können. Liegt eine Aufteilung in voneinander unabhängig nutzbare Ressourcen vor, muss als zweites ein verbindlicher Satz von Regeln festgelegt werden, mit welchen situationsangepasst entschieden wird, wer wann wie lange auf welchen Teil des Übertragungsmediums zugreifen darf. Solche Regeln werden in Kommunikationsnetzen als Vielfachzugriffsprotokolle bezeichnet [Wal00]. Im Folgenden wird betrachtet, wie die Aufteilung der Funkbandbreite in Funkressourcen für den Vielfachzugriff in einem OFDM-System realisiert werden kann. Vielfachzugriffsprotokolle sind Gegenstand der anschließenden Kapitel dieser Arbeit.

Die Aufteilung in Funkressourcen kann wie in Bild 3.4 dargestellt im Zeit-, Frequenz- und/oder Code-Multiplex erfolgen [Rap02]<sup>1</sup>. Die OFDM Übertragungstechnik bietet hierfür ein hohes Maß an Flexibilität. In [Grü00] wurden zu diesem Thema umfangreiche quantitative Untersuchungen hinsichtlich der erzielbaren Bitfehlerraten durchgeführt. Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Eigenschaften der drei genannten Multiplex-Techniken für den Vielfachzugriff in einem zellularen OFDM-Funksystem diskutiert.

<sup>1</sup>In Mehrantennensystemen [GSS<sup>+</sup>03] steht zusätzlich die räumliche Dimension als weiterer Freiheitsgrad zur Verfügung. Solche Systeme werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

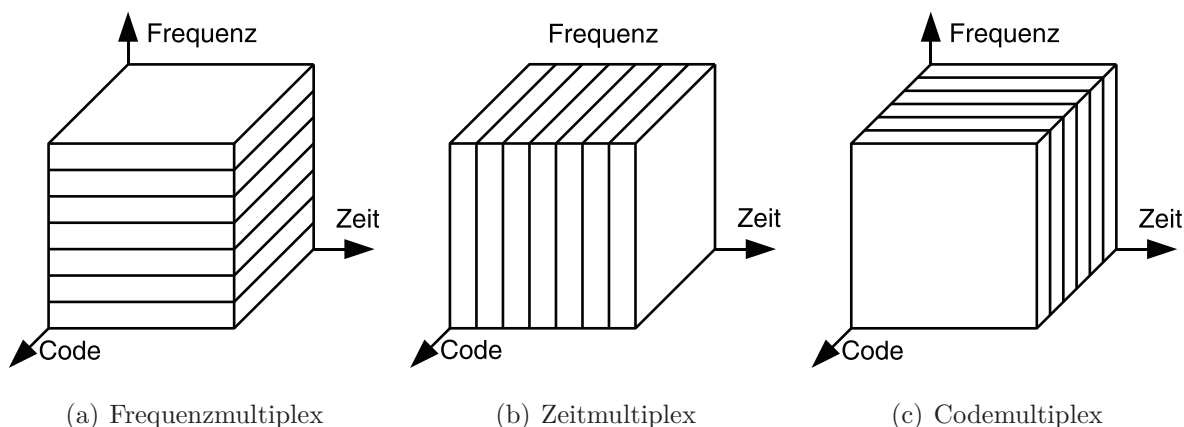


Bild 3.4.: Möglichkeiten zur Aufteilung der Funkbandbreite für den Vielfachzugriff

### 3.2.1. OFDM-FDMA

Der Vielfachzugriff über Aufteilung der Bandbreite in separate Frequenzbänder (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA) kann durch die Aufteilung der Subträger auf unterschiedliche Nutzer realisiert werden. Die Anwendung von FDMA erfordert im UL von OFDM-Funksystemen eine hohe Genauigkeit bei der Frequenzsynchronisation, wenn mehrere MS gleichzeitig senden. Bereits bei geringen Frequenzabweichungen überlagern sich die nicht-synchronen Signale im Empfänger derart, dass die in Bild 3.1 gezeigte Orthogonalität der si-förmigen Subträgerspektren zerstört wird und Inter-Carrier-Interferenzen auftreten. Im DL hingegen wird die Orthogonalität nicht verletzt, da die BS während der DL-Phase als einziger Sender in der Zelle aktiv ist.

Mittels OFDM-FDMA lassen sich wie in Bild 3.5 skizziert Subträgerbündel variabler Größe an die Benutzer zuteilen. Auf den schmalbandigen Subträgern treten bei zeitvarianten Funkkanälen Fadingeinbrüche in Zeitrichtung auf. Ist der Funkkanal nur langsam zeitlich veränderlich, so wird im Falle eines Fadingeinbruchs die Datenübertragung des Benutzers für einen längeren Zeitraum gestört. In OFDM-FDMA-basierten Funksystemen bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten, um solche Störungen zu vermeiden.

Zum einen können jedem Benutzer mehrere Subträger zugewiesen werden. Haben die zugewiesenen Subträger in Frequenzrichtung Abstände zueinander, die größer als die Kohärenzbandbreite  $B_K$  sind, so kann durch Interleaving in Frequenzrichtung und Kanalcodierung die Frequenzdiversität des Kanals zur Reduzierung der Bitfehlerraten ausgenutzt werden.

Zum anderen besteht die Möglichkeit einer adaptiven Subträgerzuteilung, welche an die Momentanzustände der subträgerspezifischen Schmalbandkanäle angepasst wird. Das Funkressourcenmanagement muss hierfür wie in Bild 3.5 angedeutet in regelmäßigen Abständen die Übertragungsfunktionen aller Benutzer neu schätzen und auf den neuen Messergebnissen basierend eine Neuzuteilung der Subträger durchführen. Um Verarbei-

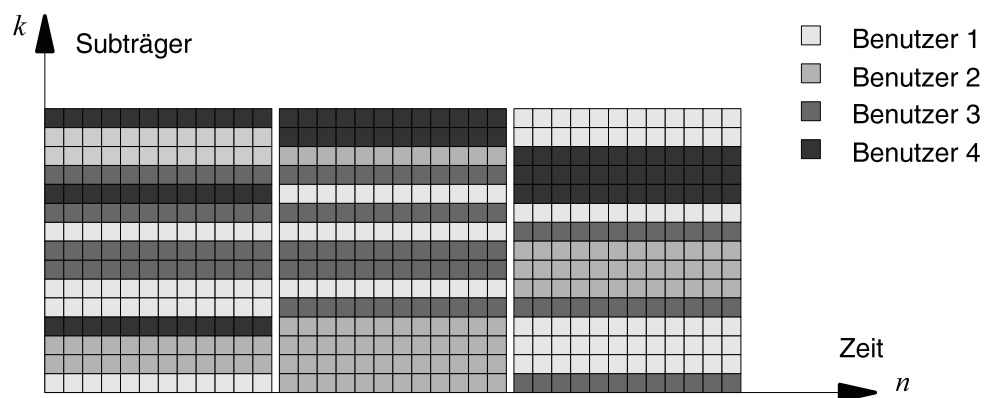


Bild 3.5.: Mögliche Ressourcenaufteilung mit OFDM-FDMA

tungsaufwand zu sparen, können mehrere benachbarte Subträger zu Zeit-Frequenz-Blöcken [Grü00] zusammengefasst werden. Voraussetzung hierfür ist, dass  $B_K$  hinreichend groß ist, sodass alle Subträger eines Blocks innerhalb der Kohärenzbandbreite liegen. In diesem Fall weisen alle Kanalübertragungsfaktoren  $H_{k,n}$  eines Blocks eine hohe Korrelation auf. Wie breit ein Zeit-Frequenz-Block maximal sein darf bzw. wie häufig eine Umbelegung der Subträger erfolgen muss, hängt von den der Kohärenzbandbreite  $B_K$  bzw. der Kohärenzzeit  $T_K$  der Funkkanäle ab.

In [Grü00] wurde gezeigt, dass sich mit kanaladaptiver Subträgerzuteilung im Vergleich zu den anderen in diesem Kapitel beschriebenen Ressourcenaufteilungskonzepten hohe Gewinne hinsichtlich des Gesamtdurchsatzes in einer Funkzelle erreichen lassen. Die Untersuchungen in [SOR07] haben ergeben, dass durch den Einsatz von OFDM-FDMA ein durchschnittlicher SNR-Gewinn von etwa 6 dB erzielt werden kann. Dieser Gewinn ergibt sich aus der Multi User Diversity (MUD, *engl.* Mehrbenutzerdiversität), die mit OFDM-FDMA durch eine flexible, an die benutzerspezifischen Übertragungsfunktionen adaptierte Subträgerauswahl ausgenutzt werden kann.

### 3.2.2. OFDM-TDMA

In einem OFDM-Funksystem mit im Zeitmultiplex betriebenen Vielfachzugriff (*Time Division Multiple Access*, TDMA) nutzt immer nur ein Teilnehmer exklusiv die volle Anzahl der vorhandenen Subträger für die Dauer eines oder mehrerer OFDM-Symbole. In einem Mehrteilnehmersystem sind daher die Anforderungen an die Frequenzsynchronisation nicht so strikt wie im Falle von FDMA, da der Empfänger stets nur das Signal eines Senders empfängt, auf welches er sich synchronisieren kann. Folglich können Inter-Carrier-Interferenzen vermieden werden.

Mit TDMA steht der maximale Grad an Frequenzdiversität zur Verfügung. Es ist jedoch keine direkte Adaption an frequenzselektive Funkkanäle möglich. Doch auch in OFDM-

TDMA-Systemen ist zu einem gewissen Grad die Anpassung an die verbindungs-spezifische Frequenzcharakteristik der Funkkanäle möglich. In [LGRZ03] wurde gezeigt, dass für jeden Benutzer ein sog. Paketfehlerraten-Indikator aus der geschätzten Kanalübertragungsfunktion abgeleitet werden kann, der neben dem mittleren Störabstand einen weiteren Indikator für die zu erwartende Übertragungsgüte darstellt. Eine Anpassung an den Kanal kann damit beispielsweise mittels adaptiver Modulation erfolgen.

### 3.2.3. OFDM-CDMA

Eine dritte Möglichkeit ist die Realisierung des Vielfachzugriffs durch Codespreizung (*Code Division Multiple Access*, CDMA), was mit OFDM auf unterschiedliche Weisen erfolgen kann [HP97]. Bei CDMA greifen alle Benutzer simultan auf das Medium zu. Im Empfänger werden die verschiedenen Signale durch Korrelation mit der jeweiligen Funkverbindung zugeordneten Spreizsequenz wieder getrennt. Als Spreizsequenzen können entweder orthogonale Codesequenzen wie z. B. Walsh-Hadamard-Codes oder quasi-orthogonale Pseudo-Zufallsfolgen (*pseudo noise*, PN) mit guten Autokorrelations- und Kreuzkorrelationseigenschaften verwendet werden [Pro95].

Bei Übertragung über einen zeit- und frequenzselektiven Funkkanal werden die Elemente der gesendeten Folgen verzerrt, sodass aufgrund des Orthogonalitätsverlustes bei der Dekorrelation im Empfänger Eigeninterferenzen erzeugt werden [Rap02]. In zellularen CDMA-basierten Funkssystem wie z. B. UMTS steigen diese Eigeninterferenzen mit wachsender Benutzeranzahl in der Zelle immer weiter an. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu FDMA und TDMA. Letztere erzeugen im frequenzselektiven Funkkanal keine Eigeninterferenzen und die einzelnen Funkverbindungen stören sich nicht gegenseitig. Mit CDMA hingegen sinkt die Güte der Funkverbindungen mit steigender Benutzeranzahl, wie die Ergebnisse in [Grü00] belegen. Mit OFDM-CDMA wird durch die Spreizung eine hohe Frequenzdiversität erzielt, sodass mit dieser Technik ebenso wie im Falle von TDMA nicht dieselbe hohe Auswahldiversität und Adaptionfähigkeit an die schnellen Schwundeffekte wie bei Anwendung von subträgerselektivem OFDM-FDMA ausgenutzt werden kann.

## 3.3. Duplextechniken

Für die Übertragung im Vollduplex muss das verfügbare Funkspektrum in zwei Anteile aufgespalten werden. Dies geschieht wie in Bild 3.6 dargestellt entweder im Frequenz- (*frequency division duplex*, FDD) oder im Zeitduplex (*time division duplex*, TDD) [Wal00].

In FDD-Systemen werden für DL und UL jeweils eigene Frequenzbänder belegt, was die simultane Übertragung in beiden Richtungen einer Funkstrecke ermöglicht. Hierfür werden in jedem Funkgerät zwei HF-Teile benötigt. Die Frequenzbänder für DL und UL müssen

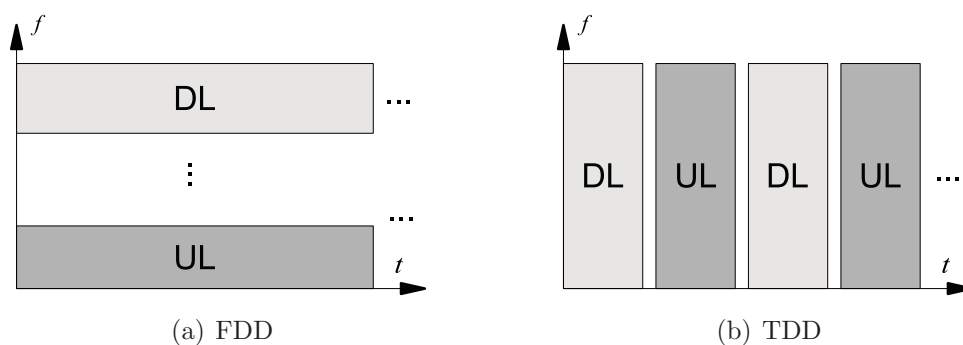


Bild 3.6.: Möglichkeiten für die Voll duplex-Übertragung

aufgrund der nichtidealen Bandpassfilter im Sende- und Empfangsteil einen hinreichend großen Abstand voneinander aufweisen, um Eigeninterferenzen zu vermeiden.

Im TDD-Betrieb findet in jedem Vielfachzugriffrahmen ein Wechsel zwischen DL und UL statt. In TDD-Systemen wie z. B. dem UTRAN-TDD (*UMTS Radio Access Network*) System [HKK<sup>+</sup>00] kann der Umschaltzeitpunkt zwischen DL und UL als variabler Systemparameter dimensioniert werden. Auf diese Weise können Funkressourcen bedarfsangepasst zwischen DL und UL aufgeteilt werden. Die Funkgeräte benötigen in TDD-Systemen nur ein HF-Teil und sind damit günstiger in der Herstellung. Ein Vorteil von FDD-Systemen ist hingegen die schnellere Verfügbarkeit von Signalisierungsinformationen über einen Rückkanal, wie er z. B. in Funksystemen mit adaptiver Modulation benötigt wird [KSL98].

In Funksystemen mit kanaladaptiver Anpassung der Übertragungsparameter (Linkadaptation) besteht in TDD-Systemen der Vorteil der Kanalreziprozität. Da in UL und DL derselbe Funkkanal genutzt wird, kann die BS den Kanal aus den Empfangssignalen im UL schätzen und die gewonnene Information unmittelbar zur Anpassung der Übertragungsparameter im DL anwenden. Das gleiche gilt umgekehrt für die MS. In FDD-Systemen hingegen werden in UL und DL unabhängige Kanäle mit unterschiedlichen Übertragungsfunktionen genutzt. Um beispielsweise eine Linkadaptation im DL durchführen zu können, muss zunächst die MS den Kanal schätzen und das Ergebnis im nächsten UL an die BS signalisieren. Dieser Signalisierungsaufwand kann in TDD-Systemen eingespart werden.



## 4. Das SO-RRM-Systemkonzept

Die in Kapitel 3 vorgestellte OFDM Übertragungstechnik bietet die Möglichkeit, ein Gleichwellennetz aufzubauen. Ein Gleichwellennetz liegt vor, wenn alle Sender synchron auf derselben Trägerfrequenz übertragen. Auf der OFDM-Übertragungstechnik basierende Gleichwellennetze sind aus der Rundfunktechnik bekannt. Dort werden sie bereits seit Längerem für die terrestrische Ausstrahlung von Digitalfernsehen eingesetzt [Rei07].

Auch auf der OFDM-Übertragungstechnik basierende zellulare Mobilfunksysteme lassen sich als Gleichwellennetz aufbauen. In [GMRW03] und [RG04] wurde gezeigt, dass alle im System aktiven BS und MS zellübergreifend in Zeit und Trägerfrequenz synchronisiert werden können. Durch die Trägersynchronisation findet kein Übersprechen in benachbarte Subträger statt. Auch in Zeitrichtung liegen die von unterschiedlichen Stationen gesendeten OFDM-Symbole auf demselben Raster, sodass Nachbarkanalinterferenzen in einem vollständig synchronisierten Netz nicht auftreten. Funkressourcen (Zeit-Frequenz-Blöcke, vgl. Kapitel 3.2) werden entweder als Nutzsignale oder als Gleichkanalstörer wahrgenommen. Dadurch entsteht eine technische Möglichkeit, einzelne Ressourcen zellübergreifend zu nutzen. Diese Überlegungen führen auf das in dieser Arbeit vorgestellte selbstorganisierende Funkressourcenmanagement (SO-RRM). Das SO-RRM basiert auf drei technischen Voraussetzungen:

1. Anwendung der OFDM-Übertragungstechnik
2. Zellübergreifende Synchronisation aller BS und MS in Zeit und Trägerfrequenz
3. Messung der Gleichkanalinterferenzleistungen.

Um den Bezug zu herkömmlichen RRM-Konzepten herzustellen, erfolgt zunächst ein kurzer Überblick zum Thema Ressourcenvergabe in zellularen Mobilfunksystemen. Anschließend wird auf die Besonderheiten von SO-RRM eingegangen.

### 4.1. Zellulare Mobilfunksysteme

Ein wesentliches Merkmal zellulärer Funksysteme ist die Unterteilung des Versorgungsgebietes in eine Vielzahl von Funkzellen. Jede Funkzelle verfügt über eine fixe Infrastruktur



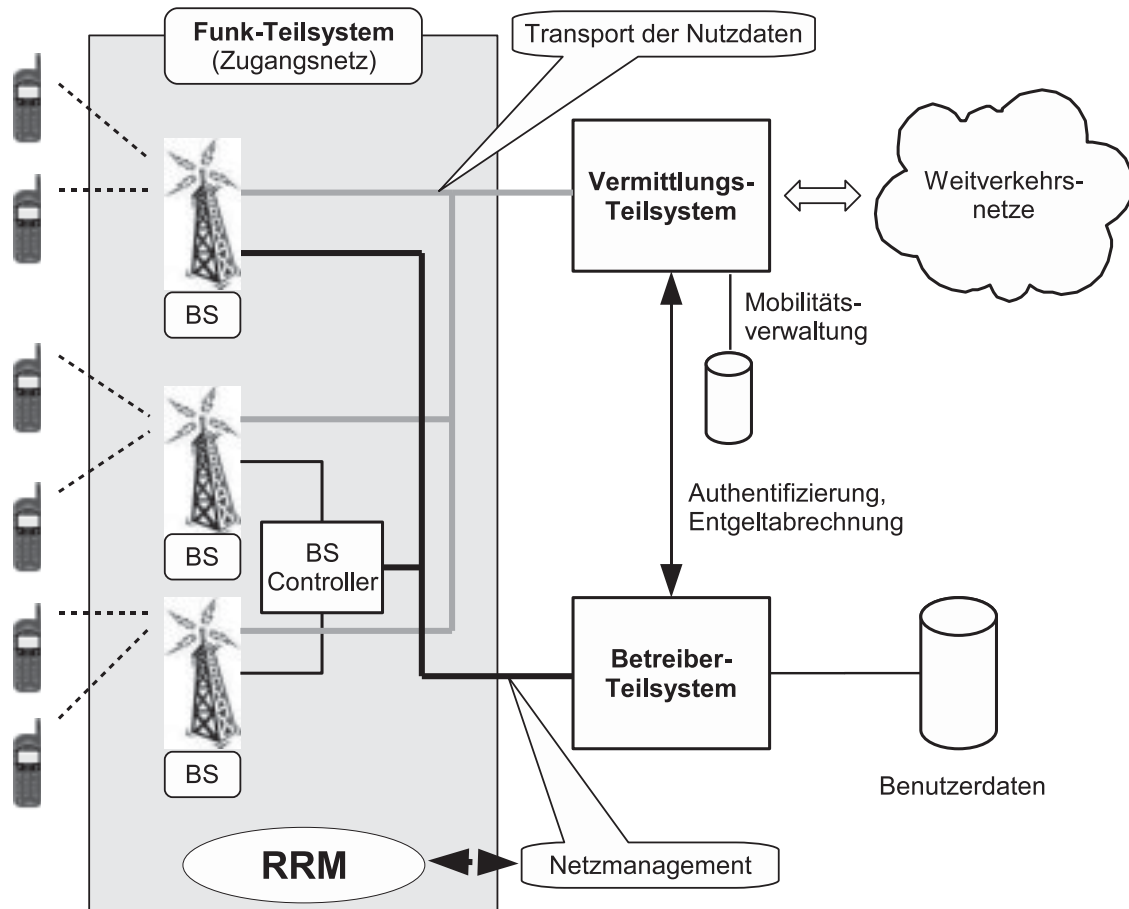


Bild 4.1.: Aufbau und Teilsysteme eines zellularen Mobilfunksystems [Wal00]

in Form einer BS. Die Infrastruktur zellulärer Funkssysteme lässt sich wie in Bild 4.1 gezeigt in drei Teilsysteme untergliedern: das Funk-Teilsystem, das Vermittlungs-Teilsystem und das Betreiber-Teilsystem [Wal00]. Für den GSM-Standard beispielsweise wird diese Aufteilung in [ETS98] definiert. Das Funk-Teilsystem besteht aus der Gesamtheit aller BS und BS-Kontrollknoten und dient den MS als Zugangsnetz zu Weitverkehrsnetzen („letzte Meile“). In diesem Teilsystem ist sämtliche Funktionalität für die drahtlose digitale Datenübertragung untergebracht. Das RRM bildet eine Untermenge dieser Funktionen.

Die Vergabe der Funkressourcen an die in ihrer Zelle befindlichen MS wird über das in den BS oder deren übergeordneten Kontrollknoten angesiedelte RRM koordiniert. Im Gegensatz zu sog. Ad-Hoc-Funknetzen [Rap02] erfolgt die Kommunikation ausschließlich sternförmig über die BS. Die MS haben keinen direkten Funkkontakt zueinander. In zellularen Mobilfunksystemen können aktive Funkverbindungen zur BS einer benachbarten Zelle weitergereicht werden. Dadurch können sich die MS frei zwischen den Zellen bewegen, ohne dass ihre Funkverbindung unterbrochen wird.

Motivation für die Aufteilung in Funkzellen ist die Wiederverwendbarkeit der Funkressourcen, sprich die simultane Nutzung derselben Funkbandbreite an verschiedenen

Orten. Frequenzen können umso häufiger wiederverwendet werden, je kleiner die Zellgrößen gewählt werden. Aus frequenzökonomischer Sicht steigt daher die Effizienz zellularer Funkssysteme mit abnehmenden Zellradien. Die Erhöhung der Effizienz durch den Einsatz kleiner Funkzellen hat jedoch zwei Nachteile. Zum einen steigen die Infrastrukturkosten aufgrund der zunehmenden Anzahl der zur Abdeckung des Versorgungsgebiets benötigten BS. Zum anderen erhöht sich in herkömmlichen Systemen der zweiten Generation der Aufwand für die Frequenzplanung [ZK01].

## 4.2. RRM-Techniken

Für einen stabilen Netzbetrieb muss das Funkressourcenmanagement für jede unterhaltene Funkverbindung einen hinreichend hohen Störabstand gewährleisten. Dieses Ziel steht in Konflikt zur ökonomischen Anforderung nach einer möglichst hohen Wiederverwendungsrate der Funkressourcen. Hauptaufgabe des RRM ist folglich, auf Gesamtsystemebene einen möglichst guten Kompromiss zwischen Stabilität und Effizienz des Netzbetriebs zu erzielen.

Wesentliche Störgröße in zellularen Funkssystemen sind die durch die Frequenzwiederverwendung entstehenden Gleichkanalinterferenzen (GKI). Zellen, in denen dieselben Funkressourcen verwendet werden, werden als Gleichkanalzellen bezeichnet. BS und MS, welche GKI für eine betrachtete Funkverbindung erzeugen, werden Gleichkanalstörer (GKS) genannt.

Die Höhe der GKI hängt aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen Ausbreitungseffekte maßgeblich vom Abstand zwischen BS oder MS und den GKS ab. Die GKI steigen mit zunehmender Wiederverwendungsrate an. Bei der Ressourcenvergabe muss das RRM sicherstellen, dass das Verhältnis aus Nutzleistung zu GKI einen vorgegebenen Schwellwert nicht unterschreitet. Es existieren zwei Möglichkeiten, um diese Vorgabe zu erfüllen.

Die erste Methode ist die statische Ressourcenvergabe (SRV). Mit dieser Technik wird ein minimaler Wiederverwendungsabstand und damit eine Maximalhöhe der GKI garantiert, indem bei der Netzplanung jeder Zelle ein Teil der Funkressourcen exklusiv zugeteilt wird. Dieselben Funkressourcen dürfen nur in hinreichend weit entfernten Zellen wiederverwendet werden, sodass die GKI einen Maximalwert nicht überschreiten. Die Wiederverwendungsabstände müssen auf den schlechtesten Fall ausgelegt werden, dass sich in allen Gleichkanalzellen aktive GKS befinden. Entscheidender Nachteil der SRV ist die eingeschränkte Bandbreitenverfügbarkeit in den Zellen. Räumliches Verkehrsaufkommen und Ressourcenbedarf müssen bereits während der Netzplanung geschätzt und auf die zu erwartenden Lastspitzen ausgelegt werden [Wal00]. Eine Adaption an veränderte Situationen ist nicht möglich.

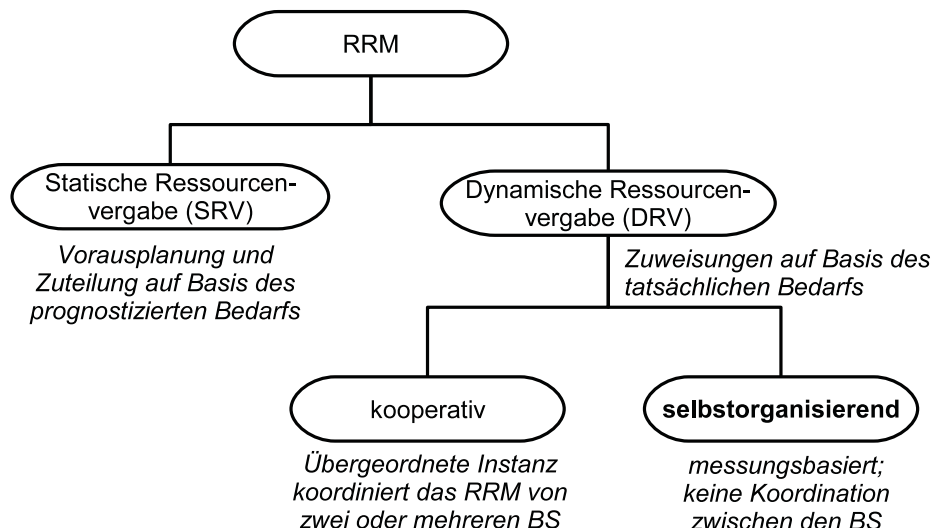


Bild 4.2.: Klassifizierung der RRM-Techniken

Die zweite, wesentlich flexiblere Methode zur Lösung der RRM-Aufgabe ist die dynamische Ressourcenvergabe (DRV). In DRV-basierten Systemen wird die Höhe der GKI im laufenden Betrieb ermittelt und eine darauf angepasste Zuteilung der Funkressourcen durchgeführt. In jeder Zelle kann auf die gesamte Systembandbreite zurückgegriffen werden. Im Vergleich zur SRV entfällt die Notwendigkeit einer Vorhersage des zu erwartenden Verkehrsangebots. Die Ressourcenvergabe erfolgt auf Basis des tatsächlichen momentanen Bandbreitenbedarfs.

Bild 4.2 schematisiert die diskutierten RRM-Techniken. Ein umfassender Überblick zum Thema Ressourcenvergabe ist darüber hinaus in [KN96] zu finden.

#### 4.2.1. Statische Ressourcenvergabe

In Systemen mit SRV werden die insgesamt  $N_R$  im System verfügbaren Funkressourcen gleichmäßig innerhalb einer Gruppe von  $C$  benachbarten Funkzellen aufgeteilt. Jede Zelle innerhalb eines solchen Clusters (*engl.* Gruppe, Haufen) bekommt folglich  $N_R/C$  Ressourcen exklusiv zugewiesen. Das RRM des weltweit verbreiteten GSM-Mobilfunksystems basiert aufs SRV [ETS98].

Im Modell wird das Versorgungsgebiet zunächst flächendeckend in gleich große Hexagone zerlegt. Hierin lässt sich wie in Bild 4.3 gezeigt ein von der Clustergröße  $C$  abhängiger Frequenzplan erstellen. Um vollständige Flächendeckung erreichen zu können, muss die Clustergröße die Bedingung

$$C = i^2 + ij + j^2 \quad (4.1)$$

erfüllen mit den natürlichen Zahlen  $i$  und  $j$  [Lee95]. Jede Zelle hat in diesem Schema wie in Bild 4.3 zu sehen sechs nächste Gleichkanalzellen auf dem sog. ersten Störerring. Je größer

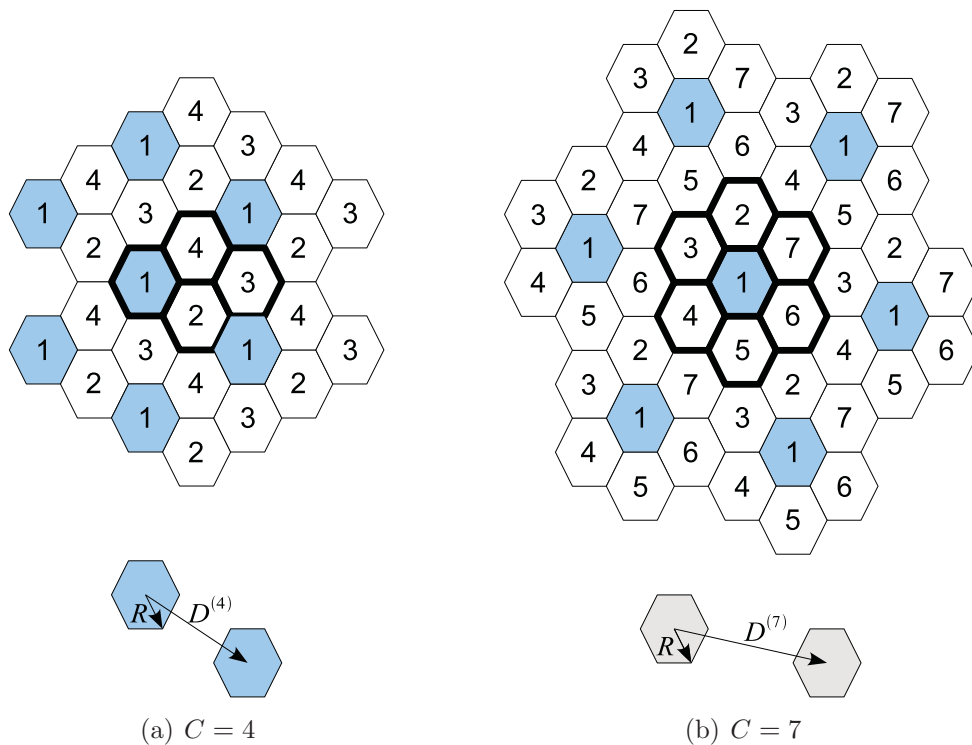


Bild 4.3.: Beispiel für Frequenzpläne bei statischer Ressourcenvergabe

die Clustergröße gewählt wird, desto niedriger sind bei SRV die Gleichkanalinterferenzen aufgrund der höheren Abstände  $D^{(C)}$  zwischen den Gleichkanalzellen.

Das mittlere Signal-zu-Interferenz-plus-Rausch-Leistungsverhältnis (*engl.* signal to interference plus noise ratio, SINR) des vom Sender  $b$  mit Sendeleistung  $P_S^b$  versorgten, im Abstand  $a^{b,m}$  entfernten und um den Lognormalfadingfaktor  $\eta^{b,m}$  abgeschatteten Empfängers  $m$  wird definiert als

$$\bar{\gamma}^m = \frac{P_S^b \cdot (a^{b,m})^{-\alpha} \eta^{b,m}}{\underbrace{\sum_{\beta=1}^{N_{\text{GKI}}} P_S^\beta \cdot (a^{\beta,m})^{-\alpha} \eta^{j,m}}_{\text{GKI}} + N}. \quad (4.2)$$

Ist die Anzahl der Gleichkanalstörer  $N_{\text{GKS}}$  hinreichend groß, kann die Leistung der Gleichkanalinterferenzen nach dem zentralen Grenzwertsatz als additives weißes Gauß'sches Rauschen (AWGR) angenommen werden. Die Leistung des Empfängerrauschens

$$N = F \cdot K_B \cdot \Theta \cdot B \quad (4.3)$$

berechnet sich aus der Rauschzahl  $F$  (typisch  $5 \dots 10$ ), der Boltzmann-Konstante  $K_B$  ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Ws/K), der Temperatur  $\Theta$  in Kelvin und der Systembandbreite  $B$  in Hz [Wal00].

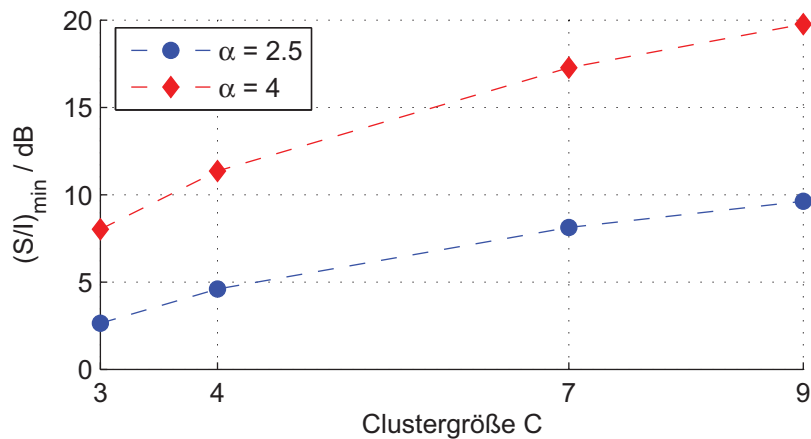


Bild 4.4.: Worst-Case-Störabstand bei SRV in Abhängigkeit von Clustergröße  $C$  und Dämpfungskoeffizient  $\alpha$ ; s. Gln. (4.1) und (4.4)

Sie liegt in zellularen Systemen in der Regel deutlich unterhalb der GKI-Summenleistung. Wegen  $GKI \gg N$  werden zellulare Funkssysteme als interferenzlimitiert bezeichnet [Lin93, Rap02]. Bei der Modellbildung wird auch für  $N$  die AWGR-Annahme getroffen.

Aus Gl. (4.2) und Bild 4.3 wird deutlich, dass die GKI mit steigender Clustergröße  $C$  ab- und die Störabstände zunehmen. Für die analytische Abschätzung des erzielbaren Signalstörabstands in zellularen Funkssystemen mit SRV können außerhalb des ersten Störerrings liegende Gleichkanalzellen vernachlässigt werden [Wal00, ZK01]. Der mittlere Störabstand ist bei hexagonaler Zellstruktur unter der Annahme einer für alle Funkstationen gleichen Sendeleistung und unter Vernachlässigung des Empfängerrauschens ausschließlich vom Quotienten

$$Q = \frac{D^{(C)}}{R} = \sqrt{3C}$$

abhängig [ZK01].  $R$  ist der Zellradius und  $D^{(C)}$  der von der Clustergröße  $C$  abhängige Abstand zur nächsten Gleichkanalzelle. Der niedrigste Störabstand ergibt sich für am Zellrand befindliche MS, wenn ihre Ressourcen in allen 6 Gleichkanalzellen des ersten Störerrings simultan wiederverwendet werden. In [Rap02] wird unter der Annahme  $I \gg N$  eine Näherungsformel für den Störabstand des DL einer derart gestörten Funkverbindung hergeleitet. Das im schlechtesten Fall erzielte Verhältnis aus Signal- zu Interferenzleistung (SIR) berechnet sich aus der Nutzsignalleistung  $S$  und der Interferenzleistung  $I$  der empfangenen Gleichkanalstörer zu

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{\min} = \frac{1}{2(Q-1)^{-\alpha} + 2(Q+1)^{-\alpha} + 2Q^{-\alpha}}. \quad (4.4)$$

In Bild 4.4 ist der für verschiedene Clustergrößen  $C$  berechnete Störabstand für zwei Dämpfungskoeffizienten dargestellt. Ein für Mikro- und Pikozenen (kleine Zellen mit

Radien von einigen 100 m) typischer Wert ist  $\alpha = 2.5$ . In Makrozellen (Zellradien von einigen km) hingegen sind Dämpfungskoeffizienten in der Größenordnung  $\alpha = 4$  zu erwarten. Diese Annahmen sind durch zahlreiche Messungen bestätigt worden, z. B. [Rap02] und insbesondere [BHS05]. Die in Bild 4.4 gezeigten Ergebnisse der Abschätzung zeigen deutlich, dass bei Anwendung von SRV in Mikrozellen aufgrund der geringeren Dämpfung der Interferenzsignale der GKS größere Wiederverwendungsabstände eingeplant werden müssen als in Makrozellen. Die Ressourceneffizienz ist daher in Mikrozellen geringer als in Makrozellen. Folglich ist es gerade für Funknetze mit kleinen Zellen und somit in Versorgungsgebieten mit hohem Verkehrsaufkommen sinnvoll, nach Alternativen zu SRV zu forschen.

### 4.2.2. Dynamische Ressourcenvergabe

In Funksystemen mit dynamischer Ressourcenvergabe (DRV) wird keine feste Aufteilung der Funkressourcen nach einem räumlichen Wiederverwendungsschema vorgenommen. Stattdessen werden Ressourcen flexibel und bedarfsangepasst im laufenden Betrieb ausgewählt und den Benutzern zugewiesen.

DRV-Algorithmen werden anhand der Art der von den BS ausgewerteten Informationen klassifiziert [KN96]. Gemäß Bild 4.2 wird unterschieden zwischen kooperativen Verfahren, welche Kenntnisse über Belegungsinformationen in benachbarten Funkzellen auswerten, und selbstorganisierenden Verfahren, die allein auf Basis von Empfangssignal- und/oder Interferenzpegelmessungen operieren.

#### 4.2.2.1. Kooperative Verfahren

In Systemen mit kooperativer DRV werden die Belegungsentscheidungen von mehreren BS gemeinsam getroffen. Im Extremfall existiert eine einzige Zentraleinheit für das RRM, welcher sämtliche Information aller BS zur Verfügung steht. Im letztgenannten Fall wird von zentraler Ressourcenvergabe gesprochen [KN96]. Dieser müssen sämtliche für das RRM benötigte Informationen aus allen Funkzellen des Netzes mitgeteilt werden. Durch den hohen Signalisierungsaufwand können starke Verzögerungen beim Verbindungsaufbau entstehen. DRV-Algorithmen stellen aufgrund der hohen Rechenkomplexität eine große Herausforderung hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit dar, da es sich um NP-vollständige Probleme handelt [KS99].

Ein Beispiel für zentrale Ressourcenvergabe ist der in [EM83] als „optimale Vergabestrategie“ vorgestellte Maximum-Packing (MP)-Algorithmus. Dieser führt eine Liste über die aktuellen Kanalbelegungen. Da a priori bekannt ist, welche Zellen gleichzeitig eine Funkressource nutzen dürfen, kann jederzeit für jede Zelle ermittelt werden, welche Ressourcen einem neuen Benutzer zugeteilt werden können, ohne eine bestehende Verbindung zu stören. Stehen bei einer Anfrage in dieser Liste keine freien Ressourcen zur Verfügung,

wird durch systemweite Umbelegungen versucht, der betroffenen Zelle mindestens eine zusätzliche Ressource zu beschaffen, mit welcher der anfragende Benutzer versorgt werden kann. Die Ergebnisse in [KS99] zeigen, dass MP in Szenarien mit geringer bis mittlerer Verkehrslast mehr Verbindungsanfragen erfolgreich bedienen kann als SRV und dezentrale DRV-Verfahren, bei hohen Lasten jedoch schlechteres Verhalten aufweist. In allen zitierten Quellen wird betont, dass sich MP aufgrund der hohen Rechenkomplexität und der hohen Umbelegungsraten in größeren zellularen Systemen nicht anwenden lässt. Zudem werden in [CPLR02] eine Reihe von dezentralen verkehrsadaptiven DRV-Verfahren (s.u.) vorgestellt, welche alle in den durchgeführten Simulationen eine höhere Leistungsfähigkeit aufweisen als MP. Zentraler DRV ist aus den genannten Gründen keine praktische Relevanz zuzumessen.

Verkehrsadaptive DRV-Verfahren, auch zellbasierte Verfahren genannt [KN96], basieren auf der Annahme, dass jeder BS eine Negativliste benachbarter BS vorgegeben wird, deren aktuell genutzte Ressourcen sie nicht wiederverwenden darf. Durch diesen Ausschluss kann bei geeigneter Wahl der Negativlisten sichergestellt werden, dass ein minimaler Wiederverwendungsabstand eingehalten wird. Bevor eine BS eine neue Ressource belegt, fragt sie zunächst die aktuellen Belegungslisten aller auf ihrer Negativliste geführten BS ab. Alle Ressourcen, die zum Anfragezeitpunkt nicht von dieser BS genutzt werden, können von der BS belegt werden. In die Belegungsentscheidungen können neben der notwendigen Bedingung eines minimalen Wiederverwendungsabstands weitere Informationen verfahrensspezifisch einbezogen werden wie z. B. die Anzahl der in der eigenen Zelle bereits belegten Ressourcen [IC93]. In [CPLR02] werden Strategien vorgestellt, welche durch kurzzeitige Verletzungen der Wiederverwendungsvorgaben die maximal bedienbare Verkehrslast erheblich steigern können.

In der Literatur existieren zudem zahlreiche Ansätze zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von SRV-basierten Systemen durch kurzfristiges Verleihen von Funkressourcen zwischen benachbarten Zellen (*engl.* channel borrowing schemes, s. Referenzen in [KN96]). Auch diese können als verkehrsadaptive DRV-Verfahren klassifiziert werden. Nachteil dieser Verfahren ist zum einen der hohe Signalisierungsaufwand zwischen den Zellen, durch welchen zusätzliche Verzögerungen beim Verbindungsaufbau auftreten. Zum anderen müssen die ausgeliehenen Ressourcen für alle innerhalb des Mindestwiederverwendungsabstands zur leihenden Zelle liegenden BS gesperrt werden (*engl.* channel locking). Dadurch erhöht sich der Wiederverwendungsabstand für die Dauer der Beleihung, sodass die Anzahl verfügbarer Ressourcen in den betroffenen Nachbarzellen sinkt.

#### 4.2.2.2. Selbstorganisierende Verfahren

In zellularen Mobilfunksystemen mit selbstorganisierender DRV entscheiden die BS autonom über die Ressourcenvergabe auf Basis von lokal zur Verfügung stehenden Informationen. DRV-basierte Systeme bieten die maximale Flexibilität bezüglich der Ressourcen-



nutzung, da weder eine Vorausplanung noch eine zellübergreifende Kommunikation im laufenden Netzbetrieb benötigt werden.

In [CFIM94] werden untere und obere Schranken für die Blockierungswahrscheinlichkeiten selbstorganisierender DRV-Algorithmen für zellulare Funkssysteme hergeleitet, ohne konkrete Angaben zur Realisierung solcher Verfahren zu machen. Die Herleitung erfolgt unter der vereinfachenden Annahme, dass für eine Funkressource immer dann ein hinreichender Störabstand gewährleistet ist, wenn sie in den unmittelbar angrenzenden Nachbarzellen nicht genutzt wird. Genau diese Einschränkung gilt auch für ein SRV-System mit Clustergröße  $C = 3$ , mit welchem das betrachtete DRV-System verglichen wird. Die Benutzerverteilung wird als gleichverteilt angenommen und das Verkehrsangebot durch einen Poisson-Prozess modelliert. Die zwei wichtigen Ergebnisse dieser Studie sind erstens, dass DRV-Verfahren grundsätzlich niedrigere Blockierungswahrscheinlichkeiten aufweisen als SRV, und zweitens, dass bei der Aufnahme neuer Funkverbindungen die Blockierungswahrscheinlichkeit durch eine geringe Anzahl an Umbelegungen bestehender Ressourcenbelegungen deutlich gesenkt werden kann. Zudem ist es laut dieser Studie effizienter, durch aggressive Vergabestrategien Verbindungsabbrüche bis zu einem gewissen Maß in Kauf zu nehmen und die betroffenen Verbindungen durch die Auswahl neuer Ressourcen neu aufzubauen, als Abbrüche durch vorsichtige Belegungsstrategien zu vermeiden.

Unter denselben idealisierten Annahmen wie in [CFIM94] wird in [CFS94] gezeigt, dass mit einer Selbstorganisation nahezu dieselbe Anzahl von Funkverbindungen unterhalten werden kann wie mit dem bereits vorgestellten zentralen MP-Verfahren.

