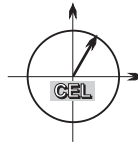


■ *Forschungsberichte aus dem  
Institut für Nachrichtentechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie*



Dennis Burgkhardt

# ■ **Dynamische Reallokation von spektralen Ressourcen in einem hierarchischen Auktionssystem**

Copyright: Institut für Nachrichtentechnik (CEL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
2011

Druck: Druckcooperative  
Steinstraße 23  
76133 Karlsruhe

ISSN: 1433-3821

**Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie**  
Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Jondral

- Band 1     Marcel Kohl  
**Simulationsmodelle für die Bewertung von  
Satellitenübertragungsstrecken im  
20/30 GHz Bereich**
- Band 2     Christoph Delfs  
**Zeit-Frequenz-Signalanalyse: Lineare und  
quadratische Verfahren sowie vergleichende  
Untersuchungen zur Klassifikation von Klaviertönen**
- Band 3     Gunnar Wetzker  
**Maximum-Likelihood Akquisition von Direct  
Sequence Spread-Spectrum Signalen**
- Band 4     Anne Wiesler  
**Parametergesteuertes Software Radio  
für Mobilfunksysteme**
- Band 5     Karl Lütjen  
**Systeme und Verfahren für strukturelle  
Musteranalysen mit Produktionsnetzen**
- Band 6     Ralf Machauer  
**Multicode-Detektion im UMTS**
- Band 7     Gunther M. A. Sessler  
**Schnell konvergierender Polynomial Expansion  
Multiuser Detektor mit niedriger Komplexität**
- Band 8     Henrik Schober  
**Breitbandige OFDM Funkübertragung bei  
hohen Teilnehmergegeschwindigkeiten**
- Band 9     Arnd-Ragnar Rhiemeier  
**Modulares Software Defined Radio**
- Band 10    Mustafa Mengüç Öner  
**Air Interface Identification for  
Software Radio Systems**

**Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie**  
Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Jondral

- Band 11    Fatih Çapar  
**Dynamische Spektrumverwaltung und  
elektronische Echtzeitvermarktung von  
Funkspektren in Hotspotnetzen**
- Band 12    Ihan Martoyo  
**Frequency Domain Equalization in CDMA Detection**
- Band 13    Timo Weiß  
**OFDM-basiertes Spectrum Pooling**
- Band 14    Wojciech Kuropatwiński-Kaiser  
**MIMO-Demonstrator basierend  
auf GSM-Komponenten**
- Band 15    Piotr Rykaczewski  
**Quadratureempfänger für Software Defined Radios:  
Kompensation von Gleichlauf Fehlern**
- Band 16    Michael Eisenacher  
**Optimierung von Ultra-Wideband-Signalen (UWB)**
- Band 17    Clemens Klöck  
**Auction-based Medium Access Control**
- Band 18    Martin Henkel  
**Architektur eines DRM-Empfängers  
und Basisbandalgorithmen zur Frequenzakquisition  
und Kanalschätzung**
- Band 19    Stefan Edinger  
**Mehrträgerverfahren mit dynamisch-adaptiver  
Modulation zur unterbrechungsfreien  
Datenübertragung in Störfällen**
- Band 20    Volker Blaschke  
**Multiband Cognitive Radio-Systeme**

**Forschungsberichte aus dem Institut für Nachrichtentechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie**  
Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Jondral

- Band 21 Ulrich Berthold  
**Dynamic Spectrum Access using OFDM-based  
Overlay Systems**
- Band 22 Sinja Brandes  
**Suppression of Mutual Interference in  
OFDM-based Overlay Systems**
- Band 23 Christian Körner  
**Cognitive Radio – Kanalsegmentierung und  
Schätzung von Periodizitäten**
- Band 24 Tobias Renk  
**Cooperative Communications: Network Design and  
Incremental Relaying**
- Band 25 Dennis Burgkhardt  
**Dynamische Reallokation von spektralen Ressourcen  
in einem hierarchischen Auktionssystem**



## Vorwort des Herausgebers

Internet und Mobilkommunikation haben in den vergangenen zwei Jahrzehnten weltweit Wirtschaft und Gesellschaft stärker verändert als jede andere technische Entwicklung. Der Zugriff auf die vom Internet angebotene Information ist heute praktisch von überall und zu jeder Zeit möglich. Wenn die Prognosen zur drahtlosen Übertragungstechnik Recht behalten, und daran besteht kein Zweifel, stehen wir hier aber immer noch am Anfang einer weiter an Rasanzen zunehmenden Entwicklung. Diese wird dazu führen, dass das heute von fast jedem benutzte Mobiltelefon und der von vielen geschätzte mobile Internetzugriff durch, ebenfalls funkgestützte, Maschine–Maschine-Kommunikation in Verkehr, Produktion, Freizeit usw. drastisch erweitert wird. Dabei werden nicht mehr im Wesentlichen schmalbandige Audiosignale sondern zunehmend breitbandige Daten- und Videosignale den großen Teil des Verkehrsaufkommens ausmachen. Eine Herausforderung für die weitere Entwicklung der Funkübertragungstechnik besteht damit darin, den verfügbaren Frequenzbereich besser nutzbar zu machen. Das für die Funkkommunikation verfügbare Spektrum ist nämlich stark durch die Ausbreitungsphysik bestimmt und in seiner Übertragungskapazität eng begrenzt. Dieser Begrenzung kann einerseits durch laufende Verbesserung der Technik begegnet werden, andererseits muss darüber nachgedacht werden, welche weiteren Möglichkeiten zur besseren Ausnutzung der begrenzten Übertragungsressourcen bestehen. In den letzten Jahren durchgeführte Messungen zur tatsächlichen Ausnutzung des verfügbaren Frequenzbereichs lassen jedenfalls vermuten, dass hier noch erhebliches Optimierungspotenzial besteht. Die bessere Nutzung des elektromagnetischen Spektrums kann von verschiedenen Seiten her angegangen werden. Zum Einen besteht die Möglichkeit, durch den Einsatz von Ultra Breitband Systemen (*Ultra Wide Band*, UWB) zusätzli-

che Kapazitäten durch spektrales Underlay freizusetzen. Zum Anderen werden zunehmend Overlayssysteme untersucht, die von den Primärnutzern eines lizenzierten Frequenzbandes brach liegen gelassene Ressourcen einer Sekundärnutzung zugänglich machen. Natürlich mussten und müssen für beide Strategien neben den sich aus der Technik ergebenden Problemen auch Aufgaben, die sich auf dem Gebiet der Regulierung stellen, gelöst werden.

Neben Underlay und Overlay hat eine weitere Möglichkeit zur besseren Ausnutzung der knappen Ressource Mobilfunkspektrum das Zeug dazu, zumindest in einer Übergangszeit, für Entlastung zu sorgen. Es handelt sich dabei um die Einführung eines hierarchisch organisierten Auktionssystems zum Handel von Funkressourcen zwischen Mobilfunkoperatoren. Mit den technischen Aspekten dieser Möglichkeit hat sich Herr Burgkhardt, angestoßen durch ein Kooperationsprojekt mit einem weltweit agierenden industriellen Partner, in den vergangenen Jahren gründlich auseinandergesetzt. Mit seiner Dissertation *Dynamische Reallokation von spektralen Ressourcen in einem hierarchischen Auktionssystem* legt er die Ergebnisse dieser Forschung vor.

Karlsruhe, im Januar 2011  
Friedrich Jondral



# Dynamische Reallokation von spektralen Ressourcen in einem hierarchischen Auktionssystem

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
des Karlsruher Instituts für Technologie  
genehmigte

DISSERTATION

von Dipl.-Ing. Dennis Martin Burgkhardt  
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Januar 2011  
Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Friedrich K. Jondral  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Adam Wolisz



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Spektrumsnutzung und deren Entwicklung</b>	<b>5</b>
2.1	Verwaltung und Nutzung der knappen Ressource Spektrum . . . . .	5
2.2	Weniger Regulierung . . . . .	8
2.3	Zweitnutzung von freien Ressourcen . . . . .	12
2.4	Flexible Lizenzen und marktbasierende Ansätze . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung</b>	<b>23</b>
3.1	Systemkonzept . . . . .	23
3.1.1	Hinführung . . . . .	23
3.1.2	Ressourcenaustausch zwischen Mobilfunkanbietern	25
3.1.3	Stufenweise Anpassung als Kompromiss . . . . .	28
3.2	Abstrahierte Ressourcen als Handelsgüter . . . . .	34
3.3	Auktionssystem . . . . .	37
3.4	Implementierung . . . . .	43
3.4.1	Auktionsdurchführung und Signalisierung . . . . .	43
3.4.2	Zentraler und dezentraler Ansatz . . . . .	46
3.4.3	Verhalten bei Signalisierungsfehlern . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Quantitative Untersuchungen</b>	<b>49</b>
4.1	Beispielszenario . . . . .	49
4.1.1	Zu modellierende Eigenschaften . . . . .	49
4.1.2	Hierarchie mit drei Ebenen . . . . .	50
4.2	Verkehrsmodell und Random Walk . . . . .	53
4.2.1	Motivation des Modells . . . . .	53
4.2.2	Statistik des gewählten Modells . . . . .	60

## *Inhaltsverzeichnis*

4.3	Simulationen im 3-Ebenen-Szenario . . . . .	66
4.3.1	Bewertungsgrößen . . . . .	66
4.3.2	Untersuchungen bei idealer Reallokation . . . . .	68
4.3.3	Auktionsfolge auf der untersten Ebene . . . . .	84
4.3.4	Einfluss der Wertschätzungen . . . . .	87
4.3.5	Korrelation im kurzfristigen Bedarf . . . . .	90
4.4	Analytische Verifikation im 2-Ebenen-Szenario . . . . .	93
4.4.1	Berechnung der Reallokationsstatistik . . . . .	93
4.4.2	Vergleich mit der Simulation . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>

# 1 Einleitung

Seit dem experimentellen Nachweis der Existenz von elektromagnetischen Wellen durch HEINRICH HERTZ 1886 in Karlsruhe hat die drahtlose Kommunikation große Veränderungen in Anwendung und Wahrnehmung erlebt. Telegraphische Übertragungen gehören von Anfang an zu den Hauptanwendungen der Funktechnik, aber schon 1926 wurde in Deutschland zum ersten Mal in Zügen der Deutschen Reichsbahn auf der Strecke Hamburg–Berlin für Reisende der ersten Klasse eine drahtlose Fernsprechanbindung angeboten. Dennoch wurde in der Öffentlichkeit die Funktechnik zunächst hauptsächlich durch Rundfunk und Fernsehen bestimmt. Sprachkommunikation war Spezialanwendung und insbesondere dem Militär vorbehalten.

Schnell war es vonnöten, einzelne Dienste gegen Störungen untereinander zu schützen, was eine nationale wie internationale Frequenzplanung und Regulierung der Funkfrequenzen mit sich brachte. Das für mobile Funkübertragungen geeignete Frequenzband wurde in Bänder geteilt, und in jedem Band ist es einem Dienst exklusiv vorbehalten, bestimmten regulatorischen Rahmenbedingungen folgend, zu senden und interferenzfrei zu empfangen. Im zivilen Bereich spielten bei der Regulierung insbesondere die breitbandig angelegten TV-Bänder eine wesentliche Rolle.

Erst in den 1990er Jahren konnte mit der Einführung des Global System for Mobile Communications (GSM) im D-Netz das erste öffentliche, zellulare Telefontzugangsnetz für Privatanwender der *digitalen* Übertragung Vorschub leisten. Durch zunehmende Miniaturisierung der Endgeräte und dank sinkender Preise gehört das Mobiltelefon als nicht mehr wegzudenkendes „Immer-dabei-Gerät“ zum festen Bestandteil der technischen Ausrüstung vieler Menschen. Gleichzeitig konnte sich das Inter-

## 1 Einleitung

net dank der Einführung des World Wide Web auch im privaten Bereich rasch verbreiten. Der Wireless-LAN-Standard IEEE 802.11 ermöglichte drahtlosen Zugang zum Internet auch in der Öffentlichkeit, z. B. in Cafés oder campusweit an Universitäten.

Die rasche Fortentwicklung der Mobilfunkstandards ließ das Internet auch bald auf eigentlich für die Telefonie vorgesehenen Endgeräten Einzug halten. Das vor einigen Jahren noch als Vision angedachte *ubiquitous internet* ist für jeden Nutzer eines modernen *Smart Phones* heute Realität. Diese Miniaturcomputer weisen inzwischen schon in Ansätzen Eigenschaften auf, die man einem *Software Radio* und der Vision des *Cognitive Radios* von MITOLA zuschreibt: Die Geräte können selbsttätig ihre Position bestimmen, wählen das günstigste Netz und versuchen, bei Annäherung an das Zuhause des Besitzers automatisch, das dortige Wireless-LAN zu erreichen.

Um dem stetig wachsenden Bedarf an Übertragungsbandbreite beizukommen, wird in allen Bereichen der Planung und Umsetzung – Regulierung, Mobilfunkstandards, Zellplanung, Netzausbau – auf eine höchst effiziente Nutzung der interessierenden Frequenzbereiche hingewirkt. Zusätzlich können auch immer wieder Frequenzen für den Mobilfunkbereich freigemacht werden, z. B. aus der digitalen Dividende in den TV-Bändern. Dennoch sind nur endlich viele Ressourcen verfügbar, und neue Zuteilungen gehen zwangsläufig auf Kosten bereits bestehender Dienste. Zudem werden die Veränderungen der technischen, aber auch wirtschaftlichen Gegebenheiten bei verschiedenen Mobilfunkanbietern immer rascher, sodass der Regulierer die jeweils aktuelle Situation nur träge in einer entsprechenden Zuteilung von Funkressourcen abbilden kann.

### **Aufbau der Arbeit**

Um neue Methoden zur Verbesserung der Ressourcennutzung und Fortentwicklung der Regulierungspraxis zu finden, hat sich ein reichhaltiges Forschungsgebiet entwickelt. In dieser Arbeit gibt zunächst Kapitel 2

einen Überblick über die grundsätzliche Problemstellung und die damit zusammenhängenden Bereiche neuerer Forschung. Wie die für den Mobilfunk interessanten Frequenzen verwaltet werden und wie sie effizienter genutzt werden könnten, beschreibt Abschnitt 2.1. Im Folgenden werden in den Abschnitten 2.2–2.4 drei verschiedene Ansätze zur Fortentwicklung der Spektrumsnutzung und -verwaltung unterschieden. In jedem dieser Bereiche werden exemplarische Arbeiten vorgestellt: Ein Teil der Vorschläge möchte den Spektrumszugriff möglichst rein technisch umsetzen und unter wenigen und sehr einfachen regulatorischen Einschränkungen zulassen (Abschnitt 2.2). Mit minimalen Änderungen an bestehenden Systemen und Lizenzen wollen Overlay- und UWB-Systeme zeitweise ungenutzte Ressourcen auffüllen (Abschnitt 2.3). In Abschnitt 2.4 schließlich werden Ansätze vorgestellt, die nach einer Flexibilisierung der Frequenz-Allokation und nach einer automatisierten, bedarfsgerechten Zuteilung streben.

Mit der Motivation, eine Verbesserung ausgehend von der aktuellen Situation zu finden, die nicht eine völlige Neuwidmung von Frequenzbereichen oder einen zusätzlichen Mobilfunkstandard benötigt, fährt die vorliegende Arbeit fort. So fasst Kapitel 3 die bis dahin vorgestellten Szenarien und Forschungsarbeiten im Hinblick auf ihre Ziele zusammen und stellt noch offene Herausforderungen für eine flexible Spektrumsnutzung heraus. Im Abschnitt 3.1 wird das zentrale Konzept der vorliegenden Arbeit, nämlich ein *hierarchisch organisiertes Auktions-system zum Handel von Funkressourcen zwischen Mobilfunkoperatoren*, vorgestellt. Es vermittelt zwischen den teils widersprüchlichen Anforderungen, die sich aus den bisherigen Forschungsarbeiten zum Thema herauskristallisiert haben. Wie das vorgeschlagene Konzept in bestehende Mobilfunksysteme integriert werden könnte, ist Gegenstand von Abschnitt 3.2. Die Motivation für das verwendete Auktionssystem und dessen Umsetzung wird in Abschnitt 3.3 vorgestellt, sodann schließen einige Implementierungsfragen im Abschnitt 3.4 das Kapitel ab.

Das anschließende Kapitel 4 entwickelt in Abschnitt 4.1 zunächst ein Beispielszenario mit drei Hierarchieebenen in einem Auktionsgebiet. In

## 1 *Einleitung*

nerhalb dieses Szenarios konkurrieren modellhaft mehrere Mobilfunkanbieter um die verfügbaren Ressourcen. Ihre Verkehrslast wird durch ein Random-Walk-basiertes Verkehrsmodell dargestellt, das in Abschnitt 4.2 eingeführt wird. Abschnitt 4.3 definiert zu Beginn Bewertungsgrößen, die sowohl die effiziente Nutzung des vorhandenen Spektrums messen als auch für jeden Operator betrachten, ob sich eine Teilnahme am Auktionssystem lohnt. Danach werden die Ergebnisse der Simulationen im Einzelnen vorgestellt und erläutert. Durch analytische Betrachtung der Bewertungsgrößen in einem vereinfachten Szenario in Abschnitt 4.4 können die Simulationsergebnisse verifiziert werden.

Kapitel 5 schließlich fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und ordnet sie in den Kontext der bisherigen Forschungsbeiträge ein.



## 2 Spektrumsnutzung und deren Entwicklung

### 2.1 Verwaltung und Nutzung der knappen Ressource Spektrum

In der gängigen Regulierungspraxis wird das elektromagnetische Spektrum in Frequenzbänder unterteilt. Jedem dieser Bänder wird eine bestimmte Nutzung zugewiesen, sodass unterschiedliche Dienste nicht interferieren. Solche Frequenzuteilungen umfassen beispielsweise Beschränkungen der Sendeleistung, Vorgaben zu Modulationsschemata, Übertragungsstandards und machen Aussagen zu den erlaubten Nutzern eines Bandes. Schutzbänder vermeiden dabei Interferenzen zwischen benachbarten Diensten. Nutzer, die in einem bestimmten Frequenzband senden wollen, müssen in der Regel von der Regulierungsbehörde eine Lizenz dafür erhalten.

Durch die Vergabe von Lizenzen will also die regulierende Behörde exklusiven und interferenzfreien Zugang zu spektralen Ressourcen für funkbasierte Kommunikation-, Mess- und Beobachtungssysteme ermöglichen. Die zugeteilten Lizenzen sind rechtsverbindlich, sodass sich z. B. die Anbieter und Nutzer eines Kommunikationssystems auf eine Servicequalität verlassen können, die nicht durch beliebige und unvorhersagbare Störungen anderer in dem Band sendender, nicht lizenzierter Systeme unterminiert wird. Gerade für Mobilfunkoperatoren, deren Geschäftsmodell auf dem Angebot ihrer Dienste an zahlende Kunden fußt, bildet diese garantierte Exklusivnutzung die Grundlage ihrer wirtschaftlichen Existenz.

Wie die Auktionen für die UMTS-Frequenzbereiche im Jahr 2000 eindrücklich zeigten [39], messen Mobilfunkanbieter solchen exklusiven

Nutzungslizenzen einen hohen Wert bei. Zwar nicht ganz so spektakulär in den gezahlten Preisen, jedoch immer noch sehr eindrücklich zeigte sich dies bei den Auktionen um die „digitale Dividende“ aus frei werdenden TV-Bändern. Da in den eigenen Bändern keine künstliche Interferenz zu erwarten ist, haben die Anbieter die Möglichkeit, bei kalkulierbaren Kosten und Gewinnmargen Basisstationen aufzubauen und ihren Kunden einen bestimmten Service-Standard zu bieten.

In den für die Mobilkommunikation interessanten Frequenzbereichen ist bereits jede denkbare Ressource zugeteilt, davon der größere Teil an militärische oder zumindest staatliche Dienste. Schon früh wurde im Angesicht wachsender Märkte für mobile Kommunikation als erster Schritt gefordert, diesen Anteil staatlich reservierter Funkbereiche effizienter zu nutzen und Teile davon in den zivilen Sektor zu transferieren [37]. Wie allerdings die Entwicklung seither zeigt, konnte auf dieser Ebene wenig bewirkt werden.

Dennoch steigt in Zeiten des „Überall-Internets“ der Hunger nach breitbandigen, drahtlosen und flächendeckenden Diensten ungebremst an. Denn verglichen mit den schnellen Fortschritten in den Übertragungstechniken und -standards zeigt sich die Trägheit von festen Frequenzuteilungen als ein großer Nachteil bezüglich der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der bestehenden Regulierung. Während neu zu entwickelnde Übertragungssysteme eine effiziente Übertragung, z. B. gemessen in  $\text{bit/s/Hz/m}^2$ , als wichtiges Entwurfsziel beinhalten, zeigen verschiedene Messkampagnen [5, 17, 54], dass auch in Mobilfunkbändern bei weitem nicht das gesamte Spektrum ständig genutzt wird, es vielmehr zu „Löchern“ in der Zeit-Frequenz-Ebene in signifikanten Teilen der Bänder und versorgten Regionen kommt („*spectrum holes*“ [31]).

Da aber die Ressource Spektrum nicht vermehrt werden kann, ist alenthalben von einer *Knappheit* des Spektrums die Rede. Dieser grundlegende Widerspruch zwischen beklagter Knappheit auf Seiten der Anwender von Funkkommunikation und der gemessenen ineffizienten Nut-

## 2.1 Verwaltung und Nutzung der knappen Ressource Spektrum

zung von Spektrum in lizenzierten Bändern führt natürlich direkt zu der Frage, wie das zur Verfügung stehende Spektrum besser genutzt werden kann.

Eine für die Forschung wegweisende Vision entwickelte MITOLA mit seiner Idee eines *Cognitive Radios* [55]. Ein rekonfigurierbares *Software Defined Radio* ist das Kernelement für ein autonom und nutzerzentriert handelndes Cognitive Radio: Dieses soll selbstständig seine spektrale Umgebung beobachten, die Frequenzbelegung und andere verfügbare Cognitive Radios einbeziehen und damit auf Basis seiner Kenntnisse über die Kommunikationsbedürfnisse seines Benutzers sein Funkverhalten einrichten. Dabei kommen Lern- und Entscheidungsalgorithmen zur Anwendung, die in einem steten Regelkreis, dem *Cognition Cycle*, fortwährend lernen und immer wieder die physikalischen Parameter der Übertragung wie z.B. Frequenzband und verwendete Modulation dynamisch anpassen können.

Diese Idee einer autonomen und selbst-konfigurierenden Funkeinheit hat seither zu einer schier unüberschaubaren Fülle an Forschungsarbeiten geführt, die ausgehend von diesen Konzepten in die unterschiedlichsten Richtungen Vorschläge zur dynamischen und flexiblen Spektrumsnutzung hervorgebracht haben. Diese in ihrer Gesamtheit darzustellen, würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen. Deshalb werden in den folgenden Abschnitten drei Themenfelder umrissen, die sich grundsätzlich in ihrer Herangehensweise unterscheiden, dennoch aber unter dem gemeinsamen Dach der Überschrift „Dynamischer Spektrumszugriff und Cognitive Radio“ in unzähligen Veröffentlichungen diskutiert werden.

Allen gemeinsam ist die grundsätzliche Notwendigkeit, die starre Regulierung und damit langjährige Festlegung auf bestimmte Systeme und Standards als Hindernis auf dem Weg zur effizienten Ressourcennutzung zu entfernen, zu umgehen oder aber beweglicher zu machen:

- Der erste Punkt strebt weniger Regulierung bis hin zu völlig freiem Spektrumszugriff an (Abschnitt 2.2),

- der zweite sucht die vorhandenen Löcher in der Zeit-Frequenz-Ebene durch ein überlagertes Zweitsystem zu f llen (Abschnitt 2.3), während
- eine marktbasierter Flexibilisierung von Exklusivlizenzen die dritte Säule darstellt (Abschnitt 2.4).

Allein schon die Diskussion, welche dieser Ansätze wohl eine Chance auf Umsetzung hat, ist Gegenstand zahlreicher Beiträge, wovon [21, 58, 62, 71, 75] exemplarisch nur einen kleinen Teil darstellen. Während im Folgenden hauptsächlich konzeptuelle Vorschläge gezeigt werden, sind dennoch auch technisch höchst anspruchsvolle Fragen im Bereich des dynamischen Spektrumszugriffs zu klären, als Beispiel sei nur die *spektrale Belegungsmessung* als weites Forschungsfeld genannt. Für einen weiter gefassten Überblick über das gesamte Themengebiet unter verschiedenen Betrachtungswinkeln bieten u. a. die Artikel [1, 9, 31, 38] einen fundierten Einblick in die Materie.

### 2.2 Weniger Regulierung

Zunächst sei auf die vergleichsweise zurückhaltend regulierten ISM-Frequenzbänder (Industrial, Scientific and Medical) verwiesen, in denen jede Funkanwendung gestattet ist, die den Rahmenbedingungen u. a. an mittlere Sendeleistung und -leistungsdichte erfüllt. In den bekanntesten dieser Bänder insbesondere bei 2,4 GHz, aber auch bei 5 GHz, entwickelte sich eine Fülle von Funkanwendungen und weltweit eingesetzten Standards. Drahtlose Datenübertragung in Wireless Local Area Networks nach dem IEEE-802.11-Standard (WiFi) sind genauso wenig wegzudenken wie die von jedem Mobiltelefon für die Nahbereichskommunikation zur Verfügung gestellte Bluetooth-Schnittstelle.

Im Sinne von Cognitive Radios greifen die Endgeräte opportunistisch auf die Funkressourcen zu. Dabei beobachten sie, ob bestimmte Kanäle schon belegt sind und wählen aus mehreren im Standard verankerten

Kanälen einen freien aus. Diese dynamische Kanalwahl ist wohl die pragmatischste *Koexistenzstrategie*, um das gemeinsame Frequenzband zu nutzen. Nichtsdestotrotz zeigt sich schon am Beispiel WiFi und Bluetooth, dass diese zwei Dienste sich bereits stören können, da ihre jeweiligen Standards sich überlagernde Kanäle vorsehen. Eine Koexistenzstrategie zur Koordination *zwischen* diesen beiden Systemen ist nicht explizit vorgesehen. Insbesondere kann aufgrund der nicht-exklusiven Regulierungssituation auch in keiner Weise vorausgesagt werden, welche zukünftigen weiteren Dienste Teile des Frequenzbandes beanspruchen werden.

Lässt man einem Netz von Cognitive Radios einen weiteren Spielraum im Frequenzbereich, sieht man sich einer Fülle von regulatorischen Beschränkungen gegenüber. Diese werden sowohl von der gewählten Frequenz, der Zeit und auch dem Ort abhängen. Um dennoch auch bei opportunistischem Zugriff auf derart liberal regulierte Bänder zugreifen zu können, benötigen die im Frequenzbereich dynamischen Endgeräte dennoch lokales Wissen über die regulatorischen Gegebenheiten, die am aktuellen Standort Gültigkeit haben. Erst dann kann das Cognitive Radio nach verfügbaren Frequenzen suchen und sie regulierungskonform verwenden. [4] und [22] schlagen formale Beschreibungssprachen für Frequenzzuteilungen vor, die alle für ein Endgerät wichtigen Informationen über Ob und Wie der Nutzbarkeit am gegebenen Standort enthalten, also Zulässigkeit und eventuelle Nebenbedingungen wie Leistungsbeschränkungen. Das DARPA-XG-Programm schätzt die formale Beschreibung der lokal geltenden Regelungen sogar als essentiell für die verbreitete Einsetzbarkeit von Cognitive-Radio-Netzen ein.

Da es sich als äußerst schwierig herausstellt, eine sowohl konsistente als auch vollständige Datenbank lokaler Regulierungsgegebenheiten zu pflegen und auf den Endgeräten vorzuhalten, verfolgt das Konzept des *Cognitive Pilot Channels* einen anderen Ansatz [65]: Dabei soll ein definierter Übertragungskanal ständig die lokalen Informationen über verfügbare Frequenzen über die Luftschnittstelle übertragen. Die Cognitive Radios sollen dann aufgrund dieses Wissens pas-

sende Konfigurationen für ihre eigentlichen Datenübertragungen finden.

Betrachtet man allgemein einen konkurrierenden Zugriff von Übertragungssystemen auf eine begrenzte Ressource, so zeigt sich, dass die *Spieltheorie* ein geeignetes Werkzeug ist, um die Effektivität von Spektrumszugriffs- und -zuteilungsstrategien zu untersuchen. Je nach Forschungsbereich kann dabei „Übertragungssystem“ sehr unterschiedliche Bedeutungen haben: Einige Netzzugangspunkte mit zugehörigen Nutzern können gemeint sein, ebenso wie die paarweisen Funkverbindungen zwischen allgemeinen Cognitive Radios in einem bestimmten Gebiet als Teil eines Ad-Hoc-Netzes. Die Spieltheorie bietet dabei die mathematischen Werkzeuge, um die gegebenen Szenarien auf die Existenz von Equilibria hin zu untersuchen sowie Strategien anzugeben, die zu diesen stabilen Situationen führen. Ebenso wird die Optimalität existierender Equilibria im Sinne der gewünschten Zielgrößen analysiert.

Um einen ersten Eindruck von der Anwendung der Spieltheorie auf Funkkommunikationssysteme zu vermitteln, gibt [52] eine grundlegende Einführung und beschreibt die Systematik und Begriffe der Spieltheorie. Um die Szenarien weiter zu unterteilen, unterscheidet [31] *konkurrierende* von *kooperativen* Systemen. Im ersten Fall tauschen sich die konkurrierenden System in keiner Weise explizit über ihren jeweiligen Bedarf an spektralen Ressourcen aus. Sie reagieren nur indirekt untereinander auf die Aktionen der anderen, z. B. durch Messungen der spektralen Belegung oder, wie bei CDMA-artigen Systemen, durch Messung des Rausch- bzw. Interferenzniveaus. Erst auf Basis dieser Informationen entscheiden die Systeme, ob und auf welche Weise sie Funkressourcen nutzen. Die Entscheidungen werden dabei egoistisch nur im Hinblick auf den Vorteil des individuellen Systems getroffen. So beschreibt beispielsweise [26] Systeme, die ihren eigenen Datendurchsatz maximieren, indem sie regelmäßig ihre Leistungsverteilung auf die möglichen Kanäle ohne Absprachen mit den anderen Systemen anpassen. Dabei kann jeder Kanal von mehreren Systemen benutzt werden, was in der Folge zu Interferenz führt.

Im Allgemeinen werden aber solche unkoordiniert opportunistischen Zugriffsstrategien zu einer ineffizienten Allokation führen: Das ist der „Preis der Anarchie“ [40]. Folglich führt man Kooperation in die Zugriffsverfahren ein und definiert eine *Spektrums-Etikette* respektive ein *Protokoll*, an das sich wiederum teilnehmende Systeme halten müssen. Dieses Protokoll ist derart gestaltet, dass es zu einer optimalen Spektrumsbelegung führt. Die Forschungsansätze unterscheiden sich dann hauptsächlich in der Definition dieses Optimums. Wichtige Kriterien sind beispielsweise der Gesamtdatendurchsatz aller Teilnehmer oder eine Art von Fairness-Maß, das eine Bevorzugung einzelner vermeidet. [51] argumentiert auch im Bereich der „spectrum commons“, also einer Lizenzierung, die ähnlich den ISM-Bändern allen den Zugriff unter schwachen regulatorischen Randbedingungen erlaubt, für ein Mindestmaß an Organisation.

In [34] tauschen die Systeme untereinander Informationen darüber aus, welche negativen Folgen, sprich Verschlechterung im Signal-zu-Interferenz-und-Rauschverhältnis (SINR), die Kanalbelegungen der anderen Nutzer auf die eigene Übertragung hat. Jeder einzelne Nutzer versucht dann, gleichzeitig den eigenen Durchsatz zu maximieren und dabei negativen Einfluss auf die anderen gering zu halten. Im Gegensatz zu egoistischen Systemen geht [73] von einer anthropologisch inspirierten Idee aus: Die einzelnen Systeme haben eine Abneigung gegenüber ungleicher Behandlung in der Nutzung des Spektrums und versuchen, eine faire Aufteilung durchzusetzen. Um eine lokal begrenzte Anpassung der Frequenzuteilung an die Kommunikationsbedürfnisse der Systeme zu erreichen, führt [16] Verhandlungen zwischen benachbarten Systemen ein und etabliert auf diese Weise ein verteiltes Zugriffsprotokoll. Betrachtet man einfache Geräte, die aufgrund geringer Rechenkapazität und mit möglichst wenig Kommunikationsaufwand für sich selbst möglichst einfachen Regeln zum Kanalzugriff folgen sollen, so vergleicht [76] verschiedene solcher Regeln, sowohl in An- als auch in Abwesenheit möglicher Primärsysteme, wie sie im folgenden Abschnitt 2.3 beschrieben werden.

Auch weitere, im Abschnitt 2.4 vorgestellte Forschungsarbeiten, die sich auf den Handel mit Lizenzen beziehen, analysieren Szenarien mit spieltheoretischen Mitteln, eine klare Abgrenzung in die drei hier verwendeten Kategorien ist oft nur schwer oder überhaupt nicht möglich.

### 2.3 Zweitnutzung von freien Ressourcen

Die im vorhergehenden Abschnitt 2.2 beschriebenen Zugriffsprotokolle haben gemein, dass es keinen Spektrumsnutzer gibt, der anderen Nutzern übergeordnet ist. Es werden zuvor Absprachen über die Nutzung der Übertragungskapazitäten getroffen oder es findet ein konkurrierender Zugriff statt. Alle Teilnehmer müssen Mechanismen und Techniken bereitstellen, um diese Koordination zu leisten.

Auf der anderen Seite sind die interessanten Frequenzbänder bereits vergeben. Ein Austausch der vorhandenen Systeme hingegen ist schwierig, wenn nicht nahezu unmöglich, oftmals auch unerwünscht. Aber gerade bei den existierenden Systemen stellt man die nicht vollständige Nutzung der zugeteilten Frequenzen fest. [55] schlägt daher vor, freie Ressourcen verschiedener Systeme, den *Primärsystemen*, in einen „Spectrum Pool“ zu geben, auf den *Sekundärssysteme* zugreifen können. Diese Systeme überlagern dann die unverändert in ihrem zugeteilten Band operierenden Primärsysteme, man spricht bei den Sekundärssystemen auch von *Overlaysystemen*.

Einen ersten Ansatz, den Spectrum-Pooling-Gedanken umzusetzen, um damit die Lücken in der Zeit-Frequenz-Ebene anderer Systeme zu nutzen, liefert [69]. Grundsätzlich soll das Sekundärsystem transparent für das Primärsystem sein, dies lässt sich in den folgenden Randbedingungen zusammenfassen:

1. Das Overlay-System darf keine oder nur marginale zusätzliche Interferenz in das existierende Primärsystem einbringen, sodass laufende Kommunikation weder gestört noch unterbrochen wird,



ebenso darf das Sekundärsystem das Primärsystem nicht an neu aufzubauenden Verbindungen hindern.

2. Das Sekundärsystem muss jederzeit nahezu sofort die eigene Übertragung über eine bestimmte Ressource einstellen, wenn das Primärsystem dort seine eigene Verwendung wieder aufnimmt.
3. Das Primärsystem darf kein Protokoll wie „Listen before Talk“ oder Carrier-Sense-Schemata verwenden. Andernfalls würde eine Übertragung des Sekundärsystems die Verwendung der Ressourcen durch das Primärsystem ausschließen, was eine Sekundärnutzung im Umkehrschluss verbieten würde.

Das Modulationsverfahren OFDM und die damit verbundene Flexibilität, einzelne Unterträger beliebig ein- und auszuschalten, stellt sich als geeigneter Kandidat für das Sekundärsystem dar [69]. So kann in der Zeit-Frequenz-Ebene, vorausgesetzt das Primärsystem hat wie viele digitale Kommunikationssysteme eine TDMA/FDMA-basierte Struktur, das Sekundärsystem in die freien Stellen eingepasst werden. Die Herausforderungen für das Overlay-System liegen insbesondere in der Belegungsmessung und der Vorhersage von durch das Primärsystem freigelassenen Löchern in der Zeit-Frequenz-Ebene. Hier kommen wieder Elemente des Cognition Cycle nach MITOLA zum tragen.

Die Idee aus [69] bildet die Basis für verschiedene Szenarien und Frameworks, die dynamischen Sekundärzugriff durch Overlay-Systeme ermöglichen. Im CORVUS-Framework [7, 13] wird vorgeschlagen, die spektralen Bereiche von mehreren existierenden Primärsystemen zu verwenden, indem die Nutzungslücken wie nicht lizenziertes Spektrum behandelt werden. Es werden unterschiedliche Möglichkeiten für eine Koordination zwischen den Cognitive Radios des Sekundärsystems diskutiert, unter anderem spezielle Funkbaken in einem eigens reservierten Frequenzband. Das „OFDM-based Cognitive Radio (OCRA) Network“ [1] schlägt ein Framework für die physikalische Schicht (PHY) und die Medienzugriffsschicht (MAC) vor, bei dem ein Overlay-System in einem heterogenen spektralen Umfeld arbeitet.

Der IEEE-Standard 802.22 [36], anlehnend an IEEE 802.16/WiMAX, war in der Entwicklungsphase als OFDM-basiertes Overlayssystem in regional ungenutzten TV-Bändern in den USA motiviert. Ziel des Standards ist ein Breitband-Netzzugang mit Abdeckungsbereichen in der Größenordnung von Vorstädten oder auch im ländlichen Bereich. Lizenzfrei zu betreibende Customer Premise Equipments (CPE, „Kundenendgeräte“) in einem Umkreis von bis zu 100 km um eine Basisstation (BS) erreichen somit Zugang zum Internet. Mit durchschnittlichen Abständen CPE–BS von ca. 30 km spricht man auch von einem Wireless Regional Area Network (WRAN).

Während in Europa das zu Grunde liegende WiMAX inzwischen als einfacher Breitbandübertragungsstandard in eigens reservierten Frequenzbändern verwendet wird, beinhaltet der Standard 802.22 in seiner Entwicklungszeit noch die Umsetzung von grundsätzlichen Overlay-Funktionalitäten: Unter der Koordination der BS führen die CPEs regelmäßige Messungen in gemeinsamen „quiet periods“, also Zeitabschnitten ohne eigene Aussendungen, durch, um momentan freie TV-Bänder zu finden. So könnten Frequenz-Sprung-Gruppen von CPEs effiziente Messungen in den vom Sekundärsystem gerade benutzten freien TV-Bändern ermöglichen [33]. Da die Eigenschaften der Primärsysteme – TV-Sender sowie im gleichen Band in den USA zugelassene drahtlose Mikrofone – bekannt sind, können die Messungen mit geringer Komplexität durchgeführt werden, indem man spektrale Korrelationen der möglichen Primärsysteme ausnutzt [30]. Nach den Messungen legt die BS die Kanäle fest, die für das WRAN genutzt werden sollen. Dabei können nicht nur einzelne Kanäle verwendet werden, es ist vielmehr auch möglich, benachbarte Kanäle, auch partiell, zusammenzufassen. Mögliche Interferenzen zu drahtlosen Mikrofonen werden vermieden, indem man gezielt einzelne OFDM-Unterträger deaktiviert. Das Protokoll sieht auch vor, dass sich BS verschiedener Anbieter untereinander, sogar über die Luftschnittstelle, über verwendete Kanäle austauschen.

Einen ganz anderen Weg der Zweitnutzung beschreiten *Ultra-Wideband(UWB)-Systeme*: Ihre Nutzung setzt sehr geringe Leistungsdich-

ten voraus, sodass UWB-Systeme für andere Primärsysteme nicht mehr von Rauschen unterschieden werden können. In den USA ist beispielsweise über eine Bandbreite von mehreren GHz eine obere Grenze von  $-41 \frac{\text{dBm}}{\text{MHz}}$  festgelegt, die dem Grenzwert von „sonstiger ungewollter Abstrahlung“ entspricht [67]. Um dennoch sehr hohe Datenraten im Nahfunk, z. B. in Personal Area Networks (PAN) mit mehreren  $100 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ , zu erreichen, muss die Bandbreite entsprechend hoch sein. Durch Verfahren wie pulsbasiertes UWB oder Multiband-OFDM erreicht man die als Ultra-Wideband definierten Bandbreiten von mindestens 500 MHz bzw. relative Bandbreiten von mehr als 0,2. Ebenso können bei niedriger Datenrate sehr einfache Sender- und Empfängerstrukturen für größere Kommunikationsdistanzen aufgebaut werden, wie sie etwa für Sensornetze mit kostengünstigen oder sogar Einweg-Knoten interessant sind.

## 2.4 Flexible Lizenzen und marktbasierende Ansätze

In den zuvor beschriebenen Ansätzen wurde entweder eine sehr generische Lizenz für ein Band betrachtet oder aber eine Zweitnutzung bereits vergebener Bänder zugelassen. In beiden Fällen jedoch handelte es sich nach wie vor um eine auf Dauer angelegte Regulierung. Die gesetzten Regeln und die Lizenzen für die Teilnehmer werden vom Regulierer einmal festgelegt und bleiben für längere Zeiträume bestehen. Die in diesem Abschnitt gezeigten Ansätze verfolgen das Ziel, die starren Zuteilungsgrenzen aufzuheben, die Lizenzen oder Nutzungsrechte handelbar zu machen oder aber marktbasierende konkurrierende Zugriffsverfahren einzuführen. Alle diese Möglichkeiten lassen sich zudem auf vielfältige Art kombinieren.

Bereits sehr früh wurde von [63, 64] vorgeschlagen, die verfügbaren Mobilfunkkanäle flexibel zwischen den verschiedenen Mobilfunkanbietern auszutauschen. Ein Ansatz, der in der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt wird. Die Autoren beschreiben auch kurz verschiedene Zuteilungsstrategien von zentraler Organisation bis hin zu dezentralen, adaptiven

Algorithmen. Allerdings werden Marktaspekte und Abrechnungsmodalitäten unter den Mobilfunkoperatoren nicht betrachtet.

Für eine dynamische Allokation nicht innerhalb eines Bandes, sondern zwischen zwei benachbarten Systemen zeigt [49] einen weiteren Vorschlag: Zwei im Spektrum benachbarten Diensten wird eine flexible Grenze im Frequenzbereich zugeordnet. Unter der Annahme komplementären Bedarfs an Bandbreite können die beiden Dienste dann jeweils mehr Frequenzen beanspruchen. Diese Idee wurde von [50] weiterentwickelt. Der Artikel beschreibt ein Systemkonzept und die technischen Erfordernisse einer derartigen dynamischen Spektrumszuteilung. So verlangen die variierenden Frequenzbänder beispielsweise Transceiver, die sich über einen weiten Bereich rekonfigurierbar betreiben lassen.

Der Marktaspekt und neue Bepreisungsmodelle für spektrale Belegung kommen von zwei Seiten ins Spiel. Auf der einen Seite bieten sich einfache Bepreisungsmodelle im Sinne von Kostenfunktionen bei konkurrierendem Zugriff an, die einer Nutzenfunktion gegenübergestellt werden. So führt [35] ein Verteilungsprotokoll zwischen CDMA-basierten Systemen ein, bei dem jedes System bei einer zentralen Instanz für genutzte Sendeleistung und damit Interferenz bei den anderen Systemen bezahlen muss. Eine zweite Möglichkeit sieht die direkte Bepreisung des Interferenzbeitrags an einem definierten Messpunkt vor. Letzteres Modell wurde von einem FCC-Vorschlag motiviert, dass Regulierung künftig nicht mehr auf der Begrenzung der Sendeleistung beruhen sollte, sondern auf einem abstrahierten, empfangenzentrierten Interferenzmaß, der *Interferenzttemperatur* [25]. Diese beinhaltet neben dem Rauschen auch alle anderen unerwünschten Abstrahlungen.

In [61] wird bereits die Idee diskutiert, das verfügbare Band in Handels-Einheiten zu unterteilen, die einem gemeinsamen Teiler der von den einzelnen Teilnehmern verwendeten Kanalbandbreiten entspricht. In einem zentralen System wird die Verteilung der Frequenzen nach verschiedenen Kriterien wie u. a. der bisherigen Nutzung, der prädierten

Last und einer Ertragsschätzung dann nach einem Optimalitätskriterium festgelegt.

[40] verwendet ebenfalls ein Handels- und Preisbildungsprotokoll, vermeidet aber die zentrale Instanz durch ein *verteilt*es Protokoll und die Einführung von Einschätzungsfunktionen, welche die Vermutungen der einen Teilnehmer über die verdeckte Information der anderen abbilden. Beide Ansätze sind jedoch hauptsächlich durch die spieltheoretische Analyse motiviert, weniger durch tatsächliche marktnahe Bewertung von Übertragungsressourcen.

Ganz anders stellt sich die Situation bei den Lizenzen für zellulare Mobilfunknetze dar. Ganz offenbar messen die Mobilfunkanbieter ihren Übertragungslizenzen einen monetären Wert bei. Der erste folgerichtige Schritt, nämlich der *Verkauf* der Lizenzen durch den Regulierer an die Anbieter, ist gängige Praxis. Konsequenterweise untersucht [14] verschiedene Möglichkeiten, die Übertragungsrechte für bestimmte Frequenzen, Regionen und Zeitabschnitte als handelbare Güter verfügbar zu machen. Auf diese Weise würde man nicht auf generische Lizenzen ausweichen, vielmehr würde der Regulierer immer noch die Rahmenbedingungen, wie z. B. den zu verwendenden Mobilfunkstandard, vorgeben. Auf diese Weise entstünde ein *Sekundärmarkt* für die Lizenzen, bei dem die *Primärnutzer* durch Verkauf oder Vermietung von Lizenzen auch dann einen monetären Nutzen aus ihren Lizenzen ziehen können, wenn sie diese gerade nicht zum eigentlichen Zweck selbst verwenden können, andere aber mit zusätzlichen Ressourcen die von den Kunden angeforderten Dienste erbringen könnten.

Aus der Sicht der Regulierer kommt eine ausführliche Studie für die Europäische Union [3] zu dem Schluss, dass die Europäische Kommission sowohl mit Spektrums-Lizenz-Handel als auch der Liberalisierung desselben durch verbindliche Vorgaben an die Mitgliedsstaaten voranschreiten solle. Auch zeigt sich in weiteren Vorschlägen, z. B. in einem Ofcom-Vorschlag zu Auktionen im 2,6 GHz-Band, die Bereitschaft der Regulierer, ein hohes Maß an Liberalisierung zuzulassen und sekundären Spektrumsressourcenhandel zu unterstützen [59].

## 2 Spektrumsnutzung und deren Entwicklung

Es sei hier nochmal der Unterschied zu den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Ansätzen betont: Während dort oft frei agierende Cognitive Radios in einem sehr heterogenen Umfeld um die Ressourcen konkurrieren, müssen im Falle des Sekundärmarktes alle Teilnehmer zuvor festgelegten Regeln gehorchen. Insbesondere bleibt eine zentrale Instanz zur Kontrolle und nötigenfalls zur Durchsetzung der vergebenen und gehandelten Lizenzen sowie des gesamten Regelwerks unbedingte Notwendigkeit [20].

Im Gegensatz zu allgemeinen Lizenzen zur Sekundär*nutzung* von bereits vergebenen Bändern bringt der Sekundär*markt* auch insbesondere den Vorteil der exklusiven Nutzung mit sich. Ein Nutzer, der Lizenzen von einem anderen Nutzer erwirbt, hat im gegebenen Band und zur bestimmten Zeit die gleichen ausschließlichen Nutzungsrechte, frei von Interferenz durch andere konkurrierende Systeme bzw. durch Overlay-systeme. Nur auf diese Weise kann auch die Bereitschaft zur tatsächlichen Bezahlung von derartigen Lizenzen aus zweiter Hand sichergestellt werden.

Desweiteren bietet der Sekundärmarkt auch eine große Spannweite in der Art, wie die ursprünglichen Inhaber ihre Lizenzen abgeben. Sowohl die kurzfristige Vergabe an möglicherweise konkurrierende Sekundärnutzer, beispielsweise lokal an Mobilfunkoperatoren während großer Veranstaltungen, ist denkbar. Auch eine langfristige Vermietung von voraussichtlich brach liegenden Lizenzen ist möglich. Auf diese Weise könnte der Erwerber der Lizenzen auch längerfristig damit planen und sogar eigene Infrastruktur für rentabel erachten.

Die Vorschläge des DIMSUMnet-Frameworks [8] führen einen „central radio access network manager“ als zentrale Instanz für die Aushandlung und Vergabe von spektralen Nutzungsrechten in einem „coordinated access band“ ein. Die Nutzung dieses Bandes wird von einem regional zuständigen „access network manager“ geregelt. Von ihm erhalten die Dienstanbieter jeweils ihren Anteil des verwalteten Bandes, um dort ihre eigenen Dienste erbringen zu können.

*Auktionen* sind ein weit verbreitetes Marktinstrument, das die Preisfestsetzung mit der eigentlichen Ermittlung der Käufer von Gütern vereint. Nach verschiedenen Verfahren [48], die selbst nach wie vor Gegenstand eigener Forschung sind [27], geben mögliche Käufer von Ressourcen ihre Gebote ab. Anhand der Gebotshöhe werden die Gewinner der Auktion bestimmt. Bei *regulären* Auktionen gewinnt jeweils das eine bzw. die höchsten Gebote. Der Preis richtet sich dann direkt nach der Höhe der gewinnenden oder aber nach den Preisen der höchsten verlierenden Gebote.

Bei der Primärzuteilung von Mobilfunklizenzen sind Auktionen zwischen dem Regulierer und den potenziellen Lizenznehmern gängige Praxis mit zum Teil Aufsehen erregenden Ergebnissen, wie bei den UMTS-Lizenz-Auktionen im Jahr 2000 [39]. Aber auch im Bereich des Netzmanagements oder der Verwaltung von Großrechnerkapazitäten finden Auktionen im technischen Bereich ihre Anwendung [32, 42, 44]. Im Rahmen der Diskussion um die flexiblere Nutzung von Mobilfunkressourcen kommen Auktionen in vielfältiger Form in den vorgeschlagenen Konzepten zum Sekundärmarkt zur Anwendung. Der ökonomische Faktor von kurzzeitigen Verhandlungen zwischen den Spektrumsnutzern insbesondere auch zur Vermeidung von verzerrten und sich übermäßig hochschaukelnden Preisen wird beispielsweise in [19] hervorgehoben.

Im „Resource Auction Multipla Access (RAMA)“-Protokoll [2] etwa geben Netzknoten zufällige Gebote ab, von denen das höchste im Anschluss bestimmt, welcher Knoten im folgenden Frame die Ressource für sich verwenden darf. In diesem Fall wird die Auktion allerdings ausschließlich technisch als eine Form eines Vielfachzugriffsverfahrens verwendet, nicht jedoch im ökonomischen Sinne als System zum Ressourcenverkauf.

Durch Hinzunahme dieses ökonomischen Aspekts schlägt [45] Echtzeitauktionen als ein Marktinstrument zur gleichzeitigen Ressourcenallokation *und* Preisfindung vor: Nutzer verhandeln dabei mit den Netzanbietern um Zugangsmöglichkeiten und Übertragungsressourcen in

Echtzeit, also auf Basis von Zeitrahmen von wenigen Sekunden bis hin zu einigen Millisekunden. Die Nutzer genauso wie die Anbieter setzen nur die Rahmenbedingungen wie z. B. Mindestpreise und Preislimits. Die eigentliche Gebotserstellung genau wie die Durchführung der Auktionen geschieht automatisiert durch Bietagenten in den Endgeräten der einzelnen Nutzer in Echtzeit auf Basis dieser Rahmenbedingungen sowie der aktuellen Bedarfssituation.