Die Ressourcenauswahl kann bei selbstorganisierender DRV entweder zufällig oder auf Basis von Messergebnissen erfolgen. Da eine zufällige Ressourcenauswahl erwartungsgemäß schlechtere Ergebnisse liefert als messungsbasierte Verfahren [KN96], wird die Betrachtung auf messungsbasierte Verfahren beschränkt. Eine technisch einfach zu ermittelnde Größe sind die ressourcenspezifischen Interferenzleistungen. In der Literatur findet sich eine große Anzahl an Zuteilungsverfahren, die zunächst die Interferenzleistung aller Ressourcen messen und anschließend die Ressource mit der geringsten Interferenz für die Vergabe auswählen. Diese Strategie wird im Folgenden als SO-GI bezeichnet.

In [Chu93] werden notwendige Rahmenbedingungen für die Anwendbarkeit von SO-GI-basierter DRV in zellularen TDMA/FDMA-Funksystemen erörtert. Insbesondere wird eine zellübergreifende Synchronisation aller BS und MS gefordert. Besonders hingewiesen wird auf die Notwendigkeit, bei der Ressourcenauswahl sowohl die Messungen der BS als auch die der MS zu berücksichtigen, da in UL und DL unterschiedliche Gleichkanalinterferenzverhältnisse vorliegen. Es wird ein Vergabeprozess vorgeschlagen, in dem die BS eine Liste der Ressourcen mit den geringsten UL-Interferenzen an die MS sendet. Die MS misst für diese Ressourcen ebenfalls die Interferenzleistungen und sucht sich schließlich die



Ressource mit der geringsten DL-Interferenz für den Verbindungsaufbau aus<sup>1</sup>. In [Chu93] wird die Leistungsfähigkeit des DRV-Verfahrens anhand der Verteilungsfunktion aller in den Simulationen beobachteten SIRs bewertet. Es wird festgestellt, dass die balancierte Ressourcenauswahl unter Berücksichtigung von UL und DL insgesamt höhere SIRs liefert, als wenn allein auf Basis der UL- oder DL-Messungen entschieden wird.

Eine umfangreiche Simulationsstudie über interferenzmessungsbasierte DRV-Algorithmen findet sich in [CC96]. Neben der Auswahl nach geringster Interferenz (SO-GI) werden zusätzlich folgende Varianten untersucht:

- SO-GIUS (geringste Interferenz unterhalb eines Schwellwerts): Wie SO-GI, mit der zusätzlichen Einschränkung, dass die gemessene Interferenz einen gegebenen Schwellwert nicht überschreiten darf.
- SO-HIUS (höchste Interferenz unterhalb eines Schwellwerts): Von allen Ressourcen, deren Interferenz unterhalb eines gegebenen Schwellwerts liegt, wird diejenige mit der maximalen Interferenzleistung ausgewählt (MIN-MAX-Auswahl).
- Hybrides Verfahren aus SO-GI und SO-HIUS: Liegt die höchste Interferenzleistung aller gemessenen Ressourcen unterhalb eines gegebenen Schwellwerts, wird nach SO-HIUS verfahren, ansonsten nach SO-GI.
- SO-NRUS (niedrigste Ressource unter Schwellwert): Die Ressourcen werden in aufsteigender Indexreihenfolge durchlaufen. Es wird diejenige Ressource ausgewählt, die bei diesem Durchlauf als erste eine Interferenzleistung unterhalb eines gegebenen Schwellwerts aufweist.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Algorithmen stark von den eingestellten Amplitudenschwellen abhängen. Die jeweils optimalen Schwellwerte erwiesen sich als stark vom betrachteten Szenario abhängig. Für deren Dimensionierung konnten keine allgemeinen Zusammenhänge abgeleitet werden. Als Resultat wird in [CC96] festgestellt, dass das einfache, ohne einen Schwellwert-Parameter auskommende SO-GI-Verfahren im Vergleich zu den anderen Verfahren in allen untersuchten Szenarien eine mindestens ebenbürtige, meist sogar bessere Leistungsfähigkeit aufweist.

Die höhere Effizienz SO-basierter DRV im Vergleich zu SRV wurde in vielen weiteren Studien bestätigt, so z. B. [Kun99, Loz02, CKS02, GMRW03].

Im Rahmen eines Systemvorschlags für ein Mobilfunksystem der 3. Generation (UMTS) wird in [WOE<sup>+</sup>97] erstmalig die besondere Tauglichkeit der OFDM-Übertragungstechnik

---

<sup>1</sup>Dieses Verfahren stellt für die MS eine Vereinfachung des ansonsten ähnlichen Verfahrens dar, welches im heute weitverbreiteten DECT-System [ETS96] für Schnurlostelefone verwendet wird. Bei DECT messen die MS die Interferenzleistungen aller 120 zur Verfügung stehenden Kanäle, bevor ein Verbindungsaufbau initiiert wird.

für die Etablierung flexibler zellübergreifender Ressourcenvergabeschemata diskutiert. Da alle Sender bzw. Empfänger für jedes OFDM-Symbol stets die vollständige IFFT bzw. FFT berechnen, ist es in OFDM-basierten Systemen aus technischer Sicht besonders einfach, einer Verbindung eine variable Anzahl an Ressourcen bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen. In der Studie werden ein SRV- und ein SO-GI-basiertes RRM anhand von Simulationsergebnissen verglichen. Abweichend von den bislang präsentierten Studien werden in [WOE<sup>+</sup>97] Szenarien mit zwei simultan aktiven Klassen von Verbindungen betrachtet: Sprachverbindungen mit niedriger sowie Datenverbindungen mit hoher Datenrate. Aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse geht SO-GI insbesondere in den Szenarien mit hohen Datenraten als deutlicher Gewinner hervor.

Die Untersuchungen in [AJK99] und [Tab01] betrachten das Verhalten von SO-GI-basiertem RRM bei ungleichförmig verteiltem Benutzeraufkommen. In [AJK99] wird ein rechteckförmiges Versorgungsgebiet angenommen, welches einen rechteckförmigen Streifen mit im Vergleich zum restlichen Gebiet deutlich höherer Benutzerdichte enthält. In [Tab01] hingegen werden in den Simulationen für jede Funkzelle unterschiedliche mittlere Ankunfts-raten eingestellt. Beide Studien stellen übereinstimmend fest, dass die Leistungsfähigkeit von Systemen mit SRV mit zunehmender Asymmetrie des Verkehrsangebots immer stärker abfällt. Die betrachteten SO-GI-Ansätze hingegen können sich flexibel an die jeweiligen Nachfragesituationen anpassen und sind daher bei vor allem bei ungleichförmigem Benutzeraufkommen um ein Vielfaches effizienter als SRV.

### 4.3. SO-RRM

Das in dieser Arbeit untersuchte SO-RRM ist ein speziell auf die Anwendung der OFDM-Übertragungstechnik zugeschnittenes DRV-Konzept, das für zellulare Mobilfunksysteme der vierten Generation vorgeschlagen wird.

Die in [GMRW03] und [RG04] beschriebene zellübergreifende Synchronisation ist eine notwendige Voraussetzung für den Aufbau eines SO-RRM-Systems. In einem vollständig synchronisierten Netz treten zwar Gleichkanalinterferenzen, aber keine Nachbarkanalstörungen auf. Folglich können die GKI für alle Ressourcen präzise gemessen werden. Im weiteren Verlauf wird stets von einem vollständig synchronisierten Netz ausgegangen.

Ziel ist das Erreichen einer hohen Flexibilität bezüglich der Nutzung knapper Funkressourcen. Durch Selbstorganisation soll eine effektive und effiziente Bandbreitennutzung erzielt werden, ohne dass hierfür eine aufwändige Vorausplanung vor der Inbetriebnahme benötigt wird.

Bild 4.5 zeigt die Unterschiede zwischen einem herkömmlichen System SRV und einem SO-RRM-System hinsichtlich der Verfügbarkeit der Funkressourcen. Mit SO-RRM kann in jeder Zelle über die gesamte Systembandbreite verfügt werden. Funkressourcen werden

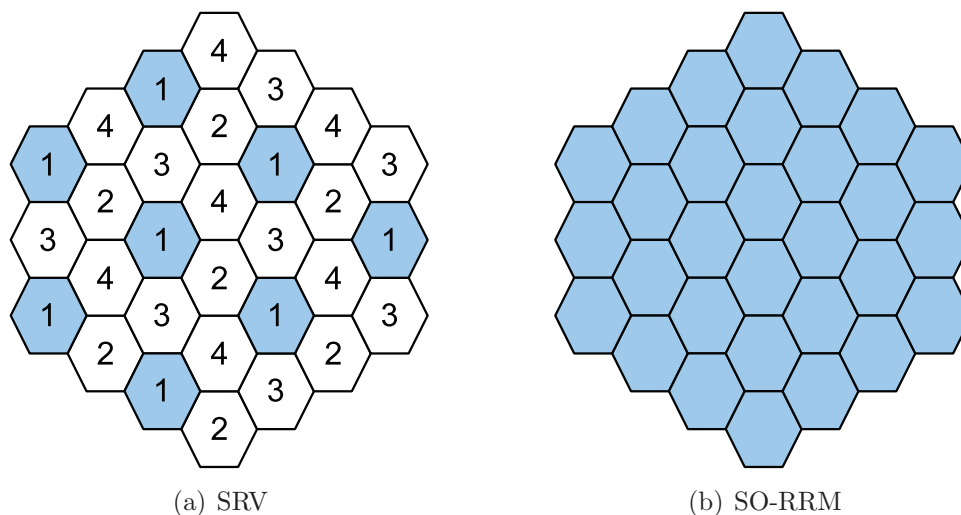


Bild 4.5.: Verfügbarkeit der Funkressourcen mit SRV und mit SO-RRM

bedarfsangepasst immer dann und dort belegt, wo sie gerade tatsächlich benötigt werden. In zukünftigen Anwendungsszenarien mit einer Vielzahl unterschiedlicher Dienste, in denen das lokale Verkehrsaufkommen nur schwer vorhersagbar ist, wird eine solche Flexibilität dringend benötigt.

Aus zwei Gründen muss mit stark schwankendem Ressourcenbedarf in den Zellen gerechnet werden. Zum einen ergeben sich bei geringen Zellradien kurze Verweildauern der MS in einer Zelle. Zum anderen werden Dienste mit variablen Datenraten genutzt. Es wird eine große Anzahl verschiedener Dienste mit unterschiedlichem Datenratenbedarf existieren. Im Versorgungsgebiet wird es daher immer wieder zu temporären Hot-Spot-Situationen<sup>2</sup> kommen, in denen der Ressourcenbedarf lokal stark schwankt und sich kurzzeitig auf einzelne Zellen fokussiert. Die geschilderten Annahmen verdeutlichen die Notwendigkeit einer hohen Flexibilität bei der Ressourcenverfügbarkeit. Ausreichend Flexibilität kann nur mit einem auf DRV basierenden SO-RRM erzielt werden.

### 4.3.1. Systemstruktur

Bild 4.6 zeigt die Struktur eines zellularen Mobilfunksystems mit SO-RRM. Die Funkzellen sind hier vereinfachend als gleich große Hexagonflächen dargestellt mit jeweils einer BS im Zentrum der Zelle. Es wird nicht zwingend von einem flächendeckenden Versorgungsgebiet ausgegangen. Das vorgestellte SO-RRM-System eignet sich ebenso wie in Bild 4.6 angedeutet für den Inselbetrieb. Durch die Selbstorganisation ist keine starre Festlegung der Zellenanordnung notwendig. Das vorgeschlagene System kann flexibel um weitere

<sup>2</sup>Ein Hot-Spot liegt vor, wenn überdurchschnittlich viele MS in einer Zelle aktiv sind und/oder wenn einige wenige MS mit sehr hohen Datenraten übertragen wollen.

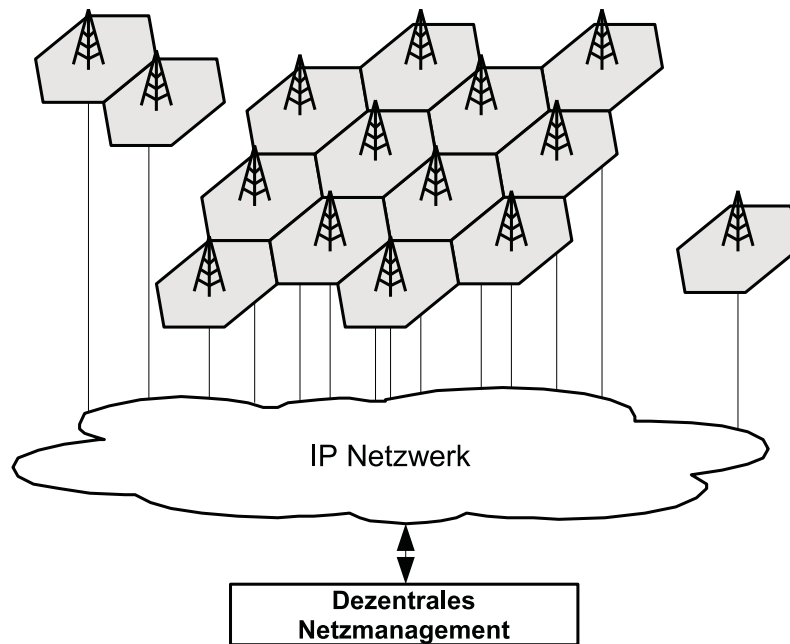


Bild 4.6.: Struktur eines synchronisierten zellularen OFDM-Systems mit SO-RRM

Funkzellen ergänzt werden, ohne dass hierfür bestehende Infrastruktur umkonfiguriert werden muss.

Festnetzseitig werden Weitverkehrsnetze künftig vollständig auf dem IP-Protokoll basieren (All-IP-Netzwerke, „Next Generation Networks“ [Sie02]). UMTS Release 5 ist das erste kommerzielle zellulare Funknetz, in dem eine solche Technik zur Anbindung der BS an Weitverkehrsnetze eingesetzt wird [BS04]. Es ist daher anzunehmen, dass auch in künftigen 4G-Systemen die BS an ein All-IP-Netzwerk angeschlossen werden. In solchen Netzen können Sprach- und beliebige andere Nutzdaten mit derselben Technik transportiert werden. All-IP-Netzwerke lassen sich dezentral verwalten und steuern [Sie02]. Hierdurch verringern sich Komplexität und Kosten der BS, da keine funknetzspezifische Hardware für das Netzmanagement benötigt wird. Ein breitbandiger Internetanschluss wird auf Festnetzseite ausreichen, um die BS in Betrieb nehmen zu können. Da die BS durch das SO-RRM autonom agieren, lässt sich die Infrastruktur des vorgeschlagenen zellularen Funknetzes flexibel, schnell und kosteneffizient aufbauen.

### 4.3.2. Zellübergreifende Synchronisation in Zeit- und Frequenzrichtung

Wie bereits zu Beginn des Kapitels dargelegt ist die in [GMRW03] und [RG04] beschriebene zellübergreifende Synchronisation eine notwendige Voraussetzung für den Aufbau eines SO-RRM-Systems. In einem vollständig synchronisierten Netz treten zwar Gleichkanalinterferenzen, aber keine Nachbarkanalstörungen auf. Folglich können die GKI für alle

| Index | PHY Modus                  | Bits / Symbol       | Mindest-SNR        |
|-------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| 1     | QPSK, $r = \frac{1}{2}$    | $\varphi^{(1)} = 1$ | $\Gamma_1 = 4$ dB  |
| 2     | 16-QAM, $r = \frac{1}{2}$  | $\varphi^{(2)} = 2$ | $\Gamma_2 = 9$ dB  |
| 3     | 64-QAM, $r = \frac{1}{2}$  | $\varphi^{(3)} = 3$ | $\Gamma_3 = 14$ dB |
| 4     | 256-QAM, $r = \frac{1}{2}$ | $\varphi^{(4)} = 4$ | $\Gamma_4 = 18$ dB |

Tabelle 4.1.: Angenommenes Linkadaptionsschema

Ressourcen mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Im weiteren Verlauf wird stets von einem vollständig synchronisierten Netz ausgegangen.

### 4.3.3. Physikalische Übertragungsmodi und adaptive Modulation

Die Kombination aus Modulationsverfahren und Coderate wird als physikalischer Übertragungsmodus (PHY Modus) bezeichnet. Für die quantitativen Untersuchungen wird in dieser Arbeit der in Tabelle 4.1 angegebene Satz von PHY Modi angenommen. Alle vier Modi verwenden ein  $M$ -QAM-Modulationsalphabet. Für die Kanalcodierung wird ein Faltungscode mit der Coderate  $r = \frac{1}{2}$  eingesetzt [Pro95]. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier gewählten PHY Modi sowie deren Anzahl keinerlei Einschränkung des Systementwurfs darstellen. Das vorgeschlagene SO-RRM-Konzept lässt sich mit jedem beliebigen Satz von PHY Modi verwenden. Die PHY Modi in Tabelle 4.1 bilden lediglich die Basis für die quantitativen Untersuchungen in dieser Arbeit.

Die dynamische Anpassung des Modulationsverfahrens an den Zustand des Funkkanals wird als adaptive Modulation bezeichnet [KH00, LGRZ03]. Kriterium für die Auswahl eines PHY Modus ist der Störabstand einer Funkverbindung. Das Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis (SNR) beeinflusst maßgeblich die Bitfehlerrate (*engl.* bit error rate, BER) einer digitalen Übertragung [Lük95]. Für jeden PHY Modus  $\varphi$  lässt sich ein Mindest-SNR  $\Gamma_\varphi$  bestimmen, sodass für alle SNRs  $\gamma \geq \Gamma_\varphi$  die BER unterhalb einer maximal tolerierten Grenze liegt. Die Wahl der Schwellwerte  $\Gamma_\varphi$  ist abhängig von der verfolgten Strategie: Als Zielgröße lassen sich z. B. entweder die mittlere Paketverzögerung oder der Gesamtpaketdurchsatz optimieren [Lam04].

Im Rahmen der quantitativen Untersuchungen wird in dieser Arbeit ein verzögerungsorientierter Adaptierungsansatz [Lam04] gewählt. Es wird vorausgesetzt, dass der Empfänger fehlerhafte Pakete erkennen und mittels eines geeigneten ARQ-Verfahrens (*engl.* automatic repeat request, ARQ) [Wal00] die erneute Übertragung fehlerhafter Pakete anfordern kann. Die Schwellwerte  $\Gamma_\varphi$  werden so gewählt, dass die Paketfehlerrate (*engl.* packet error rate, PER) wie in Bild 4.7 verdeutlicht für alle  $\gamma \geq \Gamma_\varphi$  unterhalb von  $10^{-2}$  liegt. Die in Bild 4.7 gezeigten Kurven und die in Tabelle 4.1 angegebenen Mindest-SNR-Schwellen  $\Gamma_\varphi$  stammen aus mit Rechnersimulation unter Annahme eines AWGR-Kanals gewonnenen Bitfehlerkurven. Die Paketgröße wurde zu  $L_{\text{MAC}} = 240$  Bit angenommen. Die PER berechnet sich aus

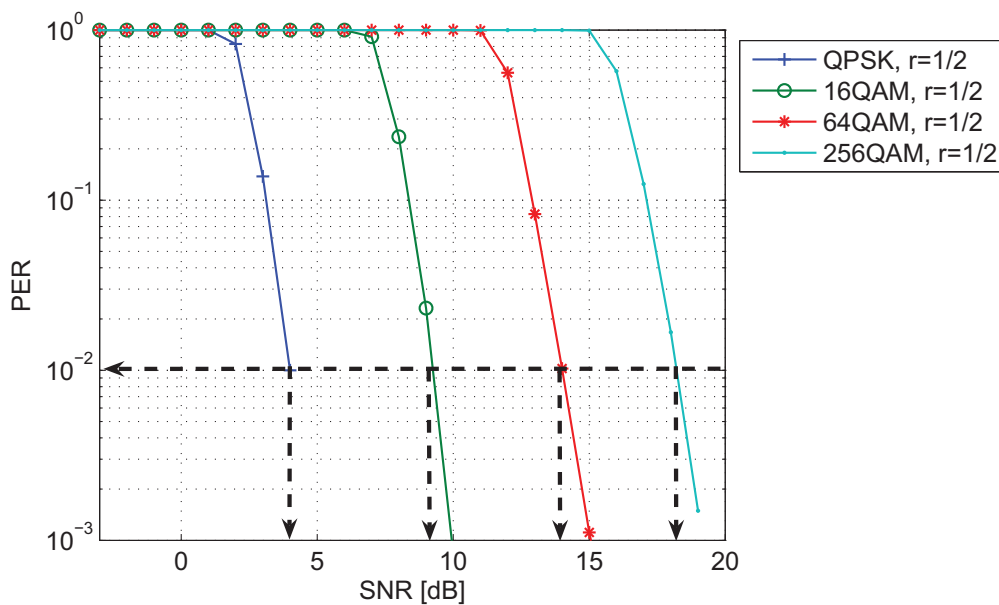


Bild 4.7.: PER-Kurven der vier möglichen PHY Modi im AWGR-Kanal bei einer Paketlänge von  $L_{\text{MAC}} = 240$  bit

der Bifehlerrate zu

$$\text{PER}_\varphi = 1 - (1 - \text{BER}_\varphi)^{L_{\text{MAC}}}.$$

#### 4.3.4. Ressourcenaufteilung mit FDMA

Als Vielfachzugriffstechnik wird OFDM-FDMA eingesetzt. Ein wichtiger Vorteil gegenüber TDMA liegt in der feineren Ressourcengranularität von FDMA. Je feiner die Bandbreite aufgeteilt und damit die Ressourcenanzahl erhöht wird, desto flexibler werden die Möglichkeiten zur bedarfsgerechten Ressourcenzuteilung. Allerdings erhöht sich mit steigender Ressourcenanzahl auch der zur Adressierung notwendige Overhead, was sich negativ auf den Durchsatz auswirkt [GPKW04]. Der zweite Grund für die Wahl von FDMA ist die Möglichkeit, entweder Frequenzdiversität auszunutzen und damit eine robuste Übertragung bei frequenzselektiven Kanälen zu erzielen oder aber mittels kanaladaptiver Zuteilungsalgorithmen eine Steigerung der Bandbreiteneffizienz erreichen zu können. Die vorliegende Arbeit wird durch die Ergebnisse in [Grü00] motiviert, worin sich kanaladaptives FDMA als effizientestes Vielfachzugriffsverfahren für OFDM-Funksysteme erwiesen hat.

Weiterhin wird angenommen, dass eine TDD-Rahmenstruktur vorliegt. Jeder Zugriffsrahmen wird je zur Hälfte in eine DL- und eine UL-Phase unterteilt. In praktischen Anwendungen kann eine beliebige Aufteilung zwischen DL- und UL-Anteil vorgenommen werden; für die Untersuchungen in dieser Arbeit ist dies jedoch nicht von Bedeutung. Die in dieser Arbeit angenommene Rahmenstruktur ist in Bild 5.2 dargestellt.



# 5. Messung der Interferenz- und Nutzsignalleistung

Da bei einer Selbstorganisation den BS keinerlei explizite Informationen über die Ressourcenbelegungen in den Nachbarzellen vorliegen, müssen sämtliche Entscheidungen über die Nutzung von Funkressourcen allein auf Basis von Messergebnissen erfolgen. Gemessen werden können die Leistung der GKI und der Nutzsignale. Wenn die GKS in ihrer Intensität bekannt sind, kann diese Information bei der Ressourcenauswahl ausgenutzt werden.

## 5.1. Interferenzleistung der Gleichkanalstörer

Es wird angenommen, dass die Ressource  $k$ , deren GKI gemessen wird, noch nicht in der eigenen Zelle genutzt wird. Dieser Fall liegt z. B. beim Verbindungsaufbau vor, wenn einer MS noch keine Ressourcen zugewiesen wurden. Es werden folglich nur GKI-Signale empfangen. Weiterhin wird angenommen, dass eine TDD-Rahmenstruktur vorliegt. Jeder Zugriffsrahmen unterteilt sich wie in Bild 5.2 gezeigt in eine DL und eine UL-Phase.

Der Messvorgang muss für UL und DL separat durchgeführt werden. Wie aus Bild 5.1 ersichtlich, werden die Signale der GKS in UL und DL auf unterschiedlichen Funkkanälen übertragen. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger ist in UL und DL in der Regel verschieden. Ebenso können gänzlich unterschiedliche Abschattungsverhältnisse vorliegen. Hieraus folgt, dass die GKI in UL und DL mit unterschiedlicher Intensität wahrgenommen werden.

Unter der Annahme, dass alle GKS mit derselben Leistung  $P_S$  senden, beträgt die tatsächliche mittlere GKI-Leistung im UL während des Rahmens  $t$

$$\bar{I}_k^b(t) = \sum_{\mu=1}^{N_{\text{GKS,UL}}(t)} P_S \cdot [a^{b,\mu}]^{-\alpha} \eta^{b,\mu} + N. \quad (5.1)$$

Hierbei bezeichnet  $[a^{b,\mu}]^{-\alpha}$  die entfernungsabhängige Pfaddämpfung auf der Funkstrecke zwischen BS  $b$  und MS  $\mu$  und  $\eta^{b,\mu}$  den zugehörigen Abschattungskoeffizienten. Im DL gilt



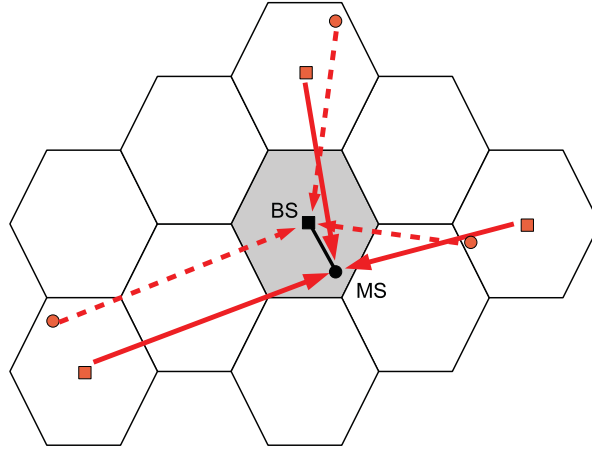


Bild 5.1.: Ungleichheit der GKI in UL und DL aufgrund unterschiedlicher GKS

entsprechend

$$\bar{I}_k^m(t) = \sum_{\beta=1}^{N_{\text{GKS,DL}}(t)} P_S \cdot [a^{\beta,m}]^{-\alpha} \eta^{\beta,m} + N. \quad (5.2)$$

In realen OFDM-Systemen können die ressourcenspezifische Erwartungswerte der Interferenzleistung über das arithmetische Mittel über alle Empfangssymbole  $R_{k,n}$  aus Gl. (3.4) geschätzt werden.

Wie in Bild 5.2 dargestellt aktualisieren BS und MS in jedem Übertragungsrahmen ihre Interferenzmessungen für UL und DL, so dass bei der Ressourcenauswahl stets die momentanen Intensitäten der GKI für alle Ressourcen bekannt sind.

## 5.2. Nutzsignalleistung

Für die Berechnung der ressourcenspezifischen SINRs wird zusätzlich die empfangene Nutzsignalleistung benötigt. Da in dieser Arbeit ein TDD-System angenommen wird und BS und MS mit derselben Leistung senden, ist die Empfangsleistung des Nutzsignals in UL und DL stets gleich. Die folgenden Betrachtungen werden für den DL durchgeführt. Im UL kann entweder dieselbe Messung durchgeführt werden oder es kann die im DL gemessene Nutzsignalleistung an die BS signalisiert werden.

Die von MS  $m$  empfangene mittlere Nutzsignalleistung  $\bar{S}_k^m$  beträgt aufgrund von Pfaddämpfung und Abschattungen

$$\bar{S}_k^m = P_S \cdot [a^{b,m}]^{-\alpha} \cdot \eta^{b,m}. \quad (5.3)$$

Um den Erwartungswert der Nutzsignalleistung schätzen zu können, muss sichergestellt sein, dass das Nutzsignal nicht von einem GKS überlagert wird. Wenn dies der Fall wäre,

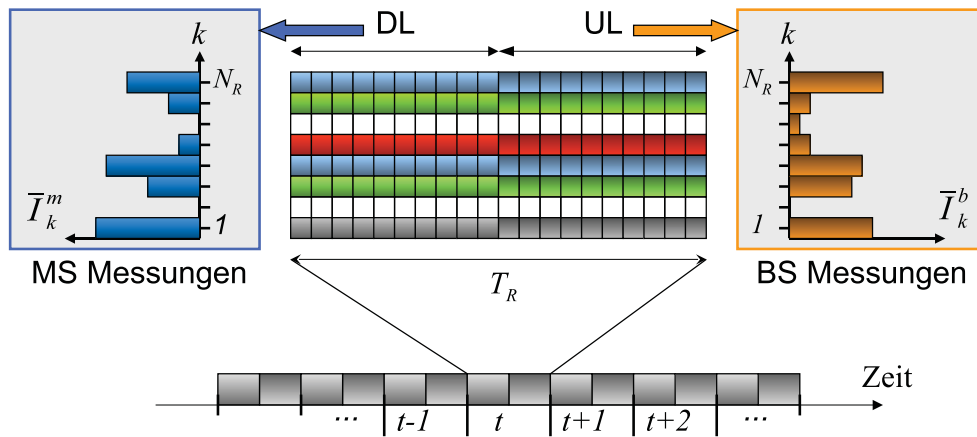


Bild 5.2.: FDMA- / TDD-basierte MAC-Rahmenstruktur sowie Messung der ressourcen-spezifischen Interferenzleistungen in UL und DL

könnte nur der Erwartungswert der Gesamtsignalleistung,  $\bar{P}_k^m = \bar{S}_k^m + \bar{I}_k^m$ , geschätzt werden.

Im System müssen also geeignete Maßnahmen getroffen werden, um Nutz- und Störsignale im Empfänger zu separieren. In [Che04] wird hierfür ein TDMA-basiertes Verfahren vorgeschlagen: Am Ende jedes MAC-Rahmens wird ein komplettes OFDM-Symbol reserviert, welches ausschließlich während des Verbindungsaufbaus zur Schätzung der Empfangsleistung genutzt wird. Die entscheidende Voraussetzung für dieses Verfahrens ist, dass nur eine MS zum Messzeitpunkt Testsignale an die BS übermittelt. Unter dieser Voraussetzung kann  $\bar{S}_k^m$  durch Mittelung über die Amplitudenquadrate der empfangenen Testsignalen geschätzt werden. Durch den TDMA-Ansatz werden alle Subträger in die Mittelung einbezogen, sodass die Schätzung auch bei frequenzselektiven Kanälen zuverlässige Ergebnisse liefert. Das Verfahren setzt für den stabilen Betrieb eine hinreichend niedrige Ankunftsrate neuer MS im System voraus, um während des Messvorgangs Kollisionen auf dem für die Messung reservierten Zeitschlitz ausschließen zu können.

Alternativ kann die Separation von Nutz- und Störsignalen durch Anwendung einer geeigneten Code-Spreiztechnik durchgeführt werden. In Anhang E wird ein solches Verfahren zur Schätzung der Nutzsignalleistung vorgestellt. Mit dem vorgeschlagenen Verfahren lassen sich sowohl die im Falle frequenzselektiver Kanäle ressourcenspezifischen Momentanwerte als auch der Erwartungswert der Empfangsleistung schätzen.

### 5.3. Störabstände

Der Störabstand wird durch das bereits in Abschnitt 4.1 definierte SINR beschrieben. Für die im anschließenden Kapitel 6 behandelte Ressourcenauswahl benötigt die BS Kenntnis

über die Störabstände aller noch nicht von ihr belegten Ressourcen. Vom Störabstand hängt ab, wieviele Ressourcen von der BS ausgewählt werden müssen.

Vor der Ressourcenauswahl werden im SO-RRM-System Ressourcenranglisten erstellt. Die Ranglisten sind in absteigender Reihenfolge nach den ressourcenspezifischen SINRs sortiert. Die Ressource mit dem höchsten SINR steht auf Listenplatz eins usw.

Da wie in Abschnitt 5.1 gezeigt die GKI in UL und DL unterschiedlich stark sind, unterscheiden sich auch die von BS und MS wahrgenommenen SINRs,

$$\bar{\gamma}_k^b = \frac{\bar{S}_k^b}{\bar{I}_k^b} \neq \bar{\gamma}_k^m = \frac{\bar{S}_k^m}{\bar{I}_k^m}. \quad (5.4)$$

BS und MS müssen demzufolge eigene Ressourcenranglisten aufstellen. Diese Ungleichheit hat Auswirkungen auf den Ressourcenauswahlprozess. Wie eine auf diesen beiden Ranglisten basierende Ressourcenauswahl durchgeführt werden kann, wird im anschließenden Kapitel 6 beschrieben.

## 6. Ressourcenauswahl im SO-RRM-System

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, wie die Störabstände in zellularen Funkssystemen gemessen werden können. Die gemessenen Störabstände werden nun als Kriterium für die Ressourcenauswahl im vorgeschlagenen SO-RRM-System verwendet. Je größer der Störabstand, desto größer ist die mit der Ressource erzielbare Datenrate. Je größer die Datenrate der genutzten Ressourcen, desto weniger Ressourcen werden für eine Funkverbindung benötigt. Je weniger Ressourcen pro Funkverbindung benötigt werden, umso weniger GKI entstehen in den Gleichkanalzellen. Und je niedriger die GKI, desto höher sind die ressourcenspezifischen Störabstände. Als Auswahlstrategie wird daher vorgegeben, stets die Ressourcen mit den höchsten Störabständen auszuwählen.

Wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt wurde, sind die GKI und daher auch die Störabstände in UL und DL unterschiedlich. Beim Aufbau einer neuen Verbindung muss daher eine Ressourcenauswahl für DL und UL durchgeführt werden. Sowohl im DL als auch im UL entscheidet die BS autonom über die Auswahl der Ressourcen. Entscheidungsgrundlage sind die in Kapitel 5 eingeführten Messgrößen sowie die verbindungsspezifischen Datenratenanforderungen.

Das Prinzip der selbstorganisierenden Ressourcenvergabe nach geringster Interferenzleistung (SO-GI) wurde bereits in Kapitel 4.2.2 vorgestellt. Eine Besonderheit der in dieser Arbeit untersuchten SO-RRM-Algorithmen ist die Möglichkeit, die MS- und ressourcenspezifischen Kanalzustände und GKI im Zuteilungsprozess zu berücksichtigen. Für jede Funkverbindung wird durch Anwendung einer Linkadaptationstechnik eine variable, von den Kanalzuständen und den gemessenen GKI abhängige Anzahl von Ressourcen ausgewählt. In den folgenden Kapiteln wird untersucht, wie sich diese zusätzliche Flexibilität auf die Leistungsfähigkeit von zellularen Mobilfunksystemen auswirkt.

Die Belegung neuer Ressourcen durch das SO-RRM erfolgt entweder beim Verbindungsaufbau oder wenn mit den bislang genutzten Ressourcen keine zufriedenstellende Dienstgüte mehr erzielt wird.

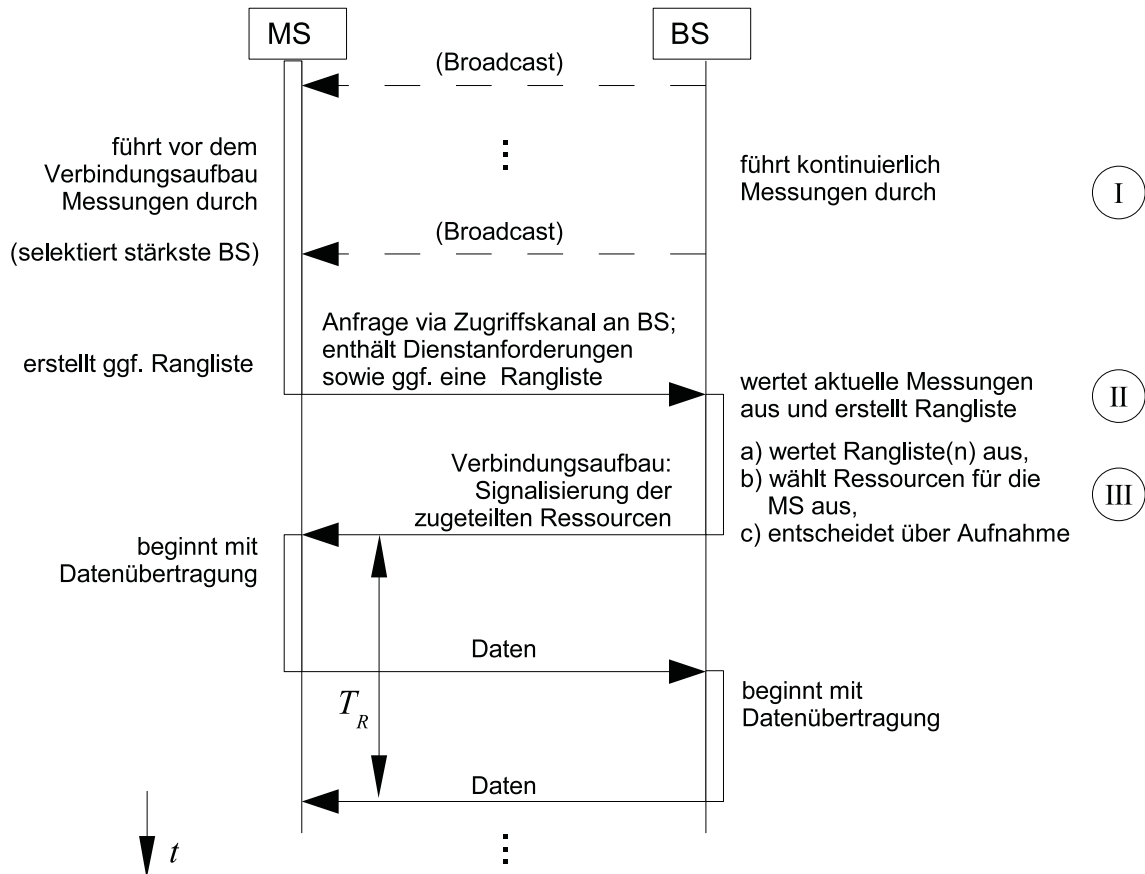


Bild 6.1.: SO-RRM-Prozedur zum Verbindungsaufbau

## 6.1. Verbindungsaufbau

Eine sich neu ins Netz einbuchende MS synchronisiert sich zunächst wie in [GMRW03, RG04] beschrieben auf die in ihrer Umgebung befindlichen BS. Die MS wählt für den beabsichtigten Verbindungsaufbau die BS mit dem aus ihrer Sicht stärksten Empfangspegel aus. Dieser Suchprozess wird für die weiteren Untersuchungen idealisiert als stets erfolgreich angenommen.

Der Verbindungsaufbau lässt sich im vorgeschlagenen SO-RRM-System in drei Phasen unterteilen: einen Messprozess, eine Ranglistenerstellung und einen Ressourcenauswahlprozess. Der für alle im Folgenden untersuchten Ressourcenvergabealgorithmen gleiche Ablauf ist in Bild 6.1 dargestellt.

### 6.1.1. Messprozess

Vor einer Verbindungsanfrage führt eine MS auf allen  $k = 1 \dots N_R$  Ressourcen Messungen der mittleren Interferenzleistungen  $\bar{I}_k^m$  gemäß Gl. (5.1) durch. In den Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die Nutzsignalleistungen  $S_k$  mit dem in Kapitel E diskutierten

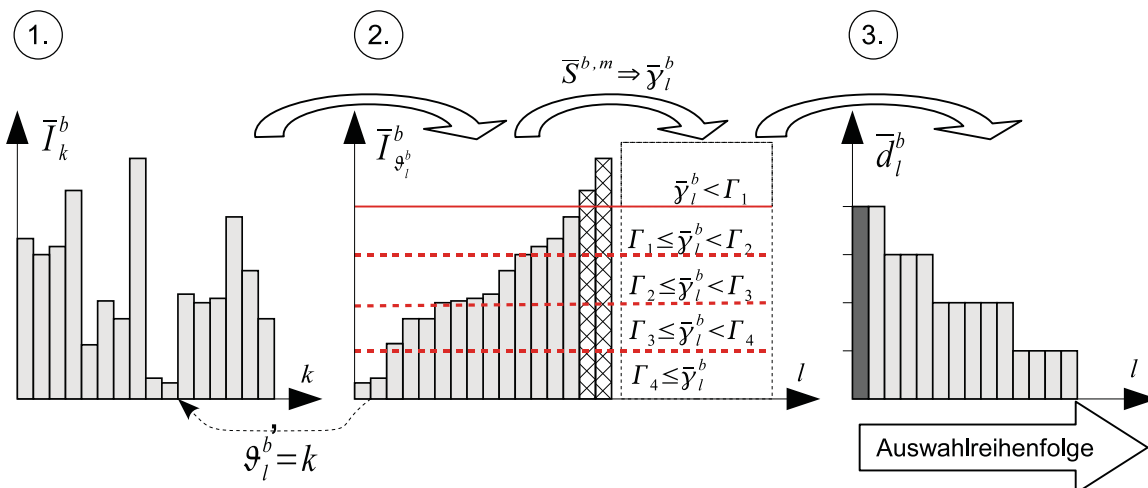


Bild 6.2.: Ressourcenauswahl und Vergabe auf Basis der geringsten gemessenen Interferenzleistungen (SO-GI)

Verfahren geschätzt werden. Auch die Nutzsignalleistung wird gemittelt. Folglich kann angenommen werden, dass für jede Ressource  $k$  ein Schätzwert  $\bar{\gamma}_k^b$  bzw.  $\bar{\gamma}_k^m$  des im Falle einer Belegung zu erwartenden mittleren SINRs berechnet werden kann. Über dieses wird die mit der Ressource  $k$  zu erzielende Datenrate  $\bar{d}_k^b$  bzw.  $\bar{d}_k^m$  prognostiziert.

### 6.1.2. Ranglistenenerstellung

BS und MS erstellen unabhängig voneinander eine Rangliste mit Ressourcenvorschlägen. Höchste Präferenz haben jeweils die Ressourcen mit der geringsten gemessenen mittleren Interferenzleistung  $\bar{I}_k^b$  bzw.  $\bar{I}_k^m$ .

Bild 6.2 verdeutlicht die Ressourcenauswahl des SO-RRM nach geringster gemessener Interferenzleistung beispielhaft für den UL. Im ersten Schritt werden die gemessenen Interferenzleistungen in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Die dadurch entstehende Rangliste der BS  $b$  wird durch die Indizes  $\{g_l^b\}_{l=1..N_R}$  beschrieben. Jedes Element der Rangliste referenziert wie in Bild 6.2 gezeigt eine Ressource mit dem Index  $k$ .

Um entscheiden zu können, wie viele Ressourcen einer neuen Verbindung zugewiesen werden müssen, wird die Prognose der im UL erzielbaren Datenraten  $\bar{d}_k^b$  benötigt. Die ressourcenspezifischen  $\bar{d}_k^b$  werden aus den geschätzten Störabständen  $\bar{\gamma}_k^b$  abgeleitet. In Bild 6.2 wird exemplarisch das in Kapitel 4.3.3 eingeführte Linkadaptionsschema mit vier PHY Modi  $\varphi = 1 \dots 4$  angenommen. Jedem PHY Modus ist ein SINR-Intervall zugeordnet. Die Auswahl der ressourcenspezifischen PHY Modi erfolgt durch Vergleich der  $\bar{\gamma}_k^b$  mit den in Tabelle 4.1 aufgelisteten SINR-Schwellen.

Die MS ermitteln analog zur BS ihre ressourcenspezifischen SINRs  $\bar{\gamma}_k^m$  und daraus die PHY Modi  $\varphi_k^m$  im DL. Beim Verbindungsaufbau sendet eine sich ins System einbuchende MS  $m$  wie in Bild 6.1 angedeutet eine Vorschlagsliste mit den  $N_{\text{Vor}} \leq N_R$  aus ihrer

Sicht besten Ressourcen an die BS. Die Rangliste beinhaltet neben den Ressourcenindizes  $\{\vartheta_l^m\}_{l=1\dots N_{\text{Vor}}}$  die zugehörigen PHY Modi  $\{\varphi_l^m\}_{l=1\dots N_{\text{Vor}}}$ . Aus den  $\varphi_l^m$  kann die BS die mit den vorgeschlagenen Ressourcen im DL erzielbaren Datenraten  $\bar{d}_l^m$  ableiten.

### 6.1.3. Ressourcenauswahl und Aufnahmeentscheidung

Ob neue Verbindungen aufgenommen und welche Ressourcen dafür belegt werden, wird von der BS auf Basis der Ressourcenranglisten entschieden. Der Ablauf des Vergabeprozesses ist in Bild 6.3 dargestellt. Ziel ist das Erreichen einer geforderten Datenrate  $d^b$  im UL bzw.  $d^m$  im DL.

#### 6.1.3.1. Getrennte Ressourcenauswahl für UL und DL

Sollen in DL und UL unterschiedliche Ressourcen genutzt werden, so sind für UL und DL zwei getrennte Belegungsprozesse gemäß Bild 6.3 notwendig. Die richtungsabhängige Ressourcenvergabe ist insbesondere dann sinnvoll, wenn in UL und DL unterschiedliche Datenraten benötigt werden.