Bei diesem Ansatz ist allerdings zu beachten, dass die Auktionen genau genommen nicht Lizenzen betreffen, sondern der Kanalzugriff der *Nutzer* eines gegebenen Mobilfunkstandards geregelt wird. Dennoch führt das Konzept von [45] Auktionen als echtes Marktinstrument des Sekundärmarktes für Lizenzen im Mobilfunkbereich ein im Kontrast zu den einmaligen Vergabe-Auktionen des Regulierers. Als problematisch stellt sich allerdings heraus, dass als Preis der Echtzeitanpassung von Ressourcenallokationen die Fragen von Dienstgüte und Zuverlässigkeit von Verbindungen über die Dauer eines Auktionsintervalls hinaus völlig auf die Preisvorstellungen der Teilnehmer verlagert werden. Sobald irgendein Teilnehmer bereit ist, mehr für eine Ressource zu zahlen, kann es für den in der Auktion unterlegenen Teilnehmer zu Verbindungsabbrüchen oder deutlich verminderter Übertragungskapazität kommen [66]. Auf diesen Punkt wird auch das Konzept der vorliegenden Arbeit sein Augenmerk legen.

Im White Paper [23] beschreibt die Wireless World Initiative die Ergebnisse der Projekte E<sup>2</sup>R und WINNER, die sich beide mit dynamischer Spektrumsnutzung beschäftigten. Dabei wurden die zuvor beschriebenen Ideen erweitert und ein Framework für Echtzeitauktionen, dynamischen Spektrumszugriff sowie flexible Frequenzplanung vorgestellt.

Unter der Annahme von Lizenzen als handelbares Gut schlägt [29] vor, dass Mobilfunkanbieter, die alle selbst Basisstationen unterhalten, in überlappenden Zellen untereinander Auktionen um Lizenzen durchführen. Dabei kann ein Operator vorübergehend freie Kanäle zur Vermietung an die Betreiber benachbarter Stationen anbieten. Diese können in



Auktionen um die Kanäle konkurrieren und im Erfolgsfall ihre eigenen Dienste für ihre Kunden optimieren.

Eine weite Diversifikation und Spezialisierung der Forschungsfelder geschieht, wie schon in den eben genannten Beispielen, insbesondere durch die Fragen, *wer* als Marktteilnehmer handelt und *auf welche Weise* um *welche Güter* gehandelt wird. Ebenso sind reichlich Anschlussfragen zu klären: So wird u. a. auch die Preisdynamik in kurzzeitigen Spektrumsauktionen untersucht [72], es werden Instrumente der Wertpapierbörsen wie Derivate und Optionen vorgeschlagen [19], Auktionsverfahren verglichen [43] und der Überkreuz-Handel zwischen mehreren Primärnutzern mit unterschiedlichen Sekundärnutzern untersucht [57].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der in diesem Abschnitt dargelegte Ansatz, die gegebene Regulierungslandschaft zu flexibilisieren, derjenige ist, der am meisten Aussicht auf eine Umsetzung hat. Die völlige Freigabe des Funkspektrums wie in den ISM-Bändern kann für weite Teile des Spektrums nicht wünschenswert sein, da in konkurrenzbestimmten Bereichen immer durch gegenseitige Interferenz Einbußen in der Effizienz hingenommen werden müssen. Ebenso erlauben die unsicheren Verhältnisse nur schwerlich Gewinn versprechende Investitionen in Infrastruktur für Mobilfunknetze, die für zahlende Kunden ausgelegt sind, da es nicht möglich ist, Dienstgüte sicherzustellen.

Dabei scheinen die Regulierer bereit, Regelungen flexibler zu gestalten und einen *Sekundärmarkt* für bereits kostenpflichtige Lizenzen zu ermöglichen. Auch zeigt eine aktuelle Studie [15], dass ein Markt für Spektrumslicenzen bereits ab einer Zahl von etwa 5 aktiven Nutzern durchaus machbar und von Vorteil für die effiziente Nutzung wie auch für die Marktteilnehmer ist. Ebenso sehen die Autoren der Studie die Einstiegshürden für neue Mobilfunkanbieter durch den sekundären Lizenzmarkt gesenkt.



## 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

Dieses Kapitel zeigt als Lösungsmöglichkeit zur effizienteren Nutzung bereits vergebener Mobilfunkfrequenzen im Abschnitt 3.1 ein hierarchisches Auktionsmodell für Mobilfunkressourcen auf. Welche Ressourcen gehandelt werden können, beschreibt Abschnitt 3.2, während der folgende Abschnitt 3.3 das verwendete Auktionsprotokoll diskutiert. Einige Anmerkungen zu Implementierungsfragen schließen in Abschnitt 3.4 das Kapitel ab.

### 3.1 Systemkonzept

#### 3.1.1 Hinführung

Auch bei einer Fokussierung auf öffentliche Fernsprech- und Datenkommunikation zeigt sich in Zusammenfassung von Kapitel 2 ein Spannungsfeld zwischen zwei Polen: Am einen Ende liegt eine sehr langfristige und damit starre Zuteilung von Mobilfunkfrequenzen an bestimmte Dienste. Am anderen Ende stehen mit allgemein zugänglichen Bändern wie den ISM-Bändern, z. B. bei 2,4 GHz, Bereiche zur Verfügung, in denen zwar eine Vielzahl von Diensten möglich ist, aufgrund des konkurrierenden Zugriffs jedoch oft nur lokal stark begrenzte Dienste auf Best-Effort-Basis, also ohne gesicherte Servicequalität, angeboten werden können.

Dennoch ist eine dauerhaft festgelegte Frequenzzuteilung an gewerbliche Mobilfunkoperatoren durchaus vorteilhaft, denn sie gewährt eine auf viele Jahre kalkulierbare Planungssicherheit und Exklusivität. Die

Mobilfunkanbieter haben die Möglichkeit, durch passende Standortplanungen und technische Investitionen einen flächendeckenden Dienst mit einer bestimmten zuvor festgelegten Dienstgüte und Abdeckung herzustellen. Die auf Jahre vergebenen Lizenzen zur Nutzung der Frequenzbereiche erlauben eine gewinnbringende Bewirtschaftung. Es muss nicht mit unvorhersehbaren Störungen durch unbekannte aber zugelassene andere Funkanwendungen gerechnet werden. Genauso wenig besteht im Regelfall eine Gefahr des plötzlichen Verlusts der Nutzungsmöglichkeiten wie bei den Auktionssystemen, die in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurden.

Allen gezeigten Ansätzen zur effizienteren Nutzung der Frequenzen ist gemeinsam, dass sie von einem koordinierten System ausgehen. Koordiniert bedeutet dabei entweder, dass ein ganz neues Konzept verfolgt wird, das aber eine zentrale Kontrollinstanz voraussetzt. Sei es schlicht ein ganz neuer Kommunikationsstandard, oder aber auch ein beigeordneter, standardisierter Cognitive Pilot Channel für die gemeinsame Nutzung eines Frequenzbereichs durch eine Vielzahl heterogener Stationen und *Cognitive Radios*.

Die Koordination kann aber andererseits auch in einem Konsens über den Spectrum-Sharing-Modus bestehen, der bei ansonsten dezentralen Systemen zu einer erfolgreichen Koexistenz führt. Hier seien als Beispiel die meist noch auf sehr abstraktem Niveau diskutierten Sharing-Systeme auf Grundlage von Interferenzmaßen genannt, die oft eine bestimmte Art von „Fairness“ voraussetzen.

Beschränkt man sich auf die Systeme, die auf eine Sekundärnutzung bereits vergebener Frequenzbereiche abzielen, muss mit einigen Problemen gerechnet werden: Für eine zuverlässige Overlay-Nutzung sind Nutzungsinformationen des Primärsystems für das Sekundärsystem unerlässlich. Bei einer Zweitnutzung durch *Untervermietung* der eigenen Lizenzen müssen neben den Vermietungsbedingungen insbesondere auch genaue Schnittstellen und Umschaltmodalitäten zwischen Primär- und Sekundärnutzer geschaffen werden. Hier sind der zeitlichen Flexibilität durch entsprechende Schutzzeiten sowie der Frequenzeffizienz

durch Schutzbänder an den Berührungspunkten Grenzen gesetzt. In jedem Fall wären deutliche Eingriffe in das Primärsystem unvermeidlich. Für das Sekundärsystem sind diese Probleme insofern weniger einschneidend, als die Umstände bereits bei der Konzeption des Systems mit in die Planung einfließen.

Implizite Annahme bei einer Sekundärnutzung von Frequenzbereichen ist stets, dass diese zeitweise nicht vollständig ausgelastet sind. Sieht man in diesem Licht nun auf die Frequenzbänder, die zwar für *einen* bestimmten Mobilfunkstandard, aber an *mehrere* Mobilfunkanbieter vergeben sind, erkennt man letztlich eine Anzahl (frequenz-)disjunkter Systeme, die jeweils für sich zeitweise nicht vollständig ausgelastet sind. Dennoch sind diese Systeme aufgrund desselben zwingend angewandten Standards kompatibel zueinander. Nicht zuletzt funktionieren vom technischen Standpunkt aus die Kunden-Endgeräte unabhängig vom verwendeten Anbieter in jedem der vorhandenen Netze.

Durch die zunehmende Verbreitung von internetfähigen Smartphones und der dazu immer häufiger angebotenen Flatrate-Tarife wächst die Verkehrslast in diesen Netzen und damit auch die Last in den Teilnetzen der einzelnen Operatoren ständig. Der Bedarf nach neuen Frequenzbereichen und der neuerliche Verkauf von Nutzungslizenzen an Teilen der „digitale Dividende“ in freigewordenen TV-Bändern sowie die gezahlten Preise unterstreichen dies eindrücklich. Es ist zu Spitzenzeiten mit einer Vollausslastung einzelner Teilnetze zu rechnen.

#### 3.1.2 Ressourcenaustausch zwischen Mobilfunkanbietern

Während der akkumulierte Verkehr aus Sprechverbindungen bei Aggregation vieler Teilnehmer zu einer statistischen Glättung im Zeitverlauf führt, zeigt aggregierter Datenverkehr eine Selbstähnlichkeit über verschiedene Skalen [47]. Ist ein Netz also auch durch Datenübertragungen belastet, ist immer wieder mit kurzzeitigen Spitzen zu rechnen, obwohl das Netz im Mittel über Zeiträume im Bereich weniger Stunden noch

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

ausreichend dimensioniert ist. Eine Glättung findet hier für eine große Zahl von Endnutzern nicht statt.

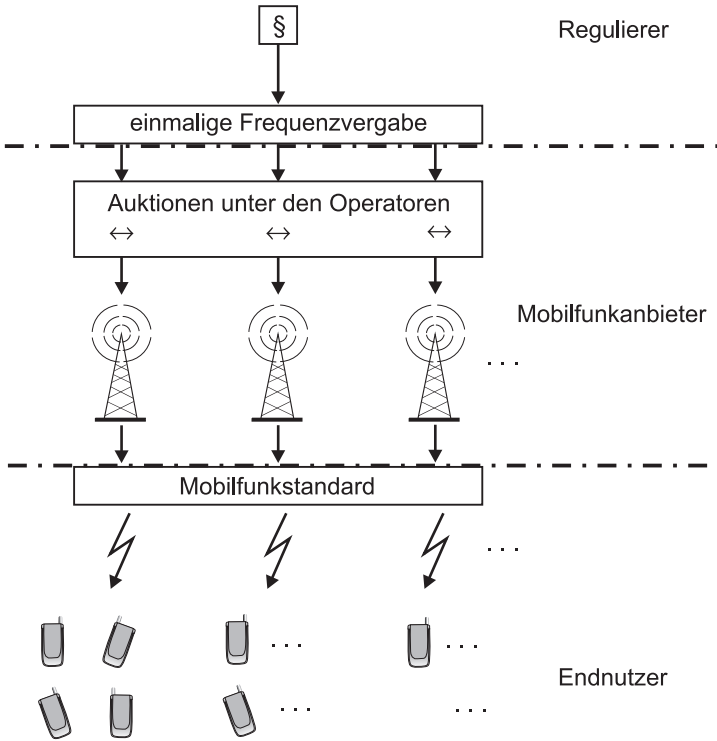
Dadurch ist bei insgesamt hohem Verkehrsaufkommen im Netz immer wieder damit zu rechnen, dass ein Anbieter einer kurzfristigen Überlastsituation gegenübersteht, während ein anderer Anbieter dennoch Kapazitäten hat. Dieser Anbieter könnte nun seine freien Kapazitäten für eine gewisse Zeitspanne an den Mitbewerber vermieten. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn sich gegebenenfalls die Verhältnisse umgekehrt haben, kann die Vermietung umgekehrt erfolgen.

Auf diese Weise kann je nach Situation jeder Mobilfunkoperator sowohl als anbietender *Primär*-Nutzer seines Teils der zugeteilten Frequenzen auftreten, oder hingegen als nachfragender *Sekundär*-Nutzer in den Frequenzbändern eines Mitbewerbers. Ein Austausch von Übertragungskapazitäten erfolgt in diesem Fall zwischen gleichartigen und gleichberechtigten Partnern: den Operatoren untereinander.

In Bezug auf die Schnittstellen zu den über- und untergeordneten Teilnehmern am Mobilfunkgeschehen ist der hier vorgeschlagene Ansatz konservativ ausgelegt:

*Der Regulierer* als übergeordnete Instanz vergibt weiterhin auf die bewährte Weise Mobilfunkfrequenzen mit den üblichen Auflagen an die einzelnen Operatoren. Die Verfahren schließen dabei bereits Auktionen als Vergabemethode mit ein und sind intensiv untersucht und erprobt. Diese Auktionen finden aber zwischen einem Verkäufer – dem Regulierer – und den Operatoren als Käufergesamtheit asymmetrisch statt. Von einer Weitervermietung von Teilen der Lizenzen ist der Regulierer nur dadurch betroffen, dass er einmalig die Zweitverwertung der Zuteilungen zwischen den Operatoren zulassen muss, ggf. mit exakten Auflagen für die Modalitäten. Auch diese Zulassung, einmal getroffen, ist statisch.

Für *die Endkunden* auf der anderen Seite wäre der Ressourcenaustausch zwischen ihren Mobilfunkanbietern völlig transparent. Eine technische Anpassung ihrer Endgeräte ist nicht erforderlich, da der Ressour-



**Abbildung 3.1:** Die Schnittstellen der Ressourcenvergabe

cenaustausch der Operatoren im Rahmen des verwendeten Protokolls erfolgt. Auch ein ganz neues Bepreisungsmodell wie z. B. bei KLÖCK [45, 46] ist nicht erforderlich.

In Abbildung 3.1 sind die drei Ebenen *Regulierer*, *Mobilfunkanbieter*, *Endkunde* sowie ihre Schnittstellen dargestellt. Es wird verdeutlicht, dass die dynamische Ressourcenreallokation ausschließlich die Sphäre der Operatoren betrifft. Die Schnittstellen der erstmaligen Frequenzvergabe von Regulierenseite her sowie des vorhandenen Mobilfunkstandards auf Seiten der Endkunden bleiben unverändert.

Eine flexiblere Nutzung der bereits zugeteilten Frequenzressourcen mit Hilfe der Weitervermietung von Lizenzen zwischen den Mobilfunkanbietern im gleichen Mobilfunkstandard und -frequenzbereich kann also auch in einem bereits bestehenden System nachträglich eingeführt werden. Technische Änderungen ergeben sich lediglich in der Netzstruktur der Operatoren. Diese müssen jedoch nicht schlagartig flächendeckend eingeführt werden, wie es bei einem ganz neuen Mobilfunkstandard der Fall wäre. Vielmehr kann in Regionen damit begonnen werden, die relativ zum Netzausbau bereits hoch ausgelastet sind. Von Regulierungsseite wäre einmalig eine Festlegung der Vermietungsmodalitäten zu treffen.

Da jede Änderung an technischer Infrastruktur mit Kosten verbunden ist, muss vom Regulierer hinterfragt werden, ob alle Operatoren dazu verpflichtet werden sollen, an einem entsprechenden System teilzunehmen und dieses zu implementieren. Das hier vorgeschlagene Modell ist jedoch in der Zahl der teilnehmenden Operatoren flexibel: Bereits zwei Operatoren könnten einen Austausch innerhalb ihrer jeweiligen Frequenzbänder vereinbaren und das System weiteren Teilnehmern Zug um Zug öffnen.

#### **3.1.3 Stufenweise Anpassung als Kompromiss**

Dennoch bleibt ein wesentlicher Zielkonflikt auch dann, wenn die Flexibilisierung eines bisher starren Systems auf die Ebene der Mobilfunkoperatoren untereinander eingegrenzt wird:

Erhöhte Flexibilität in der Ressourcenallokation bedeutet gleichzeitig auch höhere Unsicherheit: Um einen bestimmten Servicestandard bieten zu können, ist es für die Mobilfunkanbieter unerlässlich, im Voraus um die Menge der ihnen zur Verfügung stehenden Ressourcen zu wissen. Auch wenn diese Ressourcen nur vorübergehend gemietet wurden, muss jederzeit vorhersagbar sein, wann die temporären Nutzungsrechte wieder erlöschen und welche Allokation nach diesem Zeitpunkt gilt. Längerfristige Weitervermietung erhöht die Planungssicherheit, bindet



aber auch die Operatoren an einmal getroffene Vermietungsentscheidungen. Kurzfristigere Laufzeiten der Reallokation von Ressourcen bieten hingegen bessere Anpassung an das tatsächliche Verkehrsaufkommen.

Eine erste mögliche Umsetzung bestünde darin, dass je zwei Operatoren unabhängig von den übrigen jedes Mal völlig neue Konditionen aushandeln. Es wären sowohl Verhandlungen über Zeitdauer, Preis und Menge der benötigten Ressourcen notwendig. Für jeden von  $N$  Anbietern böten sich  $N - 1$  verschiedene Vertragspartner an. Schon aus der Sicht eines einzelnen Operators wäre das Auffinden von passenden Angeboten und die Abwicklung von Verhandlungen mit jedem einzelnen der anderen Operatoren äußerst aufwändig. Eine automatische, durch Software-Agenten durchgeführte Aushandlung würde je eine Schnittstelle zu jedem anderen Operator erfordern.

Aus diesem Grund wird hier auf eine von den Wertpapier- und anderen Börsen bekannte Idee aufgegriffen: Der Handel über die Nutzungsrechte findet über einen zentralen *Broker* statt. Dieser sammelt Angebot und Nachfrage *aller* Operatoren und ermittelt zu einem bestimmten Zeitpunkt aus diesen Geboten einen Preis und eine sich daraus ergebende Zuteilung von Ressourcen im Rahmen einer Auktion (siehe Abschnitt 3.3). Dadurch werden bei jeder Auktion Angebot und Nachfrage jeweils gebündelt, es entfallen die umständlichen paarweisen Verhandlungen zwischen den Teilnehmern.

Nun bedarf es allerdings der Festlegung, was jeweils in einer Auktion gehandelt wird. In einem Aktienmarkt z. B. ist die Situation klar: Es werden in jeder Auktion Anteile an einem Unternehmen angeboten und nachgefragt. Es handelt sich von Mal zu Mal um dieselben Aktien. Am Ende einer Auktion ist festgelegt, wer welche Anteile hält und auf Basis dieses Besitzes können die Marktteilnehmer erneut Gebote unterbreiten.

Für den Fall von Nutzungsrechten an Spektrumsressourcen stellt sich die Situation ähnlich, aber nicht identisch dar: Der eigentlich „Besitz“

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

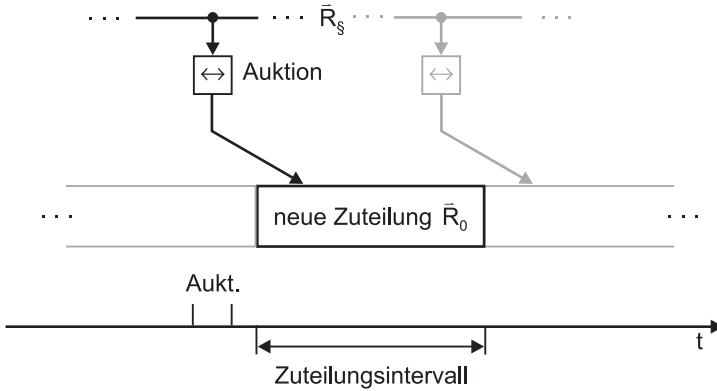
an den Mobilfunkfrequenzen ist vom Regulierer quasi-statisch vorgegeben. Soll also eine zeitlich begrenzte Lizenz im Rahmen einer Auktion zwischen den Operatoren ausgetauscht werden, muss in dieser Auktion für alle Teilnehmer einheitlich festgelegt werden,

- in welchen wohldefinierten Anteilen die zur Verfügung stehenden Ressourcen gehandelt werden und
- über welchen Zeitraum erworbene Nutzungsrechte an Übertragungsressourcen gelten sollen.

Die erste Festlegung ist deshalb bedeutend, da bei der Auktion alle Gebote, nachfragend wie anbietend, zunächst zusammengefasst und aufgrund des Auktionsausgangs unter den Teilnehmern neu aufgeteilt werden. Die Ressourcen müssen folglich austauschbar und exakt quantifizierbar sein. Diesem Komplex widmet sich Abschnitt 3.2.

Die zweite Festlegung betrifft die einheitliche Festlegung eines Zeitrahmens für die Auktionen. Dazu wird die Zeitachse in aufeinanderfolgende, gleich lange Zuteilungsintervalle aufgeteilt, die nahtlos aneinander anschließen. Für jedes dieser Intervalle wird vor dessen Beginn eine Auktion zu einem genau definiertem Zeitpunkt durchgeführt, welche die Zuteilung während dieses Intervalls bestimmt. Die Auktion muss mit einem gewissen zeitlichen Abstand vor dem Intervall stattfinden, um auch eine rechtzeitige physikalische Reallokation zu ermöglichen.

Im hier betrachteten Modell, auch wiederum anders als bei einer Wertpapierbörse, liegt die Annahme zugrunde, dass für jedes Zuteilungsintervall erneut zunächst von der ursprünglichen vom Regulierer festgelegten Allokation ausgegangen wird. Abbildung 3.2 zeigt den Ablauf für ein bestimmtes Intervall. Das Bild kann im Zeitverlauf wiederholt aneinandergereiht werden, die Zuteilungsintervalle sind aber unabhängig voneinander. Im Bild bezeichne  $\vec{R}_3$  die Zuteilung der Lizenzen an die verschiedenen Mobilfunkoperatoren, wie sie vom Regulierer festgesetzt wurde. Diese Zuteilung wird hier als statisch angenommen. Nach der



**Abbildung 3.2:** Zeitlicher Ablauf der Zuteilungsintervalle und zugehörigen Auktionen

Auktion ergibt sich die für das Zuteilungsintervall gültige Allokation  $\vec{R}_0(i)$ .

Durch diese Unabhängigkeit wird ein wesentlicher Punkt der Planungssicherheit befriedigt: Ein Anbieter kann zunächst sicher sein, dass nach dem Ende einer Zuteilungsperiode auf jeden Fall wieder die ursprüngliche Zuteilung der Ressourcen gültig ist. Ein Operator, der in einer Auktion erfolgreich Nutzungsrechte verkauft hat, muss also nicht etwa diese einmal abgegebenen Ressourcen zurückkaufen, da er die Nutzungsrechte nur für die definierte Zeit des Zuteilungsintervalls vergeben hat. Dennoch kann der Operator an den folgenden Auktionen teilnehmen und somit die Ressourcenallokation bei entsprechender Marktlage den aktuellen Gegebenheiten seiner Verkehrslast anpassen.

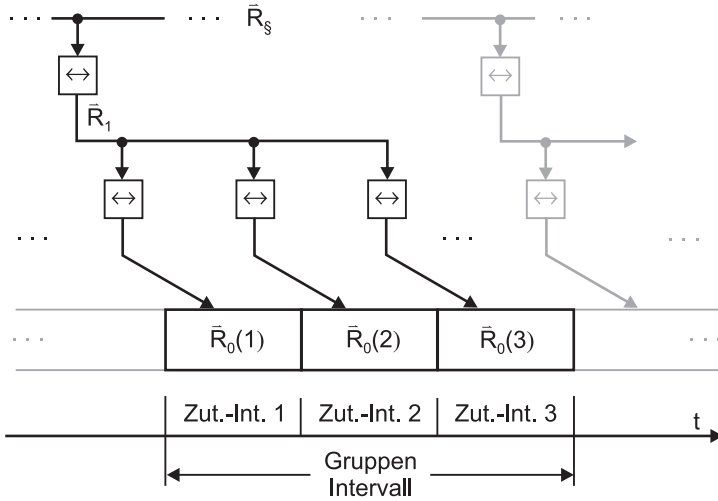
Desweiteren muss die Länge eines Zuteilungsintervalls diskutiert werden: Für eine hohe Flexibilität ist ein kurzes Intervall von Vorteil. In der Größenordnung der üblichen Zeitdauer von Telefongesprächen oder Datenverbindungen wie z. B. Webbrowsing-Sitzungen im Rahmen von einigen Minuten liegt eine sinnvolle untere Schranke. Auf diesen Zeitrahmen bezogen haben auch die Mobilfunkoperatoren die Möglichkeit,

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

ihren Bedarf mit hoher Genauigkeit vorherzusagen und passende Gebote bei der nächsten Auktion abzugeben.

Der Vorteil kurzer Zuteilungsintervalle ist natürlich auch deren Nachteil: Ein Operator, der eine akute Überlast durch Zukauf von Ressourcen abfedern kann, muss damit rechnen, bereits nach wenigen Minuten wieder weniger Übertragungskapazität zur Verfügung zu haben. Er wird in diesem Rahmen die zusätzlichen Ressourcen höchstens für Best-Effort-Verkehr zuteilen können, wenn er keine Gesprächsabbrüche aufgrund der endenden Zuteilungsperiode in Kauf nehmen will. Auch muss auf Verbindungen Rücksicht genommen werden, deren Beginn in den kurzen Zeitraum zwischen Gebotsabgabe und tatsächlichem Ende des Intervalls fällt. In diesem Licht wären dann längere Zuteilungsintervalle wünschenswert, sodass dieser kritische Moment seltener auftritt. So haben die Mobilfunkanbieter natürlich auch längerfristige Verkehrsprognosen zur Verfügung, wie sie sich z. B. aus der Schätzung von Tagesverläufen ergeben können. Auch ein zeitlich weniger fein aufgelöster Handel mit Nutzungsrechten kann Vorteile für die Anbieter bringen, da insbesondere die Dauer einer angepassten Zuteilung länger und damit – auf Kosten der Flexibilität – zuverlässiger ist.