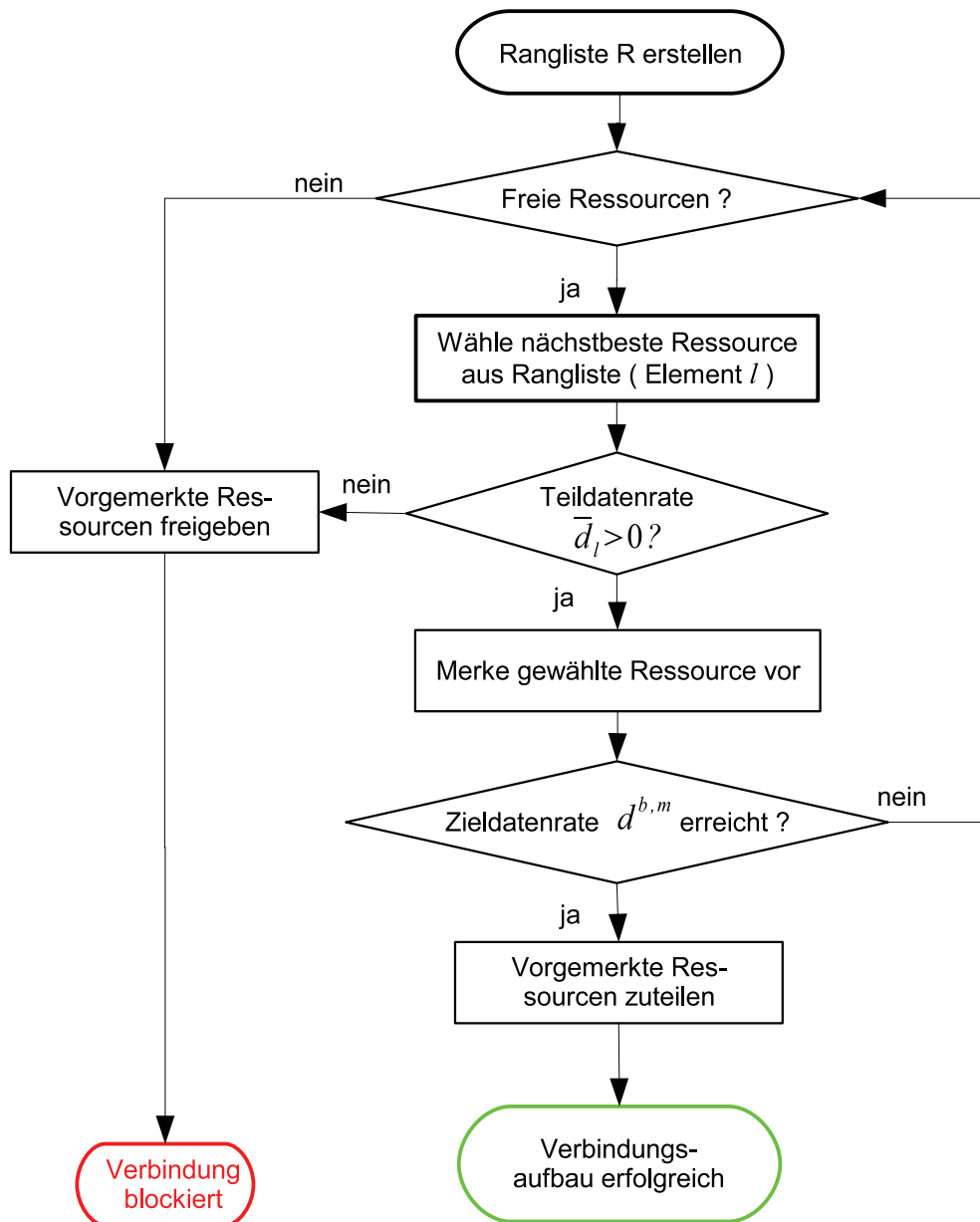
Der Vergabealgorithmus prüft iterativ die Ressourcenvorschläge in der durch die Rangliste der BS (Vergabeprozess für den UL) bzw. die Rangliste der MS (Vergabeprozess für den DL) vorgegebenen Reihenfolge. Zu Beginn wird die erzielte Datenrate mit  $d = 0$  initialisiert. Trägt die aktuelle geprüfte Ressource  $\vartheta_l$  einen Datenratenbeitrag  $\bar{d}_l > 0$  bei, so wird dieser zu  $d$  hinzuaddiert. Nach jedem Iterationsschritt wird geprüft, ob die Zieldatenrate erreicht wurde.

Der Prozess wird erfolgreich abgeschlossen und die neue Verbindung aufgenommen, sobald die Datenrate  $d$  größer oder gleich der geforderten Datenrate  $d^b$  (im UL) bzw.  $d^m$  (im DL) ist. Liegt im Iterationsschritt  $l$  ein Teilbeitrag  $\bar{d}_l = 0$  vor und wurde die Zieldatenrate mit den bisherigen Ressourcen nicht gedeckt, so wird die Aufnahme der Verbindung abgelehnt. In dem Fall werden die bereits reservierten Ressourcen wieder freigegeben und die Verbindungsanfrage blockiert.

#### 6.1.3.2. Gemeinsame Ressourcenauswahl für DL und UL

Liegen in DL und UL dieselben Datenratenanforderungen  $d^{b,m} = d^b = d^m$  vor, so kann durch eine Verschmelzung der Ranglisten von BS und MS eine gemeinsame Ressourcenvergabe für DL und UL durchgeführt werden. Typische Anwendungen mit gleichen Datenraten in DL und UL sind beispielsweise Sprach- und Videotelefonie.

Der Vergabeprozess verläuft genau wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Der einzige Unterschied liegt in der Ermittlung der Teildatenratenbeiträge  $\bar{d}_l$ . Für jeden Ressourcenvorschlag muss der höchstmögliche PHY Modus ermittelt werden, der gleichzeitig in DL

Bild 6.3.: Ressourcenvergabeprozess zur Deckung des geforderten Datenratebedarfs  $d^{b,m}$



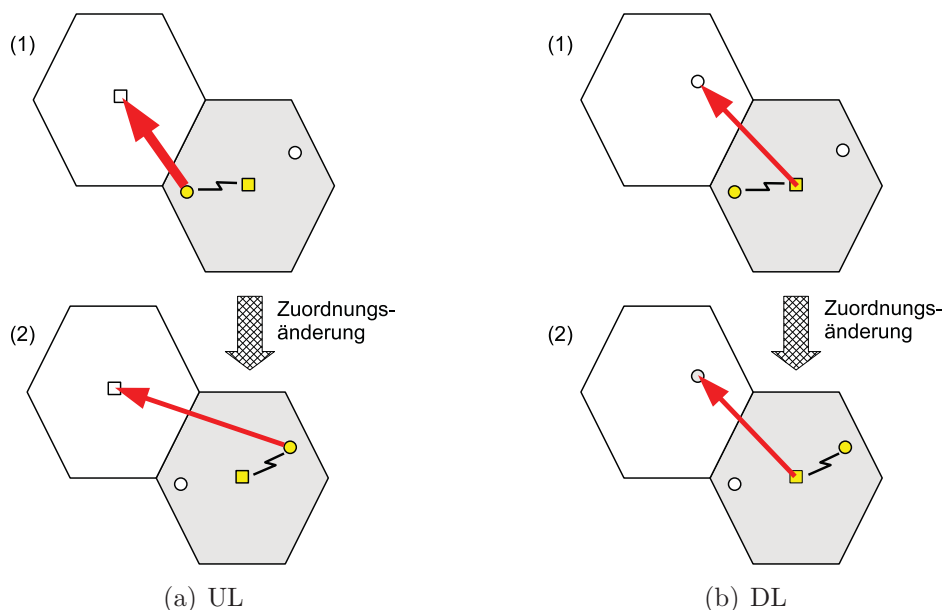


Bild 6.4.: Ressourcenumbelegung: Nur im DL ergibt sich aus Sicht der umliegenden Zellen keine Änderung der GKI.

und UL genutzt werden kann,

$$\varphi_l^{b,m} = \min \{ \varphi_l^b, \varphi_l^m \}. \quad (6.1)$$

Ob die gemeinsame Ressourcenvergabe für DL und UL Vorteile gegenüber zwei getrennten Vergabeprozessen ergibt, wird im anschließenden Kapitel 7 anhand von System-Level-Simulationen untersucht. Der Aufwand für die Signalisierung der MS-Rangliste zur BS ist in beiden Fällen identisch.

## 6.2. Ressourcenumbelegungen

Ein Änderung der beim Verbindungsaufbau ausgewählten Ressourcen wird notwendig, wenn aufgrund einer Änderung der Nutzsignalleistung oder der GKI der Störabstand sinkt und damit die nutzbare Datenrate unter den geforderten Sollwert fällt. In solch einem Fall werden alle Ressourcen der Funkverbindungen freigegeben und eine Neubelegung analog zum Belegungsprozess beim Verbindungsaufbau gem. Bild 6.3 durchgeführt. Die Auswirkungen solcher Umbelegungen auf das Systemverhalten werden im anschließenden Kapitel 7 untersucht.

Ebenso muss eine Anpassung der Ressourcenzuteilungen erfolgen, wenn der geforderte QoS zeitlichen Schwankungen unterliegt wie z. B. bei Diensten mit variablen Datenraten. Steigen die geforderten Datenraten, so müssen zusätzliche Ressourcen belegt werden.

Sinken sie hingegen, so muss aus Effizienzgründen eine Freigabe der nicht mehr benötigten Ressourcen erfolgen.

Eine insbesondere für Szenarien mit variablen Datenraten interessante Fragestellung ist die nach der Austauschbarkeit von Ressourcen zwischen den von einer BS versorgten MS. Hierzu wird der Fall betrachtet, dass eine beliebige Ressource  $\kappa$  einer MS weggenommen und einer anderen MS zugewiesen wird. In Bild 6.4 sind die Auswirkungen dieser Umverteilung auf die GKI-Verhältnisse in den umliegenden Zellen dargestellt. Aus Bild 6.4(a) geht hervor, dass eine Umbelegung im UL eine Änderung der GKI in den Nachbarzellen bewirkt. Im DL hingegen tritt keine Änderung der Interferenzen auf, da sich die Position der Interferenzquelle (der BS), nicht ändert. Wie Bild 6.4(b) zeigt, ist es im DL für die Intensität der in den Nachbarzellen wahrgenommenen GKI bedeutungslos, an welche MS die von der BS auf der Ressource  $\kappa$  gesendete Information adressiert ist.

Als Konsequenz ist festzuhalten, dass eine BS im DL beliebige Umbelegungen durchführen kann, ohne dass dies Einfluss auf die Messungen bzw. die Störabstände der Gleichkanalnutzer in den Nachbarzellen hat. Auf dieser Tatsache basierend wird in Kapitel 8 als Erweiterung für den DL ein Protokoll zur flexiblen und effizienten Versorgung von Diensten mit variablen Datenraten vorgeschlagen.



# 7. SO-RRM bei konstanten Datenraten

In diesem Kapitel wird anhand von Rechnersimulationen quantitativ untersucht, inwieweit mit dem vorgeschlagenen SO-RRM die Effizienz zellulärer Mobilfunksysteme gegenüber herkömmlichen Konzepten mit statischer Ressourcenvergabe gesteigert werden kann. Dabei wird der Fall betrachtet, dass alle Benutzer im System dieselben konstanten Datenraten in DL und UL benötigen. Eine solche Anforderung wird beispielsweise von Sprach- und Videotelefoniediensten gestellt. Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von SO-RRM unter der Annahme zeitvarianter Datenraten erfolgen im anschließenden Kapitel 8.

## 7.1. Zielsetzungen

Bei der Ressourcenvergabe wird vom SO-RRM das Ziel verfolgt, einer sich neu ins Netz einbuchenden MS beim Verbindungsaufbau einen Satz geeigneter Ressourcen zuzuteilen, welcher dieser MS über einen möglichst langen Zeitraum den vereinbarten QoS in Form einer in UL und DL gleichen konstanten Datenrate gewährleistet. Anhand quantitativer Ergebnisse aus System-Level-Simulationen wird im Folgenden geklärt,

- wieviele Benutzer pro Zelle mit dem SO-RRM-Konzept im Vergleich zu herkömmlichen SRV-basierten Konzepten erfolgreich versorgt werden können,
- inwieweit Ressourcenumbelegungen die Systemeffizienz verbessern und wie häufig diese durchgeführt werden müssen,
- ob es bei gleichen Datenraten in DL und UL effizienter ist wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben jeweils eine unabhängige Ressourcenvergabe in DL und UL durchzuführen oder durch gemeinsame Berücksichtigung der DL- und UL-Ranglisten dieselben Ressourcen für DL und UL zu benutzen, und schließlich
- welche Vorteile SO-RRM in einem Hot-Spot-Szenario bietet.

| Parameter                   | Formelzeichen     | Wert                           |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Systembandbreite            | $B$               | 20 MHz                         |
| Subträgeranzahl             | $N_S$             | 1024                           |
| Subträgerbandbreite         | $B_S = B/N_S$     | 19,53125 kHz                   |
| Symboldauer                 | $T_S = 1/B_S$     | 51,2 $\mu$ s                   |
| Guardintervall              | $T_G$             | 10 $\mu$ s                     |
| gesamte OFDM-Symboldauer    | $T_{\text{OFDM}}$ | $T_S + T_G = 61,2 \mu\text{s}$ |
| Dauer eines Zugriffsrahmens | $T_R$             | 4,096 ms                       |
| Subträger pro Ressource     | $N_{\text{SPR}}$  | 4                              |
| OFDM-Symbole / Ressource    | $N_{\text{OPR}}$  | 64                             |
| Symbolrate / Ressource      | $s_R$             | 32 kSymbole/s                  |
| konstante Datenrate / MS    | $d_m$             | 32 kBit/s bzw. 384 kBit/s      |

Tabelle 7.1.: Angenommene OFDM Systemparameter

## 7.2. Systemparameter

Es gelten weiterhin alle in Kapitel 4.3 getroffenen Annahmen eines vollständig synchronisierten zellularen OFDM-basierten Mobilfunksystems. Auf der physikalischen Übertragungsschicht werden für die verwendete OFDM-Übertragungstechnik die in Tabelle 7.1 angegebenen Systemparameter angenommen. Eine OFDM-FDMA-Ressource wird als Satz von  $N_{\text{SPR}} = 4$  Subträgern pro Ressource (SPR) definiert. Bei insgesamt  $N_S = 1024$  Subträgern beträgt die Anzahl dem SO-RRM zur Verfügung stehender Ressourcen

$$N_R = \frac{N_S}{N_{\text{SPR}}} = 256. \quad (7.1)$$

Ein TDD-Zugriffsrahmen besteht aus jeweils  $N_{\text{OPR}} = 64$  OFDM-Symbolen. Die Dauer eines Rahmens beträgt

$$T_R = N_{\text{OPR}} \cdot T_{\text{OFDM}} \approx 4 \text{ ms}$$

und die Symbolrate einer FDMA-Ressource ergibt sich zu

$$s_R = \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{TDD}} \cdot \frac{N_{\text{SPR}}}{T_{\text{OFDM}}} = 32 \text{ kSymbole/s.}$$

Mit den Annahmen aus Tabelle 4.1 folgt die mit der Ressource  $k$  erzielbare Datenrate  $d_k$  [Bit/s] in Abhängigkeit vom genutzten PHY Modus  $\varphi_k$  zu<sup>1</sup>

$$d_k = \varphi_k \cdot s_R. \quad (7.2)$$

<sup>1</sup>Die PHY Modi wurden so gewählt, dass die spektrale Effizienz sich jeweils als ganzzahliges Vielfaches der spektralen Effizienz des niederratigsten PHY Modus ergibt. Daher kann in Gl. (7.2) die vom PHY Modus  $\varphi_k$  abhängige Datenrate  $d_k$  als ganzzahliges Vielfaches von  $s_R$  berechnet werden.

### 7.2.1. Verbindungsaufbau

Der Verbindungsaufbau erfolgt wie in Kapitel 6.1 beschrieben.

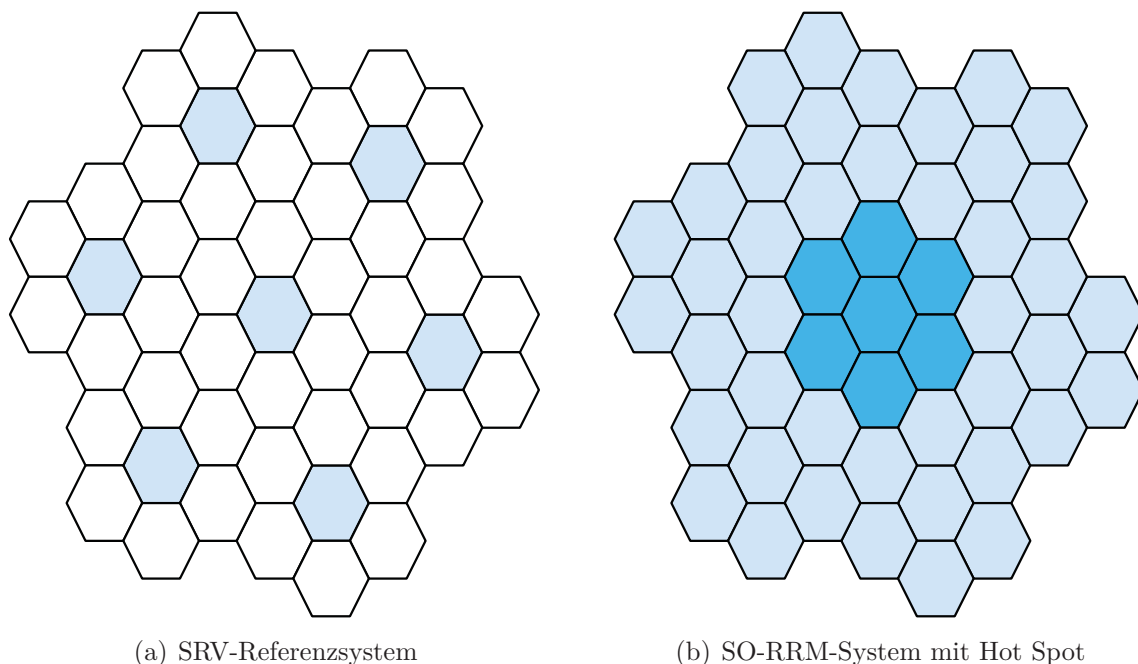
### 7.2.2. Ressourcenumbelegungen bei QoS-Unterschreitung

Fällt die Datenrate unter den Sollwert, so werden sämtliche bislang der MS zugewiesenen Ressourcen freigegeben und ein neuer Verbindungsaufbau gemäß Bild 6.1 durchgeführt.

Von einem hinzugekommenen Gleichkanalstörer sind häufig mehrere Funkverbindungen gleichzeitig betroffen. Wenn die betroffenen Funkverbindungen gleichzeitig neue Ressourcen anfordern, werden die zuständigen BS häufig aufgrund korrelierter Ranglisten simultan dieselben Ressourcen auswählen. Gibt es z. B. nur noch wenige interferenzfreie Ressourcen, so werden alle BS diese Ressourcen mit höchster Priorität auswählen. Wenn zwei BS zum selben Zeitpunkt eine bis dato freie Ressource belegen, fallen die GKI nach der Belegung deutlich höher aus als durch die Messungen vor der Belegung prognostiziert. Dadurch wird ggf. die geforderte Datenrate nicht erzielt. Um solche Konfliktsituationen zu vermeiden bzw. aufzulösen, wird ein exponentieller Back-Off-Algorithmus [Tan90, Wal00] eingesetzt.

Nach Feststellen einer QoS-Unterschreitung wartet jede BS vor der Umbelegung eine zufällige Anzahl von  $w$  Zugriffsrahmen.  $w$  ist die Realisierung einer im Intervall  $[0, 2^n - 1]$  gleichverteilten Zufallsvariable. Die Variable  $n$  zählt die Umbelegungsversuche seit der QoS-Unterschreitung und wird beim ersten Umbelegungsversuch mit eins initialisiert. Nach Ablauf der zufälligen Wartedauer schickt die MS genau wie beim Verbindungsaufbau einen Satz von  $N_{\text{Vor}}$  Ressourcenvorschlägen an die BS. Die BS behandelt die MS wie eine sich neu anmeldende MS. Die bis zu diesem Zeitpunkt von der MS genutzten Ressourcen werden freigegeben. Neue Ressourcen werden wie gehabt mit dem in Kapitel 6.1.3 vorgestellten Verfahren ausgewählt.

Falls die BS keine ausreichende Anzahl neuer Ressourcen finden kann, wird die Verbindung abgebrochen. Andernfalls übermittelt sie der MS ihre neuen Ressourcen. Die MS prüft unmittelbar nach Erhalt der neuen Ressourcen durch Auswerten des ersten DL-Rahmens, ob die neuen Ressourcen eine ausreichend hohe Datenrate im DL bieten. Das Gleiche prüft die BS im anschließenden UL. Wurden die in UL und DL geforderten Datenraten nicht erreicht, so wird eine weitere Umbelegung initiiert. Der Unterschied zur ersten Anfrage besteht einzig in der Erhöhung des Erwartungswerts der Wartedauer vor Absenden der Anfrage. Durch Erhöhen des Zählers  $n$  um eins verdoppelt sich die maximale Breite des Warteintervalls. Die Wahrscheinlichkeit einer erneuten Kollision wird dadurch im Falle von zwei konkurrierenden MS halbiert. Wird die Obergrenze von  $n = N_{\text{max retry}}$  erfolglosen Umbelegungsversuchen erreicht, wird die Verbindung abgebrochen. In den Simulationen wurde  $N_{\text{max retry}} = 5$  angenommen.



(a) SRV-Referenzsystem

(b) SO-RRM-System mit Hot Spot

Bild 7.1.: Simuliertes Versorgungsgebiet mit 49 Funkzellen

### 7.2.3. Referenzsystem mit SRV

Als Referenzsystem wird ein zellulares Funknetz mit SRV bei einer Cluster-Größe von  $C = 7$  definiert. Mit der bereits getroffenen Annahme von  $N_{\text{SPR}} = 4$  Subträgern pro FDMA-Ressource verfügt das SRV-System über  $N_{\text{R,SRV}} = \lfloor 1024 / (C \cdot N_{\text{SPR}}) \rfloor = 36$  Ressourcen pro Zelle. Im Gegensatz zum SO-RRM-System basiert die Ressourcenvergabe des SRV-Referenzsystems nicht auf Messungen. Im Falle einer Verbindungsanfrage wählt die BS eine Ressource zufällig aus ihren noch verfügbaren Ressourcen aus.

## 7.3. Simulationsmodell

In den Simulationen wird ein flächendeckendes Versorgungsgebiet aus 49 gleich großen, hexagonalen Zellen wie in Bild 7.1 angenommen. Bei der Simulation des SO-RRM-Systems wird der Verkehr in allen 49 Zellen betrachtet, während sich die Simulation des SRV-Referenzsystems entsprechend der gewählten Clustergröße  $C = 7$  auf jede siebte Zelle beschränkt. Der Zellradius wird zu  $R = 500$  m angenommen. Pro Zelle befindet sich im Mittelpunkt eine BS. Es wird unterstellt, dass alle BS und MS mit einer omnidirektionalen Antenne ausgestattet sind.

### 7.3.1. Kanalmodell

Es werden frequenzselektive Mobilfunkkanäle mit den in Kapitel 2 beschriebenen Eigenschaften betrachtet. Wie in Kapitel 2.1 diskutiert wird aufgrund der als klein angenommenen Zellradien von wenigen hundert Metern ein Pfaddämpfungskoeffizient von  $\alpha = 2.5$  angenommen. Abschattungseffekte werden, sofern nicht anders angegeben, gemäß Abschnitt 2.1.2 als Lognormal-Fading mit einer Standardabweichung von  $\sigma_A = 8$  dB modelliert. Da ein TDD-System untersucht wird, ist die Nutzsignalleistung in UL und DL gleich. Die Schreibweise vereinfacht sich daher zu  $S_k^b = S_k^m = S_k$  für alle  $k = 1 \dots N_R$ .

### 7.3.2. Räumliche Benutzerverteilung

Die räumliche Verteilung der MS im Versorgungsgebiet wird in der Simulation durch einen stochastischen Prozess modelliert. Die Position wird zum Ankunftszeitpunkt der MS zufällig ermittelt und bleibt für die gesamte Dauer der Verbindung unverändert. Es werden zwei Szenarien mit unterschiedlichem Benutzeraufkommen innerhalb des Versorgungsgebiets untersucht. Im ersten Szenario wird eine Gleichverteilung der MS im Versorgungsgebiet angenommen. Als zweites wird ein Hot-Spot-Szenario betrachtet. Im Hot-Spot-Szenario befinden sich ausschließlich in den in Bild 7.1(b) dunkel eingefärbten Zellen MS. Innerhalb der Hot-Spot-Zellen wird wieder eine Gleichverteilung angenommen.

### 7.3.3. Benutzerankunftsprozess

Die Ankunft neuer Benutzer im System wird als gedächtnisloser Geburts-Sterbeprozess modelliert [TG96]. Die Anzahl von Benutzerankünften pro Zeitintervall ist Poisson-verteilt mit der Ankunftsrate  $\lambda$ . Hieraus folgt, dass die Dauer zwischen zwei Benutzerankünften exponentiell verteilt ist. Die Ankunftsrate  $\lambda$  bezieht sich im Folgenden auf die Benutzerankünfte einer Funkzelle. Die Ankunft neuer Benutzer wird in jeder beobachteten Zelle durch eine identisch verteilte statistisch unabhängige Zufallsvariable modelliert. Die Dauer einer Funkverbindung wird in den Simulationen als Realisierung einer exponentiell verteilten Zufallsvariable  $T_B$  modelliert. Ihr Erwartungswert beträgt  $\bar{T}_B = 30$  sec. Das Verkehrsangebot  $\omega$  [TG96] berechnet sich als Produkt aus Ankunftsrate und mittlerer Verweildauer,

$$\omega = \lambda \cdot \bar{T}_B. \quad (7.3)$$

### 7.3.4. Kennzahlen für die Leistungsbewertung

Folgende Kennzahlen werden für die quantitative Leistungsbewertung in den Simulationen ermittelt. Die Bestimmung dieser Größen erfolgte mit einem Batch-Means-Ansatz [LK00]. Die Auswertungsmethodik wird in Anhang B erläutert.



### 7.3.4.1. Blockierungswahrscheinlichkeit

Die Blockierungswahrscheinlichkeit  $P_b$  gibt an, wieviel Prozent der MS-Anfragen mangels geeigneter verfügbarer Ressourcen abgelehnt werden müssen.

Da die Benutzerankünfte mit einem Poisson-Prozess modelliert werden, lässt sich die Blockierungswahrscheinlichkeit für das SRV-Referenzsystem mit Hilfe der Verkehrstheorie prognostizieren. Jede Zelle des SRV-Referenzsystems kann als  $M/M/N_{R,SRV}$  Verlustsystem betrachtet werden.  $N_{R,SRV}$  entspricht der maximalen Anzahl bedienbarer Funkverbindungen pro Zelle. Die Blockierungswahrscheinlichkeit eines solchen Verlustsystems berechnet sich nach der Erlang-B-Verlustformel [TG96] zu

$$P_b = \frac{\frac{\omega^{N_{R,SRV}}}{N_{R,SRV}!}}{\sum_{k=0}^{N_{R,SRV}} \frac{\omega^k}{k!}}. \quad (7.4)$$

### 7.3.4.2. Abbruchwahrscheinlichkeit

Wann ein Verbindungsabbruch erfolgt, wurde bereits in Abschnitt 7.2.2 erklärt. In den Simulationen wird die Abbruchwahrscheinlichkeit  $P_a$  empirisch bestimmt aus dem prozentualen Anteil der zunächst erfolgreich ins System aufgenommen MS, deren Funkverbindungen aufgrund nicht behebbarer Beeinträchtigungen der Übertragungsqualität vorzeitig beendet wurden.

### 7.3.4.3. Versorgungsgrad

Aus Sicht eines Benutzers ist es viel ärgerlicher, einen Verbindungsabbruch zu erleiden, als von vornherein erst gar keinen Verbindungsaufbau zu erhalten. In [Ake94] wird daher vorgeschlagen, Blockierungen und Verbindungsabbrüche zu einer Dienstgütekennzahl, dem Grade of Service (Versorgungsgrad, GOS), zusammenzufassen. Dieser Vorschlag wurde in zahlreichen weiteren Veröffentlichungen übernommen (z. B. [KSL98]) und soll auch in dieser Arbeit zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Systeme herangezogen werden. Der Versorgungsgrad wird in [Ake94] definiert als

$$g^* = P_b + 10 \cdot P_a.$$

Mit dieser Größe wird ein Verbindungsabbruch als zehnmal „schlimmer“ eingestuft als eine Blockierung. Leicht abweichend von der ursprünglichen Definition wird der Versorgungsgrad in dieser Arbeit als

$$g = 1 - g^* \quad (7.5)$$

definiert. In dieser Darstellung entspricht ein GOS von 1 bzw. 100% dem Idealfall, dass in der Simulation keine Blockierungen und keine Verbindungsabbrüche festgestellt wurden.

#### 7.3.4.4. Ressourcenumbelegungsrate

Als Indikator für die Stabilität des Netzbetriebs wird die Häufigkeit der in Abschnitt 7.2.2 erläuterten Ressourcenumbelegungen betrachtet. Die Ressourcenumbelegungsrate  $u$  gibt die mittlere Anzahl von Umbelegungen pro MS und Sekunde an. Je kleiner  $u$ , desto sicherer sind die im Ressourcenzuteilungsprozess getroffenen Prognosen und desto seltener treten SINR-Unterschreitungen auf. Durch die Betrachtung dieser Kennzahl soll sichergestellt werden, dass eine stabile, nicht durch häufige Umbelegungen gestörte Datenübertragung gewährleistet wird. Für jede MS  $m$  wird ein spezifischer Wert  $u_m$  ermittelt. Am Ende jedes Simulationsdurchlaufs wird aus der Menge aller berechneten  $u_m$  der Mittelwert  $u$  gebildet.

#### 7.3.4.5. Wiederverwendungsrate

Die Wiederverwendungsrate  $W$  ist ein Maß für die räumliche Wiederverwendung der Ressourcen. Es wird kontinuierlich für jede Ressource aufgezeichnet, in wievielen Zellen sie gleichzeitig genutzt wird. Über diese Beobachtungen wird der Mittelwert gebildet und durch die Anzahl simulierter Zellen geteilt. Würden z. B. im SRV-Referenzsystem in jeder Zelle alle Ressourcen dauerhaft genutzt, so entspräche die gemessene Wiederverwendungsrate dem Kehrwert der Clustergröße,  $W = 1/C$ .

#### 7.3.4.6. Benutzerkapazität

Die Benutzerkapazität wird in dieser Arbeit als das maximale Verkehrsangebot  $\omega_{\max}$  in einer Funkzelle definiert, bei welchem der GOS gerade noch über der festgelegten Toleranzschwelle von 90% liegt.

## 7.4. Gleichverteilte Benutzer innerhalb einer Zelle

Zunächst wird ein in der Fläche gleichverteiltes Benutzeraufkommen mit dem in Abschnitt 7.3.3 definierten Verkehrsangebot  $\omega$  angenommen. Im zeitlichen Mittel halten sich in jeder Zelle gleich viele MS auf. Eine gleichförmige Benutzerverteilung stellt für Systeme mit SRV den Idealfall dar, in welchem die Ressourcen mit maximaler Effizienz genutzt werden [ZK01]. Es wird nun untersucht, wie sich das SO-RRM-System in diesem Szenario verhält.

### 7.4.1. Versorgung mit niedrigen Datenraten (32 kBit/s)

Als erstes wird der Fall betrachtet, dass jede MS genau eine Ressource zugewiesen bekommt. Zusätzlich wird unterstellt, dass alle MS mit dem PHY Modus  $\varphi = 1$  (QPSK und Coderate 1/2, vgl. Tabelle 4.1) übertragen. Mit den in diesem Kapitel getroffenen Annahmen ergibt

sich eine konstante Datenrate von 32 kBit/s in UL und DL; ein typischer Wert, wie er z. B. für Sprachtelefonie benötigt wird.

Um 32 kBit/s zu erzielen, muss für jede MS genau eine Ressource ausgewählt werden. Die Vergabe einer deterministischen Anzahl von Ressourcen entspricht dem Verhalten herkömmlicher RRM-Konzepte. In diesem Abschnitt wird zunächst dieser einfache Fall quantitativ untersucht und gegen das Referenzsystem verglichen, bevor im nächsten Abschnitt die volle Flexibilität von SO-RRM ausgenutzt und eine variable, an die Interferenzsituation angepasste Anzahl von Ressourcen für die MS ausgewählt wird.

Bild 7.2 zeigt die Simulationsergebnisse für das beschriebene Szenario. Die Ergebnisse für das SRV-Referenzsystem wurden einmal mit und einmal ohne Simulation von Abschattungseffekten ermittelt. Im Fall ohne Abschattungseffekte stimmt die Blockierungswahrscheinlichkeit des SRV-Referenzsystems mit der theoretischen Abschätzung Gl. (7.4) aus Abschnitt 7.2.3 überein. Verbindungsabbrüche treten nicht auf. Die Clustergröße  $C = 7$  ist demnach für den Fall ohne Abschattungen ausreichend groß dimensioniert. Werden jedoch Abschattungen in der Simulation berücksichtigt, so treten bereits bei geringen Verkehrslasten Verbindungsabbrüche auf. SRV-basierte zellulare Mobilfunksysteme sind also anfällig gegenüber Signalabschattungen. Um Verbindungsabbrüche zu vermeiden, müsste ein größerer Wiederverwendungsabstand gewählt werden. In [Pra98] wird dargelegt, inwieweit die Clustergröße  $C$  gegenüber dem Fall ohne Abschattungen vergrößert werden muss, um ausreichend Schutz vor abschattungsbedingten SINR-Einbrüchen zu gewährleisten.

Die Ergebnisse für die SO-RRM-Systeme in Bild 7.2 zeigen deutlich, dass mit SO-RRM ein höheres Verkehrsangebot bedient werden kann als mit SRV. Gemeinsame (DL+UL, s. Abschnitt 6.1.3.2) und getrennte Ressourcenauswahl (DL bzw. UL, s. Abschnitt 6.1.3.1) liefern im hier betrachteten Szenario mit niedrigen Datenraten ähnlich gute Ergebnisse. Eine genaue Analyse der Unterschiede zwischen den SO-RRM-Verfahren sowie der Auswirkungen von Lognormalfading erfolgt anschließend bei der Untersuchung des Szenarios mit hohen Datenraten.

Eine Ursache für die höhere Leistungsfähigkeit von SO-RRM liegt in der Flexibilität, in jeder Zelle über sämtliche Ressourcen des Systems verfügen zu können. Hieraus resultiert wie in Anhang A dargelegt ein höherer Bündelungsgewinn als bei SRV [TG96]. Die zweite Ursache für die höhere Leistungsfähigkeit ist die Berücksichtigung der gemessenen Gleichkanalinterferenzen bei der Ressourcenauswahl. Während im SRV-System die Ressourcen zufällig aus dem noch verfügbaren Kontingent ausgewählt werden, wird mit SO-RRM durch Prognostizieren der Kanalgröße vor der Zuteilung adaptiv über die Wiederverwendbarkeit der Ressourcen entschieden. Dadurch werden Verbindungsabbrüche effektiv vermieden. Da bei der Bestimmung des Versorgungsgrades Verbindungsabbrüche 10mal stärker gewichtet werden als Blockierungen, vgl. Gl. (7.5), wird die Benutzerkapazität der SO-RRM-Systeme maßgeblich durch bei hohem Benutzerverkehr auftretende Verbindungsabbrüche limitiert.

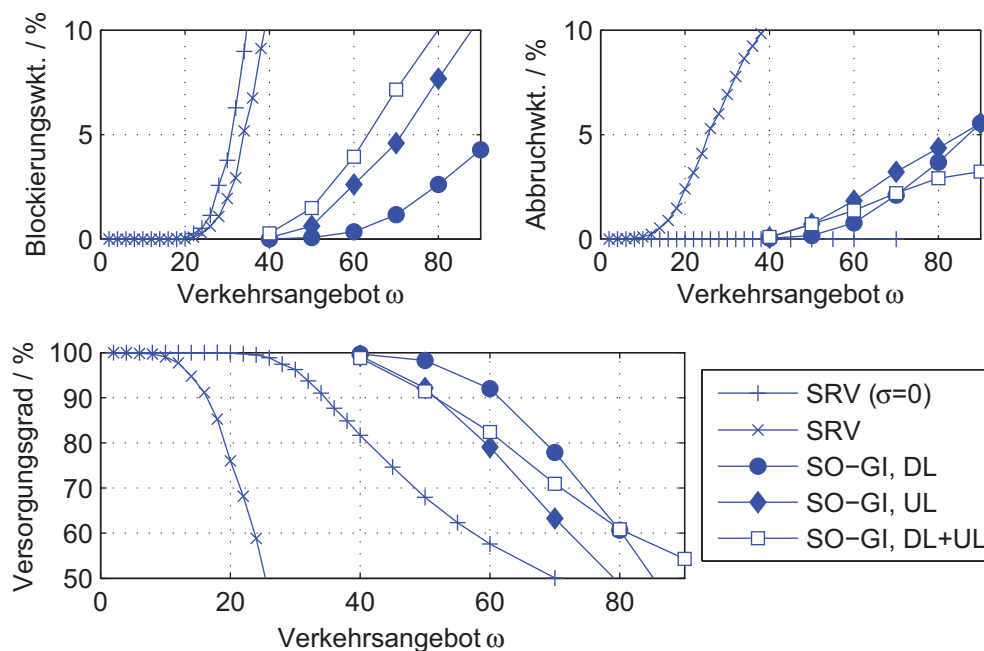


Bild 7.2.: Vergleich von SRV- und SO-RRM-System bei gleichverteilten MS, Datenrate 32 kBit/s (eine Ressource pro MS)

### 7.4.2. Versorgung mit hohen Datenraten (384 kBit/s)

Die von jeder MS geforderte Datenrate wird nun um das 12fache auf 384 kBit/s erhöht. Im schlechtesten Fall muss das SO-RRM dafür 12 Ressourcen pro MS bereitstellen. Die pro MS benötigte Ressourcenanzahl reduziert sich entsprechend Tabelle 7.2, wenn anstelle der bislang eingesetzten QPSK ein höherwertiges Modulationsverfahren eingesetzt wird. Es ist offensichtlich, dass mit höherratigen PHY Modi mehr Ressourcen zur Verfügung stehen. Die höherratigen PHY Modi benötigen jedoch höhere SINRs, vgl. Tabelle 4.1, und damit höhere Wiederverwendungsabstände. Folglich stellt sich die Frage, ob es auf Gesamtsystemebene effizienter ist, die Ressourcen durch Wahl niederratiger PHY Modi räumlich dichter wiederzuverwenden oder aber durch Wahl höherratiger PHY Modi weniger Ressourcen pro MS zu benötigen, dabei aber die Ressourcen weniger oft wiederverwenden zu können.

Anstatt eine deterministische Anzahl Ressourcen pro Benutzer auszuwählen, bietet das SO-RRM-System die Flexibilität, eine an die jeweilige Interferenzsituation adaptierte variable Anzahl von Ressourcen auszuwählen. Die Festlegung der PHY Modi erfolgt wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben mittels adaptiver Modulation (AM). Je größer die gemessenen Störabstände, desto höher sind die erzielbaren Datenraten. Folglich werden bei Anwendung einer Linkadaptionstechnik für MS mit guten Kanalzuständen weniger Ressourcen benötigt als für MS mit hohen GKI.

|         | Anzahl Ress. / MS |
|---------|-------------------|
| QPSK    | 12                |
| 16-QAM  | 6                 |
| 64-QAM  | 4                 |
| 256-QAM | 3                 |
| AM      | $n$               |

Tabelle 7.2.: Anzahl der für Datenraten von 384 kBit/s pro MS benötigten Ressourcen

#### 7.4.2.1. Ergebnisse für das SRV-Referenzsystem

In Bild 7.3 sind die für das SRV-Referenzsystem ermittelten Simulationsergebnisse dargestellt. Da gemäß Abschnitt 7.2.3 36 FDMA-Ressourcen pro Zelle zur Verfügung stehen, kann jede BS mit den Annahmen aus Tabelle 7.2 je nach PHY Modus maximal 3, 6, 9 oder 12 MS versorgen. Aufgrund des dynamischen Zugangsprozesses liegt jedoch die im Mittel pro BS versorgbare Anzahl MS unter den Maximalwerten. Die Blockierungswahrscheinlichkeit sinkt erwartungsgemäß mit steigender Effizienz des PHY Modus. Aus den hohen Abbruchwahrscheinlichkeiten wird jedoch deutlich, dass aufgrund einer zu dichten räumlichen Wiederverwendung das für die hochratigen PHY Modi benötigte Mindest-SINR oft nicht erreicht wird. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 diskutiert wurde, lässt sich ein höherer Störabstand bei SRV nur durch Erhöhen der Clustergröße  $C$  erreichen. Mit steigender Clustergröße sinkt jedoch die Anzahl pro Zelle verfügbarer Ressourcen. Weniger Ressourcen pro Zelle führen wiederum zu einem weiteren Anstieg der Blockierungswahrscheinlichkeiten.

Am schlechtesten schneidet das SRV-Referenzsystem bei Wahl des niederratigsten PHY Modus ab. Begrenzender Faktor ist in dem Fall die Blockierungswahrscheinlichkeit. Diese ist bereits bei niedrigem Verkehrsangebot sehr hoch, da wie aus Tabelle 7.2 ersichtlich viele Ressourcen pro Benutzer benötigt werden und in Summe wenig Kanäle pro Zelle zur Verfügung stehen. Wird ein höherratiger PHY Modus eingesetzt, so treten bereits bei niedrigem Verkehrsangebot Verbindungsabbrüche auf. Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die Wahl des (fixen) PHY Modus die Benutzerkapazität des SRV-Referenzsystems nur unwesentlich beeinflusst. Niederratige PHY Modi führen zu hohen Blockierungswahrscheinlichkeiten, während höherratige PHY Modi tendenziell zu einem instabileren Verhalten führen und die Wahrscheinlichkeit für Verbindungsabbrüche erhöhen.

#### 7.4.2.2. Ergebnisse für das SO-RRM-System bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL

Bild 7.4 zeigt die Simulationsergebnisse für das SO-RRM-System mit gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL. Es sind sowohl die Ergebnisse mit statischer Festlegung eines PHY Modus als auch die mit adaptiver Modulation (AM) ermittelten Ergebnisse dargestellt.

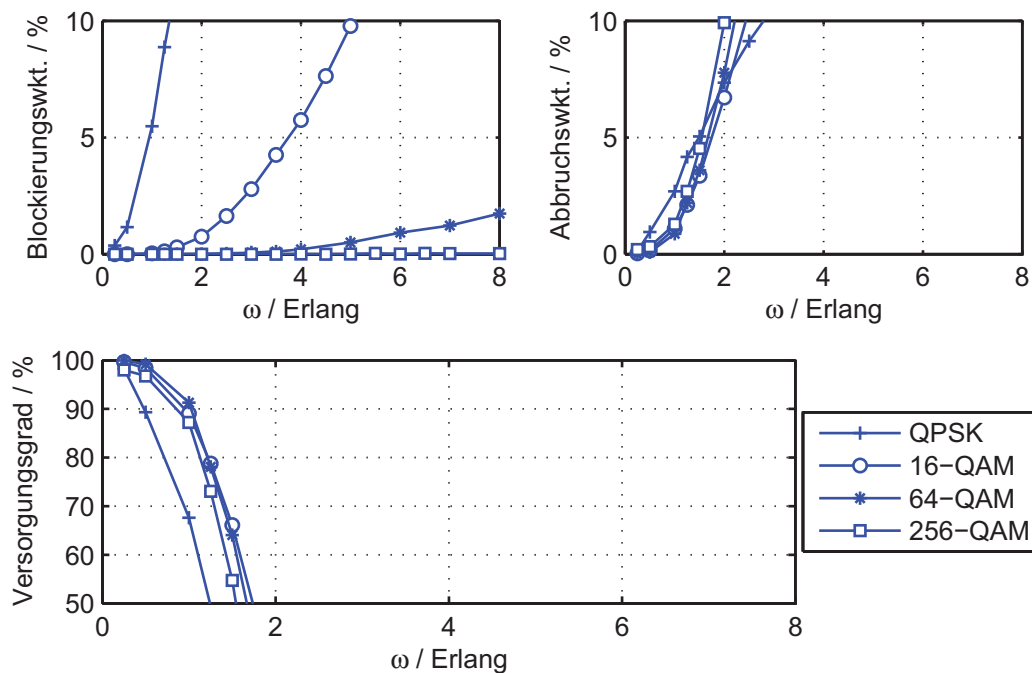


Bild 7.3.: SRV-Referenzsystem bei gleichverteilten MS, Datenrate 384 kBit/s

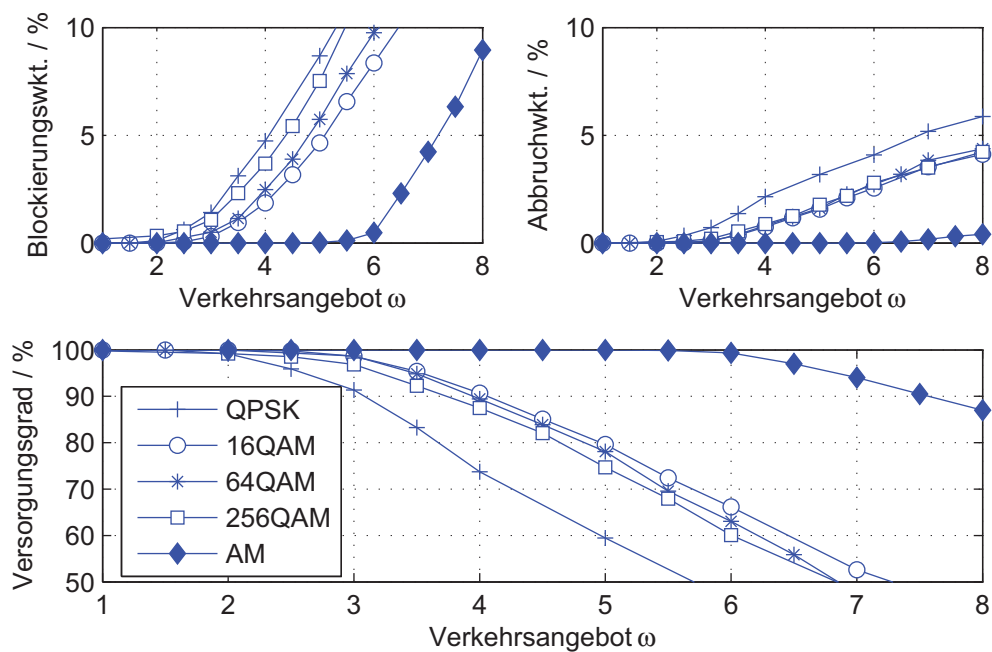


Bild 7.4.: SO-RRM-System bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in UL und DL bei gleichverteilten MS, Datenrate 384 kBit/s

Bei Anwendung eines festen PHY Modus fällt auf, dass die Blockierungswahrscheinlichkeit bei Anwendung von QPSK gegenüber der Nutzung von 16-QAM sinkt. Die Ursache hierfür liegt in der Verdopplung der Anzahl verfügbarer Ressourcen  $N_R$ , da mit 16-QAM aufgrund der doppelt so hohen Effizienz nur halb so viele Subträger pro MS benötigt werden. Beim Übergang auf 256-QAM steigt die Blockierungswahrscheinlichkeit jedoch wieder, obwohl  $N_R$  weiter erhöht wird. Ursache für diesen gegenläufigen Effekt ist die höhere Mindest-SINR-Anforderung der höherratigen PHY Modi. Offensichtlich treten Fälle auf, in denen keine Ressourcen mit ausreichend hohem Störabstand für eine MS gefunden werden können. Bei Anwendung von 256-QAM liegt die Blockierungswahrscheinlichkeit daher bereits bei niedrigem Verkehr deutlich oberhalb von Null.