Um hier einen Kompromiss zu finden, der dieses Dilemma abfedert, soll das Schema in Abbildung 3.2 erweitert werden. Zwischen die Ursprungsallokation  $\vec{R}_g$  und die letztlich gültige und physikalisch anzuwendende Zuteilung  $\vec{R}_0(i)$  werden hierarchisch weitere Zwischenzuteilungen  $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots$  eingeschoben. Gleichzeitig wird von „unten“ her die Zeitgranularität durch Zusammenfassen einer bestimmten Zahl von Zuteilungsintervallen vergrößert. So wurde in Abbildung 3.3 eine einzelne weitere Zuteilungsebene eingeführt, die drei Zuteilungsintervalle zusammenfasst. Bevor die Auktion für das erste dieser Intervalle beginnt, findet eine weitere Auktion statt, die sich auf den Zeitraum aller zusammengefassten Zuteilungsintervalle bezieht. Im gezeigten Beispiel wird in der ersten Auktion ausgehend von der Ursprungsallokation  $\vec{R}_g$  für das Gruppenintervall die Zuteilung  $\vec{R}_1$  ermittelt. Für die drei Auktionen, die dann im Folgenden zu  $\vec{R}_0(i)$  führen, wird nicht mehr  $\vec{R}_g$ , sondern  $\vec{R}_1$  als Ausgangspunkt verwendet.



**Abbildung 3.3:** Einführung einer Hierarchie in Zeitrichtung

Bei der Teilnahme an der Auktion zu  $\vec{R}_1$  werden die Operatoren ihre Schätzungen über ihren Ressourcenbedarf über den gesamten Zeitraum des Gruppenintervalls einfließen lassen. Somit können sie zunächst eine ungefähre Anpassung vornehmen, die eine längerfristige Gültigkeit während des gesamten Gruppenintervalls hat. Gültigkeit meint hier, dass aus Sicht eines einzelnen Operators sein Anteil an den Ressourcen von  $\vec{R}_1$  auf  $\vec{R}_0$  gleich bleibt, sofern er bei den entsprechenden Auktionen kein Gebot abgibt.

Dennoch kann jeder Operator seine Situation von Zuteilungsintervall zu Zuteilungsintervall verbessern, indem auf Basis kurzfristiger und damit genauerer Schätzungen des Bedarfs über die Auktionen der unteren Ebene die Zuteilung verfeinert werden kann. Aber auch bei einer Neuzuteilung für ein Zuteilungsintervall wird am Ende desselben – außer beim letzten in der Gruppe – nicht die Ursprungsallokation  $\vec{R}_s$ , sondern die bereits grob angepasste Zuteilung  $\vec{R}_1$  wirksam.

In Kapitel 4 wird in Abschnitt 4.1.2 für die detaillierten Untersuchungen ein Modell mit den in Abbildung 3.3 gezeigten drei Ebenen für verschiedene Zeitskalen eingeführt und in Simulationen verwendet. Dennoch ist das Konzept nicht auf die rein zeitliche Gruppierung beschränkt, eine regionale Bündelung auf höheren Hierarchiestufen ist denkbar [11, 74]: So können auf höheren Ebenen mehrere Zuteilungsgebiete zu einem größeren Gebiet zusammengefasst werden. Erst auf den unteren Ebenen werden die Nutzungsrechte lokal unterschiedlich gehandelt.

## 3.2 Abstrahierte Ressourcen als Handelsgüter

Durch den Regulierer werden den einzelnen Mobilfunkanbietern im vorgesehenen Frequenzbereich Abschnitte in Form von Frequenzbändern zugeteilt. Jeder Mobilfunkanbieter verwendet die ihm zur Verfügung stehenden Frequenzen in Form des vom Mobilfunkstandard vorgegebenen Kanalrasters. Hier sei als Beispiel der als Mobilfunk der 2. Generation bezeichnete *GSM – Global System for Mobile Communications*-Standard genannt [56, 68]. Das Frequenzband wird in ein Raster von 200 kHz-Kanälen eingeteilt.

Bei der Planung des Netzes muss berücksichtigt werden, dass das Kanalraster zwar 200 kHz-Kanäle vorsieht, aber an einem Ort zwei gleichzeitig nebeneinander betriebene Kanäle aufgrund ihrer höheren Bandbreite interferieren würden. So werden also einer Basisstation nur eine bestimmte Anzahl nicht benachbarter Kanäle aus den möglichen Kanälen zur Verfügung stehen. Diese Kanäle und deren direkte Nachbarn können dann erst in den nicht mehr überlappenden Abdeckungsbereichen der „übernächsten“ Zelle verwendet werden. Je nach Planungsansatz und Interferenzbetrachtungen benötigt man 3–7 verschiedene Untermengen aus den möglichen Kanälen. Diese Zahl wird als *frequency reuse factor* bezeichnet. Zudem liegen die Kanäle in verschiedenen Teilbändern gepaart für Uplink und Downlink im Frequenz-Duplex vor.

Jede Basisstation benötigt einen ihrer Kanäle (respektive ein Paar aus Uplink- und Downlink-Kanal) für Signalisierung und Zugriff der Teilnehmer. Wird eine Gesprächs- oder Datenverbindung aufgebaut, so wird diese einem logischen Traffic Channel (TCH) auf einer der anderen Frequenzen zugeordnet. Jedes Kanalpaar kann im Zeitmultiplex (TDMA) bis zu 8 Gesprächsverbindungen aufnehmen.

Geht man nun zunächst von einem sich identisch überdeckendem Zellraster der verschiedenen Mobilfunkoperatoren aus, so sind alle in einer Zelle benutzten Kanalpaare prinzipiell untereinander austauschbar. Die aufwändige Zell- und damit Interferenzplanung wurde ja bereits im Vorfeld durchgeführt. Es können also auf lokaler Ebene einer Zelle die Operatoren untereinander freie Kanalpaare austauschen, wie es im Abschnitt 3.1 vorgeschlagen wird.

Dies kann wie folgt geschehen: Noch während der Auktionsphase kann die Basisstation eines anbietenden Operators ein freies Kanalpaar physikalisch deaktivieren. Direkt nach der Auktion, wenn der Scheduler die gültige neue physikalische Zuteilung an die Operatoren und deren Basisstationen ausgeliefert hat (s. u. in Abschnitt 3.3), kann die Station des erwerbenden Operators ihre Hardware auf das neue Frequenzpaar umkonfigurieren und hinzukommende Gespräche dort zuordnen.

Dennoch ergeben sich an dieser Stelle zwei Einwände gegen die „einfache“ Austauschbarkeit von physikalischen Kanälen:

1. In existierenden Netzen werden sich die Zellen verschiedener Operatoren nicht ideal überlappen. Ein Austausch von physikalischen Kanälen würde zwangsläufig zu neuen nicht absehbaren Interferenzen führen. Die abstrahierten Güter wären nicht mehr untereinander gleich und folglich auch nicht mehr von Operator zu Operator übertragbar.
2. Will ein Operator zusätzliche Frequenzen nutzen, muss er für diese auch entsprechende technische Kapazität der Basisstation vorhalten.

Dem ersten Punkt kann auf konservative Weise begegnet werden: Man vergrößert die kleinste lokale Einheit von einer Zelle auf ein geographisches Gebiet, das mehrere Zellen enthält. Hier bieten sich z. B. Bereiche von Innenstädten, Flughäfen, Sportarenen etc. an. Der äußere Ring von Zellen oder auch nur deren nach außen gerichtete Sektoren, bei denen eine Umkonfiguration von Frequenzen zu neuen Interferenzen führen könnte, wird partiell von der Neuzuteilung ausgeschlossen: Zwar werden Kanäle deaktiviert, die ein Operator zeitweilig abgegeben hat, in diesen Zellen dürfen aber zusätzlich erworbene Nutzungsrechte nicht wahrgenommen werden. Im Inneren des Gebiets kann dennoch von der Neuzuteilung Gebrauch gemacht werden, ohne dass Interferenzen nach außen entstehen.

Auf der anderen Seite gibt es zwei Bestrebungen, die das Problem auf andere Weise entschärfen: *Co-Siting* und *Site-Sharing* [24]. Beim *Co-Siting* nutzen verschiedene Anbieter denselben Standort samt seiner Infrastruktur für ihre Basisstationen gemeinsam. Man teilt sich den Sendemast, die Unterbringung für Geräte und die Klimatisierung, wohingegen die Basisstationen und Antennen von jedem Operator in Eigenregie getrennt betrieben werden. Dadurch fallen durch die örtlichen Gegebenheiten bereits die Mittelpunkte der Funkzellen zusammen, was die Anbieter-übergreifende Interferenzsituation bereits entspannt.

Beim *Site-Sharing* hingegen gibt es an einem Standort eine einzige, von mehreren Anbietern betriebene und genutzte Basisstation, bei der die Anbieter nur logisch getrennt sind. Diese Situation kann den Austausch von Frequenzen zwischen den Anbietern sehr erleichtern: Wenn nämlich bereits eine gemeinsame Planung vorliegt, genauso wie die RF-Hardware für die verfügbaren Kanäle, kann eine Neuallokation durch logisches Umschalten der Zuordnungen von logischer Basisstation zu physikalischen Kanälen erfolgen. Damit ist auch dem zweiten Einwand begegnet: Bei im *Site-Sharing* betriebenen Stationen wird nicht nur die Frequenz- sondern auch die Hardwarenutzung gleichzeitig auf einen anderen Operator übertragen. Auch ein zusätzlicher Kapazitätsausbau einer gemeinsamen Basisstation käme letztlich allen Anbietern zugu-



te, da sie im Rahmen der dynamischen Zuteilung wechselseitig davon profitieren können.

Durch geschickte Kombination beider Ansätze lässt sich somit auch in bestehenden und künftigen zellularen Netzen das hier vorgeschlagene dynamische Reallokationssystem implementieren.

## 3.3 Auktionssystem

Da die Mobilfunkanbieter die ihnen zur Verfügung stehenden Ressourcen für gewinnbringende Dienste gegenüber ihren Endkunden einsetzen, werden sie in der Regel je nach Lastsituation den Wert einer einzelnen Ressource angeben können. Im Falle von Überlast z. B. direkt auf Basis des nicht übertragbaren Datenvolumens, oder auch indirekt durch die negativen Auswirkungen einer schlechteren Dienstgüte.

Genauso aber, wie die Verkehrslast zeitveränderlich ist, wird auch die Wertschätzung der Operatoren für Ressourcen von der Situation abhängen und von Anbieter zu Anbieter unterschiedlich sein. Dies betrifft sowohl den Kauf zusätzlicher Ressourcen als auch den Preis für das Risiko, Ressourcen zeitweilig an Mitbewerber zu veräußern.

Ist aber ein allgemein gültiger Wert für solche *Güter*, wie sie hier durch die zeitbeschränkten Nutzungsrechte an Mobilfunkfrequenzen dargestellt werden, nicht von vornherein fest, so kommen *Auktionen* ins Spiel. Sie sind bewährte Marktinstrumente, um *gleichzeitig* die Allokation und die Preise von Gütern festzulegen [48].

Bei den allgemein bekannten Formen von Auktionen handelt es sich um einseitige Auktionen: Ein Verkäufer – der *Auktionator* – bietet eines oder mehrere gleichartige Güter zum Verkauf. Nach einem bestimmten zuvor festgelegten Verfahren geben die potentiellen Käufer – die *Bieter* – ihre Gebote ab. Auf Grundlage dieser Gebote ermittelt der Auktionator dann sowohl die Verteilung der Güter auf die Käufer als auch den jeweils zu zahlenden Preis. Hierbei ist zu betonen, dass die Identität

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

der Bieter keine Rolle spielt. Nur die abgegebenen Gebote bestimmen das Auktionsergebnis.

Zu den Beispielen für solche Auktionen zählen unter anderem Kunstauktionen, Auktionen in Großmärkten für Gemüse, Pflanzen etc. sowie die sehr erfolgreichen Internetauktionsplattformen, auf denen alle Güter des täglichen Gebrauchs von privaten und geschäftlichen Anbietern versteigert werden.

Aber auch die Vergabe von Mobilfunkfrequenzen generiert durch passende Auktionssysteme neue Einnahmen für den Regulierer. Die entsprechenden Auktionsverfahren sind Gegenstand eigener Untersuchungen. Beispiele wie die Versteigerung der UMTS-Frequenzen in Deutschland im Jahr 2000 sowie den Anteilen an der digitalen Dividende im Jahr 2010 zeigen eindrücklich, dass ein *Markt* für die Nutzungsrechte existiert und Auktionen als Zuteilungsverfahren bewährt sind.

Im hier betrachteten Fall allerdings ändert sich die Situation von *ein Verkäufer – mehrere Käufer* zu *mehrere Verkäufer – mehrere Käufer*. Denn je nach Situation treten die einzelnen Mobilfunkanbieter untereinander als Anbieter oder als Nachfrager von Ressourcen auf. Eine Situation, wie man sie regelmäßig an Wertpapierbörsen findet. Da hier beide Seiten des Markts von einem oder mehreren Teilnehmern repräsentiert werden, spricht man von *zweiseitigen Auktionen* oder auch *Double Auctions*. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in Details der Preisfindung. Wichtiges Kriterium bleibt dabei noch, ob die einzelnen Transaktionen zu bestimmten Zeiten stattfinden, nachdem alle bis dahin aufgelaufenen Gebote gesammelt wurden, oder ob Gebote kontinuierlich angenommen werden und bei jeder möglichen Transaktion diese dann auch durchgeführt wird [42, 44]. Wegen der festgelegten Dauer der Zuteilungsintervalle kommen kontinuierliche Verfahren nicht in Frage. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Auktionsverfahren das Double-Auction-Protokoll nach McAfee [53] zugrunde gelegt, um beim Broker aus den Geboten die neue Allokation und den zu zahlenden Preis festzulegen. Dennoch ist das vorgeschlagene hierarchische Modell nicht auf dieses Protokoll festgelegt.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 dargelegt, wurden die handelbaren Ressourcen derart definiert, dass sie prinzipiell untereinander austauschbar sind, ihre Anzahl also die entscheidende Größe ist. Dadurch ist es möglich, vor jedem Zuteilungsintervall alle Gebote der Operatoren zusammenzufassen und im Rahmen der Auktion die Ressourcen neu zuzuteilen.

Neben den Operatoren nehmen am Geschehen hier noch der *Broker* und ein *Scheduler* als jeweils übergeordnete Rollen teil. Der Broker sammelt die Gebote und führt das Auktionsprotokoll durch. Auf der untersten Hierarchieebene wird der Scheduler anhand der Ressourcenzuteilung  $\vec{R}_0$  für jeden Operator festlegen, welche physikalischen Kanäle er im folgenden Zuteilungsintervall tatsächlich benutzen darf. Weitere Ausführungen zu Broker und Scheduler folgen in Abschnitt 3.4.

Würden alle Operatoren paarweise untereinander handeln, müsste jeder der  $N$  Teilnehmer mit den  $N - 1$  anderen Teilnehmern zunächst die Angebots- bzw. Nachfragesituation erfragen, um dann auszuwählen, mit welchem der möglichen Handelspartner er sich einig wird. Dieser Prozess müsste iterativ durchgeführt werden und der zeitliche Rahmen wäre nicht absehbar, da mit  $N(N-1)$  die Zahl der potentiell gleichzeitig stattfindenden Verhandlungen quadratisch mit der Zahl der Mobilfunkoperatoren wüchse.

Hierbei zeigen hingegen die zweiseitigen Auktionen einen weiteren Vorteil: Ihr Zeitaufwand und relativer Signalisierungsaufwand aus Sicht der Operatoren ist unabhängig von der Marktsituation fest: Pro Auktion sendet jeder Operator genau einmal sein Gebot – Angebot oder Anfrage – zusammen mit dem entsprechenden Gebotspreis an den Broker.

Die einzelnen Operatoren melden sich also beim Broker für die nächste Auktion an und geben neben ihrer Identität  $j$  als Gebot ein Tupel  $(d_j, p_j)$  an. Dabei bedeutet:

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

- $d$ : Der Bedarf des jeweiligen Operators an Ressourcen. Er ergibt sich aus der Differenz seiner gegebenen Zuteilung und der aktuellen Verkehrslast. Dabei bedeuten positive Werte einen tatsächlichen Bedarf an zusätzlichen Ressourcen, während negative Werte für überschüssige Ressourcen stehen, die als Angebot in die Auktionen eingehen. Durch den Wert 0 zeigt ein Operator an, dass er weder einen Bedarf noch ein Angebot hat, also für die folgende Auktion ausscheiden wird.
- $p$ : Der Preis, den ein Operator pro erhaltenem Gut maximal zu zahlen bereit ist. Im Falle eines Angebots ist dies der Mindestpreis, unter dem der Operator nicht bereit ist, Ressourcen abzugeben.

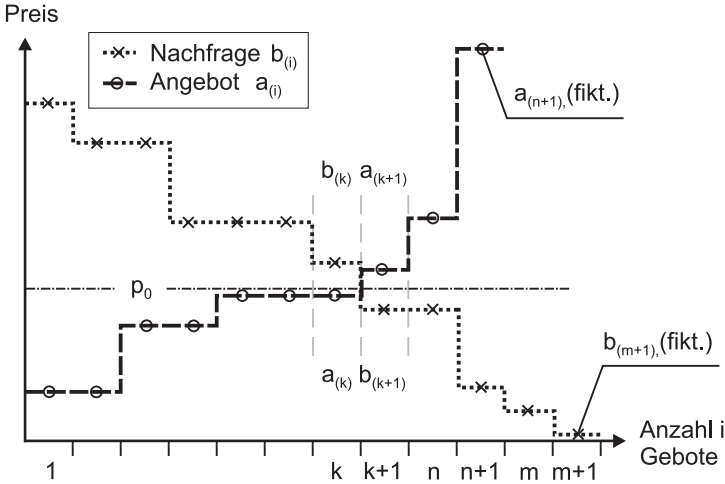
*Anmerkung:* Dass für alle Einzelgüter des Gebots der gleiche Preis angegeben wird, setzt den Signalisierungsaufwand exakt fest. Das McAfee-Protokoll ließe allerdings auch Preisangaben für jedes einzelne Gut zu (s. a. Abschnitt 4.3.4).

Zur Festsetzung der neuen Allokation und des Preises verfährt der Broker dann wie folgt:

Zunächst trennt er die Gebote in diejenigen für Nachfrage  $b$  und die für Angebote  $a$ . Dabei enthalten dann die Listen für jeden Operator gerade  $d_j$  (für Nachfrage) bzw.  $-d_j$  (für Angebote) Einträge der Form  $(j, p_j)$ . Die Listen werden dann sortiert, und zwar die Nachfrage nach absteigenden, das Angebot nach aufsteigendem Preis:

$$\begin{aligned} b_{(1)} &\geq b_{(2)} \geq \dots \geq b_{(m)} \\ a_{(1)} &\leq a_{(2)} \leq \dots \leq a_{(n)}. \end{aligned}$$

Dabei werden Gebote gleicher Höhe in zufälliger Reihenfolge in die Listen gestellt. Die Randomisierung erfolgt dabei unabhängig vom bietenden Operator.  $b_{(i)}$  ist das  $i$ -höchste von  $m$  Kaufgeboten und  $a_{(i)}$  das  $i$ -niedrigste von  $n$  Verkaufsangeboten. Sodann werden in der Reihenfolge aufsteigender Indices  $i = 1, 2, \dots$  die Paare  $(b_{(i)}, a_{(i)})$  zu Transaktionen zusammengeführt, bis  $b_{(i)} \geq a_{(i)}$  nicht mehr erfüllt ist. Es werden also diejenigen Kaufgebote bevorzugt, die einen höheren Preis zu zahlen



**Abbildung 3.4:** Angebot und Nachfrage werden nach Preis sortiert und gegenübergestellt

bereit sind, während auf Seiten des Angebots günstige Offerten bevorzugt werden. Sollten für  $m, n \geq 1$  dennoch in der Aufstellung bereits  $b_{(1)} < a_{(1)}$  sein, so kann keine Transaktion durchgeführt werden, da die Mindestpreise der Verkäufer durchweg höher als die Maximalgebote der Käufer legen. Abbildung 3.4 zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung von Kauf- und Verkaufsgeboten.

Zur formalen Darstellung und Preisfindung sei  $b_{(m+1)}$  das fiktiv günstigste Angebot und  $a_{(n+1)}$  das höchstmögliche fiktive Kaufgebot. Der Index  $k \leq \min\{m, n\}$  sei der „Kreuzungspunkt“ der beiden Kurven, und zwar derart, dass gilt:

$$b_{(k)} \geq a_{(k)} \text{ und} \\ b_{(k+1)} < a_{(k+1)}.$$

Damit ist  $k$  auch gleichzeitig die größtmögliche und damit *effiziente* Anzahl von Transaktionen.

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

Ein gültiger Transaktionspreis  $p$ , zu dem alle  $k$  Transaktionen  $1, \dots, k$  abgewickelt werden, muss

$$a_{(k)} \leq p \leq b_{(k)} \quad (3.1)$$

erfüllen.

Nach McAfee wird hierzu wie folgt verfahren: Sei  $p_0 = 1/2(b_{(k+1)} + a_{(k+1)})$ . Erfüllt  $p_0$  die Bedingung (3.1), so werden die  $k$  möglichen Transaktionen zum Preis  $p = p_0$  abgewickelt. Ist dies nicht der Fall, werden nur die Transaktionen  $(1), \dots, (k-1)$  abgeschlossen. Dabei erhält jeder Verkäufer  $p_a = a_{(k)}$  und jeder Käufer bezahlt  $p_b = b_{(k)}$ . Die Differenz der Preise  $N(b_{(k)} - a_{(k)})$  erhält der Broker (vgl. Abschnitt 3.4.1), der als *Budget Balancer* fungiert.

Wird dieses modifizierte Verfahren angewandt, so zeigt McAfee, dass die dominante Bietstrategie die *ehrliche Angabe der eigenen Wertschätzung* ist, und zwar unabhängig davon, welcher statistischen Verteilung die Wertschätzungen entnommen werden. Dies bedeutet im Sinne eines *Equilibriums*, dass es für den einzelnen Teilnehmer keinen Vorteil bringt, allein von ehrlichen Angaben abzuweichen.<sup>1</sup> Dieser, salopp gesprochen, Zwang zur Ehrlichkeit geschieht allerdings auf Kosten einer geringen Effizienzmindering, indem nämlich ggf. genau eine mögliche Transaktion verworfen wird, obwohl sie (3.1) erfüllt.

Die Anwendung des McAfee-Protokolls scheint jedoch im Licht der hier angestrebten Anwendung angebracht: Ziel soll eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen sein, wobei die Operatoren sich untereinander für das Risiko, Ressourcen temporär abzugeben, entlohnen. Es soll insbesondere kein Spekulationsmarkt für Mobilfunkfrequenzen erzeugt werden. Zudem geht der mögliche Effizienzverlust des Protokolls im Erwartungswert umgekehrt proportional mit der Zahl der Gebote  $(m, n)$  gegen 0 [53].

---

<sup>1</sup>Es existieren nach [53] andere, jedoch degenerierte Equilibria, die allerdings un-plausibles Verhalten aller Teilnehmer voraussetzen.

## 3.4 Implementierung

### 3.4.1 Auktionsdurchführung und Signalisierung

In Abschnitt 3.3 wurden die verschiedenen Rollen von Operator, Broker und Scheduler angedeutet. Anders als bei den Auktionen des Regulierers zur ursprünglichen Frequenzzuteilung werden im hier vorgestellten dynamischen und hierarchischen System, in dem eine Vielzahl von Auktionen über den Tag stattfinden soll, nicht mehr Mitarbeiter der einzelnen Operatoren als Bietagenten in den Auktionen auftreten. Diese Aufgabe übernehmen vielmehr Software-Agenten. Die einzelnen Operatoren betreiben auf ihren eigenen Servern Programme als Bietagenten, die Zugriff auf die aktuellen Zahlen zur Verkehrslast in einem Zuteilungsgebiet haben. Zudem werden sie mit den passenden Verfahren zur Lastschätzung ausgestattet und mit den Preisvorstellungen der Anbieter parametrisiert.

Der Broker ist ein eigenständiger, Operatorübergreifender Software-Agent. Sein Betrieb obliegt entweder dem Regulierer oder aber einem Operator im Auftrag aller Teilnehmer am Auktionssystem. Der Broker übernimmt neben der eigentlichen Abwicklung der Auktionen selbst auch Aufgaben der Protokollierung und Datenaggregation, die schließlich zu Abrechnungszwecken unter den Anbietern benötigt werden.

Die Aufgabe des Schedulers liegt darin, nach jeder Auktion auf Basis der ermittelten quantitativen Zuteilung von Kanälen an die verschiedenen Anbieter die Basisstationen anzuweisen, welche physikalischen Kanäle freizugeben bzw. neu zu belegen sind. Dabei muss der Scheduler zweistufig vorgehen: Erst wenn er von abgebenden Basisstationen die Bestätigung erhalten hat, dass Kanäle für den nächsten Zuteilungszeitraum freigegeben sind, darf er sie beim Empfänger zuteilen. Ebenso achtet der Scheduler darauf, dass die minimale Zahl von Reallokationen stattfindet.

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

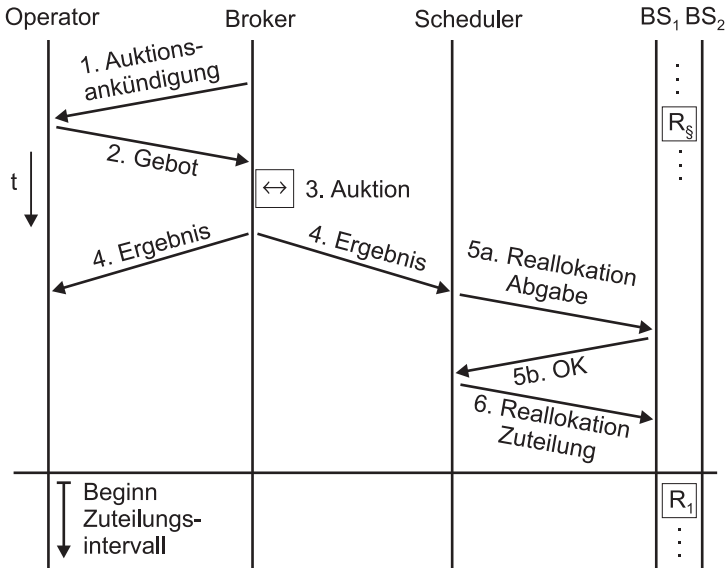
Das Verfahren, um auf einer Ebene der Hierarchie eine Auktion durchzuführen, läuft folgendermaßen ab es ähnelt dabei einem :

1. **Auktionsankündigung:** Der *Broker* teilt den *Operatoren* mit, dass für eine bestimmte Ebene und ein bestimmtes Zuteilungsintervall nun Gebote entgegengenommen werden.
2. **Gebote:** Die *Operatoren* geben die Menge der gewünschten oder angebotenen Ressourcen zusammen mit dem Preis (vgl. Abschnitt 3.3) an den *Broker*.
3. **Auktion:** Der *Broker* führt das Auktionsprotokoll durch und ermittelt somit Preis und neue Zuteilung der Ressourcen.
4. **Ergebnis:** Der *Broker* informiert die *Operatoren* und insbesondere den *Scheduler* über das Ergebnis der Auktionen.
5. **Reallokation – Abgabe:** Der *Scheduler* fordert diejenigen *Basisstationen*, deren *Operatoren* Ressourcen *verkauft* haben, zur Freigabe bestimmter Kanäle für den Verlauf des kommenden Zuteilungsintervalls auf und wartet auf deren Bestätigung.
6. **Reallokation – Zuteilung:** Nach dem Erhalt der Bestätigung aus Schritt 5 erlaubt der *Scheduler* den *Basisstationen* der *Operatoren*, die Ressourcen *gekauft* haben, die Belegung der zuvor freigewordenen Kanäle für den passenden Zeitraum.

Der Ablauf ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt.

Betrachtet man den Inhalt der einzelnen Nachrichten, so sind diese in der Regel kurz und in ihrer Größe nach oben beschränkt. So enthalten z. B. die Gebote in Schritt 2 nur wenige Werte, im Ergebnis nach Schritt 4 muss ausschließlich die neue Allokation sowie der Preis enthalten sein. Somit können alle Bieter durch Vergleich der Allokationen vor und nach der Auktion feststellen, wieviele Ressourcen sie erhalten bzw. abgegeben haben und zu welchem Preis dies geschah. Die Länge der Nachricht ist nicht von der Zahl der tatsächlichen Gebote oder vom Auktionsergebnis abhängig.





**Abbildung 3.5:** Ablauf der Signalisierung für eine einzelne Auktion

Der Signalisierungsablauf für die Zuteilung der Ressourcen an die Basisstationen ist zweistufig; der Datenumfang variiert im Prinzip mit der Zahl der neu zuzuweisenden Kanäle, ist aber dennoch nach oben begrenzt: Zu jedem möglichen Kanal muss letztlich nur eine 3-wertige Information übertragen werden: „unverändert“, „abzugeben“ oder „dazu erhalten.“ Auch hier ist eine dateneffiziente Signalisierung möglich.

#### 3.4.2 Zentraler und dezentraler Ansatz

Das Internet bietet heute in der Regel problemlos die schnelle und sichere Kommunikation unter den jeweiligen Instanzen von Biet- und Broker-Agenten auf verschiedenen, aber zentral geführten Servern der jeweiligen Mobilfunkanbieter. In den Leitzentralen liegen die Verkehrsdaten des eigenen Netzes jeweils vor und im Rahmen der eigenen Server kann jeder Anbieter in sicherer Umgebung Bietstrategie und Preisbildungen vornehmen.

Aufgrund des gewählten Verfahrens der Double Auctions enthält der Gebotsablauf auch keine Iterationen zuvor unbekannter Häufigkeit, da pro Bieter genau einmal ein Gebot abgegeben wird. Ein gegenseitiges Hochbieten ist nicht vorgesehen. Der Ablauf der Signalisierung ist also deterministisch, was besonders unter dem Aspekt der kurzfristigen Allokationen auf der untersten Hierarchieebene wichtig ist.

Bei einer zentralen Durchführung der Auktionen und einer Signalisierung zwischen wenigen Servern über das Backbone-Netz, wie sie hier den Überlegungen zugrunde liegt, hat die zu übertragende Datenmenge in den betrachteten Größenordnungen nur eine nachgeordnete Bedeutung. Andererseits sind auch dezentrale Implementierungen denkbar:

Soll z. B. ein hierarchisches Reallokationssystem nur im Inselbetrieb in wenigen Ballungsräumen eingeführt werden, kann eine lokale Implementierung von Vorteil sein. Die Hardware, auf der die Agenten-Software für Broker, Bieter und Scheduler instantiiert wird, könnte lokal bei den Basisstationen aufgebaut werden. Durch die begrenzte und vom

Umfang deterministische Datenmenge ist dann sogar eine Signalisierung über die Luftschnittstelle nicht ausgeschlossen.

#### 3.4.3 Verhalten bei Signalisierungsfehlern

Die Kommunikation zwischen den Biet- und dem Broker-Agenten kann sehr effizient ausgeführt und leicht gegen Falschübertragungen gesichert werden, da Zahl und Umfang der einzelnen Gebotsnachrichten klein sind und auch die Datenmenge nach oben begrenzt ist. Dennoch kann es, z. B. bei der Signalisierung über die Luftschnittstelle, zu Ausfällen kommen. Dazu zählt hier nicht nur der komplette Ausfall der einzelnen Verbindung oder Nachricht, sondern auch als fehlerhaft erkannte Übertragungen, die aber aus Zeitgründen kurz vor Beginn eines Zuteilungsintervalls nicht nochmals wiederholt werden können.

Zur Sicherheit des gesamten Modells trägt insbesondere der konservative Ansatz der Verfeinerung *gegebener* Allokationen bei. Sollte es zu Ausfällen in der Kommunikation der einzelnen Teilnehmer und Rollen-Instanzen kommen, wird dennoch der Dienst gegenüber den Endnutzern unberührt bleiben.

Mögliche Fehler betreffen:

- Die Ankündigung der Auktion oder die Gebotsabgabe: Erhält ein Teilnehmer die Auktionsankündigung nicht oder kann er nicht bieten, so gilt für ihn die auf der nächsthöheren Hierarchieebene erlangte Zuteilung weiter. Diese ist ja gerade Ausgangspunkt der Auktion, und durch Nichtteilnahme verändert sich an dieser Allokation nichts. Hier liegt der wesentliche Unterschied zu den einseitigen Auktionen, bei denen per se vor der Auktion *keine* definierte Zuteilung existiert.
- Die Signalisierung des Ergebnisses an den Scheduler: Auch hier kann im Fehlerfall eine Reallokation nicht stattfinden. Der Sche-

### 3 Hierarchische Auktionen zur Spektrumszuteilung

duler wird die Zuteilung der nächsthöheren Ebene annehmen bzw. auf die Grundzuteilung durch den Regulierer zurückfallen.

- Die Kommunikation zwischen Scheduler und Basisstation: Erhält eine Station keine Anweisungen zur Zuteilung, wird sie im nächsten Intervall auf die Grundzuteilung zurückfallen. Kann der Scheduler zwar die Abgabe von Kanälen, nicht jedoch die Neuzuteilung dieser Kanäle veranlassen, so kommt es nur für ein Zuteilungsintervall zu einer Unternutzung des Spektrums. Kollisionen und Interferenzen sind aber jederzeit ausgeschlossen. Dennoch wäre dieser Fall der einzige, in dem eine *Verschlechterung* gegenüber der statischen Frequenzzuteilung durch den Regulierer einträte.

Grundsätzlich existiert somit auf allen Ebenen immer eine Rückfall-Zuteilung, sodass letztlich ständig ein Dienst für die Kunden angeboten werden kann. Nur in einem der möglichen Fehlerfälle verschlechtert sich die Situation gegenüber der statischen Zuteilung, fast immer ist aber von einem Erhalt der Mindestdienstgüte auszugehen. Auf Kosten zweier zusätzlicher Schritte könnte auch dieser ungünstige Fall vermieden werden. Setzt man ein aus der Theorie verteilter Transaktionen bekanntes *Two-Phase-Commit*-Protokoll ein, so würden sowohl Abgabe als auch zusätzliche Belegung von Kanälen erst auf eine abschließende Freigabe des Schedulers hin erfolgen. Sollte diese gestört werden, bliebe wiederum die Ursprungsallokation erhalten.

Bei Fehlern, die zeitlich nicht rechtzeitig korrigiert werden konnten, muss dann in den einzelnen Instanzen Protokoll geführt werden, um im Nachhinein die tatsächlich vorliegende Zuteilung nachvollziehen und bei der Abrechnung zwischen den Operatoren berücksichtigen zu können.

## 4 Quantitative Untersuchungen

In diesem Kapitel wird das Konzept zur hierarchischen und dynamischen Zuteilung von Ressourcen durch Auktionen anhand eines Modellszenarios simulativ untersucht und analytisch verifiziert.

Beispielhaft werden in einer einzelnen Mobilfunkzelle drei Ebenen einer Allokationshierarchie betrachtet. Die Hierarchie und die grundsätzlichen Eigenschaften der Operatoren werden in Abschnitt 4.1 erläutert sowie ein statistisches Modell der Verkehrslast hergeleitet (Abschnitt 4.2). Anschließend werden in Abschnitt 4.3 anhand von Simulationen die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Bewertungsgrößen ermittelt und mit dem Fall der statischen Allokation von Ressourcen verglichen. Rechnungen überprüfen die simulierten Ergebnisse in Abschnitt 4.4.

### 4.1 Beispielszenario

#### 4.1.1 Zu modellierende Eigenschaften

Die wesentlichen Parameter, die das Geschehen im betrachteten Szenario beeinflussen, sind zum einen ein Modell der zu erwartenden Daten- oder Verkehrslast, zum anderen die unterschiedlichen Preisvorstellungen für Kauf und Abgabe von Ressourcen für bestimmte Zeiträume.

Das Verkehrsmodell beschreibt auf statistische Weise, welcher Verkehrslast sich jeder Operator im zeitlichen Verlauf gegenübersteht. Die Verkehrslast soll in verallgemeinerter Form als die Anzahl benötigter Ressourcen betrachtet werden. Das verwendete statistische Modell auf der

Basis eines *Random Walks* wird im folgenden Abschnitt 4.2 beleuchtet. Das Preis- oder Wertschätzungsmodell gibt eine Regel vor, nach der die Operatoren die Höhe ihrer Gebote während der Auktionen angeben. Diesem Aspekt widmet sich Abschnitt 4.3.4.

Grundsätzlich soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass die Eigenschaften bezüglich des Verkehrs- und Wertschätzungsmodells bei allen Operatoren den gleichen statistischen Verteilungen genügen. Betrachtet man die Verteilung einzelner Mobilteilnehmer auf bestimmte Operatoren, so ist in erster Näherung nicht anzunehmen, dass sich signifikante Unterschiede im Nutzungsverhalten ergeben. Die Annahme des gleichen Verkehrsmodells erscheint somit gerechtfertigt.

Ebenso werden allen Operatoren die gleichen statistischen Parameter zugeteilt. So werden zwar im Mittel alle Operatoren der gleichen Verkehrslast gegenüberstehen, in jeder einzelnen Simulation werden jedoch gleich zu Beginn unterschiedliche Lasten für jeden Operator per Zufall ermittelt. Wenn nicht anders angegeben, sind die modellierten Eigenschaften der einzelnen Operatoren untereinander unabhängig; dies wird im folgenden Abschnitt 4.2 nochmals diskutiert. Es ist einzuwenden, dass üblicherweise große Operatoren mit vielen Kunden und damit höherer Verkehrslast existieren sowie kleinere Anbieter mit weniger Kunden und damit geringerem Ressourcenbedarf. Dem entgegen steht aber auch die damit einhergehende asymmetrische Anfangszuteilung von spektralen Ressourcen durch den Regulierer. Dadurch wird ein großer Teil der Asymmetrie wieder aufgefangen. Denn für die Teilnahme an Auktionen für Ressourcen sind die Unterschiede zwischen der Zuteilung und dem tatsächlichen Bedarf von Bedeutung, nicht die absolute Menge. Somit können im Weiteren gleiche Verhältnisse für alle Operatoren angenommen werden.

### 4.1.2 Hierarchie mit drei Ebenen

Ausgangspunkt der Allokationshierarchie ist als oberste Ebene die feste – respektive sehr langfristige – Zuteilung der Ressourcen, z. B. durch

den Regulierer. Die Ebene erhält den Index  $\S$  für die weiteren Betrachtungen und wird ggf. auch als  $E\S$  abgekürzt.

Dabei bezeichne nun  $B$  die Zahl der insgesamt im betrachteten Band verfügbaren Ressourcen. Diese besitzen eine Ausgangsallokation an die  $N$  teilnehmenden Operatoren. Es beinhalte in  $\vec{R}_\S$  die Komponente  $R_{\S,i}$  jeweils die für den Operator  $i$  vom Regulierer festgelegte Zahl an Ressourcen vor der Teilnahme an einer Auktion. Der Index  $\S$  zeigt dabei die Allokation auf der obersten Ebene  $E\S$  an. Auf der langfristigen Ebene gilt folglich:  $\sum_{i=1}^N R_{\S,i} = B$ . Auch auf den niedrigeren Ebenen wird diese Eigenschaft beibehalten. Es sind jederzeit alle Ressourcen an die Operatoren zugeteilt und bleiben nicht etwa frei.

Als Ausgangspunkt für die angegebenen Simulationen gilt hier als Zahlenbeispiel, dass  $N = 8$  Anbieter um  $B = 96$  Ressourcen konkurrieren. Als Startallokation  $\vec{R}_\S$  auf Ebene  $E\S$  ergibt sich für alle Operatoren gleichermaßen  $R_{\S,i} = B/N = 12$ . Bei diesen Zahlen wurde auf Teilbarkeit geachtet, sodass nicht durch Verteilung eines Restes ungleichmäßige Zuteilung und damit eine Asymmetrie zwischen den Anbietern entsteht.

Im Tagesverlauf schätzen die Operatoren ihren zu erwartenden Verkehr ein. Dies kann auf Basis der regelmäßigen Tagesverläufe erfolgen und unter Einbeziehung von lokalen oder datumsabhängigen Informationen verfeinert werden. Als Beispiel könnte diese Einschätzung alle 2 Stunden erfolgen. Auf diese Weise lassen sich z. B. die tagesabhängigen Lastspitzen zur Mittagszeit oder der abendlichen Hauptverkehrszeit erfassen. Im Rahmen der Auktion kann dann jeder Anbieter versuchen, eventuellen zusätzlichen Bedarf noch zu decken.

Vor Beginn jedes 2 h-Intervalls wird dann eine Auktion für diesen Zeitraum durchgeführt. Dies geschieht jedes Mal aufs Neue auf Grundlage der langfristigen Allokation  $\vec{R}_\S$ . Würde also ein Anbieter an der aktuellen Auktion nicht teilnehmen, gälte für ihn die langfristige vom Regulierer festgelegte Zuteilung. Nachdem also alle Anbieter ihre Gebote abgegeben haben, wird die neue, mittelfristige Allokation  $\vec{R}_1$  für

Ebene	gültig	Allokation
E§: Langfristig/Regul.	dauerhaft	$\vec{R}_§, R_{§,i} = B/N = \text{const.}$
E1: Mittelfristig	2h	$\vec{R}_1, R_{1,i}$
E0: Kurzfristig	3 min	$\vec{R}_0(s), R_{0,i}(s)$

**Tabelle 4.1:** Die 3 Hierarchieebenen des Beispielszenarios

die Ebene E1 ermittelt. Sie wird im unmittelbar anschließenden 2h-Intervall Gültigkeit besitzen.

Im Verlauf der besagten 2 Stunden jedoch kann zu jedem Zeitpunkt eine kurzfristige Voraussage der Verkehrslast gemacht werden, deren Genauigkeit deutlich über der liegt, die vor der Auktion zwischen E§ und E1 gemacht wurde. Für die kurzfristige Schätzung soll hier ein Zeithorizont im Rahmen einer typischen Telefongesprächsdauer von 3 min angenommen werden. Damit ist das E1-Intervall von 2 Stunden in  $40 =: s_{\max}$  Unterintervalle der kurzfristigen Ebene E0 von je 3 min unterteilt.

Einen Überblick über die vorgestellten Ebenen gibt Tabelle 4.1, die angenommenen Werte zeigt Tabelle 4.2.

Wie schon von der langfristigen zur mittelfristigen Ebene (E§ zu E1) wird auch von E1 zu E0 jeweils kurz vor dem Beginn eines Intervalls eine Auktion durchgeführt. Allerdings diesmal basierend auf der Allokation  $\vec{R}_1$  und den Geboten der Operatoren, die sich nun auf deren genauere Einschätzung der kommenden Verkehrslast stützen können. Die sich nach der  $s$ -ten Auktion für Ebene E0 ergebende Allokation ist dann  $\vec{R}_0(s)$ .

Wie schon in der Konzeption erläutert, basiert *jede* Auktion auf einer bestimmten Ebene immer wieder neu auf der Allokation der darüberliegenden, gröber aufgelösten Ebene, wie sie kurz vor Beginn des jeweiligen Zeitintervalls gefunden wurde. So wird also auch bei der 40. Auktion von der Ebene 1 eine neue Allokation  $\vec{R}_0(40)$  auf Basis von  $\vec{R}_1$



Parameter	Zeichen	Wert
Anzahl der Operatoren	$N$	8
Verfügbare Ressourcen	$B$	96
Ausgangsallokation	$R_{\S,j}=B/N$	12
E0-Intervalle pro E1-Intervall	$s_{\max}$	40

**Tabelle 4.2:** Zahlenwerte für die Simulationen

ermittelt und nicht etwa auf Bases der Zuteilung  $\vec{R}_0(39)$  des vorhergehenden 3 min-Intervalls.

Auf diese Weise ist sichergestellt, dass jederzeit eine für den Operator sicher vorhersagbare Allokation existiert: Würde ein bestimmter Operator  $i$  ab einem beliebigen Zeitpunkt nicht mehr an den Auktionen teilnehmen, gilt für ihn bis zum Ende des gerade laufenden 3 min-Intervalls die derzeitige Zuteilung  $R_{0,i}(s_0)$ , danach bis zum Ende des 2 h-Zeitraums die vorige Zuteilung  $R_{1,i}$  und danach die ursprüngliche, feste Zuteilung  $R_{\S,i}$ . Formal nähme Anbieter  $i$  an allen folgenden Auktionen ohne Gebot teil und es gilt, in Bezug auf die anderen Operatoren, jederzeit implizit  $R_{0,i}(s) = R_{1,i} = R_{\S,i}$ . Abschnitt 4.3.3 widmet sich dem Fall, dass für Ebene E0 von dieser Regel abgewichen wird.

## 4.2 Verkehrsmodell und Random Walk

### 4.2.1 Motivation des Modells

Für die stochastische Modellierung der Verkehrslast ergeben sich aus den vorhergehenden Diskussionen folgende Anforderungen:

- Das Modell soll für kurzfristige Betrachtungen der Verkehrslast gut vorhersagbar sein, für längerfristige Betrachtungen kann es eine höhere Unsicherheit aufweisen. Dies berücksichtigt die Tatsache, dass vor der Auktion zu E1 ein Anbieter die zu erwartende

Last für die folgenden 2 Stunden grob schätzen muss, um ein Gebot abzugeben. Im Verlauf dieser Zeit muss dann vor jeder E0-Auktion erneut zur Gebotsabgabe eine kurzfristige, damit aber genauere Schätzung erfolgen.

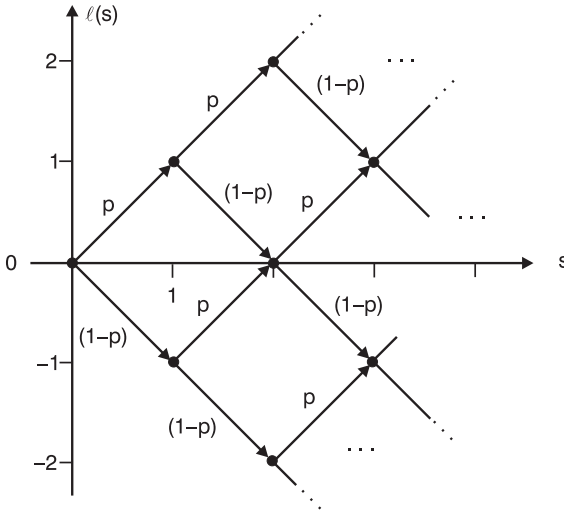
- Das Modell soll analytisch insoweit handhabbar sein, als auch Aussagen ohne Monte-Carlo-Simulationen möglich sein sollen.
- Das Modell soll aber dennoch einen Bezug zu realen Systemen aufweisen.
- Das Modell gibt ganzzahlige Werte als Anzahl der benötigten Ressourcen zurück.

### Kurzfristige Variation

Für die weiteren Betrachtungen wird nun auf ein einzelnes E1-Intervall und die darin enthaltenen  $s_{\max}$  E0-Abschnitte eingegangen. Ein Zufallsprozess ist dann Kandidat für ein Verkehrsmodell, wenn dessen Vorhersagbarkeit mit der Zeit abnimmt, seine grobe Beschreibung aber dennoch zutreffend bleibt.

Als „grobe Beschreibung“ ist der Erwartungswert des Prozesses geeignet. Er sollte sich auch während einer gewissen Zeit nicht ändern. Im hiesigen Modell wird also angenommen, dass eine Schätzung der mittleren Verkehrslast für die 2 Stunden des kommenden E1-Intervalls zutrifft. Setzt man in der Simulation den Erwartungswert gleich der angenommenen Schätzung eines Anbieters über die mittlere Verkehrslast während des E1-Zeitraums, so wird der Operator *im Mittel* eine zutreffende Schätzung abgeben haben.

*Im speziellen Verlauf* einer einzelnen Realisierung sollte aber die Abweichung des Verkehrsmodells vom Erwartungswert mit der Zeit zunehmen. Auf diese Weise wird deutlich, dass auf kurzfristige Sicht auf Ebene E0 durchaus Nachjustierungen in der Schätzung und damit der Allokation mit dem Fortschreiten über die E0-Intervalle  $1, \dots, s_{\max}$



**Abbildung 4.1:** Übergangswahrscheinlichkeiten des Random Walks

vonnöten sein werden. Hier ist also von einer zeitabhängigen *Varianz* die Rede.

Ein wohlbekanntes Beispiel für einen solchen Prozess mit konstantem Erwartungswert und wachsender Varianz ist der (eindimensionale) *Random Walk*, auch „Irrfahrt“ [18, 41, 60], der in dieser Arbeit zur Anwendung kommt. Ausgehend von einem Startwert wird der Wert der Zufallsvariablen in jedem Schritt mit gleicher Wahrscheinlichkeit  $p = 0,5$  entweder um 1 erhöht oder um 1 vermindert. Als Zufallsvariable wird also die Entfernung  $L(s)$  vom Startwert nach einer diskreten Zahl  $s$  von Schritten betrachtet. Hier kann zunächst der Startwert zu 0 angenommen werden; die Veränderung pro Schritt, wie eben schon beispielhaft verwendet, zu 1. Die Entscheidung über die Richtung der Veränderung erfolgt von Schritt zu Schritt unabhängig.

Lässt man bei einem Random Walk den zeitlichen Abstand der einzelnen Schritte gegen Null konvergieren und gleichzeitig die Änderung

pro Schritt gegen eine differentielle Änderungsrate, so erhält man den WIENER-Prozess, der in 3-dimensionaler Ausprägung Anwendung bei der BROWN'schen Teilchenbewegung findet.

Der Random Walk bildet im hier gezeigten Verkehrsmodell den Teil der Verkehrslast ab, der sich von E0-Intervall zu E0-Intervall verändert. Untersuchungen realer Nutzungsdaten in Mobilfunknetzen zeigen, dass ein Random-Walk-Modell für die kurzfristige Modellierung gut geeignet ist [70].

Zu beachten ist jedoch, dass die Varianz von  $L(s)$  mit größer werden dem  $s$  unbeschränkt anwächst. Das Random-Walk-Modell kann also nicht für beliebig lange Zeit angewendet werden. In der Realität ist nicht zu erwarten, dass sich die Verkehrslast unabhängig von anderen Einflüssen in Richtung potentiell unbeschränkt großer Werte bewegen wird. Dem wird Rechnung getragen, indem zur Modellierung der Verkehrslast eine Realisierung eines Random Walks nur im begrenzten Verlauf der  $s_{\max}$  E0-Schritte während eines Intervalls der Ebene 1 zur Anwendung kommt.

### Startwert

Für den langfristigen Verlauf der Verkehrslast über den Tag und über die Woche zeigen z. B. Messungen über die spektrale Auslastung von Mobilfunkfrequenzen wiederkehrende Muster [6, 5]. Es ist davon auszugehen, dass sich die Operatoren in dieser zeitlichen Auflösung mit ähnlichen Auslastungsmustern konfrontiert sehen. Nimmt man dies mit der Modellannahme zusammen, dass sich die gesamte mittlere Last gleichmäßig auf alle Operatoren verteilt, so kann für jeden Operator im Verkehrsmodell die mittlere zu erwartende Last für einen bestimmten Zeitraum auf Basis der gleichen Statistik bei gleichen Parametern ermittelt werden. Hier ist dieser Zeitraum ein E1-Intervall.