Im Gegensatz zum SRV-Referenzsystem fallen die Abbruchwahrscheinlichkeiten im SO-RRM-System umso niedriger aus, je höherratiger der eingesetzte PHY Modus bzw. je höher die Mindest-SINR-Schwelle  $\Gamma_{\min}$  liegt. Offensichtlich steigt die Stabilität der Selbstorganisation durch die Anwendung höherratiger PHY Modi. Der Grund dafür ist, dass durch die Nutzung hochratiger PHY Modi weniger Ressourcen pro MS benötigt werden und dadurch insgesamt weniger GKI entstehen.

Mit dem SO-RRM-System lassen sich deutlich mehr Benutzer versorgen als mit dem SRV-Referenzsystem. Aus Bild 7.4 geht hervor, dass der Einsatz von adaptiver Modulation die Effizienz bedeutsam verbessert. Die Ursache dafür liegt in der interferenzadaptiven Ressourcenauswahl. MS mit hohen Störabständen benötigen weniger Ressourcen als MS mit niedrigen Störabständen. Jeder MS werden immer nur genau so viele Ressourcen zugewiesen, wie sie tatsächlich benötigt. Hierdurch erreicht das SO-RRM-System seine hohe Effizienz.

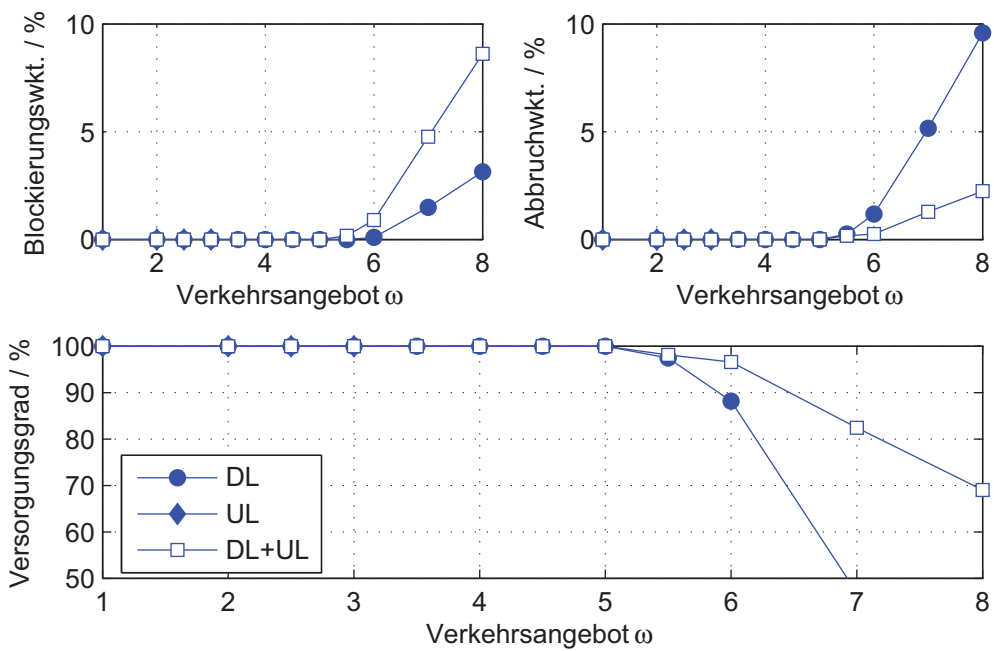
#### 7.4.2.3. Ergebnisse für das SO-RRM-System bei getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL

Bild 7.5 zeigt die Ergebnisse für den Fall, dass in DL und UL wie in Kapitel 6.1.3.1 beschrieben unabhängige Ressourcenauswahlprozesse durchgeführt werden. Zum Vergleich sind noch einmal die im vorigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse für die gemeinsame Auswahl in DL und UL aufgeführt. Es wird nur noch der Fall mit AM betrachtet.

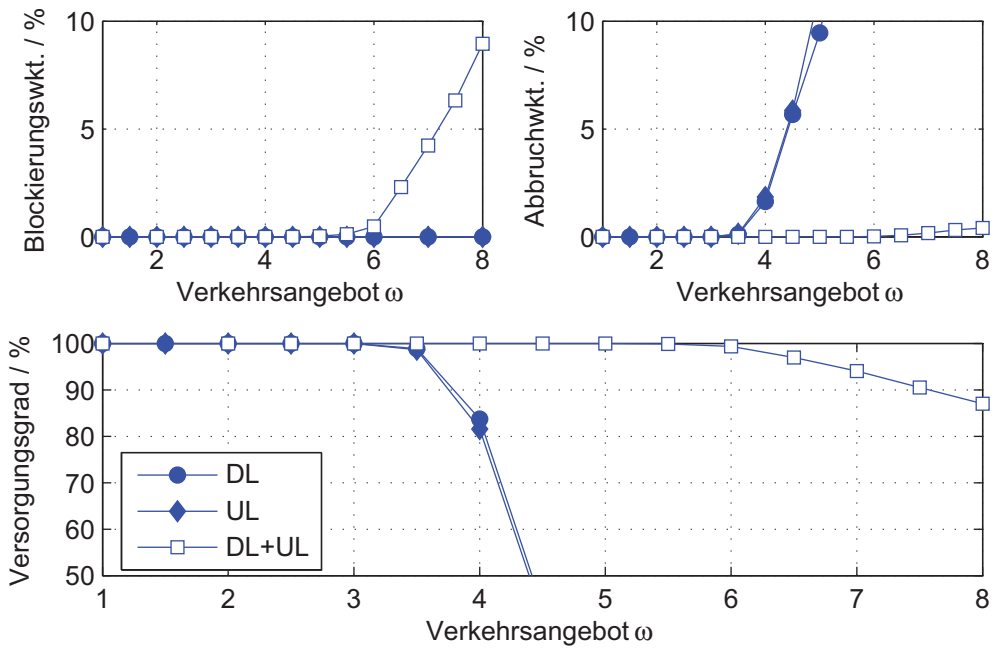
In Bild 7.5(a) sind die ohne Abschattungseffekte ( $\sigma_A = 0$ ) ermittelten Simulationsergebnisse dargestellt. Im SO-RRM-System mit gemeinsamer Auswahl liegt die Blockierungswahrscheinlichkeit höher als in den beiden SO-RRM-Systemen mit getrennter Auswahl. Die Abbruchwahrscheinlichkeit ist jedoch bei getrennter Auswahl größer. Dies führt aufgrund der stärkeren Gewichtung von Verbindungsabbrüchen zu einem niedrigeren Versorgungsgrad als bei der gemeinsamen Ressourcenauswahl in DL und UL.

Der beobachtete Effekt verstärkt sich, wenn Lognormalfading in den Simulationen berücksichtigt wird. Bild 7.5(b) zeigt die Ergebnisse für diesen Fall. Die Abbruchwah-





(a) ohne Abschattungen,  $\sigma = 0$  dB



(b) mit Abschattungen,  $\sigma = 8$  dB

Bild 7.5.: Vergleich der SO-RRM-Systeme mit getrennter und gemeinsamer Ressourcenauswahl in UL und DL bei gleichverteilten MS, Datenrate 384 kBit/s und Anwendung adaptiver Modulation



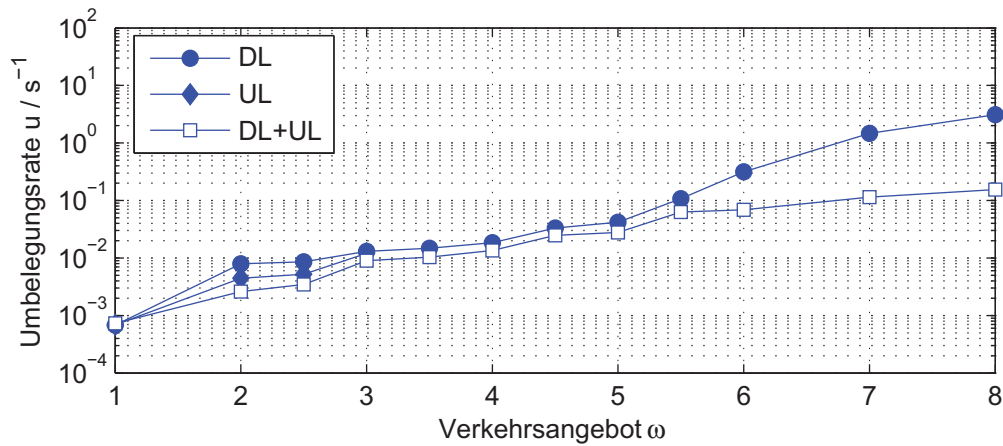
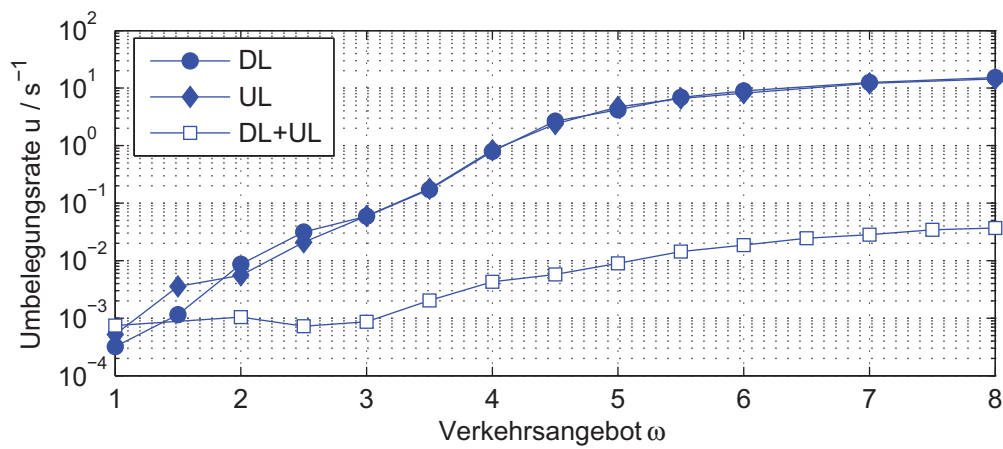
(a) ohne Abschattungen,  $\sigma = 0\text{dB}$ (b) mit Abschattungen,  $\sigma = 8\text{dB}$ 

Bild 7.6.: Umbelegungsrate bei getrennter und bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in UL und DL, Datenrate 384 kBit/s und Anwendung adaptiver Modulation

scheinlichkeit erhöht sich bei getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL drastisch im Vergleich zum Szenario ohne Abschattungen, während sie bei gemeinsamer Ressourcenauswahl sinkt. Um dieses Phänomen zu erklären, werden die in Bild 7.6 dargestellten Umbelegungsrate betrachtet. Im Szenario (a) ohne Abschattungen sind die Umbelegungsrate zunächst für alle Verfahren nahezu identisch. Erst bei hohem Verkehrsangebot lässt sich ein signifikanter Unterschied feststellen. Die Umbelegungsrate steigen bei getrennter Auswahl deutlich stärker an als im System mit gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL. Im Szenario (b) mit Abschattungen liegen die Umbelegungsrate bei getrennter Auswahl bereits bei niedrigem Verkehrsangebot deutlich über den mit gemeinsamer Auswahl erzielten Rate. Die höheren Umbelegungsrate decken sich mit der Beobachtung, dass bei getrennter Auswahl Verbindungsabbrüche aufgrund erfolgloser Umbelegungsversuche häufiger auftreten als bei gemeinsamer Auswahl. Die niedrigeren Umbelegungsrate zeigen, dass mit gemeinsamer Auswahl der Ressourcen in DL und UL eine höhere Stabilität bei der Selbstorganisation erzielt wird.

Was ist die Ursache der höheren Abbruchwahrscheinlichkeiten und der häufigeren Umbelegungen bei getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL? Um diese Fragen zu beantworten, werden in Bild 7.7 die mittleren Wiederverwendungsrate der genutzten Ressourcen betrachtet. Im Szenario (a) ohne Abschattungseffekte lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Verfahren feststellen. Bei gemeinsamer Auswahl liegen die Wiederverwendungsrate minimal über denen bei getrennter Auswahl. Wesentlich mehr Aufschluss liefert die Betrachtung des Szenarios (b) mit Abschattungseffekten. Hier geht die Schere deutlich auseinander. Die Wiederverwendungsrate liegen im System mit gemeinsamer Ressourcenauswahl weit über den im System mit getrennter Ressourcenauswahl erzielten Rate. Bei gemeinsamer Auswahl werden folglich im Mittel mehr Ressourcen pro Benutzer ausgewählt als bei getrennter Auswahl. Für beide Verfahren gilt, dass die Wiederverwendungsrate im Szenario mit Abschattungen niedriger ausfallen und demnach weniger Ressourcen pro Benutzer benötigt werden als im Szenario ohne Abschattungen.

Weiteren Aufschluss über das beobachtete Verhalten geben die in Bild 7.8 dargestellten Verteilungen der aus der Linkadaptation resultierenden PHY Modi. Hieran lässt sich der Unterschied zwischen den beiden Szenarien (a) ohne und (b) mit Abschattungseffekten am deutlichsten erkennen. Ohne Abschattungen (linke Spalte) ist kein bedeutsamer Unterschied zwischen den Verfahren feststellbar. Im Szenario mit Abschattungen (rechte Spalte) lässt sich jedoch ein signifikant unterschiedliches Systemverhalten beobachten. Die auffälligste Beobachtung in Bild 7.8 ist die Verteilung der PHY Modi bei getrennter Ressourcenauswahl im Szenario mit Abschattungen. Während im Szenario ohne Abschattungen bereits bei relativ niedrigem Verkehrsangebot aufgrund der gestiegenen GKI auf niederratige PHY Modi ausgewichen wird, werden im Szenario mit Abschattungen offensichtlich fast immer Ressourcen mit hohem SINR gefunden, sodass auch bei hohem Verkehr überwiegend die hochratigen PHY Modi genutzt werden.

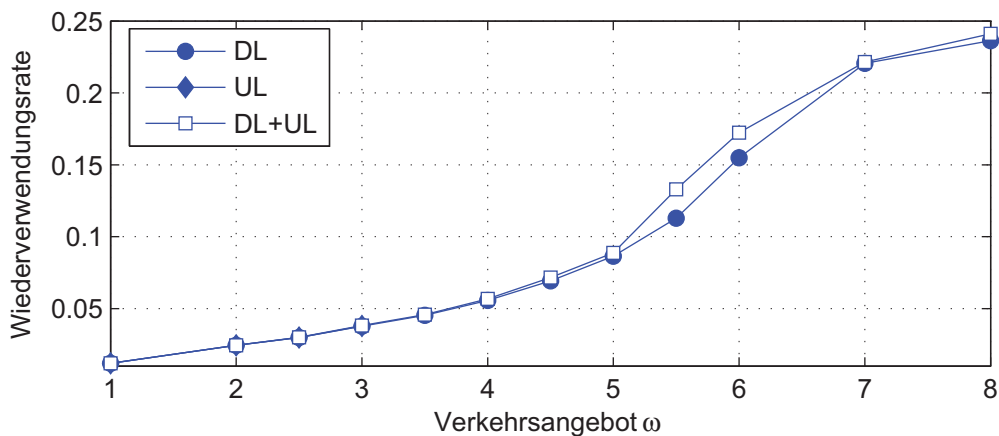
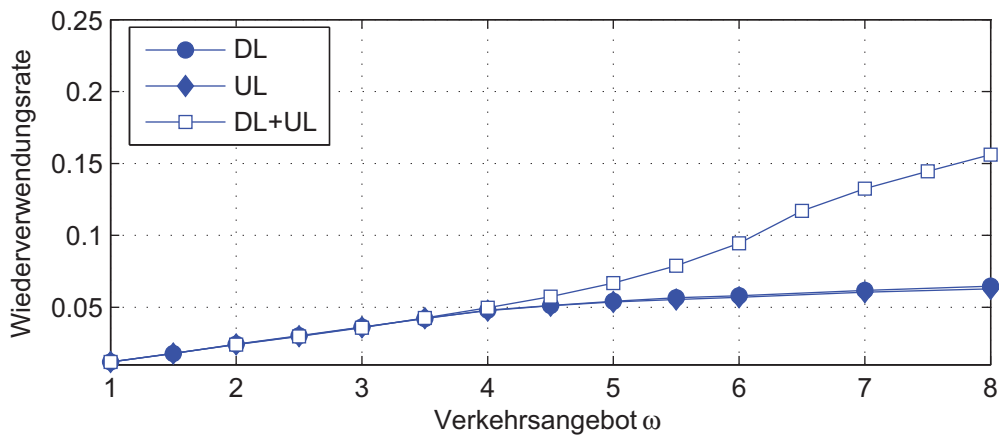
(a) ohne Abschattungen,  $\sigma = 0\text{dB}$ (b) mit Abschattungen,  $\sigma = 8\text{dB}$ 

Bild 7.7.: Mittlere Wiederverwendungsrate bei getrennter und bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in UL und DL, Datenrate 384 kBit/s und Anwendung adaptiver Modulation

Das zunächst fragwürdig erscheinende beobachtete Verhalten lässt sich anschaulich erklären. In Kapitel 2.1.2 wurde erläutert, dass die im Versorgungsgebiet auftretenden Abschattungen zwischen BS  $b$  und MS  $m$  durch lognormalverteilte Zufallsvariablen  $\eta^{b,m}$  beschrieben werden. Die Lognormalverteilung ist dabei so parametrisiert, dass sie einen Median von eins aufweist. Demzufolge führen 50% der Realisierungen von  $\eta^{b,m}$  zu einem Wert von größer als eins und damit zu einer Anhebung der mittleren Empfangsleistung gegenüber dem Fall ohne Abschattung. Die anderen 50% hingegen verstärken die mittlere Pfaddämpfung und senken die mittleren Empfangsleistungen im Vergleich zum Szenario ohne Abschattungen.

Wie in Kapitel 6 ausführlich dargelegt wurde, werden die Ressourcen nach geringster gemessener Interferenzleistung ausgewählt. Niedrige Interferenzleistungen liegen dann vor, wenn (a) keine oder nur wenige GKS die Ressourcen nutzen oder wenn (b) der Fall vorliegt, dass die GKS abschattungsbedingt hohe Pfaddämpfungen zur messenden BS oder MS aufweisen. Da im System eine große Anzahl von Ressourcen zur Verfügung steht, ist selbst bei hoher Systemauslastung die Wahrscheinlichkeit groß, dass aufgrund starker Abschattungen Ressourcen mit niedriger Interferenzleistung vorgefunden werden. Diese Ressourcen stehen dann in der Auswahlrangliste ganz vorn. Die niedrigen Interferenzleistungen führen zu hohen SINRs. Hierdurch erklärt sich die in Bild 7.8 beobachtete Verteilung der PHY Modi. Da die Ressourcen bei Lognormalfading überwiegend mit hochratigen PHY Modi genutzt werden, erklärt sich die in Bild 7.7 gemachte Beobachtung, dass bei getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL in den Simulationen mit Lognormalfading weniger Ressourcen pro Benutzer benötigt werden als im Szenario ohne Lognormalfading.

Bei gemeinsamer Auswahl der Ressourcen in DL und UL gelten dieselben zuvor beschriebenen Zusammenhänge. Das Lognormalfading wirkt sich jedoch weniger stark aus als bei der gemeinsamen Auswahl. Der Grund hierfür ist, dass bei der gemeinsamen Ressourcenauswahl gemäß Gl. (6.1) die höhere der beiden in DL und UL gemessenen Interferenzleistungen in die Kanalzustandsprognose einfließt. Da die Abschattungsprozesse in DL und UL voneinander unabhängig sind, ist bei gemeinsamer Ressourcenauswahl die Wahrscheinlichkeit für sehr kleine Interferenzleistungen viel geringer. Es ist weniger wahrscheinlich, dass sowohl die Gleichkanalstörer im DL als auch im UL durch das Lognormalfading abgeschwächt werden. Die Wahrscheinlichkeit für eine Abschwächung beträgt aufgrund des Medians von eins der Lognormalverteilung in jeder Übertragungsrichtung 50%. Die Wahrscheinlichkeit, dass sowohl die DL-Störer als auch die UL-Störer abgeschwächt werden, beträgt demnach nur noch 25%. Da bei gemeinsamer Ressourcenauswahl folglich im Mittel höhere Interferenzleistungen in die Kanalprognosen eingehen, werden entsprechend schlechtere SINRs geschätzt und niederratigere PHY Modi ausgewählt als bei getrennter Ressourcenauswahl. Entsprechend werden bei gemeinsamer Auswahl wie in Bild 7.7 zu sehen mehr Ressourcen pro Benutzer benötigt.

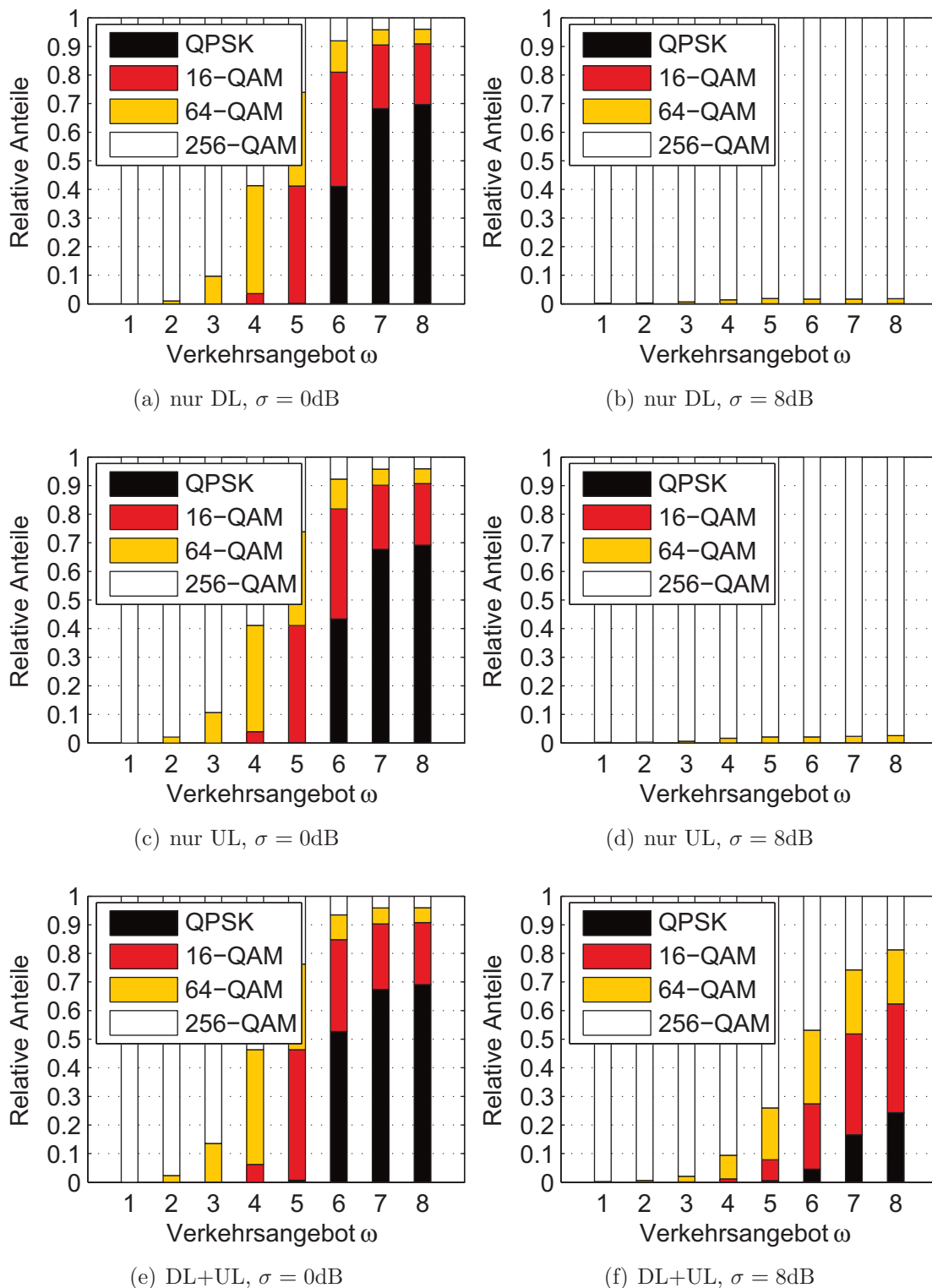


Bild 7.8.: Relativer Anteil der genutzten PHY Modi bei gleichverteilten MS, Datenrate 384 kBit/s und Anwendung adaptiver Modulation

Anhand der Umbelegungsraten wurde bereits erläutert, dass mit der gemeinsamen Ressourcenauswahl in DL und UL eine höhere Stabilität bei der Selbstorganisation erreicht wird. Die bei getrennter Auswahl überwiegend genutzten hochratigen PHY Modi führen zur häufigeren SINR-Unterschreitungen und einer höheren Abbruchwahrscheinlichkeit. Grund hierfür ist das Systemverhalten bei Hinzukommen eines weiteren GKS. Für die bestehenden Verbindungen steigen durch einen zusätzlichen Störer die GKI an. Durch das Lognormalfading kann dieser Anstieg sehr stark ausfallen. Als Konsequenz sinken die mittleren Störabstände und mit ihnen die Datenraten der betroffenen Verbindungen. Bei gemeinsamer Ressourcenauswahl hingegen sind die Funkverbindungen weniger anfällig gegenüber zusätzlichen Störern, da die Störabstände durch die gemeinsame Auswertung der GKI in DL und UL weniger optimistisch prognostiziert werden. Dadurch bleibt den Ressourcen ein größerer Spielraum für weitere Anstiege GKI, bevor der jeweilige SINR-Schwellwert unterschritten wird.

### 7.4.3. Systemverhalten bei Überdeckung des Ressourcenbedarfs

Im letzten Abschnitt wurde festgestellt, dass die gemeinsame Ressourcenauswahl in DL und UL zu einem besseren Systemverhalten führt als die getrennte Ressourcenauswahl. Der Grund hierfür lag in den pessimistischeren SINR-Prognosen, die dazu führen, dass im Mittel mehr Ressourcen pro Benutzer eingesetzt werden als bei getrennter Ressourcenauswahl. Obwohl mehr Ressourcen eingesetzt werden und dadurch höhere GKI entstehen, treten bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL weniger Verbindungsabbrüche auf. Es stellt sich daher die Frage, ob durch eine über den eigentlichen Bedarf hinausgehende Ressourcenzuteilung das Systemverhalten verbessert werden kann.

Es wird der Fall untersucht, dass beim Verbindungsaufbau die in Bild 6.3 mit  $d^{b,m}$  bezeichnete Zieldatenrate um 25% erhöht wird, obwohl die Benutzer nach wie vor dieselbe Datenrate  $d^{b,m}$  fordern. Ziel dieser Überdeckung ist es, die bereits laufenden Übertragungen robuster gegenüber neu hinzukommenden Funkverbindungen zu machen und Einbrüche der Datenrate unter den Sollwert von  $d^{b,m}$  zu verhindern.

Bild 7.9 zeigt die Ergebnisse für den Fall mit 25% Überdeckung pro Benutzer. Zum Vergleich sind noch einmal die Ergebnisse aus dem vorigen Abschnitt (Bild 7.5) mit eingezeichnet. Für das SO-RRM-System mit getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL wird das Ziel erreicht, durch die Auswahl zusätzlicher Ressourcen die Abbruchwahrscheinlichkeit zu senken. Das SO-RRM-System mit gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL hingegen profitiert nicht von der getroffenen Maßnahme. Die Abbruchwahrscheinlichkeit bleibt nahezu unverändert niedrig. Da jetzt jedoch mehr Ressourcen pro MS vergeben werden, steigt die Blockierungswahrscheinlichkeit im Vergleich zum Fall ohne Überdeckung signifikant an.

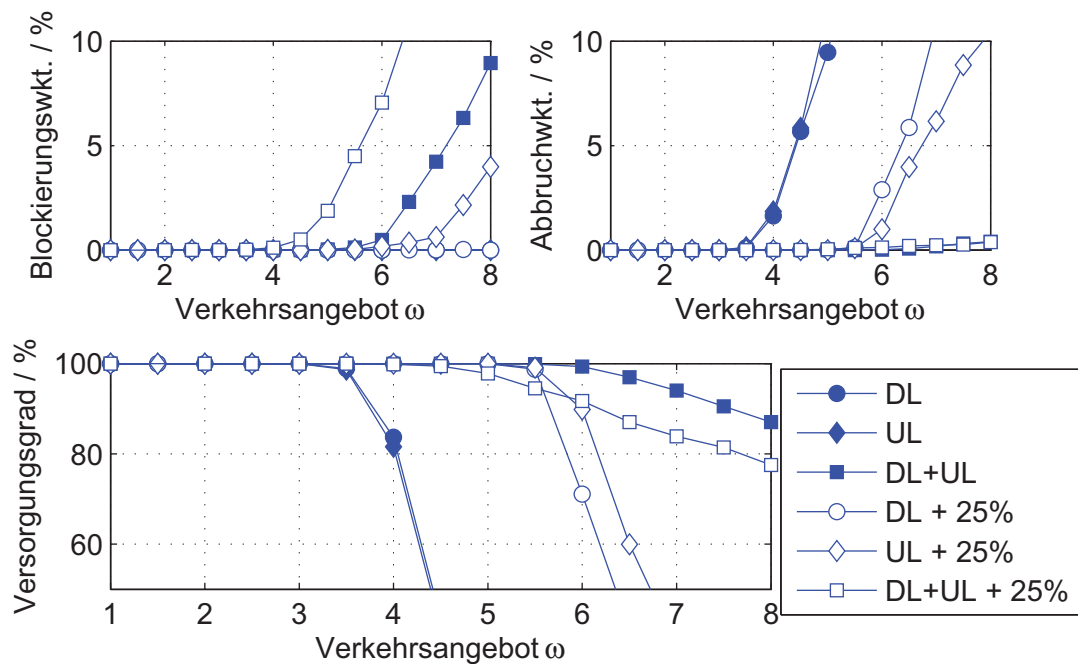


Bild 7.9.: Systemverhalten bei Überdeckung der geforderten Datenrate um 25% (384 kBit/s benötigt, 480 kBit/s zugewiesen)

Die in Bild 7.10 gezeigten Umbelegungsraten verdeutlichen, dass die Zuteilung überschüssiger Ressourcen bei getrennter Ressourcenauswahl das Systemverhalten bei niedriger und mittlerer Systemauslastung verbessert. Bei hoher Auslastung jedoch verschlechtert sich das Verhalten, weil mit der gestiegenen Anzahl an genutzten Ressourcen auch die Wahrscheinlichkeit für SINR-Unterschreitungen bei Hinzukommen weiterer Gleichkanalstörer zunimmt. Bei gemeinsamer Ressourcenauswahl in DL und UL tritt dieser Effekt nicht auf. Die zusätzlich genutzten Ressourcen bewirken, dass neue Verbindungen bereits bei mittlerem Verkehrsangebot mit großer Wahrscheinlichkeit abgewiesen werden. Die gestiegene Blockierungswahrscheinlichkeit hat zur Folge, dass weniger häufig neue Benutzer ins System aufgenommen werden und dadurch wie in Bild 7.10 klar zu erkennen die Umbelegungsraten sinken.

## 7.5. Hot-Spot-Szenario

Die größte Stärke von SO-RRM liegt in der Versorgung von ungleichförmig im Versorgungsgebiet verteiltem Ressourcenbedarf. Daher wird nun das Systemverhalten in einem Hot-Spot-Szenario untersucht. Der hier angenommene Hot Spot besteht aus bis zu 7 der in Bild 7.1(b) dunkel markierten Zellen. Die Größe des Hot-Spot-Gebiets entspricht genau der Größe  $C = 7$  eines SRV-Clusters. Im Extremfall konzentriert sich das gesamte Verkehrsaufkommen in nur einer Zelle. Neben diesem Fall werden die Fälle mit Verkehr in zwei, drei

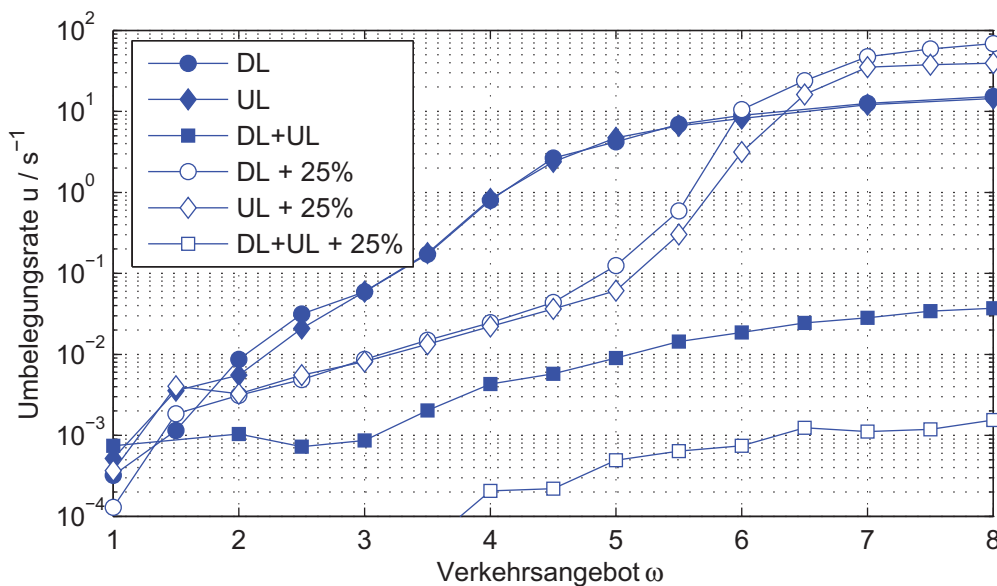


Bild 7.10.: Umbelegungsrate bei Überdeckung der geforderten Datenrate um 25% (384 kBit/s benötigt, 480 kBit/s zugewiesen)

und sieben Zellen untersucht. Innerhalb jeder Hot-Spot-Zelle wird das Benutzeraufkommen als gleichförmig verteilt angenommen.

Bild 7.11 zeigt die Simulationsergebnisse für das Hot-Spot-Szenario. Wenn sich der gesamte Verkehr in einer Zelle konzentriert, so liegen keine GKI vor. Sowohl das SRV-Referenzsystem als auch das SO-RRM-System sind in dem Fall allein durch die Anzahl verfügbarer Ressourcen limitiert. Da keine interferenzbedingten SINR-Einbrüche zu erwarten sind, wird im SRV-Referenzsystem mit dem höchstratigen PHY Modus übertragen. Dadurch sind in jeder SRV-Zelle 36 Ressourcen verfügbar. Pro Benutzer werden drei Ressourcen benötigt, sodass im SRV-Referenzsystem  $K = 12$  Kanäle bereitstehen. Die simulierte Blockierungswahrscheinlichkeit deckt sich in dem Fall nahezu exakt mit der in Anhang A angegebenen (Erlang-B)-Verlustwahrscheinlichkeit  $P_b(\omega, K)$ .

Obwohl nur eine Zelle simuliert wird und daher keine GKI existieren, treten im SRV-Referenzsystem Verbindungsabbrüche auf. Da im SRV-System vor der Zuteilung keine SINR-Prognosen erstellt werden, kann es vorkommen, dass einige MS aufgrund starker Abschattungseffekte kein hinreichend hohes SINR für die Nutzung des höchstratigen PHY Modus haben. In dem Fall werden zwar freie Ressourcen gefunden; die Funkverbindung wird jedoch sofort wieder abgebrochen, da der geforderte Mindestdatenratenbedarf nicht gedeckt wird.

Dem SO-RRM-System stehen im betrachteten Szenario  $C = 7$  mal mehr Ressourcen zur Verfügung als dem SRV-System. Wenn sich der Verkehr auf eine Zelle konzentriert, kann eine um den Faktor 7 höhere Benutzeranzahl versorgt werden. Aufgrund der größeren Anzahl  $C \cdot K$  verfügbarer Kanäle ist zudem wie in Anhang A erklärt der Bündelungsgewinn



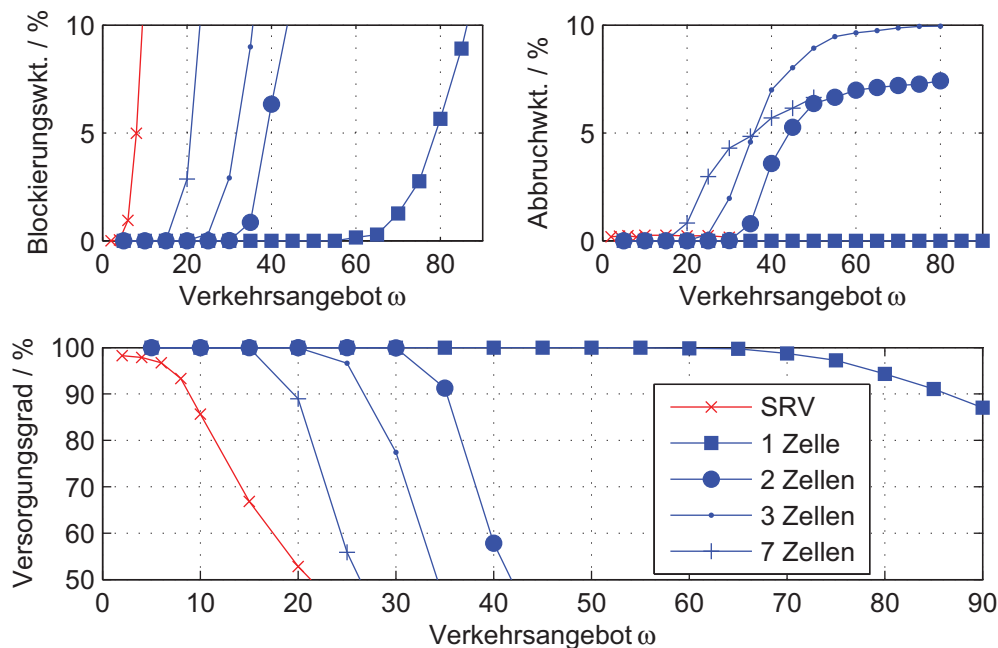


Bild 7.11.: Ergebnisse für das Hot-Spot-Szenario; Datenrate 384 kBit/s

im SO-RRM-System größer als im SRV-Referenzsystem, was noch einmal zu einer Senkung der Blockierungswahrscheinlichkeit führt. Da mit SO-RRM vor der Zuteilung stets auf Basis der geschätzten SINRs geprüft wird, wieviele Ressourcen tatsächlich für eine neue Funkverbindung benötigt werden, treten im Gegensatz zum SRV-Referenzsystem keine Verbindungsabbrüche auf.

Wird das Verkehrsaufkommen auf zwei benachbarte Zellen ausgeweitet, so halbiert sich erwartungsgemäß im SO-RRM-System die Benutzerkapazität pro Zelle gegenüber dem Fall des in nur einer Zelle konzentrierten Verkehrsaufkommens. Bild 7.11 zeigt weiterhin die Ergebnisse für die Szenarien mit Verkehr in drei und sieben Funkzellen. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass im SO-RRM-System sämtliche Ressourcen immer dort belegt werden können, wo sie gerade benötigt werden. Für das SRV-System hingegen ist es unerheblich, wie hoch das momentane Verkehrsaufkommen in den umliegenden Zellen ist. Jede SRV-Zelle hat ihr fest zugewiesenes Ressourcenkontingent. In Zellen mit niedrigem Verkehr können die in umliegenden Zellen brach liegenden Ressourcen nicht genutzt werden, um Zellen mit hohem Verkehr zu entlasten.

Durch die Adaption an das tatsächliche momentane Verkehrsaufkommen in den umliegenden Zellen bietet das SO-RRM-System die maximale Flexibilität bezüglich der Verfügbarkeit und Nutzung von Funkressourcen.

## 7.6. Diskussion

Die in diesem Kapitel präsentierten Simulationsergebnisse belegen, dass mit dem SO-RRM-System eine hohe Effizienz und Flexibilität erzielt werden. Die Ressourcenauswahl nach geringster gemessener Interferenzleistung führt sowohl zu einem effizienten als auch stabilen Netzbetrieb. Durch die Anwendung einer Linkadaptionstechnik wird erreicht, dass MS mit guten Kanalzuständen wenig Ressourcen benötigen und somit wenig Interferenzleistung erzeugen. Funkverbindungen mit schlechten Kanalzuständen hingegen erhalten mehr Ressourcen mit robusten PHY Modi.

Gerade das zuletzt betrachtete Beispiel eines Hot-Spot-Szenarios zeigt deutlich die Vorteile einer Selbstorganisation. Während Funkzellen SRV-basierter Systeme in keiner Weise von Schwankungen des Verkehrsaufkommens in umliegenden Zellen profitieren, können SO-RRM-Systeme die zugeteilte Funkbandbreite für jede Zelle ohne jeglichen Planungsaufwand dynamisch und bedarfsgerecht skalieren. Freie Ressourcen werden immer dort genutzt, wo zusätzlicher Bedarf im Versorgungsgebiet entsteht.

Das SO-RRM-System lieferte in allen simulierten Szenarien eine höhere Systemleistung als das SRV-Referenzsystem. Insbesondere zeigte sich, dass SO-RRM ein deutlich robusteres Verhalten gegenüber Signalabschattungen aufweist. Während Signalabschattungen in SRV-Systemen aufgrund der fehlenden Interferenzadaptivität die Wahrscheinlichkeit für Verbindungsabbrüche stark erhöhen, können SO-RRM-Systeme sogar von Abschattungen profitieren. Vorteile ergeben sich, wenn Ressourcen ausgewählt werden, deren Gleichkanalstörer stark von der messenden BS oder MS abgeschattet sind und daher nur schwache GKI erzeugen.

Die Untersuchungen erfolgten unter der Annahme konstanter Datenraten in DL und UL. Zwei SO-RRM-Zuteilungsstrategien wurden betrachtet, die in Kapitel 6.1.3.1 beschriebene getrennte Ressourcenauswahl für DL und UL und die gemeinsame Ressourcenauswahl mit Nutzung derselben Ressourcen in DL und UL aus Kapitel 6.1.3.2. Bei getrennter Ressourcenauswahl in UL und DL ist bei gegebenem Lognormalfading die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass Ressourcen mit niedrigen GKI ganz vorn in den Auswahlranglisten stehen. Die niedrigen GKI kommen wie bereits erläutert dadurch zustande, dass die Gleichkanalstörer stark von der messenden Station abgeschattet sind.

Die Wahrscheinlichkeit, dass in DL und UL gleichermaßen starke Abschattungseffekte vorliegen, ist aufgrund der unabhängigen Lognormalfadingprozesse in DL und UL deutlich geringer. Dadurch wird bei gemeinsamer Ressourcenauswahl frühzeitiger auf robuste PHY Modi ausgewichen als bei der getrennten Ressourcenauswahl. Bei getrennter Auswahl werden selbst bei hohem Verkehrsangebot überwiegend hochratige PHY Modi angewendet, welche empfindlicher gegen die durch neue Funkverbindungen hinzukommenden GKI sind. Dadurch kommt es bei getrennter Ressourcenauswahl in DL und UL häufiger zu Ressourcenumbelegungen und Verbindungsabbrüchen als bei gemeinsamer Ressourcenauswahl.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch Zuteilung einer höheren als der geforderten Datenrate beim Verbindungsaufbau ein höherer Versorgungsgrad im System erzielt werden kann. Die überschüssige Übertragungskapazität wirkt als Puffer gegen Änderungen der GKI. Der Puffer bewirkt, dass die Häufigkeit von Ressourcenumbelegungen und Verbindungsabbrüchen bei mittlerer Systemauslastung deutlich abnimmt. Erst bei hohem Verkehrsangebot wirken sich die durch die überschüssigen Ressourcen zusätzlich entstehenden GKI negativ auf die Versorgungsgüte aus.