Dieser Schätzwert zwischen den Operatoren soll „ähnlich“ aber dennoch zufällig sein. Da einerseits für die Abweichungen der Operatoren untereinander auf längere Sicht keine besonderen Annahmen gemacht

werden können, wurde hier auf die GAUSS-Verteilung zurückgegriffen. Dabei wurde für jeden der  $N$  Operatoren als Erwartungswert  $\mu = D/N$  gewählt.  $D$  wird dabei in erster Näherung als die mittlere Verkehrslast im gesamten Netz betrachtet und als Parameter vorgegeben. Diese Last wird symmetrisch auf die Operatoren verteilt. Aufgrund des weiteren Vorgehens bei der Modellierung ist  $D$  nicht exakt die mittlere Last; dies wird im Abschnitt 4.2.2 genauer dargestellt. In Anlehnung an die im Zusammenhang mit Verkehrsmodellierung häufig anzutreffende POISSON-Verteilung wurde die Varianz der GAUSS-Verteilung auf  $\sigma_1^2 = \mu = D/N$  gelegt, sodass  $D$  der einzige freie Parameter im Modell der Verkehrslast bleibt.

Damit bleibt hier nur noch ein Parameter, nämlich  $D$ , als Freiheitsgrad, sodass das System hinsichtlich seines Verhaltens in Abhängigkeit von der angebotenen Last untersucht werden kann.

### Kombiniertes Modell

Die Bestimmung der Verkehrslast jedes Anbieters erfolgt nun, indem eine mittlere Last  $d_1$  für ein Intervall der Ebene E1 als Startwert eines Random Walks ermittelt wird, der diesen Wert vor jedem E0-Abschnitt nach oben oder unten anpasst. Der so erhaltene Wert  $d_0(s)$  bildet dann den tatsächlichen Bedarf eines Operators an Ressourcen ab.

Die einzelnen Schritte sind für jeden Operator unabhängig von den anderen die Folgenden:

1. Gib  $D$  vor.
2. Bestimme ein

$$\tilde{d}_1 \sim \mathcal{N}(D/N, D/N). \quad (4.1)$$

Runde diesen kontinuierlichen Wert auf die nächste ganze Zahl und beschränke nach unten durch 0, da es keine negative Verkehrslast gibt. Die Begrenzung nach oben durch  $B$  trägt dem

maximalen Angebot Rechnung.

$$d_1 = \begin{cases} 0 & \tilde{d}_1 < 0,5 \\ \text{runden}(\tilde{d}_1) & 0,5 \leq \tilde{d}_1 < B - 0,5 \\ B & \tilde{d}_1 \geq B - 0,5 \end{cases} \quad (4.2)$$

3. Für jedes  $s = 1, \dots, s_{\max}$  addiere die Realisierung eines Random Walks  $l(s)$  zum Startwert.

$$\tilde{d}_0(s) = d_1 + l(s) \quad (4.3)$$

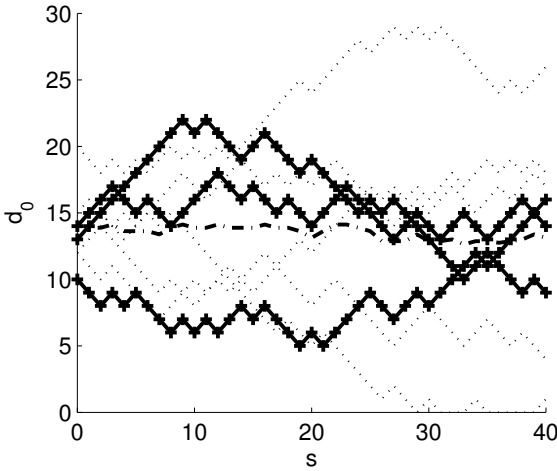
4. Beschränke den Bedarf  $d_0(s)$  nach unten durch 0, da es keine negative Verkehrslast gibt. Nach oben soll der Bedarf nicht größer sein als die Zahl der verfügbaren Ressourcen  $B$ .

$$d_0(s) = \begin{cases} 0 & \tilde{d}_0(s) \leq 0 \\ d_0(s) & 0 < \tilde{d}_0(s) < B \\ B & \tilde{d}_0(s) \geq B \end{cases} \quad (4.4)$$

Einige Beispielrealisierungen  $d_0(s)$  sind in Abbildung 4.2 gegeben, es gilt  $\mu = \sigma_1^2 = 100/8 = 12,5$ . An der unteren der drei hervorgehobenen Realisierungen ist deutlich die Begrenzung auf  $d_0(s) \geq 0$  zu erkennen. In etwa auf Höhe von  $\mu = 12,5$  ist der Mittelwert aller acht gezeigten Realisierungen eingezeichnet.

Der Wert  $d_1$  dient dann in der Auktion vor Beginn einer Ebene-E1-Auktion dem jeweiligen Operator als Schätzwert seiner zu erwartenden Verkehrslast und wird für die Bildung der Gebote herangezogen. Ebenso wird er vor der  $s$ -ten Ebene-E0-Auktion zur Ermittlung seines Bedarfs oder Überschusses den Wert als  $d_0(s)$  als Schätzung annehmen.

Für die Ermittlung der Vergleichsgrößen während der Simulation wird angenommen, dass die Größen  $d_0(s)$  auch gleichzeitig der dann tatsächlich aufgetretenen Verkehrslast entsprechen, die Schätzungen auf



**Abbildung 4.2:** Hervorgehoben 3 von 8 Beispielrealisierungen von  $d_0(s)$ . Der Mittelwert aller 8 ist gestrichelt eingezeichnet.

der Ebene  $E_0$  also zutreffend waren. Auf Ebene  $E_1$  hingegen, gesehen als Mittel über das Gruppenintervall, ist aufgrund der hier verwendeten Länge des Random Walks von  $s_{\max} = 40$  die Schätzung zwar im Erwartungswert richtig, der über eine Realisierung  $d_0(s)$  gebildete Mittelwert allerdings auch mit signifikanter Wahrscheinlichkeit nicht exakt gleich dem Startwert. Dies zeigt, dass die längerfristige Schätzung  $d_1$  nur im Mittel zutreffend ist, aber im Einzelfall Unsicherheit über den Verlauf bestehen bleibt.

Im oben angegebenen Verfahren zur Erzeugung des Verkehrsmodells können in Zwischenschritten negative Werte entstehen, die in Schritt 4 abgeschnitten werden. Betrachtet man den Random Walk in Bezug auf eine Verkehrslast, so erwartet man eher, dass die Verkehrslast in einem Moment, in dem sie gerade 0 ist, im nächsten Schritt mit Wahrscheinlichkeit  $p = 0,5$  wieder steigt, unabhängig von der Vergangenheit. Dies ist im gewählten Modell nicht der Fall: Sollte der Random Walk zuvor mehrere Schritte in Richtung negative Zahlen gemacht haben, wird die

Wahrscheinlichkeit, im nächsten Schritt über die 0 zu kommen, kleiner werden.

Betrachtet man Spezialfälle des Random Walks, die bei 0 eine gedachte Barriere haben, so kann man u. a. danach unterscheiden [60], wie sich die Wahrscheinlichkeit  $p_{01} = P(l(s+1) = 1 | l(s) = 0)$ , dass der Zustand  $l(s) = 0$  wieder verlassen wird, darstellt. Mit  $p_{00} = 1 - p_{01}$  bleibt der Random Walk im Zustand 0. Für  $p_{01} = 0$  spricht man von einer „absorbierenden Grenze“, für  $p_{01} = 0,5$  von einer teil- und für  $p_{01} = 1$  von einer totalreflektierenden Grenze.

Dennoch wurde für das Modell hier nicht der eben angedeutete teilreflektierende Fall gewählt, sondern der angegebene Weg, negative Werte nullzusetzen. Obwohl dieser Fall nicht durch einen Wert von  $p_{01}$  auszudrücken ist, lässt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $L(s)$  im gewählten Fall angeben, während sie im teilreflektierenden Fall nicht geschlossen darstellbar ist. Vergleichende Simulationen zeigen jedoch, dass bei den gewählten Parametern der Unterschied beider Methoden in Bezug auf die Bewertungsgrößen nach Abschnitt 4.3.1 nicht signifikant ist.

### 4.2.2 Statistik des gewählten Modells

In diesem Abschnitt wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Bedarfs  $D_0(s)$  eines Operators betrachtet. Diese Verteilung wird später verwendet, um die simulativen Ergebnisse analytisch zu überprüfen.

#### Startwert

Der Startwert  $\tilde{d}_1(s)$  folgt nach (4.1) einer Normalverteilung  $\mathcal{N}(\mu = D/N, \sigma_1^2 = D/N)$ . Die Wahrscheinlichkeitsdichte einer solchen Verteilung



lung ist

$$f_{\mathcal{N}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_1^2}\right). \quad (4.5)$$

Die Verteilungsfunktion

$$\begin{aligned} F_{\mathcal{N}}(t) &= \int_{-\infty}^t f_{\mathcal{N}}(x) \, dx \\ &=: \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma_1}\right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

kann nicht geschlossen berechnet werden, liegt jedoch als  $\Phi(t)$  für die Parameter  $\mu = 0, \sigma_1 = 1$  tabelliert vor.

Die Verteilung der durch Rundung und Zusammenfassung in (4.2) entstandenen Zufallsvariable  $D_1$  lässt sich mit (4.6) wie folgt angeben:

$$P_{D_1}(k) = \begin{cases} 0 & k < 0 \\ \Phi\left(\frac{0,5-\mu}{\sigma_1}\right) & k = 0 \\ \Phi\left(\frac{k+0,5-\mu}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(\frac{k-0,5-\mu}{\sigma_1}\right) & 1 \leq k < B \\ 1 - \Phi\left(\frac{B+0,5-\mu}{\sigma_1}\right) & B. \end{cases} \quad (4.7)$$

## Random Walk

Der zweite Teil des Verkehrsmodells besteht aus dem Random Walk. Beginnend beim Ausgangspunkt wird für jeden Schritt mit gleicher Wahrscheinlichkeit  $p = 0,5$  entweder 1 addiert oder subtrahiert. Nach  $s$  Schritten gibt die Zufallsvariable  $L(s)$  die Entfernung vom Ausgangspunkt an, also die Summe der einzelnen, voneinander unabhängigen Entscheidungen für eine Laufrichtung.

Die Verteilung von  $L(s)$  kann mithilfe der Binomial-Verteilung angegeben werden [18]. Diese gibt die Summe  $X(s)$  von  $s$  unabhängigen BERNOULLI-Experimenten mit den zwei Möglichen Ausgängen  $\{0, 1\}$  an, wobei allgemein gilt:  $P(0) = p$ ,  $P(1) = 1 - p$ . Für  $p = 0,5$  gilt

$$P_{X(s)}(l) = \binom{s}{l} p^l (1-p)^{s-l} = \binom{s}{l} 2^{-s} := B(l|s, 0,5) \quad (4.8)$$

mit der Varianz

$$\text{var}(B(l|s, 0,5)) = \frac{s}{4}. \quad (4.9)$$

Für den Random Walk muss die Ergebnismenge von  $\{0, 1\}$  zu  $\{-1, 1\}$  transformiert werden, was sich für  $L(s)$  folgendermaßen darstellt:

$$P_{L(s)}(l) := B\left(\frac{l+s}{2} | s, 0,5\right) \quad (l+s) \text{ gerade.} \quad (4.10)$$

Durch die Transformation ist aber für gerade  $s$  die Verteilung nur für gerade  $l$  von Null verschieden, für ungerade  $s$  nur für ungerade  $l$ . Es ergibt sich:

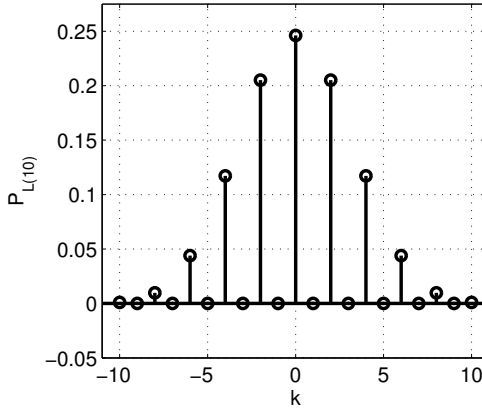
$$P_{L(s)}(l) = \begin{cases} B\left(\frac{l+s}{2} | s, 0,5\right) = \binom{s}{\frac{l+s}{2}} 2^{-s} & (l+s) \text{ gerade} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.11)$$

Die Varianz stellt sich nach der Transformation als  $\text{var}(L(s)) = s$  dar und steigt mit der Zahl der Schritte. Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft die Verteilung  $P_{L(10)}(l)$  nach 10 Schritten: Es sind nur geradzahlige Entfernungen vom Ausgangspunkt möglich.

### Kombination

Im nächsten Schritt wird die Summe aus dem Startwert und der Länge des Random Walks gebildet,

$$\tilde{D}_0(s) = D_1 + L(s), \quad (4.12)$$



**Abbildung 4.3:** Verteilung der Länge  $L(s)$  eines Random Walks nach  $s = 10$  Schritten.

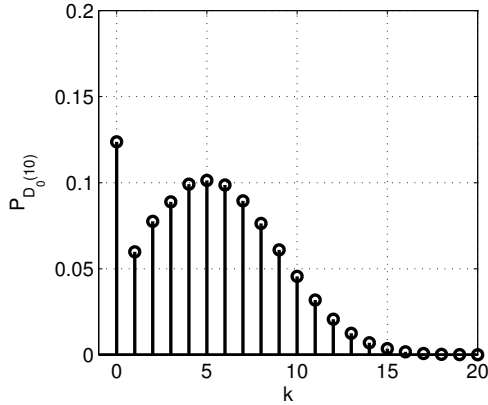
wobei  $\tilde{D}_0(s)$  noch negative Werte annehmen kann. Da bereits  $P_{D_1}(k)$  auf numerischen Näherungen beruht, sollen hier und im Folgenden nur noch die Rechenvorschriften für die Verteilungen angegeben werden. Die später dargestellten analytischen Ergebnisse greifen auf diese Verteilungen zurück. Im Gegensatz dazu beruhen die simulierten Ergebnisse auf Monte-Carlo-Simulationen vieler Realisierungen des Verkehrsmodells und des Auktionsablaufs.

Für die Verteilung der Summe zweier unabhängiger Zufallsvariablen gilt

$$P_{\tilde{D}_0(s)}(k) = (P_{D_1} * P_{L(s)})(k) \tag{4.13}$$

$$= \sum_{n=-s}^s P_{D_1,j}(n) \cdot P_{L(s)}(k - n), \tag{4.14}$$

also die Faltung der Verteilungen der Summanden. Die gesuchte Verteilung  $P_{D_0(s)}(k)$  ergibt sich schließlich durch Begrenzung des Werte-



**Abbildung 4.4:** Verteilung der Last  $D_0(10)$  eines Nutzers nach  $s = 10$  Schritten;  $\mu = \sigma_1^2 = 5$ .

bereichs auf das Intervall  $\{0, \dots, B\}$ :

$$P_{D_0(s)}(k) = \begin{cases} \sum_{i=-s}^0 P_{\tilde{D}_0(s)}(i) & k = 0 \\ P_{\tilde{D}_0(s)}(k) & 1 \leq k < B \\ \sum_{i=B}^{B+s} P_{\tilde{D}_0(s)}(i) & k = B \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.15)$$

Für  $s = 10$  sowie  $\mu = \sigma_1^2 = 5$  ist in Abbildung 4.4 eine beispielhafte Verteilung gezeigt.

Für die gesamte im System vorhandene Last  $D_{0,N}(s)$  kann die Verteilung dann wie oben angegeben aus der  $N$ -fachen Faltung von  $P_{D_0(s)}(k)$  mit sich selbst errechnet werden:

$$P_{D_{0,N}(s)}(k) = \{P_{D_0(s)} * P_{D_0(s)} * \dots\}^N(k). \quad (4.16)$$

Dieser Zusammenhang gilt nur, weil angenommen wird, dass die Verkehrslast der Operatoren untereinander unabhängig ist.

## Mittlere Last

Im Modell der Verkehrslast auf Ebene E1 wurde für jeden Operator  $\mu = D/N$  gesetzt, was dem Erwartungswert der verwendeten Normalverteilung entspricht. Der Random Walk mit Ausgangspunkt 0 ist mittelwertfrei und würde bei Addition zu einer anderen Zufallsvariablen deren Erwartungswert nicht ändern. Aufgrund der Begrenzung des Bedarfs eines Operators im Modell auf das Intervall  $D_0(s) \in \{0, \dots, B\}$  werden allerdings die bis dahin symmetrischen Verteilungen verzerrt, vgl. dazu Abbildung 4.4 an der Stelle  $k = 0$ . Der Erwartungswert der Verkehrslast verschiebt sich nach oben.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist indes nicht der Parameter  $D/N$ , sondern die mittlere angebotene Verkehrslast im Vergleich zur Netzkapazität  $B$  interessant.

Aus der Verteilung  $P_{D_0(s)}(k)$  lässt sich der mittlere Bedarf pro Operator berechnen. Es gilt nach einer bestimmten Anzahl von Schritten  $s$  durch Erwartungswertbildung:

$$\bar{D}_0(s) := E_k\{D_0(s)\} = \sum_{k=0}^B k \cdot P_{D_0(s)}(k). \quad (4.17)$$

Durch weitere Mittelung über alle Iterationsschritte der untersten Ebene E0 und durch Multiplikation mit der Anzahl der Operatoren  $N$  findet man die mittlere Verkehrslast im Netz

$$\bar{D}_{0,N} = \frac{N}{s_{\max}} \cdot \sum_{s=1}^{s_{\max}} \bar{D}_0(s) \quad (4.18)$$

und damit die gesuchte relative Last

$$D_{\text{rel}} := \frac{\bar{D}_{0,N}}{B}. \quad (4.19)$$

## 4.3 Simulationen im 3-Ebenen-Szenario

### 4.3.1 Bewertungsgrößen

Mit dem erarbeiteten Verkehrsmodell kann nun im Modellszenario aus Abschnitt 4.1 die Wirkungsweise des vorgeschlagenen hierarchischen Auktionssystems simulativ untersucht werden. Das Augenmerk liegt dabei einmal auf Seiten des Gesamtsystems, um zu beurteilen, ob es für den Regulierer sinnvoll ist, die dynamische Reallokation zuzulassen. Auf der anderen Seite steht die Fragestellung, ob es für jeden einzelnen Operator vorteilhaft ist, sich am Handel mit Ressourcen zu beteiligen.

#### Perspektive des Gesamtsystems

Aus Sicht des Regulierers ist eine effiziente Nutzung der Mobilfunkressourcen wünschenswert. Als Bewertungsgröße wird also zunächst die *Netzauslastung* eingeführt: Welcher Anteil der Ressourcen wird tatsächlich durch Verkehrslast verwendet? Dazu wird für jeden Operator die momentane Verkehrslast  $D_0(s)$  mit seiner aktuellen Allokation verglichen, das Ergebnis sodann auf die verfügbaren Ressourcen bezogen und für alle Operatoren zusammengefasst:

$$U_E(s) = \frac{\sum_{i=1}^N \max(D_{0,i}(s), R_{E,i}(s))}{B} \quad E \in \{\S, 1, 0\}. \quad (4.20)$$

Die Maximumbildung überführt die Verkehrslast dabei in die Zahl der tatsächlich benutzten Ressourcen unter der Annahme, dass jeder Operator so viel seiner Verkehrslast auch tatsächlich bedient, wie ihm Ressourcen zur Verfügung stehen.

Zu Vergleichszwecken wird die Größe  $U(s)$  auf allen 3 Hierarchiestufen  $E_\S$ ,  $E_1$  und  $E_0$  berechnet, immer jedoch mit der tatsächlichen Verkehrslast  $D_0(s)$ . Die Ebene  $E_\S$  mit der Netzauslastung  $U_\S(s)$  betrachtet also den Fall statischer Zuteilung und steht damit für den Status Quo.

$U_0(s)$  betrachtet die Netzauslastung, wie sie bei vollständiger Anwendung des vorgeschlagenen Auktionssystems auf der Ebene E0 durch die Allokation  $\vec{R}_0(s)$  aufträte. Die Betrachtung von  $U_1(s)$  auf der mittleren Ebene erlaubt die Beurteilung des Nutzens einer Reallokation  $\vec{R}_1$  auf längerfristiger Basis, ohne jedoch den kurzfristigen Variationen in der Verkehrslast Rechnung zu tragen.

Die Darstellung der Netzauslastung kann auch auf die ungenutzten Ressourcen fokussiert werden: Die Verbesserung der Nutzungseffizienz wird durch  $U_E^+(s)$  beschrieben, und zwar als Anteil der im statischen Fall auf Ebene E§ ungenutzten Ressourcen, der allein durch Reallokationen unter den Operatoren, wiederum bei gleicher Verkehrslast, auf den Ebenen E1 und E0 doch noch aufgefüllt werden konnte. Dazu bildet man die folgende Größe:

$$U_E^+(s) = 1 - \frac{1 - U_E(s)}{1 - U_{\S}(s)}, \quad E \in \{1, 0\}. \quad (4.21)$$

Je nach Darstellung werden zudem  $U_E(s)$  und  $U_E^+(s)$  noch über alle E0-Intervalle  $s$  gemittelt, um die Gesamtsituation beurteilen zu können. Als grundlegender variabler Simulationsparameter dient immer die angebotene Verkehrslast  $D_{\text{rel}}$ , die in den Formeln und Bezeichnungen nur indirekt in der Verkehrslast  $D_0(s)$  vorkommt. Für jede Verkehrslast wird ein eigener Wert von  $U_E(s)$  bzw.  $U_E^+(s)$  bestimmt.

### Perspektive eines Operators

Aus der Sicht eines einzelnen Operators ist vordringlich von Interesse, ob die ihm zur Verfügung stehenden Ressourcen zur Bedienung der durch seine Kunden erzeugten Verkehrslast ausreichen. Für die Untersuchungen hier soll der für einen Operator zunächst ungünstige Fall von *Überlast* betrachtet werden.

Eine Überlastsituation bei einem Operator tritt dann auf, wenn sein aktueller Bedarf  $D_0(s)$  zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht durch

seine Allokation  $R_E(s)$  gedeckt ist:

$$D_0(s) > R_E(s). \quad (4.22)$$

Als Bewertungsgröße wird zunächst die *Überlastwahrscheinlichkeit* eines Operators definiert:

$$P_{\dot{U},E}(s) = P(D_0(s) > R_E(s)), \quad E \in \{\$, 1, 0\}. \quad (4.23)$$

An dieser Stelle bezeichnet  $P_{\dot{U},E}(s)$  die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Ressource zu wenig allokiert ist, um die Verkehrslast zu bedienen. Es handelt sich also um eine harte Entscheidung, ob überhaupt eine Überlastsituation auftritt oder nicht.

Da  $P_{\dot{U},E}(s)$  allerdings noch keine Aussage über die Menge der Überlast macht, wird zudem der *Anteil der nicht bedienten Last*  $V_E(s)$  eingeführt. Er quantifiziert die Menge der Verkehrslast, die aufgrund der unzureichenden Allokation verworfen werden musste:

$$V_E(s) = \begin{cases} \frac{D_0(s) - R_E(s)}{D_0(s)} & D_0(s) > R_E \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.24)$$

Wie schon für  $U_E(s)$  und  $U_E^+(s)$  gilt auch für  $P_{\dot{U},E}(s)$  und  $V_E(s)$  jeweils noch der implizite Parameter  $D_{\text{rel}}$  der angebotenen Verkehrslast sowie die mögliche Mittelung über die E0-Intervalle  $s$ . In Abschnitt 4.4 werden die hier gezeigten Bewertungsgrößen unter stochastischen Gesichtspunkten nochmals behandelt.

### 4.3.2 Untersuchungen bei idealer Reallokation

Im ersten Schritt der simulativen Untersuchungen wird das Szenario aus Abschnitt 4.1 im Hinblick auf die Bewertungsgrößen umfassend untersucht. In den darauffolgenden Abschnitten wird dann der Einfluss einzelner Aspekte des Szenarios genauer beleuchtet.



Dabei wird zunächst eine weitere idealisierende Annahme betreffend die Wertschätzungen der einzelnen Operatoren für ge- und verkaufte Ressourcen eingeführt: Alle Auktionsteilnehmer messen ihren Ressourcen den gleichen Wert bei und bieten identisch. Ebenfalls sollen keine möglichen Transaktionen ausgelassen werden, wie es der Auktionsmechanismus in Spezialfällen (vgl. Abschnitt 3.3) vorsieht.

Diese Annahme hat zwei Auswirkungen: Zunächst wird immer die maximale Zahl an möglichen Transaktionen durchgeführt. Keine Reallokation von Ressourcen wird nur wegen der unterschiedlichen Gebotshöhe ausgeschlossen. Im Hinblick auf die Ressourcennutzung wird eine optimale Auslastung erzielt. Die hier gemachte Annahme bildet also einen Idealfall ab, der eine obere Schranke für die Vorteile durch ein Auktionssystem darstellt.

Zudem führt diese Annahme zu einer Egalisierung der einzelnen Operatoren in Bezug auf ihre Überlastsituation. Keiner von ihnen erreicht durch höhere Gebote einen Vorteil. Entsteht bei einer Auktion ein Überangebot oder eine Übernachfrage, so werden die Transaktionen zufällig aus den Geboten gewählt. Nachteile aus nicht bedienten Geboten werden durch den Auktionsmechanismus gleichmäßig unter allen Operatoren verteilt. Für die hier gemachten Betrachtungen müssen Teilnehmer also nicht mehr unterschieden werden, da bei den angenommenen symmetrischen Ausgangsbedingungen auch für alle im Mittel die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind. Der Einfluss *unterschiedlicher* Wertschätzungen wird in Abschnitt 4.3.4 näher betrachtet.