Die Verbesserung der Systemleistung durch Belegung von mehr Ressourcen als eigentlich gerade benötigt stellt einen interessanten Untersuchungsaspekt dar, der im anschließenden Kapitel bei der Untersuchung von SO-RRM zur Versorgung von variablen Datenraten eingehend betrachtet wird.

## 8. SO-RRM im Downlink bei variablen Datenraten

Bisher wurden MS mit einer beispielhaften festen Datenrate von 384 kBit/s versorgt. In diesem Kapitel wird untersucht, wie MS mit benutzerspezifischen und zeitvarianten Datenraten im DL effizient versorgt werden können. Dabei wird angenommen, dass die benutzerspezifischen Datenraten zwischen 192 kBit/s und 768 kBit/s variieren. Die Schwankungen werden so modelliert, dass im Mittel wieder 384 kBit/s von jeder MS benötigt werden.

Im vorherigen Kapitel 7 wurden Ressourcen beim Verbindungsaufbau exklusiv für eine MS ausgewählt und von dieser möglichst langfristig genutzt, um Schwankungen der GKI zu vermeiden. Reorganisationen erfolgten nur, wenn die verfügbare Datenrate einer MS dauerhaft unter den Sollwert von 384 kBit/s fiel.

Falls die MS eine zeitlich veränderliche Datenrate von der BS fordern, die Ressourcenvergabe sich aber an einer Zuordnung mit festen Datenraten orientiert, dann müsste bereits beim Verbindungsaufbau der schlechteste Fall von 768 kBit/s angenommen werden. Dies führt allerdings zu einer geringen Systemeffizienz. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein erweitertes SO-RRM-Konzept vorgestellt. Es wird nun ein Ausgleich bezüglich der genutzten Ressourcenmengen zwischen den MS mit hohen und denen mit niedrigen Momentandatenraten angestrebt. Das neue Konzept bietet die Möglichkeit, die für den DL ausgewählten Ressourcen in kurzen zeitlichen Abständen zwischen den in der Zelle aktiven MS umzuverteilen. Die Ressourcenauswahl erfolgt wie gehabt auf Basis der in Kapitel 6 eingeführten Ranglisten. Das SO-RRM wählt weiterhin Ressourcen mit den höchsten SINRs aus und strebt deren langfristige Nutzung an, damit die in den Nachbarzellen wahrgenommenen GKI möglichst wenig schwanken.

Mit dem Erweiterungsprotokoll kann im DL die Zuordnung der ausgewählten Ressourcen zu den MS in jedem Zugriffsrahmen geändert und an den Momentanbedarf angepasst werden. Änderungen der Ressourcenzuordnungen haben im DL keine Auswirkung auf die GKI in den umliegenden Zellen. Dies wurde bereits in Kapitel 6.2 anhand von Bild 6.4 erläutert. Folglich lässt sich ein Datenratenausgleich zwischen den MS im DL widerspruchsfrei in das bestehende SO-RRM-Konzept integrieren.

Die Tatsache, dass speziell im DL die Ressourcenzuordnungen beliebig geändert werden können, eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, sich im DL an das zeitvariante Verhalten

der frequenzselektiven Funkkanäle zu adaptieren. Die Übertragungsfunktionen  $H_m(f, t)$  der MS, vgl. Bild 2.2, sind statistisch unabhängig voneinander. Je mehr Benutzer sich in einer Zelle befinden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass für einen ausgewählten Subträger (OFDM-FDMA-Ressource) vom Scheduler eine MS mit gutem Kanalzustand gefunden wird. Dieser Zusammenhang wird als Multi User Diversity (MUD) bezeichnet [SOR07].

Laut [SOR07] werden durch eine kanaladaptive Auswahl und Zuordnung der Subträger im Mittel bis zu 6 dB SNR pro Verbindung im Vergleich zur nicht-kanaladaptiven Zuordnung gewonnen. Bislang wurden die Ressourcen dauerhaft und damit bei zeitvariantem Kanalverhalten sowohl in guten als auch in schlechten Kanalzuständen genutzt. Da in diesem Kapitel kanaladaptive Ressourcenzuordnungen im DL durchgeführt werden, sind im Vergleich zu Kapitel 7 Performancesteigerungen zu erwarten. Durch die zusätzliche Möglichkeit, in jedem Zugriffsrahmen quellen- und kanaladaptive Zuordnungsentscheidungen treffen zu können, wird die Adaptivität des SO-RRM-Systems im DL beträchtlich erhöht. Die Auswirkungen auf das Systemverhalten werden im Folgenden untersucht.

## 8.1. SO-RRM-Protokoll für den DL

Als technische Lösung wird das in Bild 8.1 gezeigte Konzept vorgeschlagen. Das neue SO-RRM-Konzept wird in die zwei Teilprozesse Makro- und Mikro-RRM untergliedert. Die Steuerung der Ressourcenauswahl erfolgt durch das Makro-RRM. Dieses beinhaltet die protokolltechnischen Erweiterungen zur Versorgung der MS mit variablen Datenraten im DL. Die Ressourcenauswahl erfolgt weiterhin auf Basis der in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Mess- und Auswahlprozesse. Der zweite, als Mikro-RRM bezeichnete Teilprozess des SO-RRM hat die Aufgabe, den angestrebten Datenratenausgleich zwischen den MS innerhalb einer Zelle herbeizuführen. Hierzu ordnet es die vom Makro-RRM ausgewählten Ressourcen mit Hilfe eines Scheduling-Algorithmus den MS bedarfsangepasst zu.

Die Besonderheit des vorgeschlagenen Konzepts liegt in der Kopplung von Makro- und Mikro-RRM. Die Interaktion der beiden Prozesse kann wie in Bild 8.1 dargestellt als geschlossener Regelkreis veranschaulicht werden. Das Mikro-RRM teilt dem Makro-RRM in regelmäßigen Abständen mit, inwieweit der momentane Datenratenbedarf durch die vorhandenen Ressourcen gedeckt wird. Auf Basis dieser Rückmeldungen entscheidet das Makro-RRM, ob weitere Ressourcen ausgewählt oder belegte Ressourcen freigegeben werden müssen.

Die vom Makro-RRM ausgewählten Ressourcen sollen einerseits langfristig von der BS genutzt werden, um Schwankungen der GKI in den Nachbarzellen zu vermeiden. Andererseits muss die Menge der belegten Ressourcen angepasst werden, wenn sich die

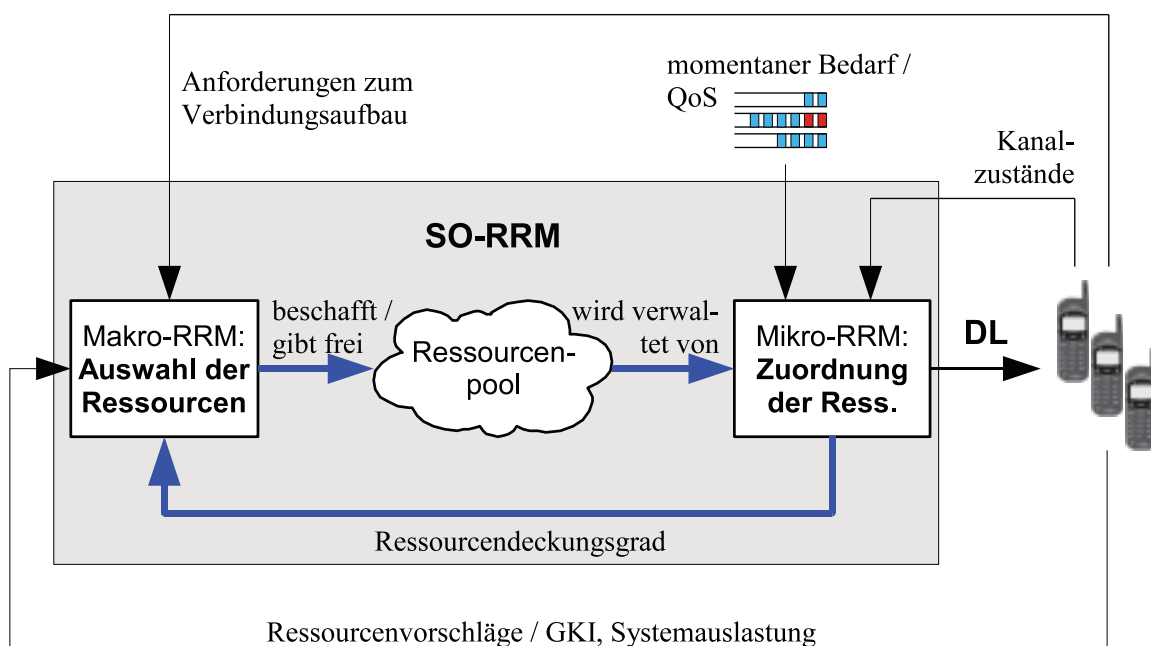


Bild 8.1.: SO-RRM im DL zur Versorgung der MS mit variablen Datenraten

geforderten Datenraten oder die Intensität der GKI ändern. Eine interessante und im Folgenden untersuchte Fragestellung lautet, wie häufig und in welchem Maße das SO-RRM Änderungen am Ressourcenkontingent einer BS vornehmen sollte, um im DL eine möglichst große Anzahl von Benutzern mit variablen Datenraten versorgen zu können.

## 8.2. Deckungsgradbasierte Ressourcenauswahl

Der in Bild 8.1 als Makro-RRM bezeichnete Teilprozess koordiniert die Ressourcenauswahl im DL. Als Erweiterung des bisherigen SO-RRM-Konzepts wird nun ein Protokoll vorgeschlagen, welches durch gezielte Ansteuerung des in Kapitel 6, Bild 6.3 definierten Auswahlprozesses eine effiziente Versorgung von MS mit variablen Datenraten im DL ermöglicht.

Die ausgewählten Ressourcen werden in einem Ressourcenpool zur Verfügung gestellt. Das Mikro-RRM kann die im Pool befindlichen Ressourcen flexibel den aktiven Funkverbindungen zuordnen. Die Zuordnungen können in jedem Übertragungsrahmen neu getroffen werden. Dadurch kann im hier betrachteten Fall variabler Datenraten ein Datenratenausgleich zwischen den Benutzern herbeigeführt werden. Eine Adaption der Zuordnungen an die Momentanzustände der zeitvarianten und frequenzselektiven Funkkanäle ist ebenfalls möglich. Diesbezügliche Überlegungen werden im Rahmen der Beschreibung des Mikro-RRM in Abschnitt 8.3 fortgeführt.

Das im Folgenden beschriebene Makro-RRM-Protokoll sorgt dafür, dass im Pool stets genügend Ressourcen zur Deckung des Gesamtbedarfs aller im DL aktiven Verbindungen zur Verfügung stehen. Ob Ressourcen zusätzlich ausgewählt werden und wenn ja wieviele, wird durch kontinuierliche Auswertung des im nächsten Abschnitt definierten Ressourcendeckungsgrads ermittelt.

### 8.2.1. Momentane Datenrate

Aufgabe des Makro-RRMs ist die Bereitstellung der momentan von den MS geforderten Gesamtdatenrate  $D(t)$ . Im hier betrachteten Modell trägt jede MS je nach Zustand ihrer Datenquelle entweder 192 kBit/s oder 768 kBit/s zur Summe  $D(t)$  bei. Das Makro-RRM muss so viele Ressourcen für den in Bild 8.1 angedeuteten Pool auswählen, dass im zeitlichen Mittel mindestens die Gesamtdatenrate  $D(t)$  erzielt wird.

Die aus den im Pool vorhandenen Ressourcen resultierende Gesamtdatenrate  $V(t)$  hängt maßgeblich von den Kanalzuständen der MS ab, denen die Ressourcen zugeordnet werden. Die Zuordnungen und damit auch  $V(t)$  können in jedem Zugriffsrahmen variieren. Das Makro-RRM kann  $V(t)$  daher nur vage prognostizieren.

Das Mikro-RRM hingegen hat genaue Kenntnis über die momentan verfügbare Gesamtdatenrate, da es stets die vom Schedulingalgorithmus (s. Kapitel 8.3) getroffenen Zuordnungen kennt.  $V(t)$  wird nach jedem Aufruf des Schedulers neu berechnet. Welchen Beitrag eine Ressource momentan zur Summe  $V(t)$  beisteuert, ergibt sich aus dem PHY Modus, mit welchem die Ressource von der zugeordneten MS genutzt werden kann.

Das Makro-RRM entscheidet auf Grundlage der vom Mikro-RRM übermittelten Größen  $V(t)$  und  $D(t)$  über die Auswahl und Freigabe von Ressourcen aus dem Pool. Als Entscheidungsgröße wird der momentane Ressourcendeckungsgrad  $\rho(t)$  ausgewertet,

$$\rho(t) = \frac{V(t)}{D(t)}. \quad (8.1)$$

Dieser muss mindestens eins betragen, damit ausreichend Übertragungskapazität für alle MS innerhalb einer Zelle zur Verfügung steht. Mit einem Deckungsgrad von größer als eins können kurzfristige Datenratenspitzen flexibel ausgeglichen und die mittleren Verzögerungszeiten der Paketübertragung gesenkt werden. Alternativ können überschüssige Ressourcen dazu genutzt werden, um bei der Linkadaption robustere PHY Modi auszuwählen und damit die Wahrscheinlichkeiten von Übertragungsfehlern zu senken.

### 8.2.2. Auswahl zusätzlicher Ressourcen

Zusätzliche Ressourcen werden vom Makro-RRM ausgewählt und dem Pool der BS hinzugefügt, wenn die momentan geforderte Datenrate  $D(t)$  nicht bereitgestellt werden



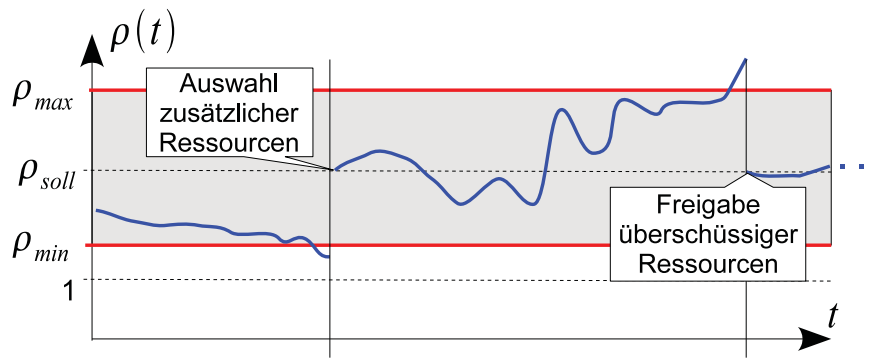


Bild 8.2.: Auslösung der Auswahlprozesse zur Neubelegung bzw. Freigabe von Ressourcen

kann. Ein Auswahlprozess wird durchgeführt, wenn der Ressourcendeckungsgrad  $\rho(t)$  wie in Bild 8.2 gezeigt den vorgegebenen Schwellwert  $\rho_{\min} \geq 1$  unterschreitet.

Die Ressourcenauswahl erfolgt wie gehabt über den in Kapitel 6 beschriebenen Prozess. Wenn sich eine MS neu bei der BS anmeldet, so wird die Ressourcenrangliste dieser MS im Auswahlprozess berücksichtigt. Falls der Deckungsgrad aufgrund gestiegener Datenraten oder aufgrund gestiegener GKI unter die Schwelle  $\rho_{\min}$  fällt, muss eine der bereits aktiven MS eine Rangliste an die BS übermitteln. In dem Fall wird die MS mit der momentan längsten Paketwarteschlange mit der Ranglistenerstellung beauftragt.

Die BS wählt in bekannter Weise so viele Ressourcen aus, bis der Deckungsgrad wie in Bild 8.2 angedeutet den vorgegebenen Sollwert  $\rho_{\text{soll}}$  erreicht hat. Für die weiteren Untersuchungen wird der Sollwert auf die Mitte des durch die beiden Schwellwerte aufgespannten Deckungsgradkorridors festgelegt,

$$\rho_{\text{soll}} = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2}. \quad (8.2)$$

Mit dieser Festlegung kann eine BS über einen längeren Zeitraum hinweg kleinere Abweichungen vom Solldeckungsgrad tolerieren, ohne dass eine Reorganisation des Ressourcenpools vorgenommen werden muss. Ein langfristiges Verweilen von  $\rho(t)$  in dem von den beiden Schwellen  $\rho_{\min}$  und  $\rho_{\max}$  aufgespannten Deckungsgradkorridor stellt sicher, dass die in die umliegenden Zellen abgegebenen GKI nicht schwanken. Welchen Einfluss die Schwellwerte auf das Systemverhalten haben, wird in den anschließenden quantitativen Untersuchungen diskutiert.

### 8.2.3. Freigabe überschüssiger Ressourcen

Überschüssige Ressourcen werden vom Makro-RRM freigegeben, wenn im DL eine höhere Gesamtdatenrate verfügbar ist als aktuell benötigt wird. Ein Freigabeprozess wird durchgeführt, wenn der Ressourcendeckungsgrad  $\rho(t)$  wie in Bild 8.2 gezeigt den vorgegebenen Schwellwert  $\rho_{\max}$  überschreitet. Freigegeben werden diejenigen Ressourcen, die zuletzt die



niedrigsten Beiträge zur verfügbaren Gesamtdatenrate  $V(t)$  geleistet haben. Dies sind in der Regel die Ressourcen mit den höchsten GKI.

Die BS misst kontinuierlich den mittleren Durchsatz aller im Pool befindlichen Ressourcen. Vor einer Freigabe erstellt die BS eine Rangliste nach aufsteigendem mittleren Durchsatz. Anschließend werden iterativ solange die Ressourcen mit dem geringsten Durchsatz freigegeben, bis  $\rho(t)$  auf den Sollwert  $\rho_{\text{soll}}$  aus Gl. (8.2) gesunken ist.

#### 8.2.4. Auslegung der Deckungsgradschwellen

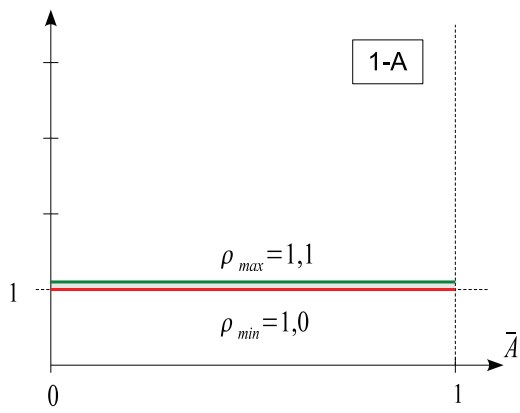
Die Auftrittshäufigkeit von Auswahl- oder Freigabeprozessen hängt maßgeblich von der Wahl der Deckungsgradschwellen  $\rho_{\text{min}}$  und  $\rho_{\text{max}}$  ab. Zuvor wurde festgelegt, dass mit jedem Auswahl- und Freigabeprozess die Menge der im Pool verfügbaren Ressourcen so angepasst wird, dass  $\rho(t)$  nach jeder Änderung des Ressourcenkontingents in der Mitte zwischen den beiden Schwellwerten liegt. Je weiter die Schwellen auseinander liegen, desto länger dauert es, bis der Deckungsgrad erneut eine der Schwellen kreuzt. Dies lässt vermuten, dass die Häufigkeit von Änderungen des belegten Ressourcenkontingents sinkt, wenn der von  $\rho_{\text{min}}$  und  $\rho_{\text{max}}$  aufgespannte Deckungsgradkorridor verbreitert wird.

Je weiter  $\rho_{\text{min}}$  über den Minimalwert von eins angehoben wird, desto flexibler können geforderte Datenratenspitzen bedient werden, ohne dass zusätzliche Ressourcen ausgewählt werden müssen. Je höher die obere Schwelle  $\rho_{\text{max}}$  gewählt wird, desto höher ist nach Gl. (8.2) der Solldeckungsgrad und desto mehr Ressourcen werden bei unveränderter Benutzeranzahl vom Makro-RRM für den Ressourcenpool ausgewählt.

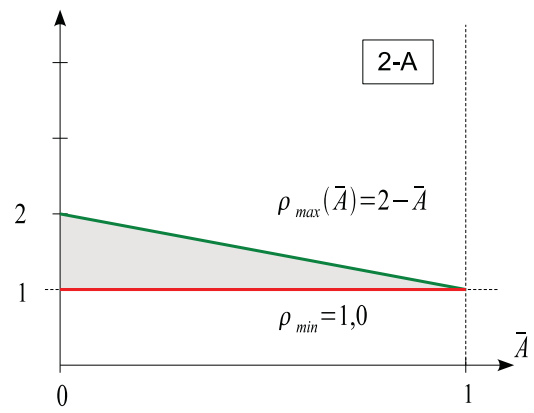
Anhand von Simulationsergebnissen wird nun gezeigt, dass eine expansive Ressourcenauswahl mit  $\rho_{\text{soll}} > 1$  zu einem stabilen Systemverhalten führt und dass solch eine Ressourcenexpansion den QoS der unterhaltenen Funkverbindungen signifikant verbessern kann. Für die Analyse werden die sechs in Bild 8.3 dargestellten Konfigurationen der Deckungsgradschwellen untersucht.

In den in der linken Spalte von Bild 8.3 angegebenen Konfigurationen werden konstante Deckungsgradschwellen vorgegeben. Das Ausmaß der Ressourcenexpansion steigert sich von Konfiguration 1-A mit fast keiner Expansion bis hin zu einem hohen Expansionsgrad bei Konfiguration 1-C. Alternativ wird über die Konfigurationen 2-A bis 2-C das Systemverhalten bei lastabhängigen Deckungsgradschwellen untersucht. Bei steigender Systemauslastung wird durch adaptive Absenkung der Deckungsgradschwellen das Ausmaß der Expansion reduziert und dadurch die Intensität der GKI gesenkt.

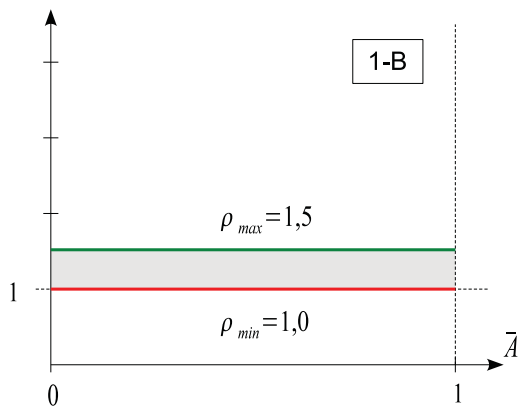
Die momentane Systemauslastung wird über die Höhe der gemessenen GKI ermittelt. Jede MS bestimmt mittels einer Schwellwertentscheidung, auf wievielen der  $N_R$  Systemressourcen die gemessene mittlere Interferenzleistung einen vorgegebenen Schwellwert  $\bar{I}_{\text{max}}$  überschreitet. Den relativen Anteil dieser Ressourcen mit hohen GKI signalisiert sie als Auslastungsindikator  $A_m(t)$  an ihre BS. In den Simulationen wird der Schwellwert  $\bar{I}_{\text{max}}$



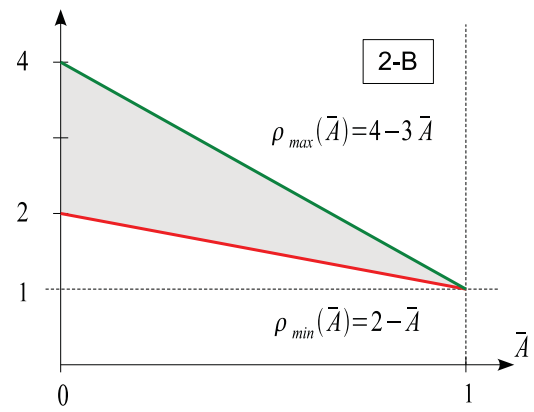
(a) Konfiguration 1-A



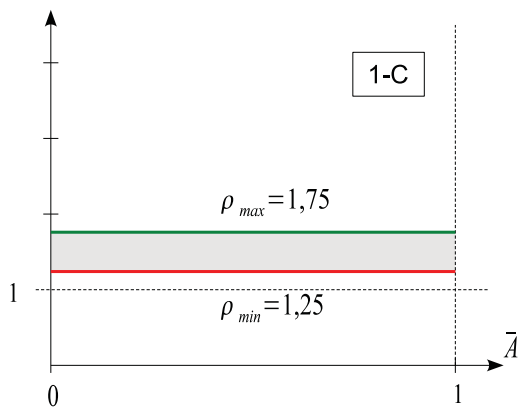
(b) Konfiguration 2-A



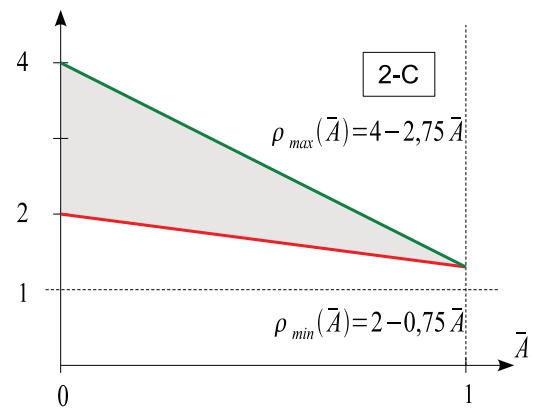
(c) Konfiguration 1-B



(d) Konfiguration 2-B



(e) Konfiguration 1-C



(f) Konfiguration 2-C

Bild 8.3.: Vergleichene Systemkonfigurationen. Links: konstante, rechts: lastabhängige Deckungsgradschwellen

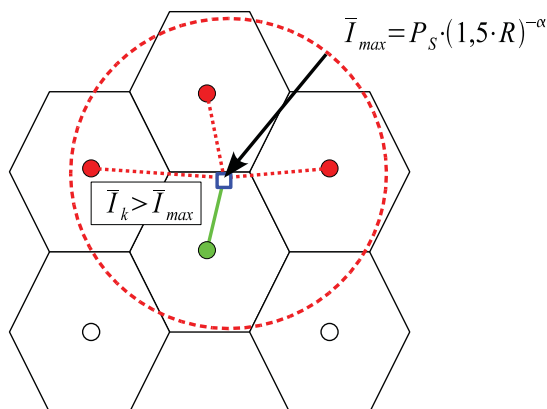


Bild 8.4.: Angenommene Detektionsreichweite einer MS für die Bestimmung der Systemauslastung auf Basis der in Gl. (8.3) definierten Interferenschwelle

auf

$$\bar{I}_{\max} = P_S \cdot (1,5 \cdot R)^{-\alpha} \quad (8.3)$$

festgelegt. Motiviert wird diese Festlegung durch die Annahme, dass alle BS mit derselben Sendeleistung übertragen. Im abschattungsfreien Fall würde eine MS genau diejenigen Ressourcen als belegt klassifizieren, die von den BS innerhalb des in Bild 8.4 eingezeichneten kreisförmigen Gebiets genutzt werden. Genau diese BS sind es, die aus Sicht der messenden MS die höchsten GKI erzeugen und daher für die Bestimmung der Systemauslastung entscheidend sind.

Aufgrund der unterschiedlichen Positionen ergeben sich für die MS in einer Zelle unterschiedliche Werte  $A_m(t)$ . Daher bildet die BS den Mittelwert  $\bar{A}(t)$  über alle von ihren MS signalisierte Werte  $A_m(t)$  und interpretiert diesen als momentanen Auslastungsindikator.

### 8.2.5. Schedulingalgorithmus

Der eingesetzte Schedulingalgorithmus berücksichtigt sowohl die momentanen Kanalzustände als auch die momentanen Zustände der benutzerspezifischen Paketwarteschlangen. In diesem Abschnitt ist zunächst das Verhalten der deckungsgradbasierten Ressourcenauswahl von Interesse. Dabei wird in allen Simulationen der im anschließenden Abschnitt 8.3 detailliert beschriebene Scheduling-Algorithmus Nr. 4 angewendet. In Abschnitt 8.3 erfolgt neben der genaueren Beschreibung eine Analyse des Einflusses der vom Schedulingalgorithmus ausgewerteten Entscheidungsgrößen auf das Systemverhalten.

### 8.2.6. Simulationsmodell

Die Simulationsergebnisse wurden mit einer in C++ entwickelten Softwaresimulation ermittelt. Das bereits in Kapitel 7.3 und Anhang B vorgestellte Simulationskonzept für zellulare SO-RRM-Systeme wurde bezüglich der in diesem Kapitel eingeführten deckungs-

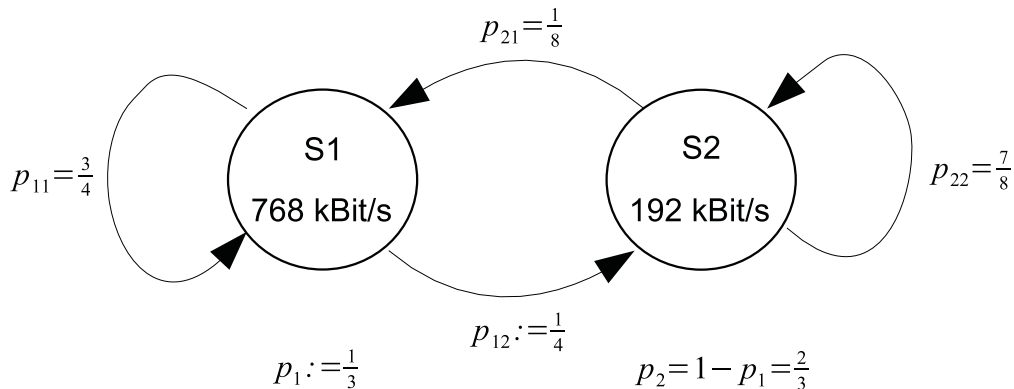


Bild 8.5.: Diskreter endlicher Markov-Prozess zur Modellierung der variablen Datenraten

gradbasierten Ressourcenauswahl im DL (s. Bild 8.1) sowie um das Paketquellenmodell mit variablen Datenraten erweitert.

Jede Datenquelle fordert momentan entweder 192 kBit/s oder 768 kBit/s. Daten werden wie in Bild 8.1 angedeutet paketweise übertragen. Ankommende Pakete werden zunächst in Warteschlangen gepuffert, bevor sie übertragen werden. Dieses Verhalten wird wie in Bild 8.5 gezeigt durch einen diskreten Markov-Prozess [TG96, Pap01] mit der endlichen Zustandsmenge  $\{S1, S2\}$  modelliert.

Der Markov-Prozess wird wie in Anhang C beschrieben so dimensioniert, dass sich die stationäre Zustandsverteilung  $(p_1 = \frac{1}{3}, p_2 = \frac{2}{3})$  ergibt. Mit dieser Verteilung liefert das Quellenmodell die gewünschte mittlere Datenrate von 384 kBit/s. Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten sind in Bild 8.5 angegeben. Der Wert  $p_{12} = \frac{1}{4}$  wird vorgegeben. Hieraus lassen sich wie in Anhang C gezeigt die übrigen Übergangswahrscheinlichkeiten ableiten.

Um im Modell eine hohe Variabilität bezüglich der geforderten Momentandatenraten zu erhalten, wird die pro Zugriffsrahmen erzeugte Paketanzahl  $X_m$  als Poisson-Prozess modelliert. Der Index  $m$  kennzeichnet den von der Quelle adressierten Benutzer. Die unabhängigen und identisch verteilten Zufallsvariablen  $X_m$  haben die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$p_A(X_m = n) = \frac{\left(\lambda_A^{(s_m)}\right)^n}{n!} \cdot \exp\left(-\lambda_A^{(s_m)}\right).$$

Der Erwartungswert der Zufallsvariablen  $X_m$  beträgt  $\lambda_A^{(s_m)}$  und steht im Modell für die mittlere Anzahl Paketankünfte pro Zugriffsrahmen. In Abhängigkeit vom Zustand  $s_m \in \{1, 2\}$  des Markov-Prozesses wird ein an die zustandsspezifische Datenrate angepasster Wert  $\lambda_A^{(s_m)}$  verwendet. Um ein Paket in einem Zugriffsrahmen der Dauer  $T_R = 4,096$  ms zu übertragen, wird eine Datenrate von 64 kBit/s benötigt. Damit ergeben sich die in Tabelle 8.1 aufgeführten Dienstmodellparameter  $\lambda_A^{(1)} = 12$  [Paketankünfte/Rahmen] im Zustand S1 (768 kBit/s) und  $\lambda_A^{(2)} = 3$  im Zustand S2 (192 kBit/s).

| Formelzeichen     | Bedeutung   | Wert                     |
|-------------------|---|--------------------------|
| $\bar{T}_B$       | mittlere Übertragungsdauer einer Verbindung                           | 10 s                     |
| $\Delta_{\max}$   | maximal tolerierte Verzögerung, nach der ein Paket verworfen wird     | $10 \cdot T_R = 40$ msec |
| $\bar{d}$         | mittlere Datenrate  | 384 kBit/s               |
| $\lambda_A^{(1)}$ | mittlere Anzahl der im Zustand S1 pro Zugriffsrahmen erzeugten Pakete | 12                       |
| $\lambda_A^{(2)}$ | mittlere Anzahl der im Zustand S2 pro Zugriffsrahmen erzeugten Pakete | 3                        |

Tabelle 8.1.: Parameter des implementierten Verkehrs- und Quellenmodells

Bei der Paketübertragung wird ein ideales Automatic Repeat Request-Verfahren (ARQ, [Wal00]) angenommen. Fehlerhaft empfangene Pakete werden von den MS sofort erkannt. In der unmittelbar auf den Paketempfang folgenden UL-Phase wird über den als ideal angenommenen Rückkanal eine negative Paketquittung signalisiert. Ansonsten wird auf gleiche Weise eine positive Quittung an die BS übertragen. Vor dem nächsten DL werden als fehlerhaft quittierte Pakete zur erneuten Übertragung ganz vorne in die jeweilige Warteschlange einsortiert.

Weiterhin wird für jede Ressource in statistisch unabhängiger Weise Rayleigh-Fading simuliert. Das Modell entspricht in guter Näherung einem frequenzselektiven Breitbandkanal. Um ebenfalls zeitvarianten Verhalten der Kanäle zu berücksichtigen, wurde die maximale Dopplerfrequenz der Funkkanäle auf  $f_{d,\max} = 10$  Hz festgelegt.

Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Konzept können im DL keine Verbindungsabbrüche einzelner MS auftreten. Wenn die verfügbare Datenrate niedriger ist als die momentan geforderte, so bewirkt dies einen Anstieg der Länge der Paketwarteschlangen. Hierdurch nehmen die Übertragungsverzögerungen der Pakete zu. Es wird gefordert, dass die Übertragung eines Pakets nicht länger als  $\Delta_{\max} = 40$  ms bzw. 10 Zugriffsrahmen dauern darf. Anstelle der im Zusammenhang mit konstanten Datenraten in Kapitel 7 betrachteten Abbruchwahrscheinlichkeiten wird hier die Unzufriedenheitswahrscheinlichkeit angegeben. Diese wird am Ende jeder Funkverbindung berechnet. Ein Benutzer gilt als unzufrieden, wenn die Maximalverzögerung  $\Delta_{\max}$  für mindestens 1% seiner empfangenen Pakete überschritten wurde. Der Versorgungsgrad wird analog zu Gl. (7.5) als aggregierte Größe aus Blockierungs- und Unzufriedenheitswahrscheinlichkeit (BW und UW) berechnet.

### 8.2.7. Simulationsergebnisse

Bild 8.6 zeigt die Simulationsergebnisse bei gleichförmiger Benutzerverteilung innerhalb der Zellen für die sechs in Bild 8.3 definierten Konfigurationen der Deckungsgradschwellen.

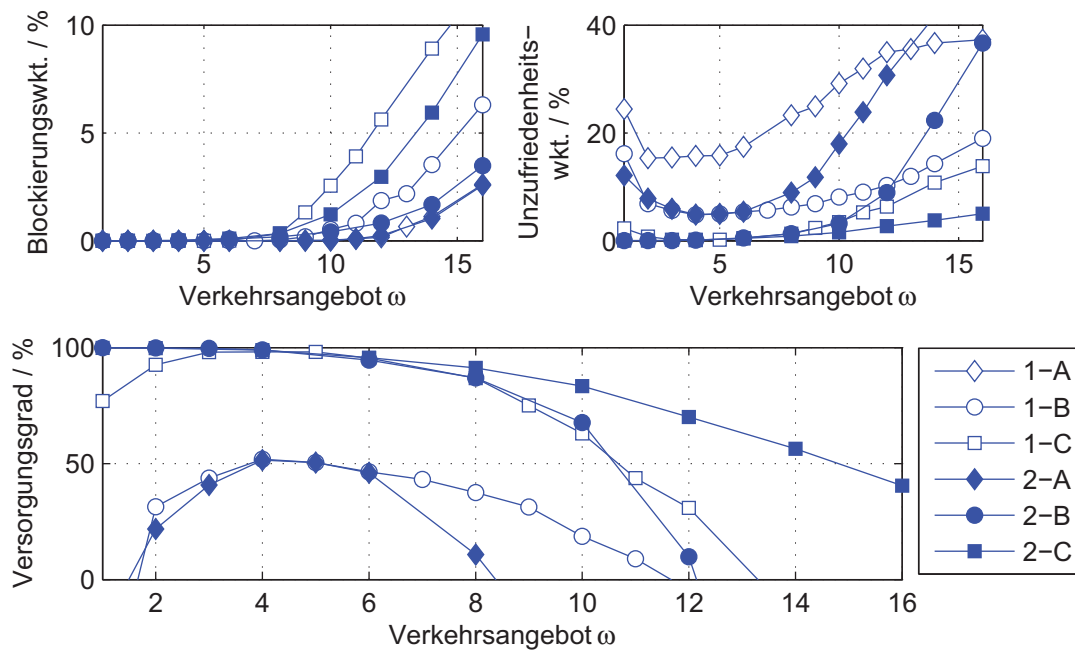


Bild 8.6.: Systemverhalten für die sechs in Bild 8.3 definierten Konfigurationen bei gleichverteilten MS, mittlerer Datenrate 384 kBit/s und Anwendung adaptiver Modulation

Man sieht, dass eine Ressourcenexpansion zu einem Anstieg der BW führt. Deutlich wird dies durch einen Vergleich der Konfigurationen 1-A, 1-B und 1-C. In dieser Reihenfolge steigt der als konstant vorgegebene Solldeckungsgrad an, genau wie die ermittelten BW.

Das gleiche Verhalten zeigt sich mit den Konfigurationen 2-A bis 2-C mit lastabhängigen Schwellwerten. Die Adaption der Schwellen an die Systemauslastung führt jedoch zu einer deutlichen Verbesserung der Performance. Durch die bei einem Anstieg des Verkehrsangebots ausgelöste Freigabe überschüssiger Ressourcen sinkt die BW, da die freigegebenen Ressourcen für den Aufbau zusätzlicher Verbindungen genutzt werden können.

Ein interessantes Verhalten ist bei den ermittelten UW zu beobachten. Die Kurven zeigen deutlich den Effekt der mit steigendem Verkehrsangebot zunehmenden MUD. Bei niedrigem Verkehrsangebot ist die UW bei den Konfigurationen 1-A, 1-B, 1-C und 2-A relativ hoch. Grund hierfür sind die relativ niedrig ausgelegten Deckungsgradschwellwerte. In den Konfigurationen 2-B und 2-C liegen die Schwellwerte bei niedriger Systemauslastung deutlich höher. Aufgrund der höheren Schwellwerte findet eine Ressourcenexpansion statt; es werden deutlich mehr Ressourcen ausgewählt als eigentlich benötigt. Durch die Ressourcenexpansion wird in den Konfigurationen 2-B und 2-C auch bei niedrigem Verkehrsangebot eine hohe MUD erreicht und es können alle Benutzer zufriedengestellt werden. Durch die zusätzlichen Ressourcen können sowohl auftretende Lastspitzen der Datenraten als

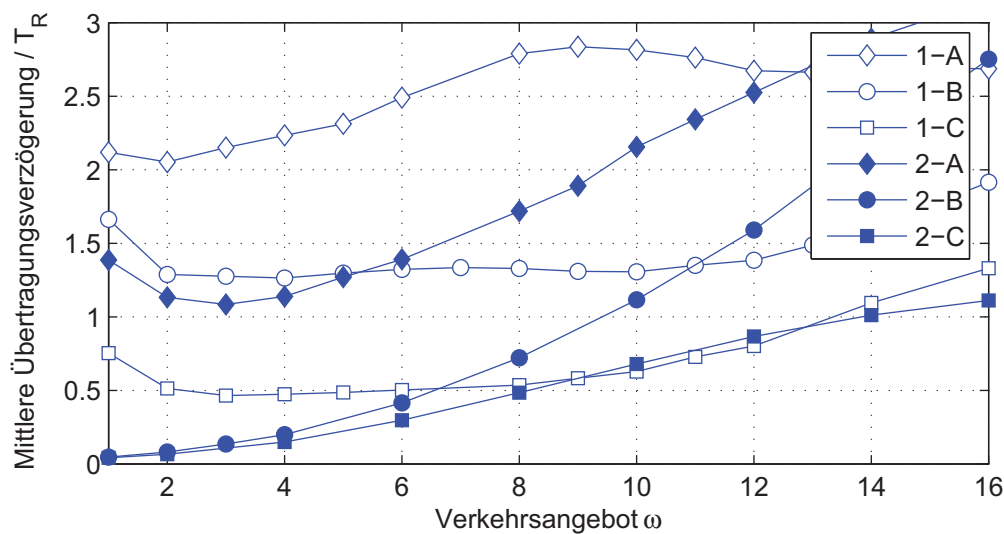


Bild 8.7.: Mittlere Paketverzögerungszeiten in Abhängigkeit von der Konfiguration der Deckungsgradschwellen, normiert auf die Rahmenlänge  $T_R$

auch kurzzeitige Einbrüche der frequenzselektiven und zeitvarianten Funkkanäle effektiv kompensiert werden.

Der durch die Überbuchung der Ressourcen bedingte Anstieg der GKI ist aus Gesamtsystemsicht offensichtlich nicht schädlich. Beim Vergleich der Ergebnisse für die Konfigurationen 1-B und 1-C sowie für 2-B und 2-C lässt sich ein leichter Anstieg der BW durch die Ressourcenexpansion feststellen. Da unzufriedene Benutzer jedoch 10mal stärker in die Berechnung des Versorgungsgrads eingehen, ist der Performanceverlust durch die höhere BW geringer als der durch die gestiegene Benutzerzufriedenheit erzielte Gewinn. Als wichtiges Ergebnis ist festzuhalten, dass eine Ressourcenexpansion den Versorgungsgrad im DL eines SO-RRM-Systems signifikant verbessert.

Die durch die Ressourcenexpansion verbesserte Versorgungsqualität lässt sich an den mittleren Verzögerungszeiten ablesen, die in Bild 8.7 dargestellt sind. Bei konstanten Deckungsgradschwellen lässt sich wieder der Einfluss der MUD bei niedrigem bis mittlerem Verkehrsangebot erkennen. Die Verzögerungszeiten sinken zunächst durch die zunehmende MUD, bevor sie bei hohem Verkehrsangebot aufgrund von Ressourcenknappheit wieder steigen. Die niedrigsten Verzögerungszeiten werden mit der Konfiguration 2-C erzielt. Die über den momentanen Bedarf hinaus ausgewählten Ressourcen werden genutzt, um plötzliche Anstiege der Datenraten zu kompensieren. Bei hohem Verkehrsangebot sorgt die Kombination aus hoher MUD und der mit  $\rho_{\min} \geq 1,25$  erzwungenen Überdeckung für sehr kurze Übertragungsverzögerungen.

In Bild 8.8 sind die mit den sechs Konfigurationen gemessenen Paketfehlerraten (PER) aufgetragen. Hier fällt auf, dass sich für die Konfigurationen mit starker Ressourcenex-

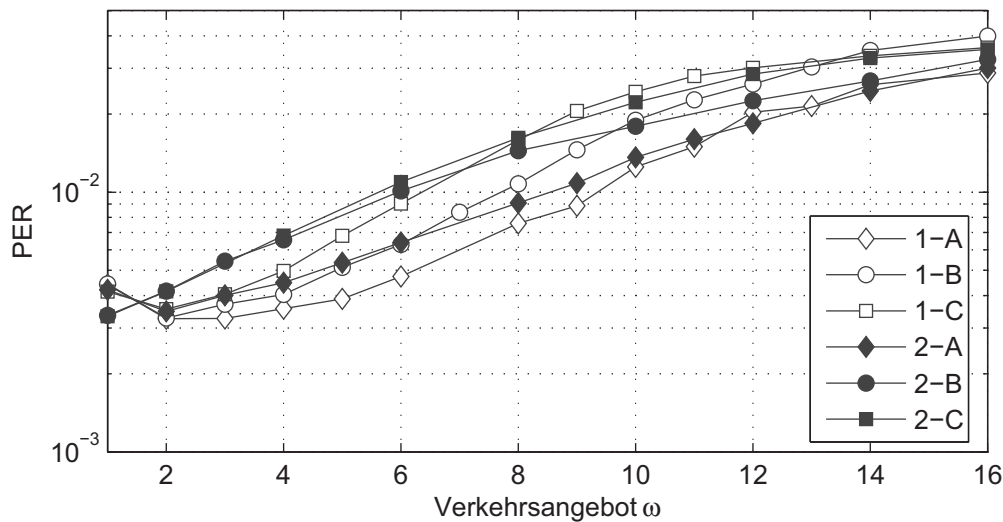


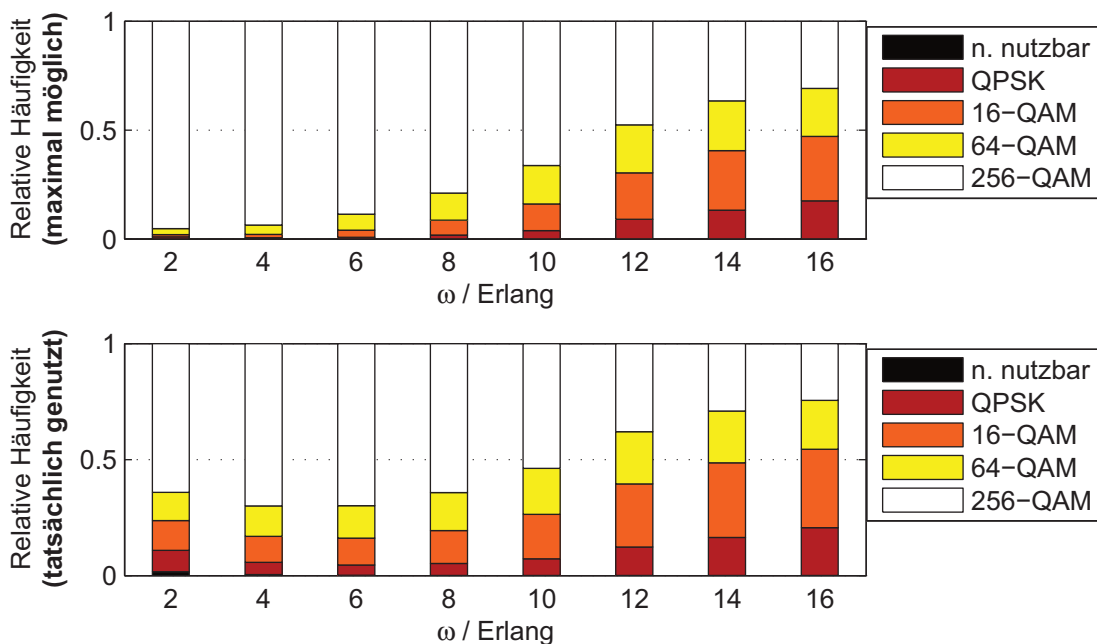
Bild 8.8.: Mittlere Paketfehlerraten (PER) in Abhängigkeit von der Konfiguration der Deckungsgradschwellen

pansion (1-C und 2-C) die höchsten PER ergeben. Grund dafür ist die größere Anzahl genutzter Ressourcen pro Zelle und die damit verbundenen höheren GKI. Wie bereits gezeigt wurde, wirkt sich eine Ressourcenexpansion trotz der höheren PER positiv auf das Systemverhalten aus.

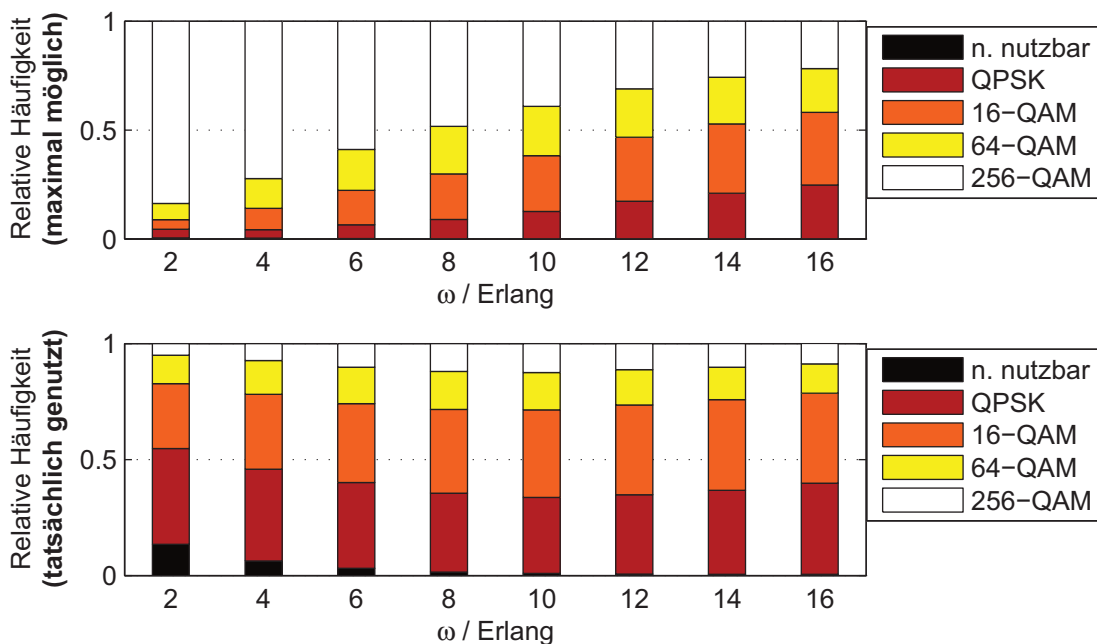
Bild 8.9 veranschaulicht die Auswirkungen einer lastabhängigen Ressourcenexpansion auf die Auswahl der PHY Modi. Es werden der Fall 1-A ohne und der Fall 2-C mit einer stark ausgeprägten Ressourcenexpansion mit lastabhängigen Deckungsgradschwellen verglichen. In beiden Fällen werden bei niedriger bis mittlerer Auslastung hohe SINRs von den MS gemessen. Entsprechend können hochratige PHY Modi bei der Übertragung angewendet werden. Im Fall 2-C werden aufgrund der Ressourcenexpansion bei gleicher Last mehr Ressourcen pro Zelle eingesetzt als im Fall 1-A. Dadurch entstehen höhere GKI und die SINRs sind schlechter als im Fall 1-A. Entsprechend fallen die anwendbaren PHY Modi im Fall 2-C etwas niedriger aus.

Man sieht in Bild 8.9, dass mit beiden Konfigurationen bei steigendem Verkehrsangebot aufgrund der zunehmenden GKI auf robustere PHY Modi ausgewichen werden muss. Der entscheidende Unterschied liegt jedoch in der Verteilung der tatsächlich angewendeten PHY Modi. In Bild 8.9(b) ist für den Fall 2-C deutlich zu erkennen, dass die überschüssigen Ressourcen genutzt werden, um auf robustere PHY Modi auszuweichen. Hierdurch sinken wie zuvor gezeigt die Paketfehlerwahrscheinlichkeiten. Mit zunehmendem Verkehrsangebot wird aufgrund der lastabhängigen Schwellwerte das Maß der Ressourcenexpansion reduziert. Man erkennt dies in Bild 8.9 daran, dass im Fall 2-C bei mittlerem Verkehrsangebot wieder hochratigere PHY Modi eingesetzt werden als bei niedrigem Verkehrsangebot. Bei hohem





(a) Konfiguration 1-A



(b) Konfiguration 2-C

Bild 8.9.: Relative Häufigkeiten der maximal möglichen und der bei einer Ressourcenexpansion tatsächlich genutzten PHY Modi

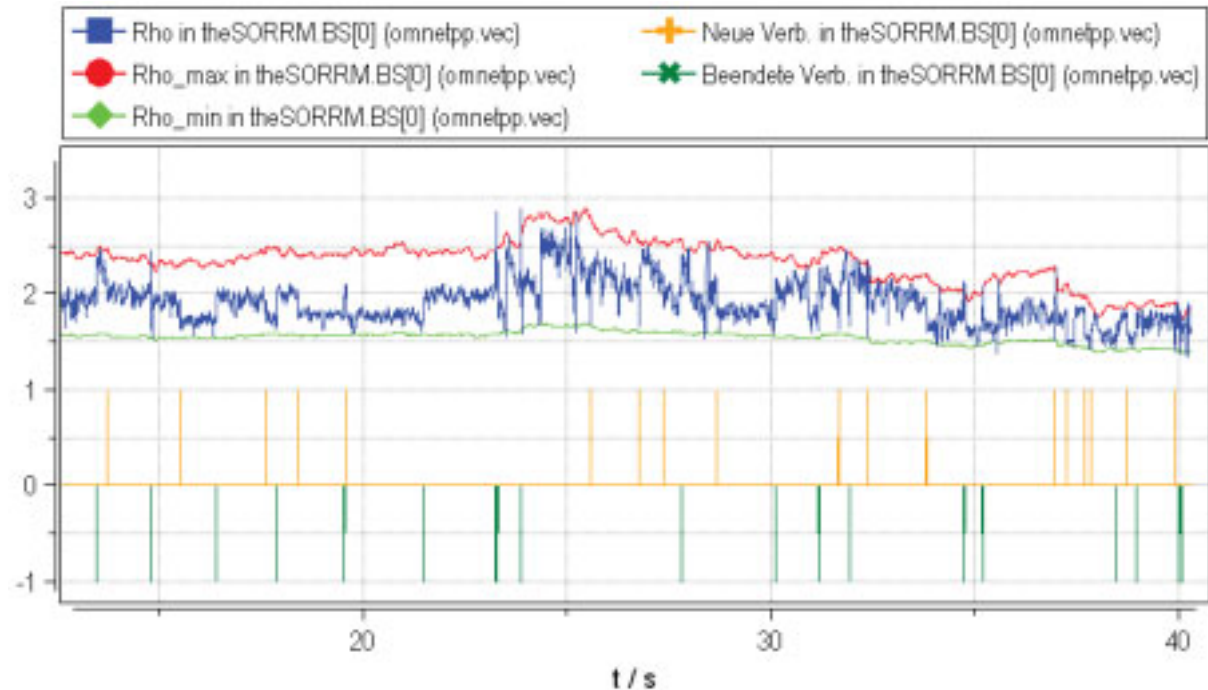


Bild 8.10.: Beispielhafter Verlauf des Deckungsgrads  $\rho(t)$  und der lastabhängigen Schwellwerte  $\rho_{\min}$  und  $\rho_{\max}$  bei einem Verkehrsangebot von  $\omega = 6$

Verkehrsangebot werden wieder zunehmend robuste PHY Modi angewendet, da mit der Zunahme des Verkehrs die GKI immer weiter ansteigen und niedrige Störabstände bewirken.

Abschließend wird zur Veranschaulichung der beschriebenen Vorgänge in Bild 8.10 ein in der System-Level-Simulation aufgezeichneter Verlauf des Deckungsgrads und der lastabhängigen Deckungsgradschwellen gezeigt. Die Adaption des Ausmaßes der Ressourcenexpansion an die Systemauslastung ist an den zeitlichen Verläufen der adaptiven Schwellen gut zu erkennen. Man sieht ferner, dass sich der Deckungsgrad nach einer Neuauswahl oder Freigabe von Ressourcen wieder auf den Sollwert in der Mitte des lastadaptiven Deckungsgradkorridors einpendelt. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass nicht zwingend bei jeder Neuankunft einer MS eine erneute Ressourcenauswahl durchgeführt werden muss.

### 8.3. Nutzenmaximierende Ressourcenzuordnung

Das Mikro-RRM entscheidet über die Zuordnung der Ressourcen zu den MS. Es wird nun untersucht, wie mit einer geeigneten Ressourcenzuordnung MUD ausgenutzt werden kann, um eine hohe Systemeffizienz zu erzielen.

Im Folgenden wird angenommen, dass der Scheduler des Mikro-RRM (vgl. Bild 8.1) sowohl vollständige Information über die Zustände aller Warteschlangen als auch Kenntnis über sämtliche momentanen SINRs  $\gamma_k^m(t)$  der zeitvarianten und frequenzselektiven Funk-

kanäle besitzt. Folglich handelt es sich bei dem vorgeschlagenen Konzept aus Sicht des ISO/OSI-Referenzmodells [Wal00] um einen schichtenübergreifenden Ansatz [LSS06].

Für die Ressourcenzuordnung wird ein nutzenbasierter Schedulingalgorithmus [BC00, SL03, Liu02, LBH03, ECV03] vorgeschlagen. Der Vorteil solcher Ansätze liegt neben einer geringen Rechenkomplexität in der hohen Flexibilität bezüglich der zumeist intuitiv nachvollziehbaren Nutzendefinition. Diese lässt sich individuell an die jeweilige Aufgabenstellung anpassen. In [BC00] wird der Nutzen als Funktion der Gesamtdatenrate definiert, die eine Verbindung zugewiesen bekommt. In [LBH03] hingegen ist der Nutzen allein von den bisherigen Wartezeiten der in den Warteschlangen stehenden Datenpakete abhängig. Desweiteren wird in [LBH03] gezeigt, dass ein Großteil der aus der Literatur bekannten Schedulingalgorithmen wie z. B. der Round-Robin-Algorithmus [Hah91] in einen äquivalenten nutzenbasierten Ansatz überführt werden kann.

1. Initialisiere  $l := 0$  und  $\tilde{\mathcal{R}}(l = 0) := \mathcal{R}(t)$  und  $\delta_{m,\kappa}(t) = 0 \forall m \in \mathcal{M}(t), \kappa \in \mathcal{R}(t)$ .
2. Berechne  $u_{m,\kappa}(t, l) \forall m \in \mathcal{M}(t), \kappa \in \mathcal{R}(t)$ .
3. Bestimme  $u_{\tilde{m},\tilde{\kappa}}(t, l) = \arg \max_{m \in \mathcal{M}(t), \kappa \in \tilde{\mathcal{R}}(l)} \{u_{m,\kappa}(t, l)\}$ .
4. Setze  $\delta_{\tilde{m},\tilde{\kappa}}(t) = 1$ .
5. Setze  $\tilde{\mathcal{R}}(l + 1) = \tilde{\mathcal{R}}(l) \setminus \tilde{\kappa}$ .
6. Aktualisiere alle zur MS  $\tilde{m}$  gehörigen Werte  $\{u_{\tilde{m},\kappa}(t, l)\}_{\kappa \in \tilde{\mathcal{R}}(l+1)}$ .
7. Wenn  $\tilde{\mathcal{R}}(l + 1) \neq \emptyset$ , dann fahre mit Punkten 3 fort; sonst Abbruch.

**Algorithmus 1:** Gesamtnutzenmaximierung durch iterative Zuordnung der Ressourcen

Im hier vorgeschlagenen SO-RRM-System wird die Zuordnung der Ressourcen zu den MS in jedem Zugriffsrahmen mit Zeitindex  $t$  neu festgelegt. Die Zuordnungsaufgabe wird mit dem im Rahmen angegebenen Algorithmus gelöst. Ziel des Algorithmus ist die Maximierung des Gesamtnutzens. In der Beschreibung steht  $\mathcal{M}(t)$  für die Menge der aktuell von der BS versorgten MS und  $\mathcal{R}(t)$  für die Menge der momentan von der BS belegten Ressourcen. Die exklusive Zuordnung einer Ressource zu einer MS wird über die Zuordnungskoeffizienten  $\delta_{m,\kappa}(t)$  ausgedrückt,

$$\delta_{m,\kappa}(t) = \begin{cases} 1 & \text{Ressource } \kappa \text{ ist Benutzer } m \text{ exklusiv zugeordnet,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Ressourcenzuordnung erfolgt iterativ. Für jede MS  $m$  und jede im Pool verfügbare Ressource  $\kappa$  wird in jedem Iterationsschritt  $l$  ein Wert  $u_{m,\kappa}(t, l)$  berechnet, welcher den

Nutzen der Ressource für die MS quantifiziert. Anschließend wird das Maximum

$$u_{\tilde{m},\tilde{\kappa}}(t, l) = \arg \max_{m \in \mathcal{M}(t), \kappa \in \tilde{\mathcal{R}}(l)} \{u_{m,\kappa}(t, l)\} \quad (8.4)$$

bestimmt und die Ressource  $\tilde{\kappa}$  der MS  $\tilde{m}$  exklusiv zugeordnet. Hierbei bezeichnet  $\tilde{\mathcal{R}}(l)$  die Menge der im Iterationsschritt  $l$  noch verfügbaren Ressourcen.

Die Größe  $u_{m,\kappa}(t, l)$  ist als Grenznutzen zu interpretieren und gibt an, wieviel zusätzlicher Nutzen einem Benutzer durch die Zuteilung einer weiteren Ressource gestiftet wird [WNS05]. In die Berechnung von  $u_{m,\kappa}(t, l)$  können sowohl die Momentanzustände der Funkkanäle als auch Zustandsinformationen über die Paketwarteschlangen einfließen.

Desweiteren wird das Prinzip vom abnehmenden Grenznutzen angenommen [WNS05]. Dieses besagt, dass der Grenznutzen für jede weitere Ressource kleiner oder gleich dem Grenznutzen der zuletzt zugeordneten Ressource ist,

$$u_{m,\kappa}(t, l+1) \leq u_{\tilde{m},\tilde{\kappa}}(t, l) \quad \forall \kappa \in \tilde{\mathcal{R}}(l+1). \quad (8.5)$$

Die Abnahme des Grenznutzens bewirkt bei geeigneter Nutzendefinition (s. nächster Abschnitt) ein Sättigungsverhalten. Zudem ist durch Gl. (8.5) sichergestellt, dass mit dem vorgestellten Zuordnungsalgorithmus immer der maximale Gesamtnutzen erzielt wird, welcher als Summe aller Grenznutzenwerte  $u_{\tilde{m},\tilde{\kappa}}(t, l)$  aus Gl. (8.4) definiert ist.

### 8.3.1. Nutzendefinition

Mit einer geeigneten Nutzendefinition kann die in den Zellen aufgrund der unterschiedlichen Momentanzustände der Funkkanäle und der Datenquellen vorhandene MUD ausgenutzt und dadurch die Systemeffizienz erhöht werden. Um die jeweilige Relevanz der verfügbaren Zustandsinformationen zu demonstrieren, werden im Folgenden beispielhaft vier Grenznutzenfunktionen  $u^{(1)}$  bis  $u^{(4)}$  definiert. In diese fließen sukzessive alle dem Scheduler zur Verfügung stehenden Kenngrößen ein.

**(1) Alleinige Berücksichtigung der Kanalzustände** Zunächst werden allein die von den MS signalisierten momentanen Kanalzustände berücksichtigt. Über das in Abschnitt 4.3.3 angegebene Linkadaptionsschema bestimmt die BS aus dem von der MS  $m$  signalisierten SINR die mit der Ressource  $\kappa$  maximal mögliche Übertragungsrate  $d_{m,\kappa}(t)$ . Die erste Grenznutzenfunktion wird definiert als

$$u_{m,\kappa}^{(1)}(t) = d_{m,\kappa}(t). \quad (8.6)$$

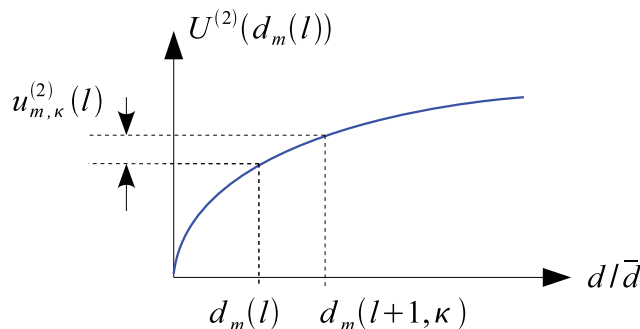


Bild 8.11.: Konvexe Nutzenfunktion  $U^{(2)}$  zur Ableitung des Grenznutzens  $u_{m,\kappa}^{(2)}$

**(2) Zusätzliche Berücksichtigung des abnehmendem Grenznutzens** Um Fairness bei der Zuordnung zu gewährleisten, wird nun das Prinzip vom abnehmenden Grenznutzen angewendet. Es wird unterstellt, dass eine weitere Ressource einem Benutzer umso weniger zusätzlichen Nutzen stiftet, je mehr Ressourcen ihm bereits zugewiesen worden sind. Daher müssen nach jeder Zuordnung alle Grenznutzenwerte  $u_{m,\kappa}(t)$  derjenigen MS  $m$ , welche die zuletzt vergebene Ressource erhalten hat, neu berechnet werden.

Die Abnahme des Grenznutzens wird beispielhaft durch die in Bild 8.11 dargestellte konvexe Nutzenfunktion

$$U^{(2)}(d_m(l)) = \left( \frac{d_m(l)}{\bar{d}} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

modelliert. Dabei ist  $d_m(l)$  die Datenrate, welche MS  $m$  nach dem  $l$ -ten Iterationsschritt im aktuellen Zuordnungsprozess bereits zugewiesen bekommen hat. Der Grenznutzen wird über die Differenz

$$u_{m,\kappa}^{(2)}(t, l) = U^{(2)}(d_m(l) + d_{m,\kappa}(t)) - U^{(2)}(d_m(l)) \quad (8.7)$$

approximiert<sup>1</sup>. Über die potentiellen Datenratenbeiträge  $d_{m,\kappa}(t)$  der noch zu vergebenden Ressourcen werden wie schon bei der ersten Nutzendefinition die momentanen Kanalzustände mitberücksichtigt. Die Abhängigkeit vom Iterationsindex  $l$  bringt zum Ausdruck, dass der Grenznutzen  $u_{m,\kappa}^{(2)}(t, l)$  davon abhängt, wieviele Ressourcen einer MS bereits zugewiesen wurden.

Aus Bild 8.11 geht anschaulich hervor, dass von zwei Benutzern mit gleicher Datenrate  $d_m(l)$  immer derjenige mit dem momentan besseren Kanalzustand den Zuschlag erhält. Hat jedoch ein Benutzer bereits ein wesentlich höheres  $d_m(l)$  als der andere, so wird die nächste Ressource dem Benutzer mit der niedrigeren Momentandatenrate zugeordnet. Durch diese Maßnahme soll die Fairness bei der Zuordnung erhöht werden.

<sup>1</sup>Für eine von der kontinuierlichen Variablen  $x$  abhängige Nutzenfunktion  $U(x)$  ist der Grenznutzen definiert als  $\partial U(x)/\partial x$  [WNS05].

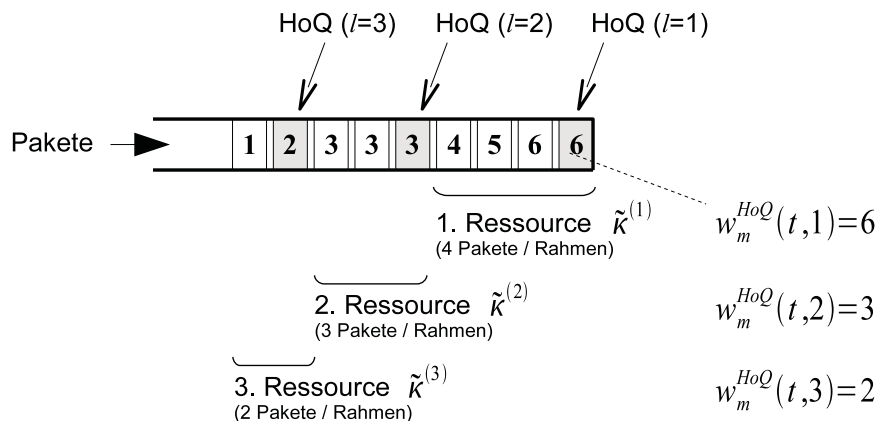


Bild 8.12.: Beispielhafte Aktualisierung des von den Paketwartezeiten und den Kanalzuständen der zugeordneten Ressourcen abhängigen Nutzenfaktors  $w_m^{HoQ}(t, l)$

**(3) Auswertung der Zustände der Paketwarteschlangen** Im nächsten Schritt wird zusätzlich die Kenntnis über die Zustände der Paketwarteschlangen ausgewertet. Der Grenznutzen wird nun in einem proportionalen Verhältnis zur Wartezeit des ganz vorn in der Warteschlange stehenden Pakets (*engl.* head of queue, HoQ) berechnet. Der Proportionalitätsfaktor  $w_m^{HoQ}(t, l)$  gibt an, seit wievielen Zugriffsrahmen sich das Paket in der Warteschlange befindet.

Nach jeder Zuordnung einer Ressource wird bestimmt, wieviele Pakete hiermit im folgenden Rahmen übertragen werden können. Dies hängt vom Kanalzustand ab. Anschließend wird der HoQ-Zeiger in der Warteschlange um genau diese Anzahl von Paketen nach hinten verschoben. Bild 8.12 verdeutlicht an einem Beispiel, wie die Größe  $w_m^{HoQ}(t, l)$  der MS  $m$  mit jeder weiteren zugeordneten Ressource aktualisiert wird. Die dritte Grenznutzenfunktion lautet somit

$$u_{m,\kappa}^{(3)}(t, l) = \begin{cases} d_{m,\kappa}(t) \cdot w_m^{HoQ}(t, l), & q(l) > 0, \\ \text{Zufallszahl } x \in [0; 1), & \text{sonst,} \end{cases} \quad (8.8)$$

wobei  $q_m(l) > 0$  den Zustand bezeichnet, dass mit den bislang zugewiesenen Ressourcen noch nicht alle in der Warteschlange stehenden Pakete übertragen werden können.

Können hingegen mit der bisherigen Datenrate  $d_m(l)$  bereits alle Pakete übertragen werden, so wird eine zwischen 0 und 1 gleichverteilte Zufallszahl  $x$  für den Grenznutzen bestimmt. Die Begrenzung  $x < 1$  bewirkt, dass MS mit  $q_m(l) > 0$  stets einen höheren Nutzen für die noch zu vergebenden Ressourcen aufweisen als bereits gesättigte Funkverbindungen mit  $q_m(l) = 0$ . Sind alle MS gesättigt, so werden die verbleibenden überschüssigen Ressourcen zufällig zugeordnet.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Erst im nächsten Schritt (4) wird mit der Grenznutzenfunktion  $u_{m,\kappa}^{(4)}(t, l)$  angestrebt, die überschüssigen Ressourcen zielgerichtet zuzuordnen.

| Paketfehlerrate $\zeta_m(t)$ | Nutzenfaktor $\Phi_m(t)$ |
|------------------------------|--------------------------|
| $< 10^{-3}$                  | 0.25                     |
| $< 10^{-2}$                  | 1                        |
| $< 10^{-1}$                  | 2                        |
| $\geq 10^{-1}$               | 3                        |

Tabelle 8.2.: Festlegung eines von der benutzerspezifischen Paketfehlerrate  $\zeta_m(t)$  abhängigen Nutzenfaktors  $\Phi_m(t)$

Der in Gl. (8.8) definierte Grenznutzen ist sowohl proportional zu den bisherigen Wartezeiten der Pakete als auch proportional zur vom Kanalzustand abhängigen momentanen Übertragungsrate. Diese Festlegung sorgt dafür, dass MS auch bei vergleichsweise schlechten Kanalzuständen nach einer kurzen Wartezeit ähnlich hohe Grenznutzenwerte vorweisen wie MS mit guten Kanalzuständen. Durch die Adaption des Grenznutzens an die Paketwartezeiten sollen die Paketverwerfungsraten gesenkt werden.

**(4) Zusätzliche Berücksichtigung der benutzerspezifischen Deckungsgrade und Paketfehlerraten** Im Fall einer Ressourcenexpansion können die überschüssigen Ressourcen mit dem in Anhang D angegebenen Algorithmus genutzt werden, um mit robusteren PHY Modi zu übertragen und dadurch die PER zu senken.

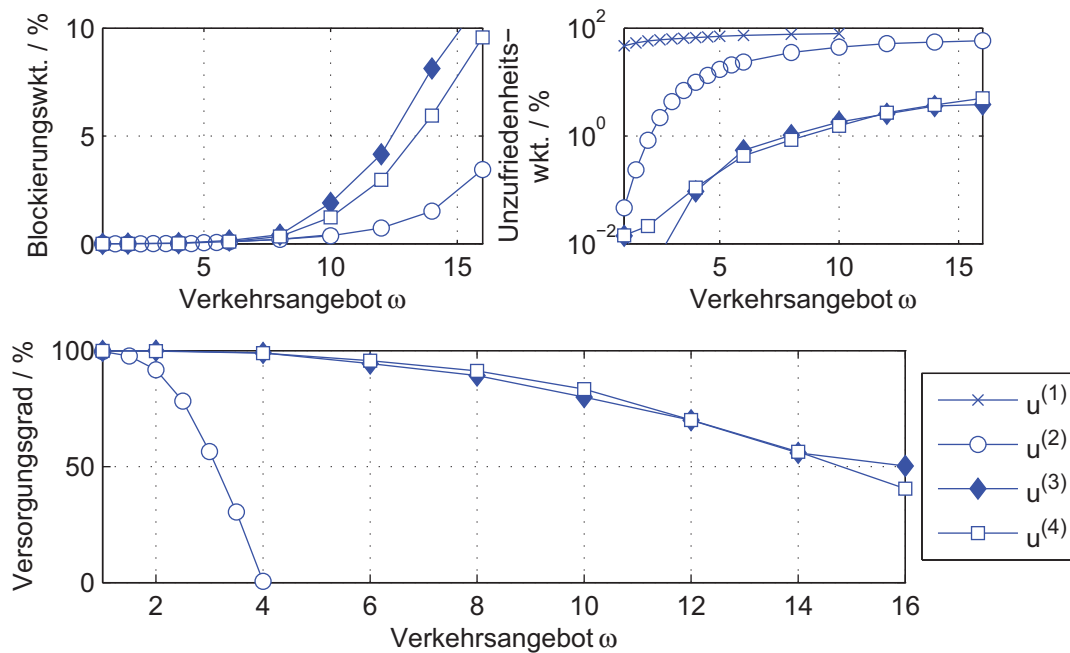
Hat eine MS bereits mehr Ressourcen erhalten als sie zum Abarbeiten ihrer Paketwarteschlange benötigt ( $q_m(l) = 0$ ), so ist ihr in Anhang D, Gl. (D.2) definierter benutzerspezifischer Deckungsgrad  $\Theta_m(t, l) \geq 1$ . Die Grenznutzenfunktion  $u_{m,\kappa}^{(4)}(t, l)$  wird nun dahingehend ausgelegt, dass der Grenznutzen mit steigendem benutzerspezifischem Deckungsgrad abnimmt.

Desweiteren wird angestrebt, die Zuordnung der überschüssigen Ressourcen zu Gunsten von Verbindungen mit bislang hohen Paketfehlerraten zu priorisieren. Dazu wird für jede MS kontinuierlich die Paketfehlerrate  $\zeta_m(t)$  gemessen und hieraus über Tabelle 8.2 ein zusätzlicher Nutzenfaktor  $\Phi_m(t)$  bestimmt. Dieser geht proportional in die Grenznutzenberechnung ein. Die vierte Grenznutzendefinition lautet damit

$$u_{m,\kappa}^{(4)}(t, l) = \begin{cases} d_{m,\kappa}(t) \cdot w_m^{\text{HoQ}}(t, l) \cdot \Phi_m(t), & q_m(l) > 0, \\ \frac{\Phi_m(t) \cdot d_{m,\kappa}(t)}{[\Theta_m(t, l)]^2}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (8.9)$$

Durch die Berücksichtigung der MS-spezifischen Deckungsgrade  $\Theta_m(t, l)$  wird verhindert, dass die MS mit den höchsten momentanen Paketfehlerraten alle überschüssigen Ressourcen der BS erhalten.



Bild 8.13.: Vergleich der Grenznutzenfunktionen  $u^{(1)}$  bis  $u^{(4)}$ 

### 8.3.2. Simulationsergebnisse

Bild 8.13 zeigt die Simulationsergebnisse für die vier Grenznutzenfunktionen  $u^{(1)}$  bis  $u^{(4)}$ . Der größte Unterschied fällt bei der Betrachtung der Unzufriedenheitswahrscheinlichkeiten auf. Bei Einsatz der rein kanalorientierten Grenznutzenfunktion  $u^{(1)}$  sind bereits bei niedrigem Verkehrsangebot über 50% der Benutzer unzufrieden, da die Ressourcen immer nur an die MS mit den besten Kanalzuständen vergeben werden.

Durch die Berücksichtigung eines abnehmenden Grenznutzen wird mit Grenznutzenfunktion  $u^{(2)}$  die Benutzerzufriedenheit durch die gestiegene Fairness bereits deutlich verbessert. Mit zunehmendem Verkehrsangebot steigt jedoch auch bei Anwendung der Funktion  $u^{(2)}$  die Unzufriedenheit bereits bei relativ niedrigem Verkehrsangebot an.

Erst die zusätzliche Berücksichtigung der Momentanzustände der Paketwarteschlangen in den Grenznutzenfunktionen  $u^{(3)}$  und  $u^{(4)}$  führt zu einer signifikanten Verbesserung des Systemverhaltens. Da das Mikro-RRM eine Priorisierung bezüglich der Wartezeiten der in den Warteschlangen aufgelaufenen Pakete durchführt, können Überschreitungen der maximal tolerierten Paketverzögerungszeiten effektiv vermieden werden.

Die Berücksichtigung der Wartezeiten der ganz vorne in den Warteschlangen stehenden Pakete in den Grenznutzenfunktionen  $u^{(3)}$  und  $u^{(4)}$  führt, wie in Bild 8.14 zu erkennen, zu einer deutlichen Senkung der mittleren Verzögerungszeiten der empfangenen Pakete. Bei Anwendung rein kanaladaptiver Zuteilungsverfahren (Grenznutzenfunktionen  $u^{(1)}$  und  $u^{(2)}$ ) liegen die mittleren Verzögerungszeiten um ein Vielfaches höher. Mit den Übertragungsverzögerungen sinkt entsprechend die Wahrscheinlichkeit, dass Pakete in den



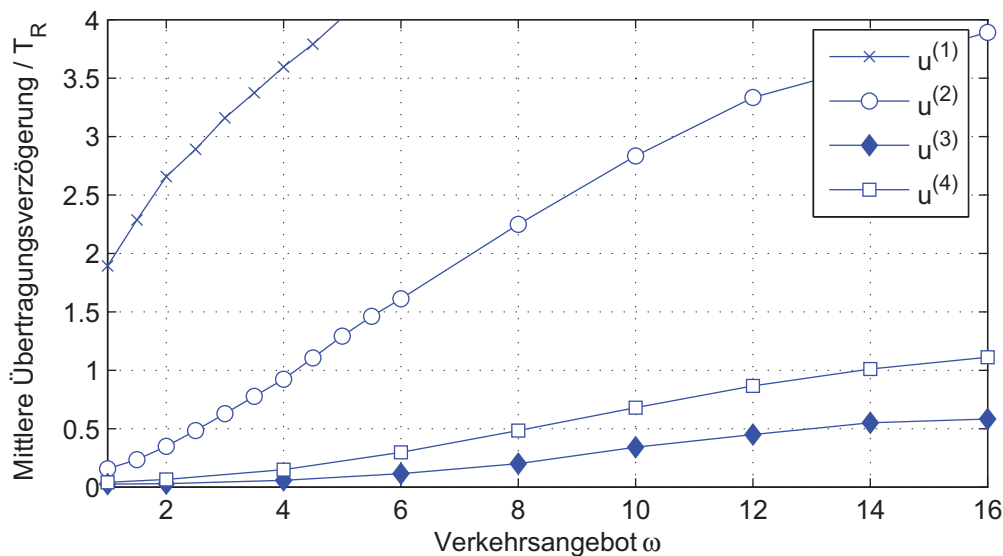


Bild 8.14.: Mittlere Paketverzögerungszeiten in Abhängigkeit von der Grenznutzendefinition, normiert auf die Rahmenlänge  $T_R$

Warteschlangen veralten und deshalb verworfen werden müssen. Dies wird anhand der in Bild 8.15 dargestellten Paketverwerfungsraten deutlich.

In Bild 8.14 fällt auf, dass mit der Grenznutzenfunktion  $u^{(3)}$  die niedrigsten mittleren Verzögerungszeiten erzielt werden. Die niedrigsten Paketverwerfungsraten werden jedoch, wie aus Bild 8.16 hervorgeht, mit der Grenznutzenfunktion  $u^{(4)}$  erreicht. Folglich zahlt es sich aus, überschüssige Ressourcen wie in Abschnitt 8.3.1, Punkt (4) erklärt gezielt an Funkverbindungen mit bislang hohen Paketfehlerraten zu vergeben. Der Zuwachs an Benutzerzufriedenheit durch Anwendung von  $u^{(4)}$  gegenüber  $u^{(3)}$  wird durch geringfügig höhere mittlere Übertragungsverzögerungen erkaufte.

Bild 8.16 zeigt die Paketfehlerraten. Da die Ressourcen mit der Grenznutzenfunktion  $u^{(1)}$  immer an die MS mit den besten Kanalzuständen vergeben werden, treten mit diesem Verfahren selbst bei hohem Verkehrsangebot nahezu keine Paketfehler auf. Die Begrenzung der zugeteilten Ressourcennengen durch den mit der Grenznutzenfunktionen  $u^{(2)}$  eingeführten abnehmenden Grenznutzen erhöht die PER bereits deutlich. Die höchsten PER treten bei Anwendung der Grenznutzenfunktion  $u^{(3)}$  auf, da die überschüssigen Ressourcen hiermit zufällig zugeordnet werden.

Bei Anwendung der Grenznutzenfunktion  $u^{(4)}$  werden die überschüssigen Ressourcen gezielt an Funkverbindungen mit bislang hohen PER vergeben. Diese können mit den überschüssigen Ressourcen auf robustere PHY Modi ausweichen. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der benutzerspezifischen Deckungsgrade wird eine höhere Fairness bei der Vergabe der überschüssigen Ressourcen erreicht. Dies führt wie in Bild 8.16 zu erkennen zu einer Senkung der PER.

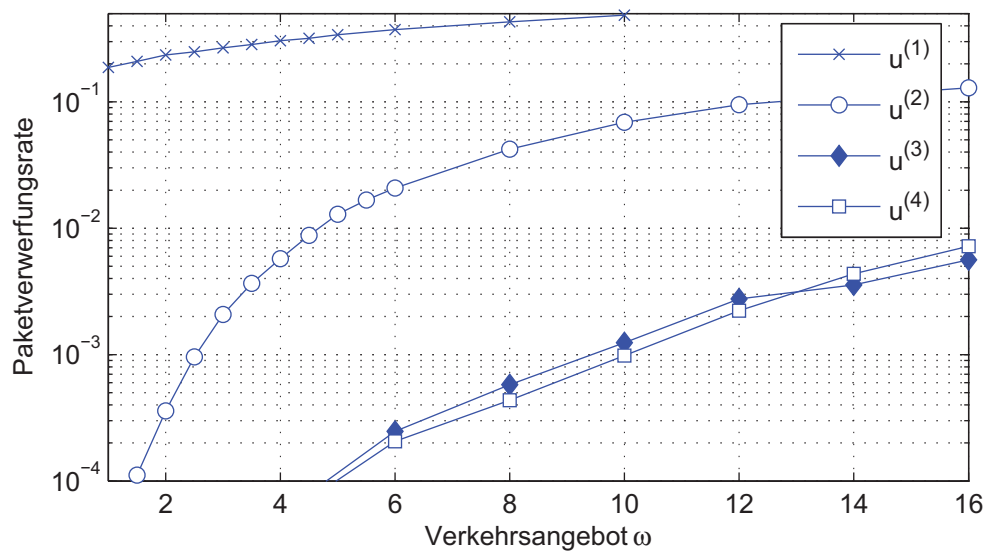


Bild 8.15.: Paketverwerfungsrate in Abhängigkeit von der Grenznutzendefinition

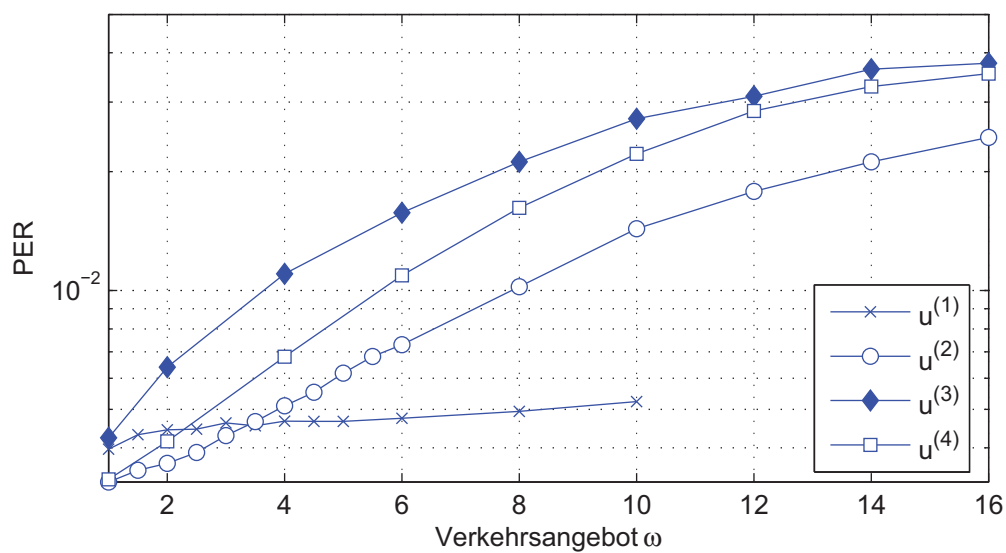


Bild 8.16.: Paketfehlerraten (PER) in Abhängigkeit von der Grenznutzendefinition

### 8.3.3. Fairnessanalyse

Anhand von Bild 8.17 wird nun die im System erzielte Fairness analysiert. Fairness ist ein wichtiger Aspekt in zellularen Systemen mit kanaladaptiver Ressourcenzuweisung [NLB02]. Sie ist ein Maß für die von den MS erzielten Datenraten in Abhängigkeit von den mittleren Pfaddämpfungen. MS am Zellrand weisen aufgrund der entfernungsabhängigen Dämpfung höhere mittlere Pfaddämpfungen auf als MS mit geringem Abstand zur BS. Wird vom Netzbetreiber eine hohe Abdeckungsquote im Versorgungsgebiet angestrebt, so muss sichergestellt sein, dass auch weit entfernte und stark abgeschattete MS ausreichend viele Ressourcen erhalten.

Im oberen Teil von Bild 8.17 ist die in den Simulationen empirisch ermittelte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) der aus entfernungsabhängiger Dämpfung und Abschattung resultierenden Pfaddämpfungen aufgetragen, die sich bei gleichmäßiger Verteilung der Benutzer innerhalb der Zellen ergibt.

Im unteren Teil von Bild 8.17 ist die von den Benutzern im Mittel erzielte Datenrate über der mittleren Pfaddämpfung aufgetragen. Man sieht deutlich, dass bei rein kanaladaptiver Ressourcenvergabe Funkverbindungen mit niedriger Pfaddämpfung bevorzugt werden. In den Simulationen wird mit der Grenznutzenfunktion  $u^{(1)}$  den MS mit schwachen Pfaddämpfungen und daraus resultierenden hohen SINRs teilweise das Sechsfache der mittleren Datenrate zugewiesen. Ein solcher Überschuss kann jedoch nicht sinnvoll genutzt werden. Folglich werden hier Ressourcen verschwendet.

Durch das Sättigungsverhalten der Grenznutzenfunktion  $u^{(2)}$  wird bereits eine höhere Fairness erzielt. Dennoch ist in Bild 8.17 nach wie vor eine Schieflage bezüglich der von der Pfaddämpfung abhängenden mittleren Datenraten zu erkennen. Die höchste Fairness wird mit der Grenznutzenfunktion  $u^{(4)}$  erreicht. Ziel dieser Zuteilungsstrategie war eine Priorisierung bei der Zuteilung überschüssiger Ressourcen zu Gunsten von Funkverbindungen mit schlechten Kanalzuständen. Wie aus Bild 8.17 hervorgeht, wird mit  $u^{(4)}$  die Fairness im Vergleich zu  $u^{(3)}$  erhöht. MS mit hohen Pfaddämpfungen bekommen im Mittel sogar geringfügig höhere Übertragungsraten zugewiesen als MS mit niedrigen Pfaddämpfungen. Letztere erhalten demnach nur so viele Ressourcen, wie sie tatsächlich benötigen.

Durch die schichtenübergreifende Berücksichtigung sowohl der Kanalzustandsinformation als auch der Zustandsinformationen der Datenquellen erreicht das SO-RRM-System im Zusammenspiel mit der in Abschnitt 8.2.2 eingeführten deckungsgradgesteuerten Ressourcenauswahl sowohl eine hohe Effizienz als auch eine hohe Fairness.