#### **Auslastung**

Zunächst ist in Abbildung 4.5 der Anteil der genutzten Ressourcen  $U_E$  nach (4.20) in Abhängigkeit von der mittleren angebotenen Verkehrslast  $D_{\text{rel}}$  (4.19) dargestellt. In Zeitrichtung wurde über alle  $s_{\text{max}} = 40$  E0-Intervalle gemittelt. Insgesamt wurden je zwischen 2500 und 50 000 E1-Intervalle simuliert. Für die meisten Darstellungen kann zudem

über alle 8 teilnehmenden Operatoren der Mittelwert gebildet werden.

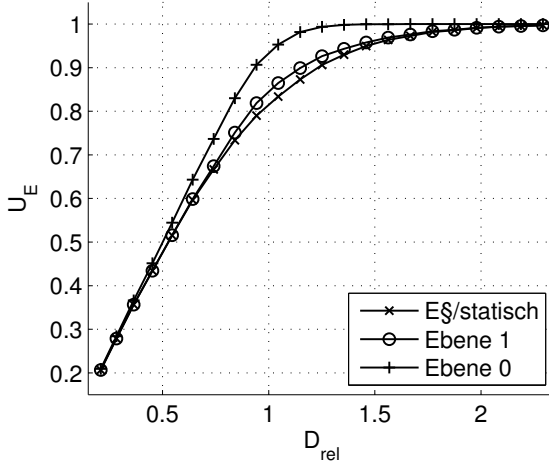
Zum Vergleich mit dem Fall statischer Zuteilung ist zunächst die Kurve für die Ebene E<sub>§</sub> eingezeichnet (×). Die feste Allokation  $\vec{R}_§$  wurde der Verkehrslast  $d_{0,i}(s)$  der jeweiligen Operatoren gegenübergestellt und die Auslastung ermittelt.

Darüberliegend folgt die Kurve für die Ebene E1 (○), wobei vor jedem E1-Intervall einmalig eine Auktion basierend auf dem Startwert des Random Walks  $d_{1,i}$  nach (4.2) durchgeführt wurde. Das Ergebnis ist die Allokation  $\vec{R}_1$ , die sodann wieder mit der Last  $d_{0,i}(s)$  verglichen wurde. Erst dann wurde über  $s$  gemittelt.

Die dritte Kurve (+) schließlich zeigt den Fall einer dynamischen Zuteilung auf Ebene E0. Jeweils vor einem E0-Intervall und basierend auf der Allokation  $\vec{R}_1$  wurde eine Auktion durchgeführt. Die Operatoren setzen als Schätzwert für ihre Gebote jeweils die aktuelle Last  $d_{0,i}(s)$ , die dann auch zu der sich ergebenden Allokation  $\vec{R}_0(s)$  in Beziehung gesetzt wird.

Alle drei Kurven zeigen einen charakteristischen Verlauf: Für kleine Werte der Gesamtlast, also in etwa für weniger als die halbe Kapazität an Ressourcen,  $D_{\text{rel}} < 0,5$ , konnte in fast allen Fällen die angebotene Verkehrslast auch bedient werden. Die Auslastung entspricht in etwa der angebotenen Last, und zwar unabhängig davon, ob eine Reallokation stattfand oder nicht. Für große Verkehrslast deutlich über der Ressourcenkapazität, also für Werte von  $D_{\text{rel}} > 1$ , nähern sich die Werte der Vollauslastung. Da ohnehin jeder Operator viel mehr Ressourcen nutzen könnte als ihm tatsächlich zur Verfügung stehen, wird keine der Ressourcen ungenutzt bleiben.

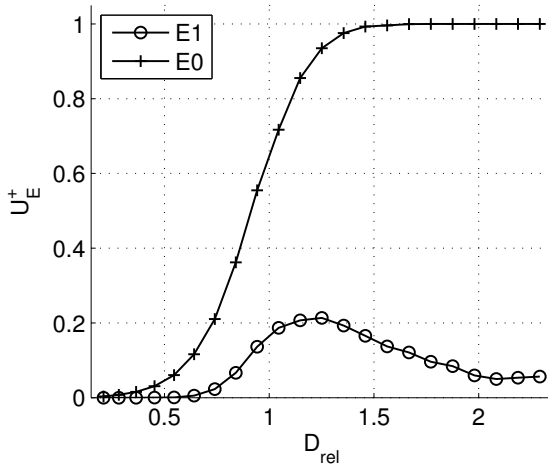
Grundsätzlich stellt sich durch die dynamische Reallokation im Mittel keine Verschlechterung der Auslastung des Netzes im Vergleich zur statischen Allokation ein. Dies ist einleuchtend, da kein Operator Ressourcen in einer Auktion zum Verkauf anbieten wird, wenn er entsprechende Verkehrslast zu erwarten hat. Selbstverständlich kann in einzelnen



**Abbildung 4.5:** Durchschnittliche Nutzung der Ressourcen  $U_E(s)$  gemittelt über  $s$

Fällen für einen Operator die angepasste Reallokation, insbesondere die auf grober Schätzung basierende E1-Allokation  $\vec{R}_1$ , schlechter sein als die statische. Dennoch zeigt sich, vor allem im Bereich einer mittleren relativen Last von etwa  $D_{rel} \approx 1$ , auch schon auf Ebene E1 im Mittel ein Vorteil gegenüber dem statischen Fall.

Wird die Allokation weiter verfeinert und kurzfristig dem aktuellen Bedarf angepasst, wie es auf Ebene E0 geschieht, so ist nochmals ein deutlicher Effizienzgewinn in der Ressourcennutzung zu erkennen. Betrachtet man  $D_{rel} \approx 1$ , so fällt auf, dass trotz bestmöglicher Anpassung der Allokation an die gegebene Verkehrslast dennoch die Auslastung nicht 1 erreicht. Dies erklärt sich dadurch, dass hier nur gemittelte Ergebnisse betrachtet werden und bereits die angebotene Last bei  $D_{rel} = 1$  nur im Mittel genau 100 % der Ressourcen benötigt. In einzelnen Fällen, wenn die tatsächliche Last niedriger ist als die Zahl der verfügbaren Ressourcen, wird auch die Auslastung kleiner als 1 sein. Wird jedoch mehr

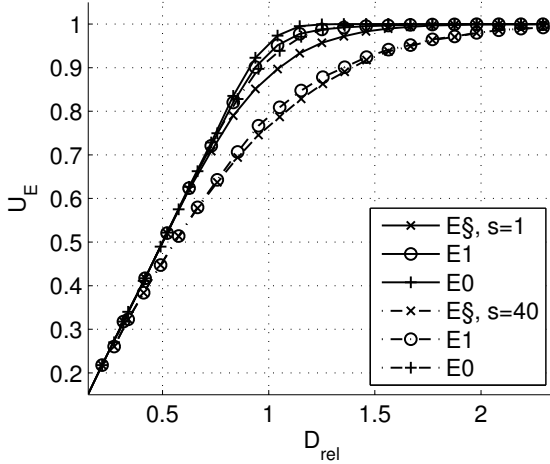


**Abbildung 4.6:** Verbesserung der Auslastung durch Reallokation  $U_E^+(s)$  gemittelt über  $s$

Last angeboten als Ressourcen zur Verfügung stehen, so kann die Auslastung dennoch höchstens 1 betragen. Im Mittel ergibt sich schließlich ein Wert unter 1. Erst bei sehr großer Überlast fällt dieser Effekt nicht mehr ins Gewicht, die Auslastung geht gegen 1.

Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 4.6 den Anteil  $U_E^+$  (4.21) der auf Ebene  $E\ddot{s}$  ungenutzten Ressourcen, die durch Reallokation bei gleicher Last zusätzlich noch verwendet werden konnten. Es liegen dieselben Daten wie in Abbildung 4.5 zugrunde. Durch die kurzfristige Anpassungen auf der Ebene  $E0$  können bei sehr hoher Verkehrslast  $D_{rel} > 1,5$  im Vergleich zum statischen Fall sogar im Mittel alle verbliebenen Ressourcen aufgefüllt werden. Um den Übergang darzustellen, wurde in den einzelnen Realisierungen für den Fall  $U_{\ddot{s}}(s) = 1$  jeweils in (4.21)  $U_E^+(s) = 1 - \frac{0}{0} := 1$  gesetzt.

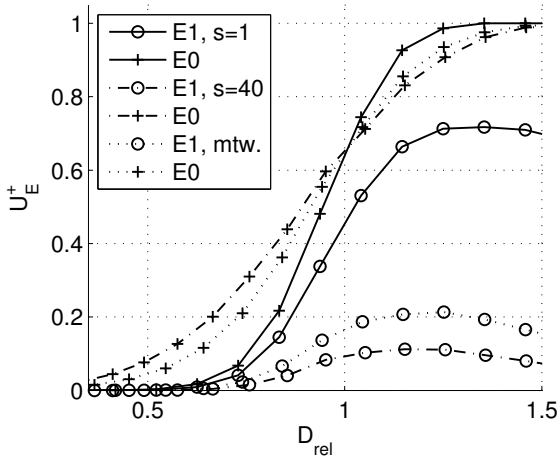
Im Gegensatz dazu zeigt die einmalige Anpassung auf Ebene  $E1$  zwar immer noch eine Verbesserung im Gegensatz zur statischen Allokati-



**Abbildung 4.7:** Durchschnittliche Nutzung der Ressourcen  $U_E(s)$  am Beginn ( $s = 1$ ) und am Ende ( $s = 40$ ) eines E1-Intervalls

on. Allerdings wird hier der Nachteil einer auf längere Zeit gültigen Zuteilung deutlich. Im Verlauf der E0-Intervalle steigt die Varianz der Verkehrslast im Vergleich zum Zeitpunkt der Auktion und damit zum Moment der notwendigerweise größeren Schätzung der Verkehrslast. Somit ist die zu Beginn gewählte Zuteilung  $\vec{R}_1$  zwar schon besser als die statische, aber über die Zeit gemittelt deutlich ungünstiger als die ständig nachgeführte Zuteilung  $\vec{R}_0(s)$ .

Mittelt man nun nicht über die Zeit, sondern greift sich die zwei Zeitpunkte zu Beginn ( $s = 1$ ) und am Ende ( $s = 40$ ) eines E1-Intervalls heraus, so wird der Einfluss der veränderlichen Verkehrslast in den Abbildungen 4.7 und 4.8 deutlich. Da zu Beginn (—) die grobe Schätzung noch nahe an der tatsächlichen Verkehrslast liegt, kann auch mit der Allokation  $\vec{R}_1$  noch eine Verbesserung erzielt werden. Am Ende des E1-Intervalls hingegen (---) geht der Vorteil von  $\vec{R}_1$  bezüglich der Auslastung deutlich zurück, erst die Reallokation auf Basis



**Abbildung 4.8:** Verbesserung der Auslastung durch Reallokation  $U_E^+(s)$  am Beginn ( $s = 1$ ) und am Ende ( $s = 40$ ) eines E1-Intervalls

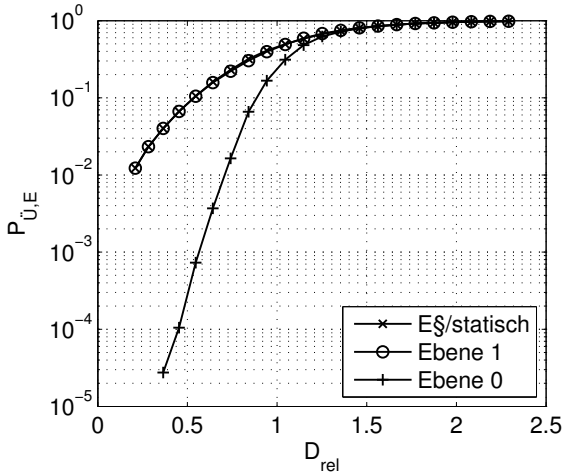
der genauen Verkehrsschätzung bringt weiterhin große Gewinne. Der eingezeichnete Mittelwert in Abbildung 4.8 entspricht dem aus Abbildung 4.6.

Beachte, dass sich mit der großen Varianz der Verkehrslast gegen Ende des E1-Intervalls zunächst auch die Auslastung bezogen auf die Allokation  $\vec{R}_s$  verändert. Zur Berechnung von  $U_E^+(s)$  in Abbildung 4.8 wurden die entsprechenden Werte als Bezugsgröße verwendet.

### Perspektive eines Operators

Die Situation aus Sicht eines einzelnen Operators soll hier durch die Betrachtung der Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{\bar{U}}$  und dem jeweils mittleren Anteil nicht bedienter Last  $V$  näher beleuchtet werden.

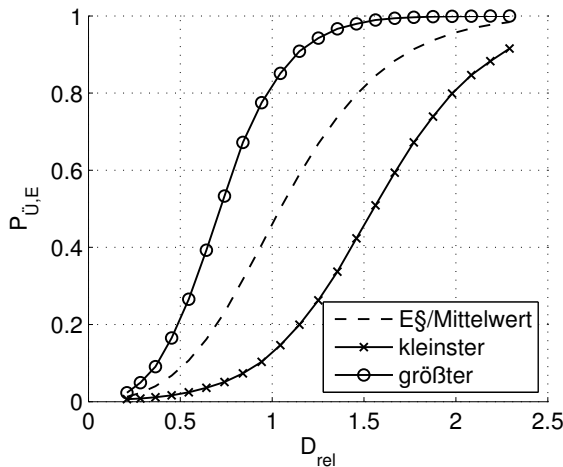
Zunächst zeigt Abbildung 4.9, gemittelt über alle Operatoren und über die Zeit, die Überlastwahrscheinlichkeit eines Operators. Die Wahrscheinlichkeit bezieht sich für alle drei Kurven jeweils auf ein einzelnes



**Abbildung 4.9:** Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{Ü,E}(s)$  eines einzelnen Operators, gemittelt über  $s$

E0-Intervall und wurde erst danach gemittelt. Durch kurzfristige Anpassung der Allokation kann auf Ebene E0 bei niedriger Verkehrslast eine Überlastsituation für einen Operator in der Regel vermieden werden. Denn mit großer Wahrscheinlichkeit sehen sich nicht alle Operatoren gleichzeitig einer überdurchschnittlichen Last gegenüber. Es werden also meist auch ein oder mehrere Anbieter von Ressourcen verfügbar sein, sodass die Wahrscheinlichkeit für die anderen, überhaupt Verkehrslast nicht bedienen zu kommen, im Vergleich zur statischen Allokation um Größenordnungen gesenkt werden kann.

Für die folgenden Betrachtungen sei betont, dass im Modell auch der Ausgangsparameter des Random Walks  $D_{1,i}$  (4.2) zufällig verteilt ist, jedoch auch über alle Operatoren gemittelt werden kann, da ihre Verkehrslast zwar unabhängig voneinander, aber nach der gleichen Verteilung gezogen wird. Dass trotz der durch den Random Walk im Verlauf der E0-Intervalle stark ansteigenden Varianz des Verkehrsmodells

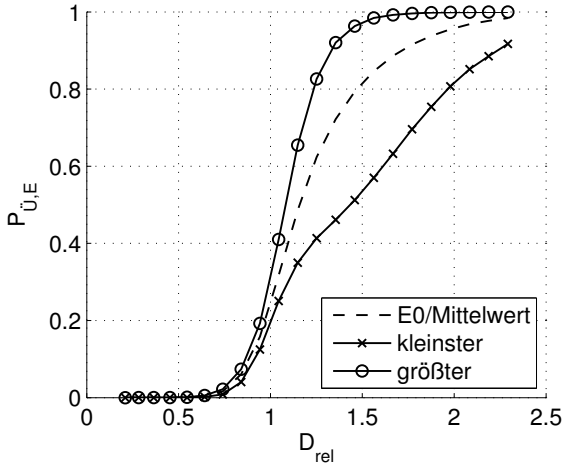


**Abbildung 4.10:** Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{Ü,E}(s)$  eines einzelnen Operators vor Reallokation auf Ebene  $Eß$ , gemittelt über  $s$ , sortiert nach Startwert  $D_{1,i}$

der Ausgangspunkt, und damit auch der als Verkehrsschätzung vor der Auktion auf Ebene  $E1$  verwendete Startwert  $d_{1,i}$ , für eine einzelne Realisierung einen Einfluss auf das Ergebnis haben kann, zeigen die Abbildungen 4.10 und 4.11. Am Beispiel der Überlastwahrscheinlichkeit, hier im linearen Maßstab, sind aus jeder Realisierung die zwei Operatoren mit dem jeweils größten und jeweils kleinsten  $d_{1,i}$  herausgegriffen. Erst dann wurde über die Realisierungen und die  $E0$ -Intervalle  $s$  gemittelt.

Im statischen Fall in Abbildung 4.10 hat erwartungsgemäß der Operator mit der höchsten mittleren Last auch durchweg eine höhere Überlastwahrscheinlichkeit als derjenige mit der geringsten mittleren Last. Gestrichelt ist der Mittelwert über alle 8 Operatoren eingezeichnet. Erlaubt man dann jedoch eine kurzfristige und optimale Reallokation der Ressourcen in Ebene  $E0$ , Abbildung 4.11, so reduzieren sich die Unterschiede zwischen den beiden herausgegriffenen Operatoren



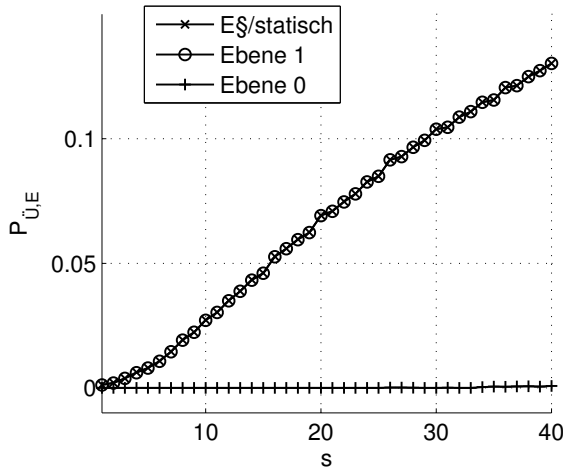


**Abbildung 4.11:** Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{Ü,E}(s)$  eines einzelnen Operators nach Reallokation auf Ebene E0, gemittelt über  $s$ , sortiert nach Startwert  $D_{1,i}$

merklich im Bereich bis zur mittleren Volllastung des Netzes. Erst wenn insgesamt deutliche Überlast besteht und damit eine Reallokation unwahrscheinlicher wird, da kaum noch Anbieter von Ressourcen vorhanden sind, ist natürlich der Operator mit der niedrigeren Last nach wie vor im Vorteil bezüglich der Überlastwahrscheinlichkeit.

Im Folgenden wird jedoch auf diese Unterschiede insofern nicht eingegangen, als für eine bestimmte mittlere Netzlast  $D_{rel}$  über alle Operatoren gemittelt wird. Der Effekt einer niedrigeren oder höheren Last schlägt sich dann in Ergebnissen für einen jeweils anderen Simulationsparameter  $D_{rel}$  nieder.

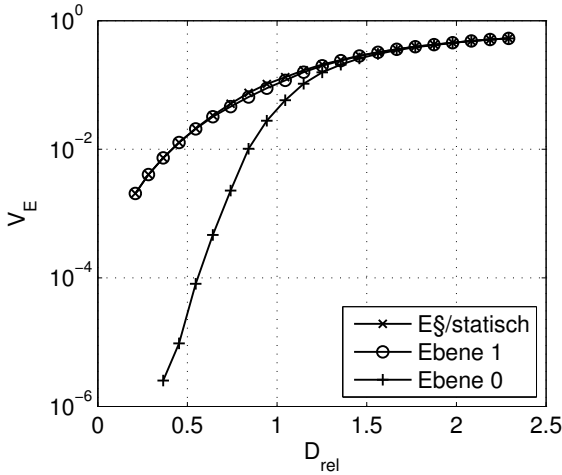
Betrachtet man, wieder in Abbildung 4.5, nicht mehr die kurzfristige Allokation, sondern würde man über das gesamte E1-Intervall die mittelfristige Allokation  $\vec{R}_1$  nach der ersten Auktion beibehalten, schwin-



**Abbildung 4.12:** Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{\dot{U},E}(s)$  eines einzelnen Operators über die Zeit  $s$  bei einer Last von  $D_{\text{rel}} \approx 0,45$

det der große Vorteil der kurzfristigen Anpassung an die schwankende Verkehrslast sofort: Es ist kein nennenswerter Unterschied zur statischen Allokation auszumachen. Betrachtet man eine geringe mittlere Last von  $D_{\text{rel}} \approx 0,45$  und trägt die Überlastwahrscheinlichkeit für die einzelnen E0-Intervalle auf, sieht man einen typischen Verlauf in Abbildung 4.12: Während am Anfang unabhängig von der Allokation noch alle Operatoren ausreichend mit Ressourcen versorgt sind, werden sich die Allokationen  $\vec{R}_s$  und  $\vec{R}_1$  meistens nicht unterscheiden. Erst im Verlauf der Zeit bei höherer Varianz der Last wird eine Reallokation bedeutsam. Dann aber kann  $\vec{R}_1$  nicht mehr angepasst werden.

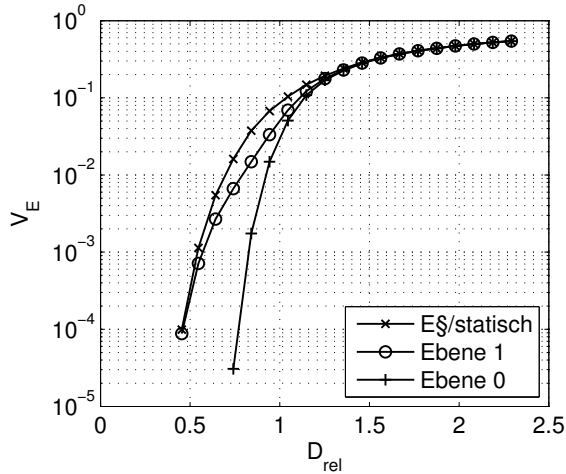
Eine ähnliche Argumentation gilt auch für die anderen Bereiche der mittleren gesamten Verkehrslast. Auch wenn die längerfristige Allokation  $\vec{R}_1$  bei höheren Verkehrslasten zunächst einen Vorteil verspricht, da ja hier die Wahrscheinlichkeit steigt, dass Käufer und Verkäufer gleichzeitig an einer Auktion teilnehmen, schwindet dieser Vorteil im



**Abbildung 4.13:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$ , gemittelt über  $s$

Verlauf der Zeit wieder, wenn sich die Lastsituation wieder verändert.

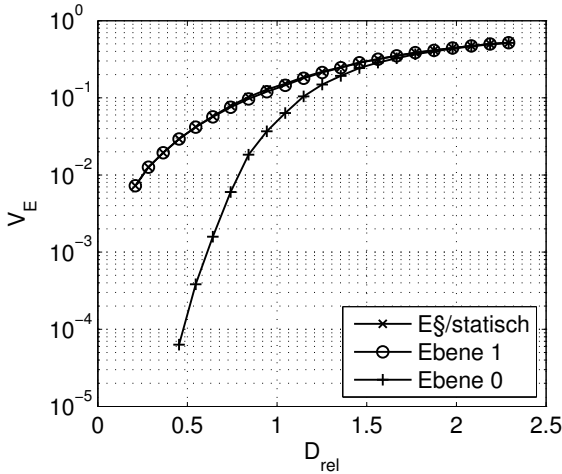
Um dies zu illustrieren, ist zunächst Abbildung 4.13 nochmals mit Bezug auf den Anteil der nicht bedienten Last  $V_E$  (4.24) dargestellt. Schon im zeitlichen Mittel zeigt sich ein minimaler Vorteil der mittelfristigen Allokation  $\vec{R}_1$  gegenüber der statischen, und zwar im Bereich  $D_{rel} \approx 0,7 \dots 1,1$ . Das heißt, dass zwar Überlast ähnlich häufig auftritt, jedoch die Schwere dieser Überlastsituation im Mittel geringer ist: Es musste insgesamt ein kleinerer Teil des Verkehrs verworfen werden. Bei wie hier angenommener bestmöglicher Reallokation zeigt sich allerdings insbesondere auf der kurzfristigen Ebene E0 ein wesentlicher Vorteil einer dynamischen Anpassung der Zuteilung an die Verkehrslast: In den Bereichen geringer Netzlast  $D_{rel} < 0,5$  wird trotz hoher Varianz der Anteil des verworfenen Verkehrs um Größenordnungen auf ein vernachlässigbares Maß verringert.



**Abbildung 4.14:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  zu Beginn ( $s = 1$ ) eines E1-Intervalls

Die gleiche Darstellung, jedoch als Momentanbild zu Beginn ( $s = 1$ ) und am Ende ( $s = 40$ ) des E1-Intervalls, verdeutlicht den zeitlichen Unterschied in Bezug auf die Verkehrslast und deren Varianz sowie den Einfluss auf der mittelfristigen Ebene E1. Zu Beginn, wenn die zugrunde liegende Schätzung noch gute Gültigkeit hat, kann im zuvor genannten Bereich  $D_{\text{rel}} \approx 0,4 \dots 1,1$  auch die mittelfristige Zuteilung die nicht bediente Last noch merklich reduzieren. Dies illustriert Abbildung 4.14. Am Ende des E1-Intervalls, vgl. Abbildung 4.15, wenn die Varianz des Verkehrs im Vergleich zum Beginn deutlich gestiegen ist, kann nur durch kurzfristige Anpassungen eine wesentliche Verbesserung erreicht werden.