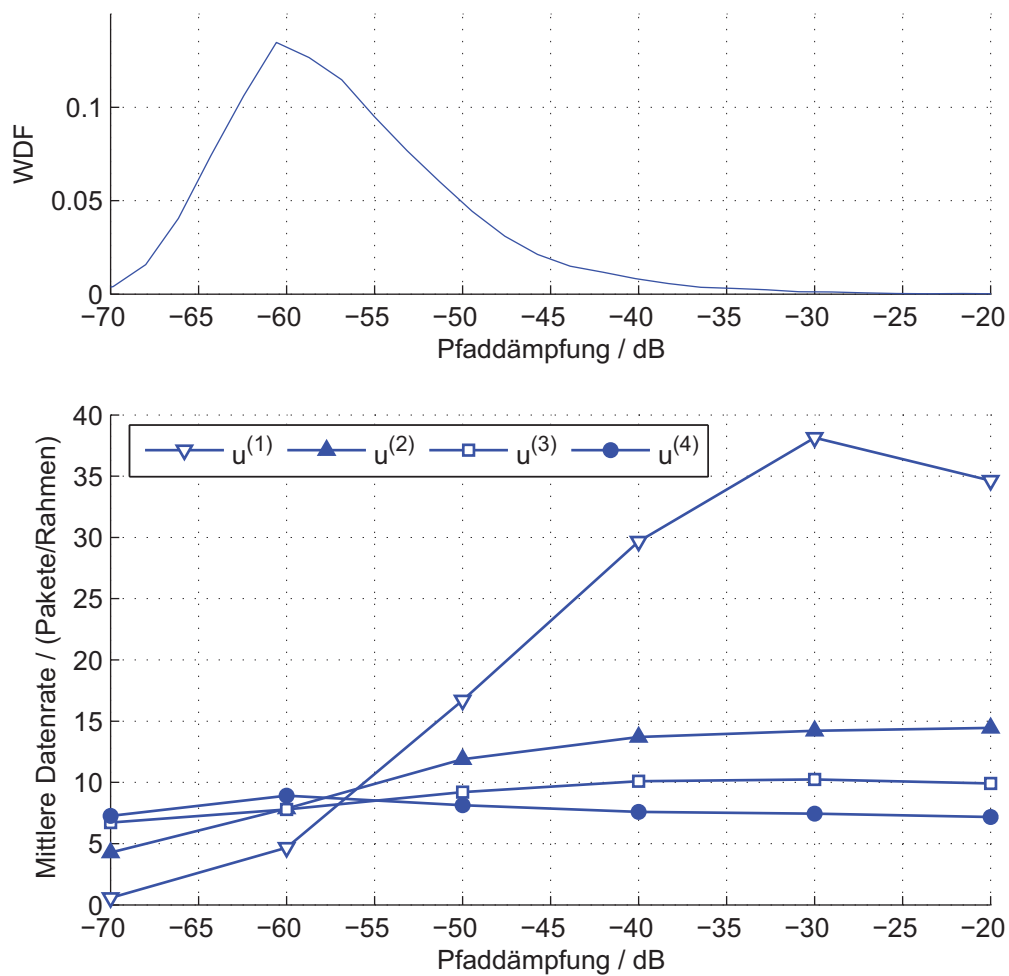


Bild 8.17.: Bewertung der mit den Grenznutzenfunktionen erzielten Fairness

## 8.4. Diskussion

Die in diesem Kapitel als Erweiterung für das SO-RRM eingeführte deckungsgradbasierte Steuerung der Ressourcenauswahl zur Versorgung von MS mit variablen Datenraten im DL erwies sich als stabile und effiziente Lösung. Ein großer Vorteil des erweiterten SO-RRM-Konzepts liegt in der Möglichkeit zur Ressourcenexpansion. In den Simulationen wurde nachgewiesen, dass sich eine Ressourcenexpansion positiv auf alle QoS-relevanten Kennzahlen auswirkt. Der mit der Ressourcenexpansion verbundene Anstieg der GKI wirkt sich bei niedriger und mittlerer Systemauslastung nicht negativ auf das Systemverhalten aus. Damit möglichst viele Benutzer versorgt werden können, muss das Maß der Ressourcenexpansion bei zunehmender Systemauslastung wieder reduziert werden, da ansonsten bei hoher Systemauslastung die Blockierungswahrscheinlichkeit aufgrund der hohen GKI steigt. Zu diesem Zweck wurden lastabhängige Deckungsgradschwellen für den Makro-RRM-Prozess eingeführt.

Entscheidend für die Versorgung der MS mit variablen Datenraten ist die Möglichkeit, die Zuordnung der im DL genutzten Ressourcen in jedem Zugriffsrahmen aktualisieren zu können. Die OFDM-FDMA-Übertragungstechnik bietet hierfür wie in Kapitel 3.2.1 erläutert die übertragungstechnischen Voraussetzungen. Im DL bewirkt eine Änderung der Zuordnungen aus Sicht der umliegenden Zellen keine Änderung der GKI. Folglich kann stets ein an den momentanen Datenratenbedarf angepasster Ausgleich zwischen den MS bezüglich der Menge der zugeordneten Ressourcen herbeigeführt werden.

Da zusätzlich die Zuordnungen der Ressourcen zu den MS in jedem Zugriffsrahmen an die momentanen Kanalzustände adaptiert werden, steigt die Performance im DL gegenüber der in Kapitel 7 verfolgten Strategie einer langfristigen Zuordnung von Ressourcen zu einer MS. Bei einem Versorgungsgrad von 90% können mit der in diesem Kapitel vorgeschlagenen Kopplung aus Makro- und Mikro-RRM trotz variabler Datenraten ca. 25% mehr MS ( $\omega_{\max}^{\text{Kap. 7}} = 7,5$  gegenüber  $\omega_{\max}^{\text{Kap. 8}} = 9,5$ ) pro Funkzelle versorgt werden.

Um die aus den unterschiedlichen Quellen- und Kanalzuständen resultierende MUD auszunutzen zu können, wurde für das Mikro-RRM ein nutzenmaximierender Scheduling-Algorithmus vorgeschlagen. Mit einem nutzenbasierten Ansatz können mehrere Zustandsgrößen zu einer Entscheidungsgröße, dem jeweiligen Grenznutzen, aggregiert werden. Zuordnungsentscheidungen werden iterativ auf Basis des für jeden Benutzer und jede Ressource ermittelten Grenznutzens getroffen. In den Simulationen wurde die höchste Performance erzielt, wenn sowohl die Momentanzustände der zeitvarianten Funkkanäle als auch die Momentanzustände der Paketwarteschlangen in die Grenznutzenberechnung einfließen.

Durch Anwendung einer mit steigender zugeordneter Ressourcenmenge abnehmenden Grenznutzenfunktion wird eine hohe Fairness im zellularen SO-RRM-System erreicht. Für jede Funkverbindung wird vor der Zuordnung der nächsten Ressource geprüft, ob eine

---

weitere Ressource noch sinnvoll genutzt werden kann. Besonders am Zellrand befindliche MS mit hohen Pfaddämpfungen profitieren von dieser Vorgehensweise. Die im Mittel pro Verbindung erzielten Datenraten werden bei geeigneter Nutzendefinition unabhängig von der mittleren Pfaddämpfung. Im SO-RRM-System kann somit eine hohe Fairness zwischen den MS hergestellt werden.



## 9. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Potential einer selbstorganisierenden Ressourcenvergabe für auf der OFDM-Übertragungstechnik basierende zellulare Mobilfunksysteme analysiert und ein SO-RRM-Konzept für zukünftige 4G-Systeme vorgeschlagen.

Die OFDM-Übertragungstechnik bildet aufgrund ihrer Effizienz und Robustheit gegenüber der Mehrwegeausbreitung realer Mobilfunkkanäle die übertragungstechnische Grundlage. Der Systemvorschlag basiert auf einer zellübergreifenden Synchronisation aller BS und MS in Zeit und Trägerfrequenz. In einem vollständig synchronisierten Funknetz entstehen zwar GKI, aber keine Nachbarkanalinterferenzen. Dadurch können die GKI zuverlässig gemessen und als Entscheidungskriterium für die selbstorganisierende Ressourcenauswahl ausgewertet werden.

Im vorgeschlagenen SO-RRM-System wählen die BS die für die Versorgung der MS benötigten Ressourcen autonom aus. Die Auswahl basiert auf den in DL und UL durchgeführten Messungen der Nutzsignalleistungen und der GKI. Hieraus werden die ressourcenspezifischen SINRs berechnet. Anschließend werden die Ressourcen mit den höchsten SINRs ausgewählt. Durch Anwendung einer Linkadaptionstechnik wird die Menge der ausgewählten Ressourcen an die Kanalzustände und an die Intensität der gemessenen GKI angepasst. Die MS unterstützen den Auswahlprozess, indem sie eine Vorschlagsliste mit den im DL gemessenen GKI an die BS übermitteln. Die BS können die Ressourcenauswahl gemeinsam für DL und UL durchführen, indem sie ihre eigenen Ranglisten mit den Vorschlägen der MS verschmelzen. Alternativ kann die Ressourcenauswahl in DL und UL getrennt erfolgen.

Eine Selbstorganisation bietet die maximale Flexibilität beim Einsatz der knappen Funkressourcen. In einem SO-RRM-System hat jede BS Zugriff auf die gesamte Systembandbreite. Ressourcen können immer dort ausgewählt werden, wo sie gerade benötigt werden. Hierdurch lassen sich asymmetrische Benutzeraufkommen wie z. B. Hot Spots höchst effizient versorgen. Zudem entfällt im Vergleich zu herkömmlichen Mobilfunksystemen der 2. und 3. Generation die Notwendigkeit einer statischen Vorausplanung des Ressourcenbedarfs und der von den Funkzellen belegten Frequenzbänder.

### **SO-RRM bei konstanten Datenraten**

Zunächst wurde in Kapitel 7 die Bereitstellung konstanter Datenraten in UL und DL untersucht. In System-Level-Simulationen wurde gezeigt, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Auswahlalgorithmen zu einem stabilen Netzbetrieb führen. Das SO-RRM-System



wurde gegen ein Referenzsystem mit SRV verglichen. Bereits bei gleichmäßiger Verteilung der Benutzer im Versorgungsgebiet wurde mit SO-RRM eine höhere Effizienz erzielt.

Seine eigentliche Stärke zeigte das SO-RRM-System im Hot-Spot-Szenario. Während in einem SRV-System keinerlei Anpassungen an Änderungen des Benutzeraufkommens möglich sind, können sich SO-RRM-Systeme flexibel an das tatsächliche momentane Verkehrsaufkommen adaptieren. Hierdurch steigt die Effizienz des SO-RRM-Systems in asymmetrischen Verkehrsszenarien wie Hot Spots im Vergleich zu herkömmlichen SRV-basierten Konzepten beträchtlich an.

Zur Bereitstellung konstanter Datenraten wurden sowohl eine gemeinsame als auch eine getrennte Ressourcenauswahl für DL und UL analysiert. Die besseren Ergebnisse wurden zunächst bei gemeinsamer Auswahl der Ressourcen für DL und UL erzielt. Eine getrennte Ressourcenauswahl ist dennoch sinnvoll, wenn in DL und UL unterschiedliche Datenraten benötigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine Überdeckung des Ressourcenbedarfs das Systemverhalten bei getrennter Auswahl verbessert werden kann. Mit dem Ressourcenüberschuss können robustere PHY Modi angewendet werden. Dadurch werden die Übertragungen robuster gegen mögliche Anstiege der GKI.

### **SO-RRM im DL bei variablen Datenraten**

In Kapitel 8 wurde als zweiter Anwendungsfall die Versorgung mit variablen Datenraten im DL betrachtet. Dazu wurde eine in DL und UL getrennte Ressourcenauswahl durchgeführt. Als Erweiterung des SO-RRM-Konzepts wurde für den DL ein Protokoll vorgeschlagen, mit welchem alle für den DL ausgewählten Ressourcen bedarfsangepasst zwischen den MS umverteilt werden können. Das Konzept basiert darauf, dass sich hierdurch im DL die in den umliegenden Zellen wahrgenommenen GKI nicht ändern.

Im erweiterten Konzept wird die Ressourcenauswahl über den Ressourcendeckungsgrad gesteuert. Dieser wird in jedem Zugriffsrahmen durch einen Vergleich zwischen verfügbarer und benötigter Gesamtdatenrate bestimmt. Die Auswahl und Freigabe von Ressourcen erfolgt bei Unter- bzw. Überschreitung vorgegebener Deckungsgradschwellen. Durch geeignete Wahl der Schwellen kann eine Überdeckung des Ressourcenbedarfs erzielt werden. Eine solche Ressourcenexpansion erwies sich bereits bei der Versorgung mit konstanten Datenrate als effizienzsteigernd. Die Auftretishäufigkeiten von Auswahl- und Freigabeprozessen werden durch eine Ressourcenexpansion reduziert, sodass die gemessenen GKI über einen längeren Zeitraum konstant bleiben.

Anhand von Rechnersimulationen wurde gezeigt, dass sich eine Ressourcenexpansion besonders bei niedriger und mittlerer Systemauslastung positiv auf alle relevanten QoS-Kennzahlen auswirkt. Bei hoher Systemauslastung jedoch sollte das Ausmaß der Ressourcenexpansion reduziert werden, damit zusätzliche Benutzer mit den freiwerdenden Ressourcen versorgt werden können. Zu diesem Zweck wurden systemlastabhängige Deckungsgradschwellen eingesetzt.

---

Als wesentliche Neuerung wurde eine Kopplung zwischen den beiden Prozessen Ressourcenauswahl und Ressourcenzuordnung eingeführt. Die vom Makro-RRM ausgewählten Ressourcen werden dem Mikro-RRM in einem Ressourcenpool zur Verfügung gestellt. Das Mikro-RRM ordnet den MS die im Pool befindlichen Ressourcen in jedem Zugriffsrahmen bedarfsangepasst zu. Anschließend berechnet es den sich aus der aktuellen Zuordnung ergebenden Deckungsgrad und meldet diesen an das Makro-RRM zurück. Das Makro-RRM wiederum nutzt den rückgekoppelten Deckungsgrad als Stellgröße für seinen Ressourcenauswahlprozess.

Für die Zuordnung der Ressourcen wurde ein nutzenbasierter Scheduling-Algorithmus vorgeschlagen. Der Algorithmus berücksichtigt die Momentanzustände sowohl der Paketwarteschlangen als auch der frequenzselektiven und zeitvarianten Funkkanäle. Hierdurch kann die in den Funkzellen vorhandene MUD ausgenutzt und die Systemeffizienz gesteigert werden. Um Fairness zu gewährleisten, wird das Prinzip vom abnehmenden Grenznutzen angewendet. Der Nutzen einer weiteren Ressource nimmt mit der Menge der Ressourcen ab, die einem Benutzer bereits zugeordnet wurden. Es zeigte sich, dass insbesondere die Auswertung der in den Paketwarteschlangen aufgelaufenen Wartezeiten für eine bedarfsgerechte Zuordnung und für die Fairness in der Zelle entscheidend ist. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung der momentanen Kanalzustände wird bei der nutzenbasierten Ressourcenzuordnung eine hohe Effizienz erreicht.

Die Kopplung von Mikro- und Makro-RRM bewirkt eine stabile und effiziente Selbstorganisation auf Gesamtsystemebene und bietet einen effektiven Mechanismus zur Gewährleistung des QoS bei variablen Datenraten.

### **Fazit**

Das in dieser Arbeit entwickelte SO-RRM birgt ein hohes Potential für zukünftige auf der OFDM-Übertragungstechnik basierende 4G-Systeme. Es eignet sich hervorragend für den schrittweisen Aufbau einer nicht zwingend flächendeckenden Infrastruktur. Ein SO-RRM-Zugangsnetz lässt sich durch schrittweise Inbetriebnahme weiterer BS kosten- und aufwandsgünstig erweitern. Durch die Selbstorganisation entfällt jeglicher Planungsaufwand. Ressourcen werden bei asymmetrischem Verkehrsaufkommen flexibel und effizient dort eingesetzt, wo sie gerade benötigt werden.



# A. Bündelungsgewinn in einem M/M/n-Verlustsystem

Aus der Verkehrstheorie ist bekannt, dass das Zusammenlegen von Bedieneinheiten zu einem Bündelungsgewinn führt. Da auch der Übergang von einer statischen Ressourcenvergabe zu einem SO-RRM als ein solches Zusammenlegen interpretiert werden kann, wird die zum Verständnis des Bündelungsgewinns benötigte Theorie in diesem Anhang kurz zusammengefasst. Eine detailliertere Einführung in die Warteschlangentheorie gibt z. B. [TG96].

Ein wichtiger dynamischer Prozess in einem Mobilfunksystem ist das zeitliche Eintreffen der Verbindungsanfragen. Im Modell wird angenommen, dass die Anfragen zu voneinander unabhängigen Zeitpunkten erfolgen. Da die Zwischenankunftszeiten unkorreliert sind, bezeichnet man solche Prozesse als gedächtnislos. Die Zwischenankunftszeiten zeitkontinuierlicher gedächtnisloser Prozesse sind exponentiell verteilt [TG96]. Es sei  $a(t)$  die Anzahl von Benutzerankünften zum Zeitpunkt  $t$ . Für gedächtnislose Prozesse kann die Wahrscheinlichkeit dafür, während eines Zeitintervalls der Dauer  $\tau$  genau  $n$  Ankünfte zu beobachten, durch eine Poisson-verteilte Zufallsvariable mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$p_A(n, \tau) = Pr \{a(t + \tau) - a(t) = n\} = \frac{e^{-\lambda\tau}}{n!} \cdot (\lambda\tau)^n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.1})$$

beschrieben werden [Pap01]. In Gl. (A.1) bezeichnet  $\lambda$  die mittlere Anzahl von Ankünften pro Zeitintervall  $\tau$  und wird daher als mittlere Ankunftsrate bezeichnet. Auf dieselbe Weise kann auch der gedächtnislose Bedienprozess mit dem als mittlere Bedienrate bezeichneten Parameter  $\mu$  modelliert werden. Aus den Größen  $\lambda$  und  $\mu$  berechnet sich das Verkehrsangebot als Maß für die Verkehrsintensität im betrachteten System zu

$$\omega = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (\text{A.2})$$

## M/M/n-Verlustsysteme

In der Verkehrstheorie wird unterschieden zwischen Verlustsystemen und Warteschlangensystemen. In einem Verlustsystem wird geprüft, ob eine Anfrage unmittelbar zu ihrem

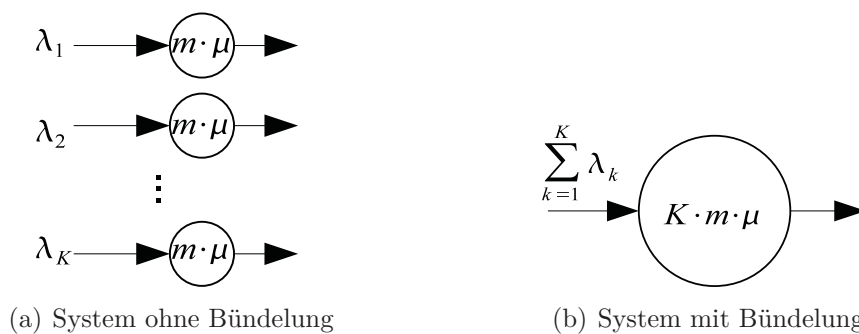


Bild A.1.: Bündelungsgewinn durch Zusammenlegen von Bedienkapazitäten

Ankunftszeitpunkt bedient werden kann. Falls ja, wird die Anfrage vom System angenommen und bedient; falls nein, wird die Anfrage verworfen. Warteschlangensysteme hingegen puffern Bedienanfragen solange, bis wieder Bearbeitungskapazität für den nächsten wartenden Auftrag zur Verfügung steht.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Anfrage in einem Verlustsystem nicht bedient werden kann, wird als Blockierungswahrscheinlichkeit bezeichnet. In Verlustsystemen mit gedächtnislosem Ankunfts- und Bedienprozess kann diese mit der nach ihrem Entdecker benannten Erlang-B-Formel berechnet werden. Sie hängt von der Anzahl verfügbarer Bedieneinheiten  $K$  (z. B. Funkkanäle) sowie dem Verkehrsangebot  $\omega$  ab,

$$P_b(\omega, K) = \frac{\frac{\omega^K}{K!}}{\sum_{k=0}^K \frac{\omega^k}{k!}}. \quad (\text{A.3})$$

Systeme mit den zuletzt genannten Eigenschaften werden gemäß der Kendall-Notation [TG96] als M/M/n-Verlustsysteme (hier:  $n = K$ ) bezeichnet. Gl. (A.3) gilt auch für M/GI/n-Verlustsysteme, deren Bedienprozess nicht gedächtnislos ist und eine beliebige Verteilungsfunktion aufweisen kann.

## Bündelungsgewinn

Ausgangspunkt der Überlegung ist das in Bild A.1(a) dargestellte System ohne Bündelung der Bedienanfragen. Das in Bild A.1(b) gezeigte System mit Bündelung muss die Summe aller  $K$  Ankunftsprozesse bedienen. Durch die Aggregation der Ankunftsprozesse ergibt sich wiederum ein gedächtnisloser Ankunftsprozess mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten und mittlerer Ankunftsrate  $\sum_{k=1}^K \lambda_k$ .

Um den Bündelungsgewinn quantitativ zu berechnen, wird zunächst der als

$$Y(\omega) = \omega \cdot (1 - P_b(\omega)) \quad (\text{A.4})$$

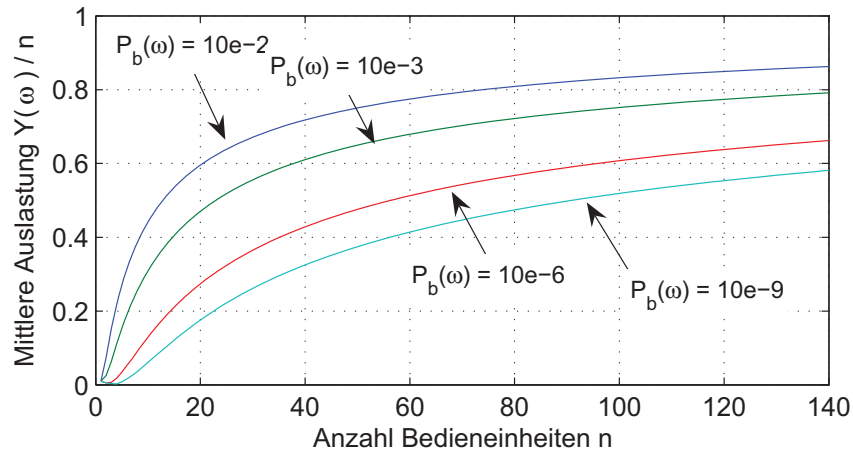


Bild A.2.: Mittlere Auslastung eines Bediener über der Anzahl verfügbarer Bedieneinheiten bei vorgegebener Blockierungswahrscheinlichkeit

definierte Verkehrswert auf die Anzahl verfügbarer Bedieneinheiten  $K$  normiert. In Bild A.2 ist die durch numerische Auswertung der Gln (A.3) und (A.4) ermittelte Abhängigkeit des Verkehrswerts von der Anzahl der Bedieneinheiten (z. B. die Anzahl verfügbarer Funkressourcen)  $n$  dargestellt. Der normierte Verkehrswert gibt den Erwartungswert der mittleren zeitlichen Auslastung einer Ressource an. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Vorgabe einer maximal tolerierten Blockierungswahrscheinlichkeit die Kanalausnutzung mit zunehmender Bündelgröße  $n$  deutlich ansteigt. In großen Bündeln werden Kanäle folglich wirtschaftlicher genutzt. Dieses Phänomen wird in der Verkehrstheorie als Bündelungsgewinn bezeichnet [TG96].

Als Beispiel werden in einem Kommunikationssystem wie in Bild A.1 gezeigt die aus jeweils  $m$  Leitungen bestehenden  $K$  Teilbündel zu einem großen Leitungsbündel zusammengelegt. Der Bündelungsgewinn kann in Bild A.2 unmittelbar durch Vergleich der normierten Verkehrswerte an den Stellen  $n_1 = m$  sowie  $n_2 = K \cdot m$  ermittelt werden.



## B. Entwickelte Simulationssoftware

Für die quantitative Untersuchung dynamischer Systeme, in denen ausschließlich zu diskreten Zeitpunkten Änderungen des Systemzustands auftreten, eignet sich besonders die ereignisgesteuerte Simulationstechnik (*Discrete Event Simulation*, [LK00]). Mit dieser Technik wird die Zeitachse eines Simulationsdurchlaufs auf eine Menge abzählbar vieler diskreter Zeitpunkte abstrahiert. Ereignisse im SO-RRM-Systemmodell sind beispielsweise Neuankünfte von MS und die erfolgreiche oder erzwungene Beendigung aktiver Funkverbindungen. In den Simulationen wird unterstellt, dass solche Ereignisse immer zu Beginn eines neuen Zugriffsrahmens stattfinden. Das Zeitraster der Simulationen besteht folglich aus äquidistanten Intervallen der Dauer  $T_R$  eines Zugriffsrahmens.

Das Simulationsprogramm wurde mit einem objektorientierten Ansatz in C++ unter Verwendung der OMNeT++ Bibliothek [Var01] entwickelt. OMNeT++ bietet flexible Mechanismen zum Erzeugen komplexer Netzwerktopologien und stellt Basisklassen für eigene Klassen bereit. Mit der bereitgestellten Basisfunktionalität kann ein zeitlich gesteuerter Nachrichtenaustausch zwischen den simulierten Objekten übersichtlich und effizient implementiert werden. Die Objektorientierung erwies sich als sehr nützlicher und effizienter Ansatz hinsichtlich der Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit der simulierten SO-RRM-Systeme. In den Simulationen werden zur Laufzeit voneinander unabhängig agierende Instanzen der BS- und MS-Objekte erzeugt. Zwecks übersichtlicher Modellierung und Implementierung der Protokollabläufe wurden alle Module, insbesondere BS und MS, als endliche Zustandsautomaten implementiert, die durch den Nachrichtenaustausch untereinander gesteuert werden.

Ein weiterer Vorteil von OMNeT++ ist die Einbindung eines Zufallszahlengenerators mit einer nahezu unendlich langen Periode von  $2^{19937}$  des erzeugten Zufallszahlenmusters [MN98]. Es steht eine Bibliothek mit Zufallszahlengeneratoren für alle in dieser Arbeit benötigten Wahrscheinlichkeitsdichten zur Verfügung. Bezüglich der Rechengeschwindigkeit konnte durch die Implementierung in C++ gegenüber einem ersten Matlab-Prototypen ein Geschwindigkeitsvorteil von etwa Faktor 20-30 herausgeholt werden. Bei Rechenzeiten von zum Teil einigen Tagen pro Kurve (PC mit Pentium4 der 3 GHz-Klasse) stellt dies eine enorme Zeitersparnis dar. Für einen höheren Detaillierungsgrad der Modellierung sollte für Folgeuntersuchungen darüber nachgedacht werden, Möglichkeiten zur Parallelisierung und Aufteilung der Rechenlast auf mehrere Prozessoren ausfindig zu machen. Entsprechende Erweiterungen für das OMNeT++ Paket sind bereits in Vorbereitung [Var05].



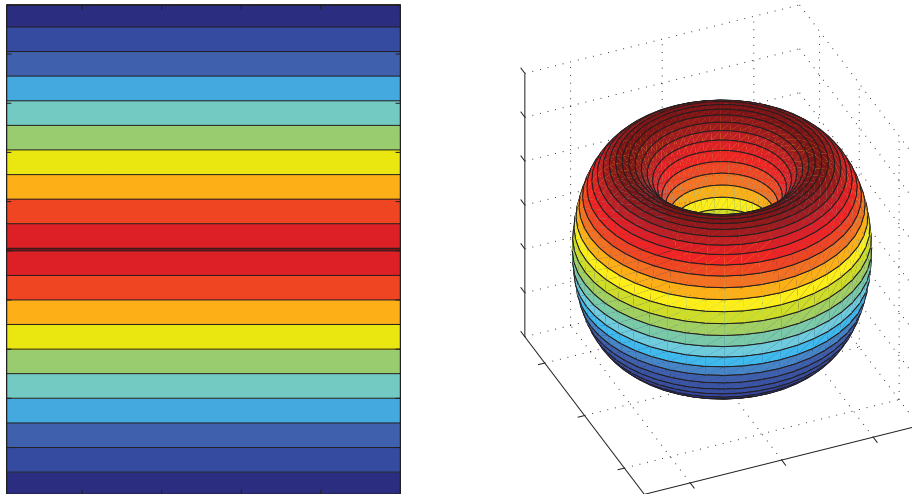


Bild B.1.: Abbildung des Versorgungsgebietes auf die Oberfläche eines Ringkörpers

## Interferenzberechnung

Bei der Simulation einer endlichen Anzahl von Funkzellen wie z. B. in Bild 7.1 weisen Zellen am Rand des Versorgungsgebietes im Mittel niedrigere Interferenzpegel auf als Zellen in der Mitte. Zur Vermeidung von Randeffekten können zwei Techniken bei der Ergebnisauswertung angewendet werden. Die simulationstechnisch einfachere Variante besteht im Weglassen der aus den Randzellen gewonnenen Simulationsergebnisse. Die nicht auswertbaren Berechnungen am Rand erhöhen den Rechenaufwand pro zählbarem Ereignis jedoch beträchtlich. Zudem tritt der unerwünschte Effekt auf, dass trotz der gleichförmigen Benutzerverteilung die Interferenzleistungen im Zentrum höher ausfallen als an den Rändern. Daher wird in dieser Arbeit die sog. Wrap-Around-Technik angewendet [ZK01]. Die Idee dieses Verfahrens liegt wie in Bild B.1 skizziert in der Abbildung des zweidimensionalen Versorgungsgebiets auf die Oberfläche eines Ringkörpers. Zur Bestimmung des Pfadverlusts zwischen einer MS und einer BS wird auf der Oberfläche des Torus der kürzeste Abstand zwischen den beiden Stationen bestimmt. Mit der Wrap-Around-Technik wird ein zyklisch geschlossenes Versorgungsgebiet ohne Randeffekte simuliert. Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass alle Zellen im Mittel dieselben Interferenzpegel aufweisen und folglich alle simulierten Funkverbindungen in die Auswertung einfließen können. Die Recheneffizienz wird dadurch um ein Vielfaches erhöht.

## Auswertungsmethodik

Ein Durchlauf einer Computersimulation eines dynamischen Systems besteht aus zwei Phasen, dem Einschwingvorgang (*Transient State*) und dem eingeschwungenen Zustand (*Steady State*) [LK00]. Die Ermittlung statistisch zuverlässiger Ergebnisse kann auf zwei

Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Simulation einer fest vorgegebenen Anzahl von Ereignissen mit festem zeitlichen Horizont. Für das Erreichen einer vorgegebenen statistischen Zuverlässigkeit müssen viele identische Durchläufe mit denselben Parametereinstellungen durchgeführt werden. Dabei muss gewährleistet sein, dass in jedem Durchlauf ein neuer Satz von Zufallszahlen generiert wird, der statistisch unabhängig von den in den anderen Durchläufen erzeugten Zufallszahlen ist. Vorteil dieser Methode ist die einfache Implementierbarkeit. Ein wesentlicher Nachteil liegt jedoch darin, dass in jedem Durchlauf erneut der Einschwingvorgang (*Transient State*) mitsimuliert werden muss. Dieser Mehraufwand an Rechenzeit kann durch *Steady-State-Simulationen* vermieden werden.

Eine Steady-State Simulation besteht aus einem einzigen Durchlauf. Für die zuverlässige Ergebnisauswertung sind zwei Kriterien zu erfüllen. Erstens muss zur Laufzeit der Simulation ermittelt werden, wann der Einschwingvorgang abgeschlossen ist. Erst ab diesem Zeitpunkt werden die ermittelten Teilergebnisse in der Auswertung berücksichtigt. Die zweite Aufgabe besteht darin zu ermitteln, zu welchem Zeitpunkt ausreichend viele Beobachtungen gesammelt worden sind, so dass die vorgegebenen statistischen Fehlertoleranzen eingehalten werden. Das Erreichen einer vorgegebenen statistischen Fehlerschranke markiert das Ende eines Steady-State-Simulationsdurchlaufs, dessen Dauer folglich variabel ausfällt. Die beschriebene Technik hat erstens den Vorteil, die geforderten statistischen Kriterien sicher zu erfüllen. Zweitens bietet sie die maximale Effizienz hinsichtlich der benötigten Rechenzeit, da nur ein Einschwingvorgang berechnet und im eingeschwungenen Zustand gerade so lange simuliert wird wie tatsächlich benötigt. Aus diesen Gründen wurden die für diese Arbeit entwickelten Simulationsprogramme mit einem Steady-State-Ansatz implementiert.

### Detektion des eingeschwungenen Zustands

Die Detektion des eingeschwungenen Zustands erfolgt durch Beobachtung des Nutzerzugangsprozesses. Zu Beginn eines Simulationsdurchlaufs sehen die neu ankommenden MS ein leeres System und messen daher nur geringe Interferenzen. Die simulierten Verbindungen sollen jedoch erst ausgewertet werden, wenn das vorgegebene Verkehrsangebot  $\omega$  nach hinreichend vielen MS-Ankünften erreicht worden ist. Erst ab dann liegen für alle MS im Versorgungsgebiet im zeitlichen Mittel dieselben Interferenzverhältnisse vor.

Folgender heuristischer Ansatz wird in den Simulationen für die Detektion verwendet. Es sei  $n$  der Index der  $n$ -ten MS-Ankunft,  $A(n)$  die Anzahl im System befindlicher MS zum Zeitpunkt der  $n$ -ten Ankunft sowie  $M(n)$  der empirische Mittelwert von  $A(n)$  gemäß

$$M(n) = \frac{1}{n} \sum_{\nu=1}^n A(\nu).$$

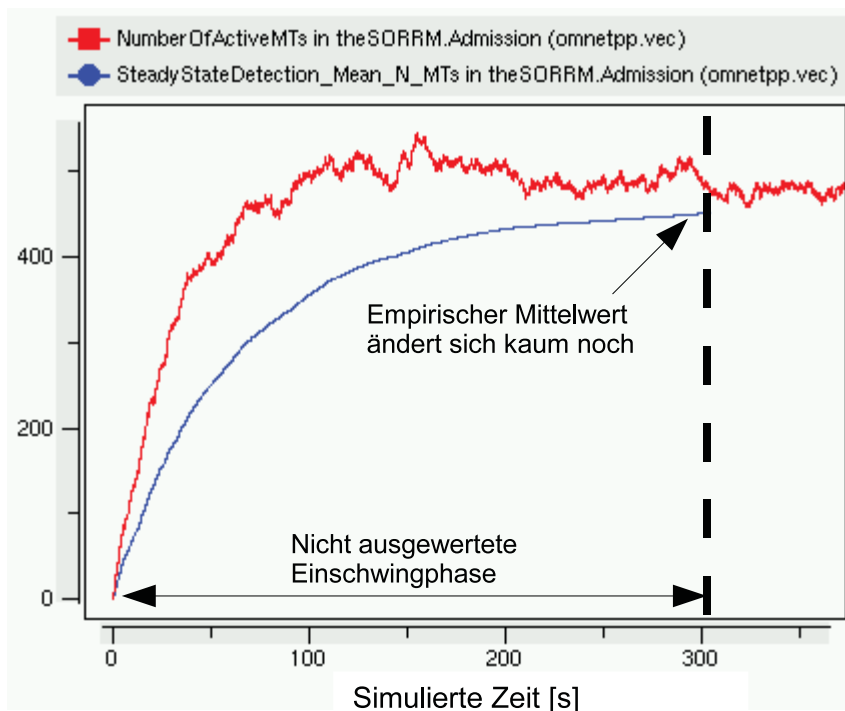


Bild B.2.: Verfahren zur Erkennung des eingeschwungenen Systemzustands

Nach jedem Ankunftsereignis wird nun geprüft, ob die relative Änderung des Schätzwertes  $M(n)$  bezogen auf den vorhergehenden Wert  $M(n-1)$  unterhalb einer vorgegebenen Schwelle  $\epsilon$  liegt. Falls

$$\frac{|M(n) - M(n-1)|}{M(n)} < \epsilon,$$

so wird die äußerst gering gewordene Schwankungsbreite der beobachteten mittleren Anzahl im System befindlicher MS dahingehend interpretiert, dass sich nun der Nutzerankunftsprozess und damit auch das Simulationsmodell im eingeschwungenen Zustand befinden. Die durchgeführten Simulationen bestätigen die Richtigkeit dieser Annahme, wie Bild B.2 beispielhaft demonstriert. Dabei wurde die Detektionsschwelle auf den Wert  $\epsilon = 10^{-5}$  festgelegt.

### Auswertungsmethodik im eingeschwungenen Zustand

Zur Auswertung der Ergebnisse wird im eingeschwungenen Zustand das Batch-Means-Verfahren eingesetzt, mit welchem der Mittelwert eines stochastischen Prozesses zusammen mit dem aus der Schätzung resultierenden Konfidenzintervall ermittelt werden kann [LK00]. Bei diesem Verfahren wird die Menge der aus einem simulierten Zufallsprozess gewonnenen Beobachtungen in disjunkte Mengen, sog. Batches (*engl.* Stoß, Stapel), aus jeweils  $N$  Beobachtungswerten eingeteilt. Zur Laufzeit werden die Beobachtungen  $X$  des analysierten Prozesses sukzessive in Batches abgespeichert. Ist das aktuelle Batch mit dem Index  $i$  mit  $N$

Werten vollständig aufgefüllt, so wird der Mittelwert über die enthaltenen Beobachtungen gebildet zu

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}. \quad (\text{B.1})$$

Nach dem  $M$ -ten gefüllten Batch berechnet das Simulationsprogramm zur Laufzeit den aktuellen Mittelwert des zugrundeliegenden stochastischen Prozesses,

$$\hat{\mu}_X = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \bar{X}_i = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij}. \quad (\text{B.2})$$

Notwendige Bedingung für die korrekte Berechnung des Konfidenzintervalls ist bei dieser Schätzung, dass sämtliche Beobachtungswerte  $X_{ij}$  aller Batches  $i = 1 \dots M$  unkorreliert sind. Diese Voraussetzung wird aufgrund der Größe des simulierten Versorgungsgebiets sowie aufgrund der langen Simulationszeiten als gegeben unterstellt. Folglich können für eine hinreichend große Batch-Anzahl  $M$  die  $\bar{X}_i$  aus Gl. (B.1) nach dem Gesetz der großen Zahl als Realisierungen einer normalverteilten Zufallsvariable mit Mittelwert  $\hat{\mu}_X$  und Varianz  $\sigma_X^2$  aufgefasst werden [Pap01]. Ein erwartungstreuer Schätzer der Varianz ist durch

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\bar{X}_i - \hat{\mu}_X)^2 \quad (\text{B.3})$$

gegeben. Aus den bekannten Größen wird das Konfidenzintervall der Schätzung für ein vorgegebenes Konfidenzniveau  $1 - \beta$  zu

$$c_i = z_{1-\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{M}}$$

berechnet. Bei der Bestimmung des 95%-Konfidenzintervalls ist  $z_{95\%} = 1.96$  [Pap01]. Aus den bisherigen Größen wird der relative statistische Fehler definiert als

$$\epsilon_{\text{rel}} = \frac{\frac{1}{2} c_i}{\hat{\mu}_X}. \quad (\text{B.4})$$

Diese Größe eignet sich unmittelbar als Maß zur Kontrolle der benötigten Dauer eines Simulationsdurchlaufs. In der vorliegenden Arbeit wird die Simulation beendet, sobald  $\epsilon_{\text{rel}}$  mit dem geforderten Konfidenzniveau von 95% auf unter  $\epsilon_{\text{rel}}^{\text{max}} = 0.1$  abgeklungen ist. Zur Vermeidung zufälliger Anfangseffekte wird zudem gefordert, dass vor Ende jeder Simulation mindestens 200 Batches gesammelt und ausgewertet worden sind.

Zur Schätzung von Blockierungs- und Abbruchrate wird im Falle einer Blockierung bzw. eines Abbruchs der zu diesem Ereignis gehörige Wert  $X_{ij}$  in Gl. (B.1) gleich eins gesetzt, ansonsten gleich Null. Um die Effizienz bezüglich der Rechenzeit zu erhöhen, wurde zudem festgelegt, dass die Simulation ohne Rücksicht auf den relativen statistischen

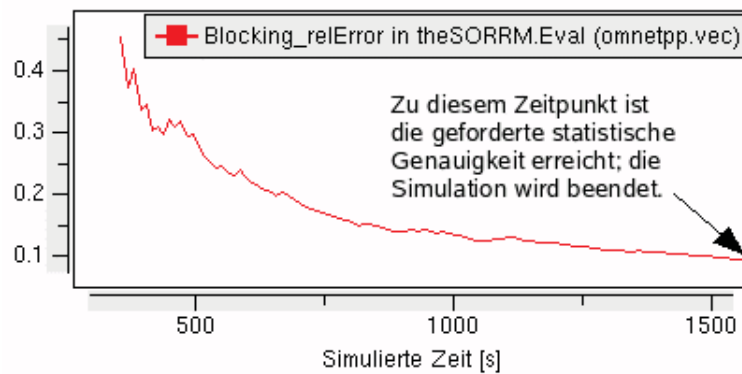


Bild B.3.: Beispiel zur Konvergenz des relativen statistischen Fehlers bei der laufzeitorientierten Ergebnisauswertung mit dem Batch Means Verfahren

Fehler beendet wird, wenn sowohl die geschätzte Blockierungsrate als auch die Verbindungsabbruchrate nach 200 Batches unterhalb einer für die durchgeführten Simulationen auf  $10^{-3}$  festgelegten Irrelevanzschwelle liegen. Die Batch-Größe  $M$  hat Einfluss auf das Konvergenzverhalten der Schätzung und muss durch Ausprobieren ermittelt werden [LK00]. In den durchgeführten Simulationen erwies sich  $M = 300$  als sinnvoller Wert. Bild B.3 zeigt beispielhaft die statistische Konvergenz des mit dem Batch Means Verfahren bestimmten relativen statistischen Fehlers der geschätzten Blockierungswahrscheinlichkeit über der simulierten Zeit eines Simulationsdurchlaufs.

## C. Diskreter Markov-Prozess zur Modellierung zeitvarianter Datenquellen

Der in Bild 8.5 dargestellte diskrete Markov-Prozess wird durch die endliche Zustandsmenge  $\mathcal{S} = \{S1, S2\}$ , die Anfangsverteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten  $(p_1(0), p_2(0))$  und die Zustandsübergangsmatrix

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

beschrieben [TG96, Pap01]. Die Elemente der Übergangsmatrix sind in Bild 8.5 als Gewichte der Zustandsübergänge eingetragen. Die Markov-Eigenschaft des Prozesses besagt, dass der Folgezustand zu jedem diskreten Zeitpunkt  $n + 1$  lediglich vom vorangegangenen Zustand zum Zeitpunkt  $n$  abhängt. Die Zustandswahrscheinlichkeiten berechnen sich mit Hilfe der Übergangsmatrix zu

$$(p_1(n+1), p_2(n+1)) = (p_1(n), p_2(n)) \cdot \mathbf{P}.$$

Gesucht ist nun die Grenzverteilung  $(p_1, p_2)$ . Diese besagt, mit welcher mittleren Wahrscheinlichkeit sich der Markov-Prozess im Zustand S1 bzw. im Zustand S2 befindet. Da die betrachtete Markov-Kette homogen ist, existiert der Grenzwert der Übergangsmatrix  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}^n$  [Pap01]. Für  $n \rightarrow \infty$  geht die Zustandsverteilung in die stationäre Verteilung über. Die Übergangswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  berechnen sich durch Lösen des Gleichungssystems

$$(p_1, p_2) = (p_1, p_2) \cdot \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}. \quad (\text{C.1})$$

Da sich der Prozess stets in einem der beiden Zustände S1 oder S2 befindet, muss für die stationäre Verteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten die Vollständigkeitsbedingung

$$\sum_{s \in \{S1, S2\}} p_s = 1$$

erfüllt sein. Aus der Festlegung  $p_1 := 1/3$  folgt  $p_2 = 2/3$ . Diese beiden Werte werden in Gl. (C.1) eingesetzt. Es ergibt sich das Gleichungssystem zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten,

$$\begin{aligned}\frac{1}{3} &= \frac{1}{3} \cdot p_{11} + \frac{2}{3} \cdot p_{21} \\ \frac{2}{3} &= \frac{1}{3} \cdot p_{12} + \frac{2}{3} \cdot p_{22}.\end{aligned}$$

Da sich die Elemente in jeder Zeile der Übergangsmatrix zu eins addieren (der Prozess verharrt entweder im alten Zustand oder wechselt in den Alternativzustand), lässt sich das Gleichungssystem zu

$$\begin{aligned}1 &= p_{11} + 2 \cdot (1 - p_{22}) \\ 2 &= (1 - p_{11}) + 2 \cdot p_{22}.\end{aligned}$$

umformen. Durch weiteres Umformen erkennt man, dass die beiden Gleichungen linear abhängig sind. Folglich muss eine der vier Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  dem Modell als Parameter vorgegeben werden. Wird die Übergangswahrscheinlichkeit  $p_{12}$  vorgegeben, so berechnen sich die übrigen Werte zu

$$\begin{aligned}p_{21} &= \frac{p_{12}}{2}, \\ p_{11} &= 1 - p_{12}, \\ p_{22} &= 1 - p_{21}.\end{aligned}$$

## D. Algorithmus zur Senkung der PHY Modi bei Überdeckung

Bei einer wie in Kapitel 8 beschriebenen Ressourcenexpansion stehen mehr Ressourcen zur Verfügung, als von den MS momentan benötigt werden. Es wird nun ein Verfahren zur Nutzung der überschüssigen Kapazität vorgeschlagen, mit welchem die begünstigten Funkverbindungen auf robustere PHY Modi ausweichen und so ihre PER senken können.

Es wird angenommen, dass einer MS  $m$  im aktuellen MAC-Rahmen  $K$  Ressourcen  $\kappa = 1 \dots K$  vom Scheduler zugeordnet worden sind. Diese können aufgrund der momentanen SINRs maximal mit den PHY Modi<sup>1</sup>  $\varphi_{\kappa, \max} \in \{\varphi_1 \dots \varphi_4\}$  genutzt werden. Die maximal verfügbaren Datenraten auf den Ressourcen  $\kappa$  der MS  $m$  betragen  $d_{m, \kappa}(\varphi_{\kappa, \max})$ . Für die MS  $m$  ergibt sich die verfügbare Datenrate

$$V_m = \sum_{\kappa=1}^K d_{m, \kappa}(\varphi_{\kappa, \max}).$$

Es wird nun unterstellt, dass die MS im aktuellen MAC-Rahmen lediglich  $D_m < V_m$  benötigt. Zu Beginn (Iterationsschritt  $n = 1$ ) werden die PHY Modi sämtlicher Ressourcen auf den niederrartigsten Modus  $\varphi_1$  gesetzt,  $\varphi_{\kappa}(1) = \varphi_1$ . Die im  $n$ -ten Schritt durch den Balancieralgorithmus erreichte Datenrate ist

$$D_m^*(n) = \sum_{\kappa=1}^K d_{m, \kappa}(\varphi_{\kappa}(n)). \quad (\text{D.1})$$

In jedem Iterationsschritt  $n$  wird für jede Ressource  $\kappa$  der Auslastungsgrad

$$b_{\kappa}(n) = \frac{d_{m, \kappa}(\varphi_{\kappa}(n))}{d_{m, \kappa}(\varphi_{\kappa, \max})}$$

berechnet. Ein Wert von eins bedeutet, dass die jeweilige Ressource mit dem maximal möglichen PHY Modus betrieben wird. Am Ende von Iteration  $n$  wird die Ressource  $\kappa^*$  mit dem niedrigsten Auslastungsgrad  $b_{\kappa^*}(n)$  ausgewählt,

$$\kappa^* = \arg \min_{\kappa} \{b_{\kappa}(n)\}.$$

---

<sup>1</sup>vgl. Linkadaptionsschema aus Tabelle 4.1



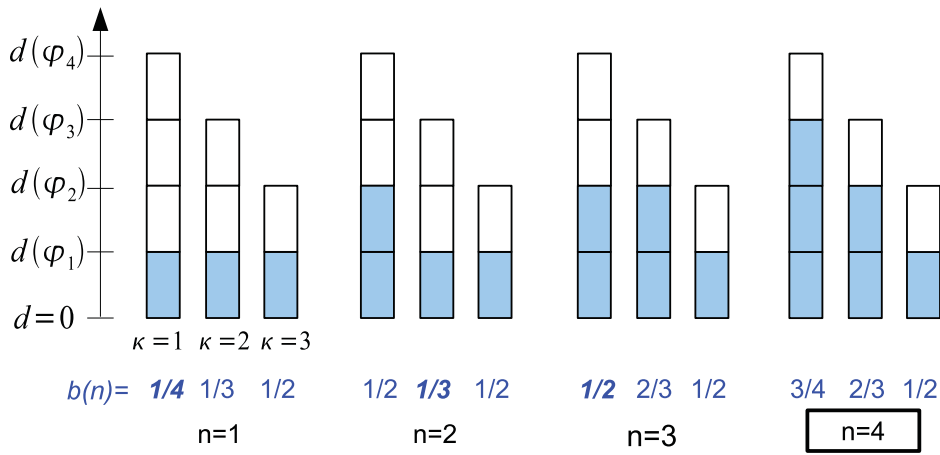


Bild D.1.: Beispiel für den PHY-Modus-Balancieralgorithmus (verfügbar  $V_m = 9$ , benötigt  $D_m = 6$  Pakete/Rahmen, Überdeckungsfaktor  $\Theta_m = 1,5$ )

Der PHY Modus der Ressource  $\kappa^*$  wird zu Beginn des nächsten Iterationsschritts um eins erhöht,

$$\varphi_{\kappa^*}(n+1) = \varphi_{\kappa^*}(n) + 1.$$

Die mit dieser Ressource erzielte Datenrate erhöht sich entsprechend auf  $d_m(\varphi_{\kappa^*}(n+1))$ . Die PHY Modi aller übrigen Ressourcen bleiben unverändert. Am Ende des Iterationsschritts wird wieder die aktuelle Datenrate  $D_m^*(n+1)$  gem. Gl. (D.1) berechnet. Erfüllt diese die Bedingung

$$D_m^*(n+1) \geq D_m \vee D_m^*(n+1) = V_m,$$

so wird der Balancieralgorithmus beendet.

Der nach Beendigung des Algorithmus erzielte MS-spezifische Überdeckungsfaktor<sup>2</sup> wird als

$$\Theta_m(t) = \frac{V_m(t)}{D_m(t)}. \quad (\text{D.2})$$

definiert. Bild D.1 verdeutlicht an einem Beispiel die Funktionsweise des Balancieralgorithmus. Mit dem Verfahren wird erreicht, dass mit der überschüssigen Übertragungskapazität die PHY Modi aller Ressourcen der MS gleichermaßen gesenkt werden. Der in Gl. (D.2) definierte Überdeckungsfaktor beträgt in diesem Beispiel  $\Theta_m = 9/6 = 1,5$ .

<sup>2</sup>Diese Größe wird vom nutzenmaximierenden Schedulingalgorithmus in Kapitel 8.3 benötigt.

# E. Verfahren zur Messung der subträgerspezifischen Störabstände

Zur Schätzung der momentanen Störabstände wird im Folgenden ein auf orthogonalen Codesequenzen basierendes Verfahren vorgeschlagen. Ziel ist die Separation des Nutzsignals von den GKS-Signalen mittels Korrelation. Das Verfahren ermöglicht im DL eines zellularen SO-RRM-Systems eine aufwandsgünstige SINR-Schätzung für alle von der BS verwendeten Ressourcen.

## E.1. Voraussetzungen

Für die Anwendbarkeit des Verfahrens wird ein vollständig synchrones zellulares Funknetz vorausgesetzt. Für den Vielfachzugriff wird OFDM-FDMA angewendet. Es wird angenommen, dass die Zeit-Frequenz-Blöcke wie in Bild E.1 skizziert hinreichend schmalbandig sind, sodass die Bandbreite eines Zeit-Frequenz-Blocks schmaler ist als die in Kapitel 2, Gl. (2.8) angegebene Kohärenzbandbreite des Funkkanals. Ferner wird vorausgesetzt, dass die Kohärenzzeit des Kanals, Gl. (2.8), größer ist als die Dauer  $T_R$  eines Zugriffsrahmens. Zudem wird angenommen, dass in jedem Zugriffsrahmen  $L_p$  Pilotsymbole mit konstanter Amplitude  $a$  übertragen werden.

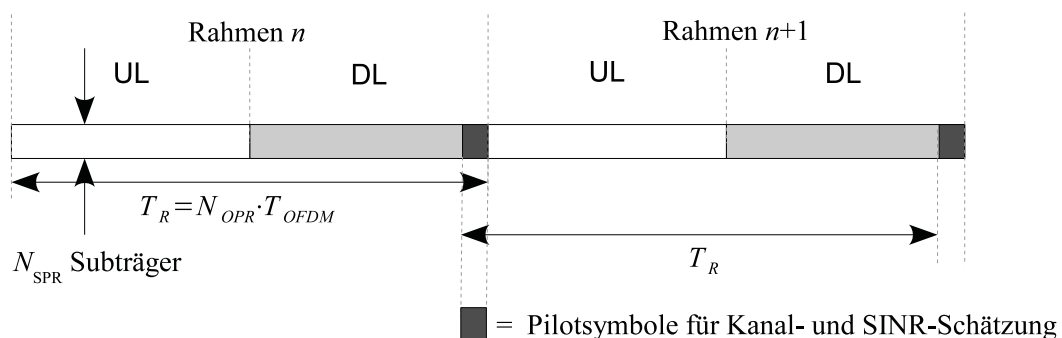


Bild E.1.: Dimensionierung der schmalbandigen OFDM-FDMA-Ressourcen

## E.2. Verfahren

Senderseitig werden die  $L_p$  Pilotsymbole mit einer Walsh-Hadamard-Sequenz (WHS, [Kam96])  $C^\nu = \{c_1^\nu, c_2^\nu, \dots, c_i^\nu, \dots, c_{L_{\text{WHS}}}^\nu\}$ ,  $c_i^\nu \in \{-1; 1\}$  moduliert. Es existieren genau  $L_{\text{WHS}}$  WHS der Länge  $L_{\text{WHS}}$ , wobei  $L_{\text{WHS}}$  eine Zweierpotenz darstellt. Die  $L_p = L_{\text{WHS}}$  Pilotsymbole werden elementweise mit der WHS multipliziert, das erste Pilotsymbol mit  $c_1^\nu$ , das zweite mit  $c_2^\nu$  usw. Die WHS haben die Orthogonalitätseigenschaft

$$\frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} c_i^\mu c_i^\nu = \begin{cases} 1, & \mu = \nu \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}. \quad (\text{E.1})$$

Da alle Sender im vorgeschlagenen SO-RRM-System zeit- und frequenzsynchron übertragen, kann durch eine zellübergreifende Rahmensynchronisation erreicht werden, dass jede empfangene Codesequenz aus einer Überlagerung der von der eigenen BS  $b_0$  gesendeten Sequenz und der von den GKS-BS gesendeten Sequenzen besteht. Die empfangenen Pilotsymbole  $R_i^m$  bestehen aus der Überlagerung von Nutz- und Störanteil,

$$R_i^m = \underbrace{a^{b_0} \cdot H_i^{b_0, m}(t) \cdot c_i^{\nu(b_0)}}_{\text{Nutzsignal}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{GKS}}} \underbrace{a^{b_j} \cdot H_i^{b_j, m} \cdot c_i^{\nu(b_j)}}_{\text{Störsignale}} + \underbrace{N_n}_{\text{Rauschen}}, \quad (\text{E.2})$$

wobei  $a^{b_j}$  die von der BS  $b_j$  verwendeten BPSK-Pilotsymbole bezeichnet.  $\nu(b_j) = 1 \dots L_{\text{WHS}}$  ist der Index der von der BS  $b_j$  verwendeten Codesequenz. Der Index  $i = 1 \dots L_{\text{WHS}}$  kennzeichnet das  $i$ -te Pilotsymbol eines Zeit- / Frequenzblocks einer OFDM-FDMA-Ressource. Jedes der  $L_{\text{WHS}}$  Empfangssymbole  $R_i^m$  enthält weiterhin einen durch den Empfänger verursachten, als AWGR angenommenen Rauschanteil  $N_i$ . Die Kanalübertragungsfaktoren  $H_i^{b_0, m} = H^{b_0, m}$  werden für die Dauer eines Übertragungsrahmens als konstant angenommen. Diese Annahme ist zulässig, wenn die Dauer  $T_R$  eines Zugriffsrahmens wie in Bild E.1 gezeigt kürzer als die Kohärenzzeit  $T_K$  und die Bandbreite der OFDM-FDMA-Ressource schmäler als die Kohärenzbandbreite  $B_K$  des Funkkanals ist.

Falls das Nutzsignal mit einer von allen GKS-Signalen verschiedenen Codesequenz  $C^{\nu(b_0)} \neq C^{\nu(b_j)}$  moduliert wird, lassen sich durch die in Gl. (E.1) beschriebene Korrelation die GKS-Signale aus der empfangenen Codesequenz herausrechnen. Das weist Ähnlichkeiten zum Vielfachzugriffsprotokoll „Aloha“ [ZK01, Rap02] auf. Beim „Aloha“-Vielfachzugriff beginnen die Teilnehmer zu einem zufälligen Zeitpunkt zu senden ohne zu wissen, ob andere Stationen ebenfalls übertragen. Erst der Empfänger merkt anhand von Fehlern in den Empfangsdaten, dass eine Kollision stattgefunden hat. Ähnlich verhält es sich hier, da die BS a priori nicht wissen, ob ihre gewählten WHS mit den von den GKS gewählten Codes kollidieren.

Zur Schätzung der Nutzsignalleistung wird für jede Ressource  $k$  die Sequenz der empfangenen Pilotsymbole  $\{R_i^m\}$  mit der Codesequenz  $C^{\nu(b_0)}$  korreliert. Die Korrelation

liefert

$$\begin{aligned}
r_k^m &= \frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} R_i^m \cdot c_i^{\nu(b_0)} + \frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{GKS}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} R_i^j \cdot c_i^{\nu(b_0)} + \frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} N_i \cdot c_i^{\nu(b_0)} \\
&= a \cdot H^{b_0, m}(t) \cdot \underbrace{\frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} c_i^{\nu(b_0)} c_i^{\nu(b_0)}}_{=1} + \frac{1}{L_{\text{WHS}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{GKS}}} a \cdot H^{b_j, m}(t) \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^{L_{\text{WHS}}} c_i^{\nu(b_0)} \cdot c_i^{\nu(b_j)}}_{\stackrel{!}{=}0} \\
&= a \cdot H^{b_0, m}.
\end{aligned} \tag{E.3}$$

Die zweite Zeile der Gleichung enthält einen Nutzsinalterm, einen GKI-Term und einen Rauschterm. Der Rauschterm hat aufgrund der AWGR-Annahme einen Erwartungswert von Null. Aufgrund der Mittelung der Rauschanteile  $n_i$  über  $L_{\text{WHS}}$  Empfangssymbole und aufgrund der Interferenzlimitierung des Systems ( $I \gg N$ ) kann der Rauschterm vernachlässigt werden. Unter der Voraussetzung

$$C^{\nu(b_0)} \neq C^{\nu(b_j)} \quad \forall j = 1 \dots N_{\text{GKS}}, \tag{E.4}$$

lässt sich in jedem Zugriffsrahmen die von der BS  $b_0$  empfangene momentane Nutzleistung aus dem Korrelationsergebnis berechnen,

$$S_k^m = |r_k^m|^2 = |a \cdot H^{b_0, m}|^2. \tag{E.5}$$

Die mittlere Nutzsignalleistung  $\bar{S}_k^m$  ergibt sich, wenn der Empfänger die in jedem Zugriffsrahmen geschätzte Größe  $S_k^m$  über einen längeren Zeitraum mittelt. Die momentane Gesamtleistung  $P_k^m$  des Empfangssignals kann über das arithmetische Mittel der Beträge aller  $L_{\text{Sym}}$  im letzten Rahmen empfangenen Symbole  $R_j^m$  geschätzt werden,

$$\begin{aligned}
P_k^m &= S_k^m + I_k^m \\
&= \frac{1}{L_{\text{Sym}}} \sum_{j=1}^{L_{\text{Sym}}} |R_j^m|^2.
\end{aligned}$$

Die Interferenz-plus-Rauschleistung  $I_k^m$  ergibt sich aus der Differenz

$$I_k^m = P_k^m - S_k^m.$$

Hiermit lässt sich schließlich das momentane SINR der Ressource  $k$  ermitteln,

$$\gamma_k^m = \frac{S_k^m}{P_k^m - S_k^m}. \tag{E.6}$$

## Auswirkung von Codekollisionen

Nutzt mindestens ein GKS  $j$  dieselbe WHS wie BS  $b_0$ , so wird der aus Gl. (E.2) resultierende Störanteil nicht als Interferenz, sondern als Nutzsignalanteil aufgefasst und trägt in Gl. (E.6) einen Anteil gem. Gl. (E.3) bei. In diesem Fall ergibt sich eine fehlerhafte SINR-Schätzung,

$$\tilde{\gamma}_k^m = \frac{S_k^m + \underbrace{|r_k^j|^2}_{\text{Kollisionsanteil}}}{P_k^m - S_k^m - \underbrace{|r_k^j|^2}_{\text{Kollisionsanteil}}} > \gamma_k^m, \quad (\text{E.7})$$

welche einen zu hohen SINR-Schätzwert liefert. Da jedoch i. d. R. aufgrund der größeren Entfernungen der GKS  $S_k^m \gg |r_j|^2$  angenommen werden kann, bleibt fraglich, ob gelegentliche WHS-Kollisionen überhaupt einen Einfluss auf die Systemleistung haben. Diese Fragestellung wird in den Folgekapiteln im Rahmen der System-Level-Simulationen quantitativ untersucht.

## Koordination und Zuteilung der orthogonalen Codesequenzen

Für die Anwendung des vorgestellten Schätzverfahrens ist noch zu klären, welche WHS eine BS zu welchem Zeitpunkt für ihre Ressourcen verwendet und wie die von der BS versorgten MS an diese Information gelangen. Als Lösung bietet sich eine Zufallszahlenfolge an. In jeder BS wird eine eigene Zufallszahlenfolge verwendet, die zu den in den übrigen Zellen verwendeten Folgen unkorreliert ist.

Seitens der MS wird angenommen, dass sie die Zufallszahlenfolge sowie den aktuellen Zustand des Zufallszahlengenerators ihrer BS kennen. Weiterhin ist den MS bekannt, welche Ressourcen aktuell von ihrer BS belegt sind. Anhand des aktuellen Generatorzustands kann jede MS für jede Ressource den im letzten empfangenen Rahmen verwendeten WHS-Index aus der Zufallszahlenfolge ableiten. Folglich können die MS in jedem Zugriffsrahmen mit dem im vorigen Abschnitt gezeigten Korrelationsverfahren für jede Ressource einen Schätzwert für das Momentan-SINR ermitteln. Durch hinreichend lange Mittelung der momentanen Empfangsleistungen  $S_k^m(t)$  kann zudem die mittlere Empfangsleistung  $\bar{S}_k^m(t)$  geschätzt werden.

Die vom Verfahren genutzten Pilotsymbole stellen bei kohärenter Übertragung keinen Overhead für das System dar, da ohnehin in jedem Rahmen Pilotsymbole für die Kanalentzerrung übertragen werden müssen.

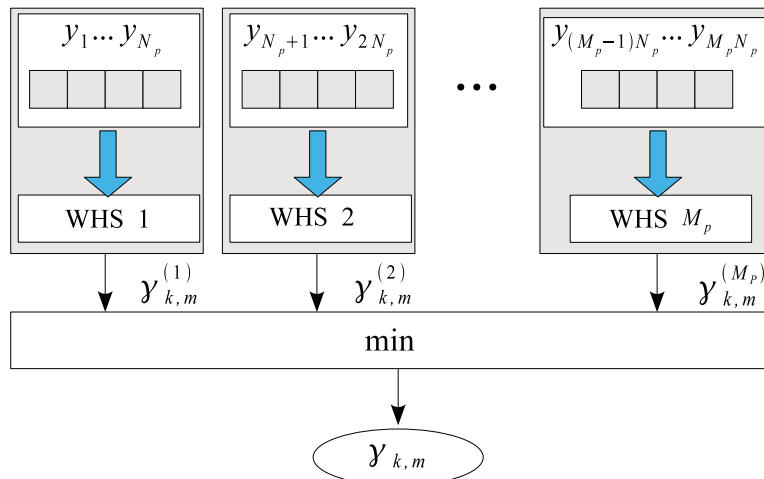


Bild E.2.: Reduzierung der Code-Kollisionswahrscheinlichkeit durch Unterteilung der Pilotsymbole in  $M_p$  Code-Blöcke

## Minimierung der Wahrscheinlichkeit von Codekollisionen

Die Wahrscheinlichkeit von Code-Kollisionen ist von der Anzahl der orthogonalen Codes und folglich von der Anzahl der Pilotsymbole pro Ressource und Rahmen abhängig. Die  $L_p = L_{\text{WHS}}$  Pilotsymbole können wie in Bild E.2 gezeigt in  $M_p$  Blöcke zu jeweils  $N_p$  Symbolen aufgeteilt werden. Es gilt der Zusammenhang

$$L_p = M_p \cdot N_p. \quad (\text{E.8})$$

Mit einem Block der Größe  $N_p$  lassen sich genau  $N_p$  unterschiedliche WHS darstellen, wobei  $N_p = 2^n$  eine Zweierpotenz darstellt. Es wird nun angenommen, dass jedem der  $M_p$  Codeblöcke zufällig eine der  $N_p$  orthogonalen WHS zugewiesen wird. Für jeden der  $\mu = 1 \dots M_p$  Codeblöcke wird ein SINR-Schätzwert  $\hat{\gamma}_{k,\mu}^m$  ermittelt.

Bei zufälliger Auswahl der WHS wird im Allgemeinen nur ein Teil der  $M_p$  Codeblöcke mit Codes der GKS kollidieren. Anhand von Gl. (E.7) wurde gezeigt, dass im Falle einer Code-Kollision immer ein zu hohes SINR geschätzt wird. Folglich entspricht das tatsächliche SINR mit größter Wahrscheinlichkeit dem Minimum der  $M_p$  Teilschätzungen,

$$\hat{\gamma}_k^m = \min_{\mu} \left\{ \hat{\gamma}_{k,\mu}^m \right\}. \quad (\text{E.9})$$

Eine falsche SINR-Messung tritt nur dann auf, wenn in Nutz- und GKS-Signal auf allen  $M_p$  Codeblöcken dieselben WHS verwendet werden.

Gesucht ist nun bei festem  $L_p$  die optimale Dimensionierung von  $M_p$  und  $N_p$ . Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwei BS auf allen  $M_p$  Blöcken zufällig dieselben Codes auswählen, entspricht genau der Codekollisionswahrscheinlichkeit  $P_K$ . Diese beträgt aufgrund der

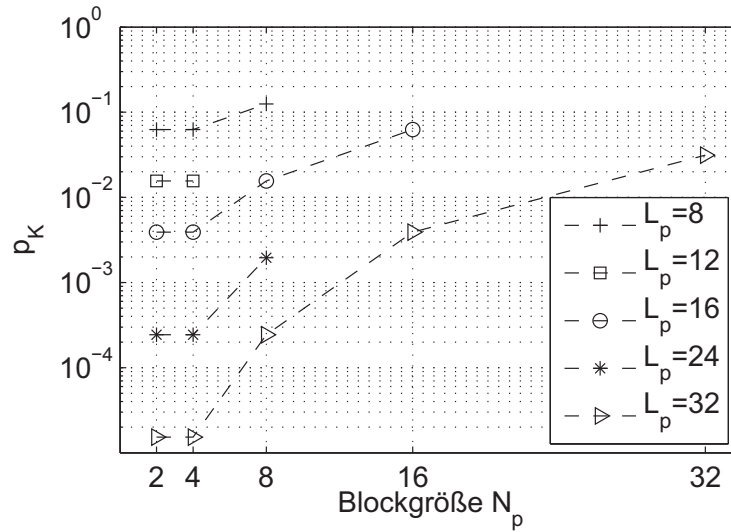


Bild E.3.: Codekollisionswahrscheinlichkeit  $p_K$  im Falle zweier Gleichkanalnutzer

zufälligen Auswahl der Codesquenzen

$$P_K = \left( \frac{1}{N_p} \right)^{M_p} = \frac{1}{N_p^{M_p}}. \quad (\text{E.10})$$

Die Wahrscheinlichkeit einer simultanen Kollision auf allen  $M_p$  Blöcken und damit einer falschen SINR-Schätzung ist für mehrere Konstellationen von  $L_p$ ,  $M_p$  und  $N_p$  in Bild E.3 aufgetragen. Offensichtlich ist  $P_K$  umso geringer, je kleiner die Blockgröße  $N_p$  gewählt wird. Die Übertragung vieler kurzer Codesquenzen ist also bei Anwendung des SINR-Schätzers aus Gl. (E.9) effizienter als die Anwendungen weniger langer Sequenzen. Bereits mit  $L_p = 16$  Pilotsymbolen pro Ressource läßt sich mit dem optimierten Verfahren eine Kollisionswahrscheinlichkeit von lediglich  $P_K = 1/256$  erzielen. Ohne die Erweiterung des Schätzers gem. Gl. (E.9) beträgt sie  $P_K = 1/16$ .

### E.3. Simulationsergebnisse

Bild E.4 zeigt die Auswirkungen von Code-Kollisionen auf die Performance des in Kapitel 8.2.6 untersuchten SO-RRM-Systems mit der Konfiguration 2-C. Im Fall  $P_K = 1/16$  ist eine Degradation der Systemleistung durch die Codekollisionen erkennbar. Mit der aus der optimierten Unterteilung in mehrere kleine Codeblöcke resultierenden Kollisionswahrscheinlichkeit von  $P_K = 1/256$  läßt sich fast kein Unterschied mehr zum Idealfall  $P_K = 0$  feststellen. Eine Kollisionswahrscheinlichkeit von  $P_K = 1/256$  kann wie gezeigt bereits mit 16 Pilotsymbolen pro Ressource erreicht werden. Das beschriebene Verfahren bietet für reale Systeme eine zuverlässige und aufwandsgünstige Schätzung der momentanen

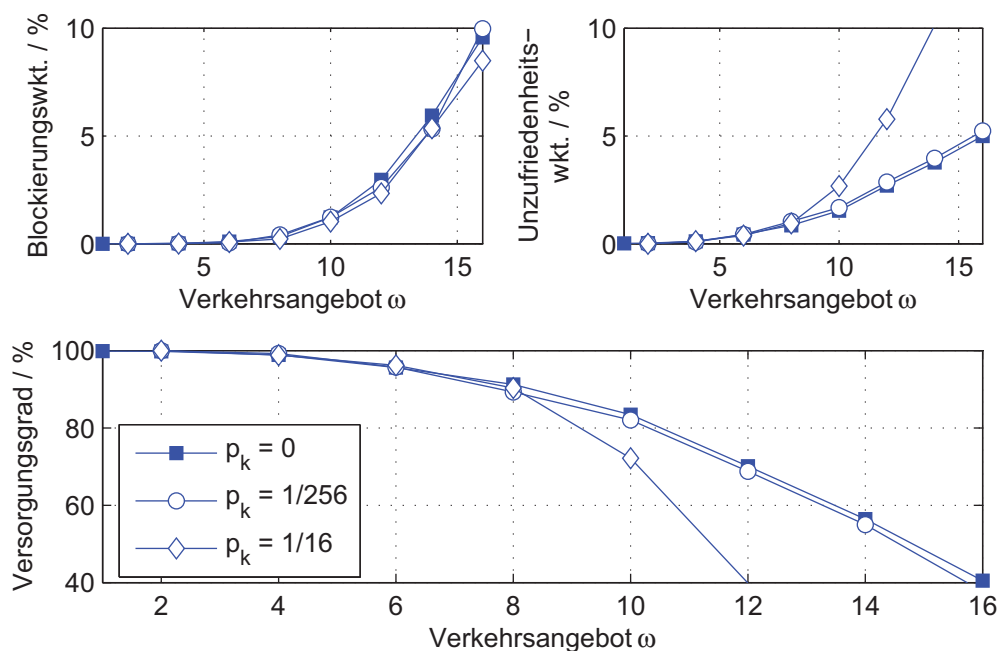


Bild E.4.: Einfluss von SINR-Schätzfehlern aufgrund von Code-Kollisionen

SINRs und ermöglicht die Anpassung der PHY Modi an das zeitvariante Verhalten der Funkkanäle.





# Notation

## Abkürzungen

|           |  |
|-----------|--|
| AM        | Adaptive Modulation  |
| ARQ       | Automatic repeat request   |
| AWGR      | additives weißes Gauß'sches Rauschen                             |
| BER       | Bitfehlerrate ( <i>engl.</i> bit error rate)                     |
| BW        | Blockierungswahrscheinlichkeit                                   |
| CDMA      | Code Division Multiple Access                                    |
| DL        | Downlink (Übertragungsstrecke von der BS zur MS)                 |
| DRV       | Dynamische Ressourcenvergabe                                     |
| FDD       | Frequency Division Duplex  |
| FDMA      | Frequency Division Multiple Access                               |
| GKI       | Gleichkanalinterferenzen   |
| GKS       | Gleichkanalstörer  |
| ISI       | Intersymbolinterferenzen   |
| MUD       | Mehrbenutzerdiversität ( <i>engl.</i> multi user diversity)      |
| OFDM      | Orthogonal Frequency Division Multiplexing                       |
| PER       | Paketfehlerrate ( <i>engl.</i> packet error rate)                |
| PHY Modus | Kombination aus verwendetem Modulations- und Codierungsverfahren |
| QoS       | Versorgungsqualität ( <i>engl.</i> quality of service)           |
| RRM       | Radio Resource Management  |
| SINR      | <i>engl.</i> signal to interference plus noise ratio             |

|        |  |
|--------|--|
| SIR    | <i>engl.</i> signal to interference ratio      |
| SNR    | <i>engl.</i> signal to noise ratio             |
| SO-RRM | Selbstorganisierendes Funkressourcenmanagement |
| SRV    | Statische Ressourcenvergabe                    |
| TDD    | Time Division Multiplexing                     |
| TDMA   | Time Division Multiple Access                  |
| UW     | Unzufriedenheitswahrscheinlichkeit             |
| ZP     | Zyklisches Präfix                              |

### Formelzeichen

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\alpha$                | Pfaddämpfungskoeffizient   |
| $\bar{d}_k^b$           | Von der BS $B$ nutzbare mittlere Datenrate der Ressource $k$                   |
| $\bar{P}_E$             | Lokale mittlere Empfangsleistung am Empfänger $E$                              |
| $\bar{S}_k^m$           | Vom Empfänger $m$ auf Ressource $k$ empfangene Nutzsignalleistung              |
| $\Delta f_S$            | Subträgerbandbreite  |
| $\eta_{S,E}$            | Abschattungsbedingter Dämpfungsfaktor auf der Funkstrecke S-E                  |
| $\Gamma_\varphi$        | Für PHY Modus $\varphi$ benötigtes Mindest-SINR                                |
| $\gamma_k^m$            | Momentanes SINR für MS $m$ auf der Ressource $k$                               |
| $\mathcal{R}(t)$        | Menge aller zum Zeitpunkt $t$ im Pool befindlichen Ressourcen                  |
| $\omega$                | Verkehrsangebot  |
| $\bar{\gamma}_{km}$     | Mittleres SINR für MS $m$ auf der Ressource $k$                                |
| $\rho^\varphi$          | Nettodatenrate einer mit PHY Modus $\varphi$ genutzten Ressource               |
| $\sigma_A$              | Standardabweichung des Lognormalfadings  |
| $\tau_{\max}$           | maximale Pfadverzögerung in einem Mehrwegfunkkanal                             |
| $\tau_p$                | Pfadverzögerung des $p$ -ten Pfades in einem Mehrwegfunkkanal                  |
| $\tilde{\gamma}_k^m(t)$ | Von MS $m$ für die Ressource $k$ zum Zeitpunkt $t$ geschätztes momentanes SINR |

---

|                  |   |
|------------------|---|
| $\varphi$        | Index zur Kennzeichnung der PHY Modi  |
| $\vartheta_l^b$  | Index der Ressource an Ranglistenposition $l$ der MS $m$                    |
| $a$              | Abstand zwischen Sender und Empfänger                                       |
| $A_m(t)$         | Im Rahmen $t$ von MS $m$ gemessene Systemauslastung                         |
| $B$              | Systembandbreite  |
| $B_K$            | Kohärenzbandbreite  |
| $C$              | Clustergrößen bei statischer Ressourcenaufteilung                           |
| $D^{(C)}$        | Abstand zwischen zwei Gleichkanalzellen bei statischer Ressourcenaufteilung |
| $f_T$            | Trägerfrequenz  |
| $f_{d,\max}$     | maximale Dopplerfrequenz  |
| $g$              | Versorgungsgrad   |
| $H(f, t)$        | Übertragungsfunktion eines Mobilfunkkanals                                  |
| $h(t, \tau)$     | zeitvariante Kanalimpulsantwort   |
| $H_{k,n}$        | Kanalübertragungsfaktor des $k$ -ten Subträgers im $n$ -ten OFDM-Symbol     |
| $I$              | empfangene Gleichkanalinterferenzleistung                                   |
| $L_{\text{WHS}}$ | Länge einer Walsh-Hadamard-Sequenz  |
| $N$              | Leistung des Empfängerrauschens   |
| $N_{\text{R}}$   | Anzahl Funkressourcen   |
| $N_{\text{P}}$   | Anzahl Pfade eines Mehrwegefunkkanals                                       |
| $N_{\text{S}}$   | Subträgeranzahl   |
| $N_{\text{GKS}}$ | Anzahl der Gleichkanalstörer  |
| $N_{\text{SPR}}$ | Anzahl Subträger pro FDMA-Ressource   |
| $N_{\text{Vor}}$ | Anzahl der von einer MS signalisierten Ressourcenvorschläge                 |
| $N_{k,n}$        | Rauschanteil des $k$ -ten Subträgers im $n$ -ten OFDM-Symbol                |
| $P_{\text{E}}$   | Empfangsleistung am Empfänger E   |

---

|                   |  |
|-------------------|--|
| $P_S$             | Sendeleistung  |
| $P_a$             | Abbruchswahrscheinlichkeit   |
| $P_b$             | Blockierungswahrscheinlichkeit   |
| $R$               | Zellradius   |
| $r$               | Coderate   |
| $R_{k,n}$         | Im $n$ -ten OFDM-Symbol auf dem $k$ -ten Subträger empfangenes Modulations-symbol  |
| $S$               | empfangene Nutzsignalleistung  |
| $s_R$             | Symbolrate pro FDMA-Ressource  |
| $S_{k,n}$         | auf dem $k$ -ten Subträger im $n$ -ten OFDM-Symbol übertragenes Modulations-symbol |
| $T_B$             | Bediendauer einer Verbindung   |
| $T_G$             | Guardintervalldauer  |
| $T_K$             | Kohärenzzeit   |
| $T_S$             | Sendesymboldauer   |
| $T_{\text{OFDM}}$ | Dauer eines OFDM-Symbols ( $= T_S + T_G$ )   |
| $u_{m,\kappa}$    | Grenznutzen der Ressource $\kappa$ aus Sicht von MS $m$                            |
| $W$               | Wiederverwendungsrate der Ressourcen   |

# Literaturverzeichnis

- [AJK99] ARGYROPOULOS, Y., S. JORDAN und S. P. R. KUMAR: *Dynamic Channel Allocation in Interference-Limited Cellular Systems with Uneven Traffic Distribution*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 48, 1999.
- [Ake94] AKERBERG, D.: *On Channel Definitions and Rules for Continuous Dynamic Channel Selection in Coexistence Etiquettes for Radio Systems*. In: *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Stockholm, 1994*.
- [BB02] BLAUNSTEIN, N. und J. B. BACH: *Multipath phenomena in cellular networks*. Boston [u. a.] : Artech House, 2002.
- [BC00] BIANCHI, G. und A. T. CAMPBELL: *A Programmable MAC Framework for Utility-Based Adaptive Quality of Service Support*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18(2), 2000.
- [BHS05] BAUM, D. S., J. HANSEN und J. SALO: *An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM)*. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Spring 2005.
- [BS04] BRAITHWAITE, C. und M. SCOTT: *UMTS network planning and development : design and implementation of the 3G CDMA infrastructure*. Elsevier, 2004.
- [BT02] BENVENUTO, N. und S. TOMASIN: *On the Comparison Between OFDM and Single Carrier Modulation With a DFE Using a Frequency-Domain Feedforward Filter*. IEEE Transactions on Communications, 50(6), 2002.
- [CC96] CHENG, M. M.-L. und J. C.-I. CHUANG: *Performance Evaluation of Distributed Measurement-Based Dynamic Channel Assignment in Local Wireless Communications*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 14(4), 1996.
- [CFIM94] CIMINI, L. J., G. J. FOSCHINI, CHIH-LIN I und ZORAN MILJANIC: *Call Blocking Performance of Distributed Algorithms for Dynamic Channel Allocation in Microcells*. IEEE Transactions on Communications, 42(8), 1994.

- [CFS94] CIMINI, L. J., G. J. FOSCHINI und L. A. SHEEP: *Single-Channel User-Capacity Calculations for Self-Organizing Cellular Systems*. IEEE Transactions on Communications, 42(12), 1994.
- [Che04] CHEN, T.: *Signal and Interference Measurements for Resource Allocation Schemes in OFDM-based Cellular Networks*. In: *9th International OFDM-Workshop, Hamburg, Germany, 2004*.
- [Chu93] CHUANG, J. C.-I.: *Performance Issues and Algorithms for Dynamic Channel Assignment*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 11(6), 1993.
- [CKS02] CHO, H.-S., J. K. KWON und D. K. SUNG: *High Reuse Efficiency of Radio Resources in Urban Microcellular Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 49(5), September 2002.
- [CPLR02] CRUZ-PEREZ, F. A. und D. LARA-RODRIGUEZ: *Distributed Dynamic Channel Assignment With Violation of the Reuse Pattern for Microcellular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 51(6), November 2002.
- [ECV03] ERGEN, M., S. COLERI und P. VARAIYA: *QoS Aware Adaptive Resource Allocation Techniques for Fair Scheduling in OFDMA Based Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Transactions on Broadcasting, 49(4), 2003.
- [EM83] EVERITT, D. E. und N. W. MACFADYEN: *Analysis of Multicellular Mobile Radiotelephone Systems with Loss*. British Telecom Technology Journal, 1, 1983.
- [ETS96] ETSI: *Digital European Cordless Telecommunications (DECT): Traffic capacity and spectrum requirements for multi-system and multi-service DECT applications co-existing in a common frequency band*. Technischer Bericht ETR 310, 1996.
- [ETS98] ETSI: *GSM 01.02 R97 : General Description of a GSM PLMN*. Technischer Bericht, 1998.
- [GMRW03] GALDA, D., N. MEIER, H. ROHLING und M. WECKERLE: *System Concept for a Self-Organized Cellular Single Frequency OFDM Network*. In: *8th International OFDM-Workshop, Hamburg, Germany, 2003*.
- [GPKW04] GROSS, J., I. PAOLUZZI, H. KARL und A. WOLISZ: *Throughput Study for a Dynamic OFDM-FDMA System with Inband Signaling*. In: *Proceedings Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Milan, Italy, 2004*.

- [Grü00] GRÜNHEID, R.: *Vielfachzugriffsverfahren für die Multiträger-Übertragungstechnik*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2000.
- [GSS<sup>+</sup>03] GESBERT, D., M. SHAFI, D. SHIU, P. J. SMITH und A. NAGUIB: *From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space Time Coded Wireless Systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 21(3), 2003.
- [Gud91] GUDMUNDSON, M.: *Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems*. IEEE Electronic Letters, 27(23), 1991.
- [Hah91] HAHNE, E. L.: *Round Robin Scheduling for Max-Min-Fairness in Data Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 9, 1991.
- [HKK<sup>+</sup>00] HAARDT, M., A. KLEIN, R. KOEHN, S. OESTREICH, M. PURAT, V. SOMMER und T. ULRICH: *The TD-CDMA Based UTRA TDD Mode*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18(8), 2000.
- [HP97] HARA, S. und R. PRASAD: *An Overview of Multicarrier CDMA*. IEEE Communications Magazine, December 1997.
- [IC93] I, C. L. und P. H. CHAO: *Local Packing - Distributed Dynamic Channel Allocation at Cellular Base Stations*. In: *Proceedings of the IEEE Globecom*, 1993.
- [Kam96] KAMMEYER, K. D.: *Nachrichtenübertragung*. Stuttgart [u. a.] : B. G. Teubner, 1996.
- [KH00] KELLER, T. und L. HANZO: *Adaptive Multicarrier Modulation: A Convenient Framework for Time-Frequency Processing in Wireless Communications*. Proceedings of the IEEE, 88(5), 2000.
- [KN96] KATZELA, I. und M. NAGHSHINEH: *Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey*. IEEE Personal Communications, 3(3), Juni 1996.
- [KS99] KULSHRESHTHA, A. und K. N. SIVARAJAN: *Maximum Packing Channel Assignment in Cellular Networks*. In: *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1999.
- [KSL98] KRÄMLING, A., M. SCHEIBENBOGEN und T. LOHMAR: *Dynamic Channel Allocation in Wireless ATM Networks*. In: *Proceedings International Conference on Telecommunications*, 1998.



- [Kun99] KUNZ, D.: *Transitions from DCA to FCA Behaviour in a Self-Organizing Cellular Radio Network*. In: *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 1999.
- [Lam04] LAMPE, M.: *Adaptive Techniques for Modulation and Channel Coding in OFDM Communication Systems*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2004.
- [LBH03] LIU, P., R. BERRY und M. L. HONIG: *Delay-Sensitive Packet Scheduling in Wireless Networks*. In: *Proceedings IEEE WCNC*, Band 3, 2003.
- [Lee95] LEE, W. Y. C.: *Mobile Cellular Telecommunications*. New York [u. a.] : McGraw-Hill, 1995.
- [Leh04] LEHNER, G.: *Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker*. Berlin [u.a.] : Springer, 2004.
- [LGRZ03] LAMPE, M., T. GIEBEL, H. ROHLING und W. ZIRWAS: *PER Prediction for PHY Mode Selection in OFDM Systems*. In: *Proceedings Globecom, San Francisco, USA*, 2003.
- [Lin93] LINNARTZ, J.-P.: *Narrowband Land-Mobile Radio Networks*. Boston [u. a.] : Artech House, 1993.
- [Liu02] LIU, XIN: *Opportunistic Scheduling in Wireless Communication Networks*. Dissertation, Purdue University, 2002.
- [Lük95] LÜKE, H. D.: *Signalübertragung*. Berlin [u. a.] : Springer, 1995.
- [LK00] LAW, A. M. und W. D. KELTON: *Simulation Modelling and Analysis*. Boston [u. a.] : McGraw Hill, 3 Auflage, 2000.
- [Loz02] LOZANO, A.: *Distributed Dynamic Channel Assignment in TDMA Mobile Communication Systems*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(6), November 2002.
- [LSS06] LIN, X., N. B. SHROFF und R. SRIKANT: *A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications on Non-Linear Optimization of Communication Systems*, 24(8), 2006.
- [May00] MAY, T.: *Differentielle Modulation und Kanalcodierung in breitbandigen OFDM Funkübertragungssystemen*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2000.

- [MN98] MATSUMOTO, M. und T. NISHIMURA: *Mersenne Twister: A 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator*. ACM Transactions on Modelling and Computer Simulation, 8(1), 1998.
- [NLB02] NANDAGOPAL, T., S. LU und V. BHARGHAVAN: *A Unified Architecture for the Design and Evaluation of Wireless Fair Queueing Algorithms*. Wireless Networks, 8, 2002.
- [OSB04] OPPENHEIM, A. V., R. W. SCHAFFER und J. R. BUCK: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. Pearson Studium, 2004.
- [Pap01] PAPOULIS, A.: *Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 4. Auflage, 2001.
- [Pra98] PRASAD, R.: *Universal wireless personal communications*. Boston, Mass. [u.a.] : Artech House, 1998.
- [Pro95] PROAKIS, J. G.: *Digital Communications*. New York [u. a.] : McGraw-Hill, 1995.
- [Pät99] PÄTZOLD, M.: *Mobilfunkkanäle*. Braunschweig [u. a.] : Vieweg, 1999.
- [Rap02] RAPPAPORT, T. S.: *Wireless Communications - Principles and Practise*. Prentice Hall, 2. Auflage, 2002.
- [Rei07] REIMERS, U.: *DVB - Digitale Fernsehtechnik: Datenkompression und Übertragung*. [ Berlin u. a. ] : Springer, 2. Auflage, 2007.
- [RG04] ROHLING, H. und D. GALDA: *An OFDM based Cellular Single Frequency Communication Networ*. In: *Proceedings of WWRf, Beijing*, Februar 2004.
- [RMBG99] ROHLING, H., T. MAY, K. BRÜNINGHAUS und R. GRÜNHEID: *Broad-Band OFDM Radio Transmission for Multimedia Applications*. Proceedings of the IEEE, 87(10), 1999.
- [Sie02] SIEGMUND, G.: *Next Generation Networks*. Amsterdam [u. a.] : Elsevier/Newnes, 2002.
- [SL03] SONG, G. und Y. LI: *Adaptive Resource Allocation Based on Utility Optimization in OFDM*. In: *IEEE Globecom*, Band 2, Dezember 2003.
- [SOR07] STEMICK, M., S. OLONBAYAR und H. ROHLING: *PHY-Mode Selection and Multiuser Diversity in OFDM based Systems*. Frequenz, 61, 2007.

- [Tab01] TABAKOVIC, Z.: *Channel Allocation Strategies in Uneven Traffic Networks*. In: *Proceedings of the 4th European Personal Mobile Communications Conference (EPMCC), Vienna, Austria, 2001*.
- [Tan90] TANENBAUM, A.: *Computernetzwerke*. Prentice Hall, 1990.
- [TG96] TRAN-GIA, P.: *Analytische Leistungsbewertung verteilter Systeme*. Berlin [u. a.] : Springer, 1996.
- [Var01] VARGA, A.: *The OMNeT++ Discrete Event Simulation System*. In: *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001), Prague, Czech Republic., 2001*. <http://www.omnetpp.org>.
- [Var05] VARGA, A.: *OMNET++ v3.2 User Manual*, 2005.
- [Wal00] WALKE, B.: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*, Band 1. Stuttgart [u. a.] : B. G. Teubner, 2000.
- [WE71] WEINSTEIN, S. und P. EBERT: *Data Transmission by Frequency Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform*. IEEE Transactions on Communication Theory, 19, 1971.
- [WNS05] WIED-NEBBELING, S. und H. SCHOTT: *Grundlagen der Mikroökonomik*. [Berlin u. a.] : Springer, 2005.
- [WOE<sup>+</sup>97] WAHLQVIST, M., H. OLOFSSON, M. ERICSON, C. OSTBERG und R. LARSSON: *Capacity comparison of an OFDM based multiple access system using different dynamic resource allocation*. In: *Proceedings Vehicular Technology Conference (VTC)*, May 1997.
- [ZK01] ZANDER, J. und S.-L. KIM: *Radio Resource Management for Wireless Networks*. Boston [u. a.] : Artech House, 2001.

# Lebenslauf

## Niclas Meier

- geboren am 24.08.1974 in Wermelskirchen
- 1981 bis 1985 Gemeinschaftsgrundschule Hasenberg, Remscheid
- 1985 bis 1994 Städtisches Röntgen-Gymnasium, Remscheid
- 1994 bis 1995 Grundwehrdienst  
Stabs- u. Fernmelderegiment 310, Koblenz
- 1995 bis 2001 Studium der Elektrotechnik  
Fachrichtung Allgemeine Elektrotechnik  
RWTH Aachen  
Abschluss: Diplom-Ingenieur
- 2001 bis 2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Arbeitsbereich Nachrichtentechnik  
TU Hamburg-Harburg
- seit 2005 Entwicklungsingenieur  
Fa. Rohde & Schwarz, München