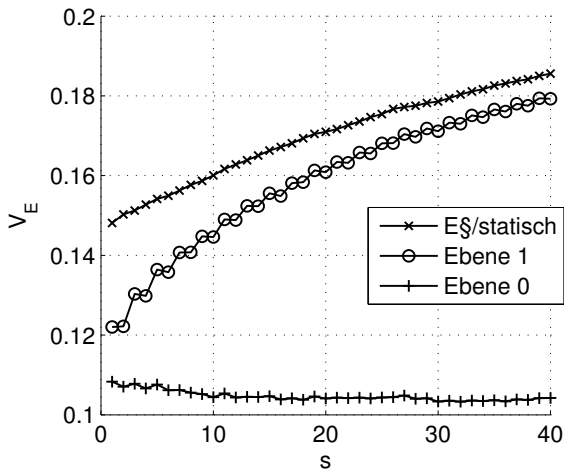
Festgehalten bei  $D_{\text{rel}} \approx 1,15$  und in linearem Maßstab zeigt Abbildung 4.16 den zeitlichen Ablauf von  $V_E(s)$ . Zu Beginn ergibt sich noch eine deutliche Verbesserung durch die Allokation  $\vec{R}_1$ , während sich im Verlauf die Kurven für E§ und E1 annähern. Bei kurzfristiger Anpas-



**Abbildung 4.15:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  am Ende ( $s = 40$ ) eines E1-Intervalls

sung kann in jedem E0-Intervall aufs Neue zwischen den Operatoren vermittelt werden, die gerade zufällig Über- bzw. Unterlast aufweisen. Der treppenartige Verlauf der Kurve für E1 ergibt sich aus dem gewählten Verkehrsmodell, das nur in jedem zweiten Schritt auf seinen Ursprungswert zurückkehren kann.

Fasst man schließlich die beiden Sichtweisen auf das Gesamtnetz und von einzelnen Operatoren aus in einem Bild zusammen, so kann man wie in Abbildung 4.17 die Auslastung der Ressourcen  $U_E$  gegen den Anteil der verworfenen Verkehrslast  $V_E$  auftragen, indem man die Ergebnisse aus den Abbildungen 4.5 und 4.13 kombiniert. Betrachtet man nun beispielsweise eine konstante Netzauslastung von ca. 0,8, so verringert sich für den einzelnen Operator der Überlastanteil um mehr als eine Größenordnung. Möchte man umgekehrt die Bedingungen für die Mobilfunkanbieter ähnlich halten, beispielsweise durch einen erlaubten Überlastanteil von 0,01, so kann im Netz deutlich mehr Last

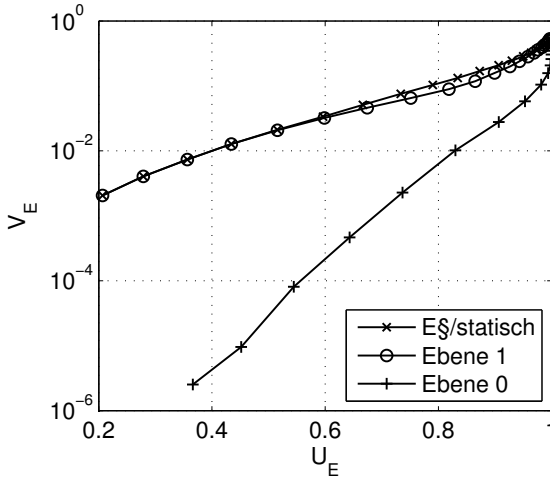


**Abbildung 4.16:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  über die Zeit  $s$  bei einer Last von  $D_{\text{rel}} \approx 1,15$

bedient werden und die Ressourcennutzung steigt von ca. 0,4 auf über 0,8.

Allerdings zeigt sich in den Ergebnissen des Modellszenarios schon bei idealen Bedingungen der Kompromisscharakter der Auktionshierarchie. Die für mittelfristige Allokationen eingeführte Ebene E1 bietet gegenüber der statischen Allokation – würde man die Zuteilung  $\bar{R}_1$  über die ganze Zeit eines E1-Intervalls festhalten – nur geringe Vorteile sowohl für die Netzauslastung als auch für den einzelnen Operator. Hier muss deutlich zwischen den Ebenen E0 und E1 unterschieden werden: Die kurzfristige Anpassung an die aktuelle Verkehrslast dient in der Tat der Verbesserung der zuvor eingeführten Bewertungsgrößen und ist letztlich die grundlegende Motivation dynamischer Allokation von spektralen Ressourcen.

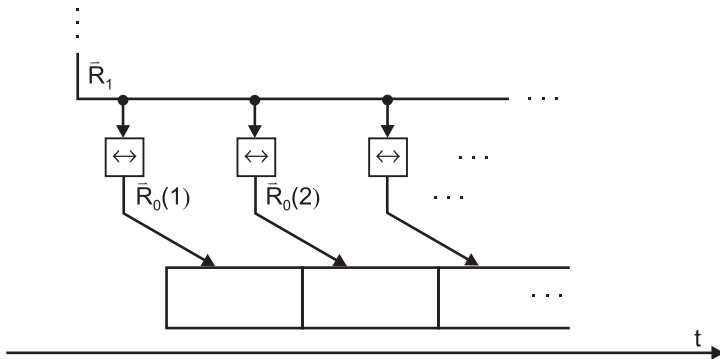
Die Zwischenebene E1, wie auch im allgemeinen Modell denkbare zusätzliche Ebenen, dienen einem anderen Zweck: Sie sollen gerade die



**Abbildung 4.17:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  aufgetragen über die Netzauslastung  $U_E(s)$ , beide gemittelt über  $s$

Unsicherheit der einzelnen Operatoren bezüglich ihrer künftigen Ressourcenallokation abmildern, ohne dass nach jedem E0-Intervall auf die Ursprungsallokation  $\vec{R}_\xi$  zurückgesprungen werden muss. Im Lichte dieses Kompromisses zusammen mit der vorhandenen Möglichkeit der feineren Anpassung auf Ebene E0 ist die ungünstigere Anpassung der Allokation mit  $\vec{R}_1$  durchaus ein hinzunehmender Preis. Anhand der Systemparameter, wie z.B. der Zahl  $s_{\max}$  der E0-Intervalle pro E1-Intervall, kann dieser Kompromiss auch quantitativ eingestellt werden.

Insgesamt scheint jedoch eine dynamische Ressourcenallokation sowohl aus Sicht der effizienten Ressourcennutzung als auch für jeden einzelnen Operator durchaus sinnvoll und effektiv, da sich beide Perspektiven im vorgestellten Modell gut zusammenführen lassen.



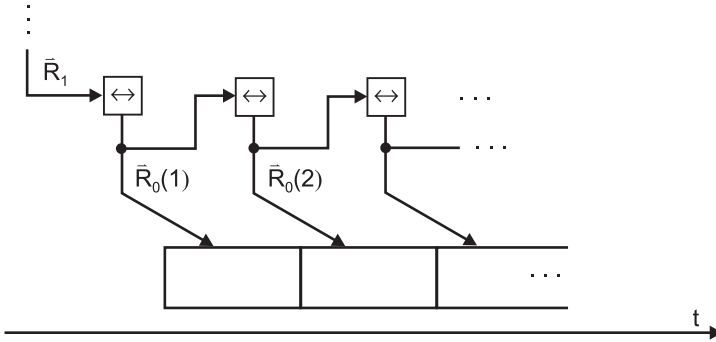
**Abbildung 4.18:** Bestimmung der Allokation  $\vec{R}_0(s)$  basierend auf  $\vec{R}_1$  in jedem E0-Intervall

### 4.3.3 Auktionsfolge auf der untersten Ebene

Im hier vorgestellten und untersuchten Modellszenario wurde unabhängig von der Hierarchieebene festgelegt, dass die Ausgangsallokation jeder einzelnen Auktion auf einer bestimmten Ebene jeweils die Zuteilung auf der nächsthöheren Ebene ist. Dies gilt ebenso auf der untersten Ebene E0, wie in Abbildung 4.18 dargestellt ist.

Denkt man nun an das Vorgehen bei Wertpapierbörsen, so wird dort fortlaufend die Verteilung der gehandelten Anteile aktualisiert. Anders als im hier vorgeschlagenen Szenario gibt es dort plausiblerweise keine zuvor festgelegten Zuteilungsverhältnisse, auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt zurückgesprungen wird. Dennoch könnte man alternativ auf Ebene E0, wenn von E0-Intervall zu E0-Intervall nur eine geringfügige Änderung der Verkehrslast zu erwarten ist, ebenso in fast allen Auktionen nicht die übergeordnete Zuteilung  $\vec{R}_1$  zugrunde legen, sondern für alle Auktionen  $s$  bis auf die erste eines E1-Intervalls das Ergebnis der vorherigen Auktion, nämlich  $\vec{R}_0(s-1)$ , als Ausgangspunkt verwenden. Diese Situation ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

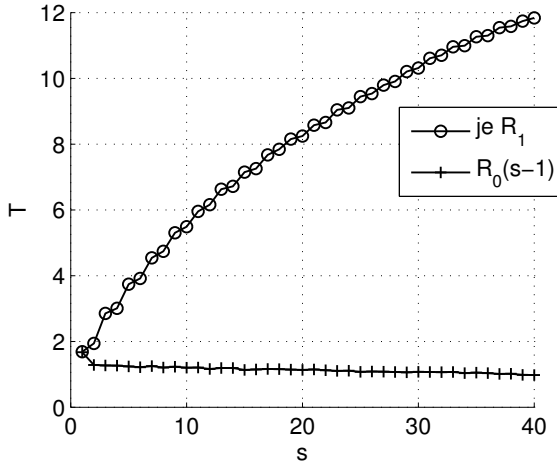




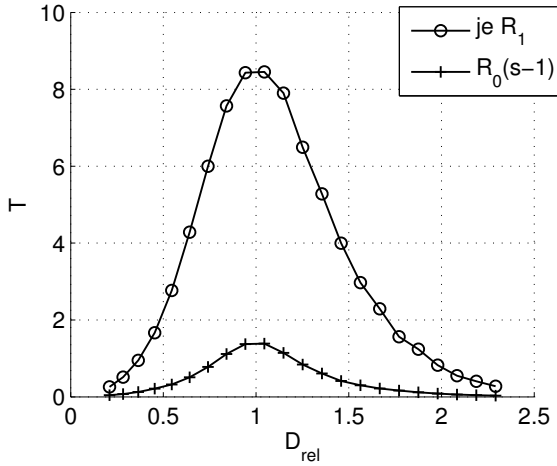
**Abbildung 4.19:** Bestimmung der Allokation  $\vec{R}_0(s)$  basierend auf  $\vec{R}_0(s-1)$  für  $s > 2$

In der Simulation mit der sequentiell fortgeschriebenen Allokation  $\vec{R}_0(s)$  zeigt sich im zeitlichen Mittel bezogen auf die zuvor eingeführten Bewertungsgrößen kein Unterschied zum ursprünglichen Modell. Wie erwartet ergibt sich jedoch ein Unterschied in der Zahl der pro E0-Intervall zustande gekommenen Transaktionen. Im zeitlichen Verlauf dargestellt, Abbildung 4.20, zeigt sich das erhoffte Ergebnis: Gerade gegen Ende eines E1-Intervalls müssen zur Anpassung an die aktuelle Verkehrslast im Vergleich zur am Anfang gewählten Allokation  $\vec{R}_1$  immer mehr Ressourcen neu zugeteilt werden. Lässt man eine differentielle Neuzuteilung zu, so reichen durchweg ähnlich wenige Transaktionen, um die Allokation nachzuführen. Wie in Abbildung 4.21 verdeutlicht, ist dieser Effekt natürlich dann besonders groß, wenn im Mittel sowohl anbietende als auch nachfragende Operatoren am Markt sind, nämlich bei einer mittleren Gesamtverkehrslast von  $D_{\text{rel}} \approx 1$ .

Gegen eine solche sequentielle Implementierung sprechen allerdings auch Gründe: Auf der physikalischen Schicht schlagen sich nicht alle in einer Auktion gemachten Transaktionen als Kanalneuzuteilungen direkt nieder. Der Scheduler wird ohnehin von E0-Intervall zu E0-Intervall nur



**Abbildung 4.20:** Mittlere Anzahl der Transaktionen  $T$  pro E0-Intervall im Zeitverlauf  $s$  bei einer mittleren Last von  $D_{rel} \approx 1,05$



**Abbildung 4.21:** Mittlere Anzahl der Transaktionen  $T$  pro E0-Intervall, gemittelt über  $s$

dann Kanäle neu zuteilen, wenn dies durch eine Veränderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zuteilungen  $\vec{R}_0$  notwendig wird.

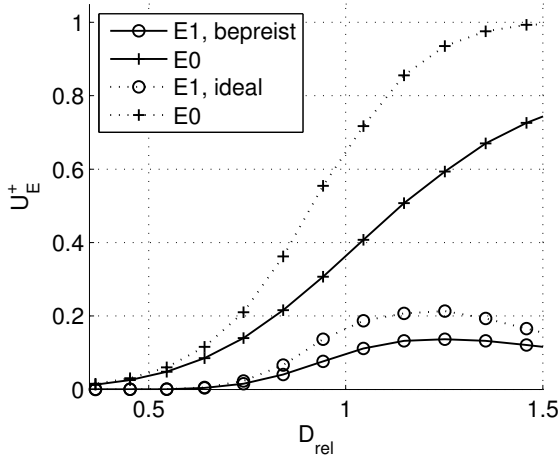
Auf der anderen Seite würde man durch die Anpassung des Auktionsablaufs die Rechtfertigung für die Auktion auf Ebene E1 aushebeln: Diese Zwischenzuteilung soll als Sicherheit für die Operatoren dienen, bereits im Voraus für ein ganzes E1-Intervall zu wissen, welche Menge von Ressourcen ihnen zur Verfügung stünde, würden sie ab einem Zeitpunkt nicht mehr an Auktionen teilnehmen. Nimmt man diese Verlässlichkeit aber aus dem System, werden die Operatoren zu Beginn des E1-Intervalls weniger Bereitschaft zeigen, insbesondere als Verkäufer aufzutreten und Ressourcen für einen längeren Zeitraum abzugeben. Entsprechend würden sich anfangs gegebenenfalls die Preise pro Ressource erhöhen. Somit wäre auch ein potentiell finanzieller Vorteil der inkrementellen Auktionsfolge, nämlich die geringere Zahl von bepreisten Transaktionen, aufgezehrt.

Folglich sollte also auch auf der kurzfristigsten Ebene E0 am ursprünglich vorgesehenen Ablauf festgehalten werden, der für jede Auktion die Ausgangszuteilung  $\vec{R}_1$  vorsieht.

#### 4.3.4 Einfluss der Wertschätzungen

In den bisherigen Untersuchungen wurden optimale Bedingungen zur Allokationsanpassung angenommen, indem allen Operatoren die gleiche Wertschätzung pro Ressource und Zeitintervall zugeordnet wurde. Stimmen die Preisvorstellungen der Operatoren nun nicht mehr überein, so werden nicht mehr alle potentiellen Transaktionen in einer Auktion zustande kommen können. Die sich ergebende Zuteilung wird schlechter sein als die bisher betrachteten Fälle.

Der Einfluss dieser Wertschätzungen und damit auch der Gebotshöhen wird in diesem Abschnitt so modelliert, dass jedem Operator unabhängig eine Wertschätzung für eine Ressource im Intervall  $(0, 1)$  gemäß einer Gleichverteilung zugeordnet wird. Dieser Wert wird dann als Preis

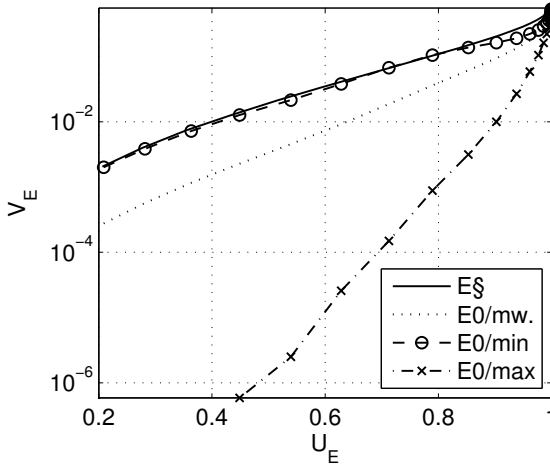


**Abbildung 4.22:** Verbesserung der Auslastung durch Reallokation  $U_E^+(s)$  gemittelt über  $s$ , das Verhältnis der Höhe von Verkaufs- zu Kauf-Gebot ist  $r = 1$

sowohl in Kaufs- wie in Verkaufsgebieten verwendet: Das Verhältnis von Verkaufs- zu Kaufpreis ist  $r = 1$ .

Abbildung 4.22 zeigt, dass die Netzauslastung weniger gut optimiert werden kann als im Fall idealer Reallokation. Da die Wertschätzungen auf die statische Allokation  $\vec{R}_g$  keinen Einfluss haben, kann die Verbesserung der Auslastung hier gut verglichen werden. Dennoch bleiben auch hier immer noch deutliche Verbesserungen: Bereits bei leichter Überlast im Netz kann bei kurzfristiger Reallokation noch die Hälfte der freigebliebenen Ressourcen aufgefüllt werden.

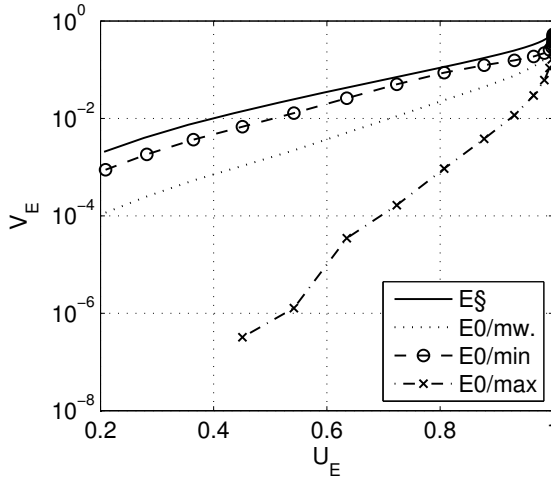
Für jeden einzelnen Operator ist die Situation jetzt natürlich stark von seiner eigenen Wertschätzung abhängig. Dazu wurde in jeder Simulation jeweils derjenige mit der höchsten und derjenige mit der niedrigsten Wertschätzung ausgewählt, um diese beiden mit dem Durchschnitt über alle Operatoren zu vergleichen. In Abbildung 4.23 wird der Vor-



**Abbildung 4.23:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  aufgetragen über die Netzauslastung  $U_E(s)$ , beide gemittelt über  $s$ . Das Verhältnis der Höhe von Verkaufs- zu Kauf-Gebot ist  $r = 1$

teil eines zahlungswilligen Auktionsteilnehmers sehr deutlich. Da seine Kaufgebote mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, kann er seinen Anteil an nicht bedienter Last im Vergleich zum Durchschnitt signifikant senken. Der Operator mit der niedrigsten Wertschätzung wird nicht zum Zuge kommen und im Fall eigener Überlast keine Ressourcen erwerben können.

Dennoch ist es auch für einen Operator mit geringer Wertschätzung vorteilhaft, im Fall von wenig Last an den Auktionen teilzunehmen. Als günstiger Anbieter wird er bei Verkäufen deutlich bevorzugt, während aber die Preisfestsetzung anhand des höchsten berücksichtigten Verkaufsgebots geschieht. Hier ist also mit finanziellen Erlösen zu rechnen. Zudem können in Einzelfällen, wenn auch nicht im Mittel signifikant, Situationen entstehen, in denen auch ein niedriges Kaufgebot Erfolg hat und eine momentane Überlastsituation gemindert werden kann.

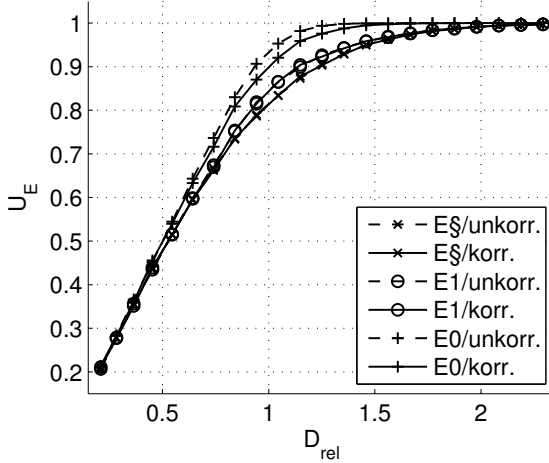


**Abbildung 4.24:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  aufgetragen über die Netzauslastung  $U_E(s)$ , beide gemittelt über  $s$ . Das Verhältnis der Höhe von Verkaufs- zu Kauf-Gebot ist  $r = 0,5$

Betrachtet man schließlich noch den Fall, dass Operatoren bereit sind, Ressourcen günstiger abzugeben, beispielsweise zur Hälfte ihrer Wertschätzung, die sie als Kaufgebot abgeben würden, zeigt sich die Situation wie in Abbildung 4.24 bei  $r = 0,5$ . Es werden insgesamt mehr Transaktionen durchgeführt, die Netzauslastung steigt etwas an. Der Anteil der nicht bedienten Last kann auch für den Operator mit der geringsten Wertschätzung im Vergleich zur statischen Allokation sinken.

#### 4.3.5 Korrelation im kurzfristigen Bedarf

Bereits bei der Definition des Verkehrsmodells in Abschnitt 4.2 wurde beschrieben, dass die Abhängigkeit der Verkehrslast der einzelnen Operatoren untereinander implizit durch die identische Parametrisierung

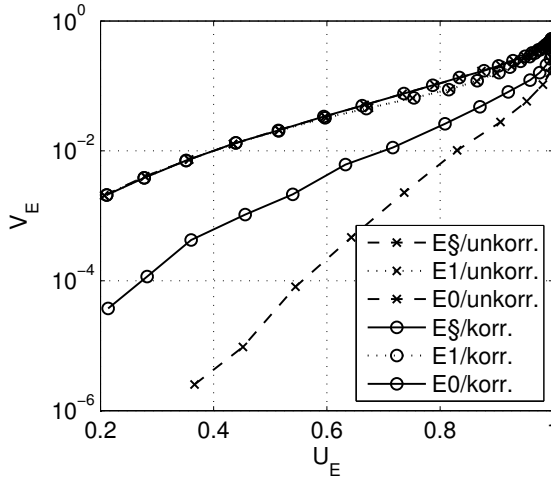


**Abbildung 4.25:** Durchschnittliche Nutzung der Ressourcen  $U_E(s)$  gemittelt über  $s$  für unkorrelierte und korrelierte Last

des Verkehrsmodells gegeben ist. Im weiteren wurde davon ausgegangen, dass die kurzfristigen Variationen der Last unabhängig zwischen den Anbietern auftreten.

Kommt es dennoch zu sehr kurzfristigen Korrelationen unter den Operatoren, führt das dazu, dass in einer Auktion mit größerer Wahrscheinlichkeit deutlich mehr Asymmetrie zwischen Angebot und Nachfrage herrscht. Infolgedessen wird auch während solcher Perioden die Allokationsoptimierung schlechter funktionieren als im unkorrelierten Fall.

Die Vermutung bestätigt sich, wenn man im Verkehrsmodell die Laufrichtung des Random Walks zwischen den Operatoren paarweise mit der Wahrscheinlichkeit  $p_{mit} = 0,75$  koppelt. In Abbildung 4.25 ist im Vergleich mit kurzfristig unkorreliertem Verkehr eine Verringerung der Netzauslastung zu beobachten. Ebenso kann jeder einzelne Operator



**Abbildung 4.26:** Anteil der nicht bedienten Last  $V_E(s)$  aufgetragen über die Netzauslastung  $U_E(s)$ , beide gemittelt über  $s$  für unkorrelierte und korrelierte Last

den Anteil seines nicht bedienten Verkehrs im Überlastfall nur deutlich weniger reduzieren, wie Abbildung 4.26 illustriert.

Obwohl wie erwartet eine Verschlechterung eintritt, ist der betrachtete Fall wohl eher selten anzutreffen. Die Länge der E0-Intervalle kann so gewählt werden, dass die ursprüngliche Annahme der unkorrelierten Last aufrechterhalten werden kann. Für längerfristige gemeinsame Änderungen, wie etwa im Tagesverlauf der Verkehrslast, ist dann jeweils ein anderer Parameter  $D_{rel}$  zu betrachten.



## 4.4 Analytische Verifikation im 2-Ebenen-Szenario

### 4.4.1 Berechnung der Reallokationsstatistik

Möchte man die Überlastwahrscheinlichkeiten für einen Operator gemäß (4.23) berechnen, stellt sich die Situation für den statischen Fall E§ übersichtlich dar: Es gilt ohne Auktion für jeden Operator die feste Allokation  $R_{\S,i} = B/N$  unabhängig von den anderen, vgl. (4.51) im nächsten Abschnitt 4.4.2.

Die Verhältnisse ändern sich jedoch, wenn eine Auktion durchgeführt wird: Zwar ist die Verkehrslast der Operatoren untereinander nach wie vor statistisch unabhängig. Die neue Zuteilung eines bestimmten Operators  $j$  nach der Auktion ist jedoch statistisch von seiner eigenen Last  $D_0(s)$  abhängig, denn sie bestimmt letztlich die Gebote während der Auktion. Zusätzlich ist der Ausgang der Auktion wiederum von der Lastsituation  $\vec{D}_{0,(-j)}(s)$  der übrigen  $N - 1$  Operatoren ( $-j$ ) abhängig.

Wegen der Abhängigkeit von neuer Allokation und Verkehrslast muss also im dynamischen Szenario mit Auktionen auch bei der isolierten Betrachtung eines einzelnen Operators auf die gemeinsame Verteilung von Bedarf  $D_0(s)$  und Allokation  $R_0(s)$  zurückgegriffen werden:

$$P(D_0(s), R_0(s)), \quad (4.25)$$

wobei für die Zufallsvariable  $R_0(s)$  zudem die Gesamlastsituation aller Operatoren zu berücksichtigen ist.

Für die analytischen Betrachtungen in diesem Abschnitt wird das gegebene Modell auf ein einstufiges Modell vereinfacht. Ausgehend von der festen Allokation  $\vec{R}_{\S}$  findet *eine* Auktion basierend auf der akuten Verkehrslast  $\vec{D}_0$  der Operatoren statt. Die Zwischenstufe E1 mit der Allokation  $\vec{R}_1$ , wie sie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben ist, fällt hier also weg. Auf diese Weise wird überhaupt erst eine analytische Darstellung ermöglicht, die es erlaubt, simulative Ergebnisse zu überprüfen.

### Hilfsgrößen

Zur vereinfachten Darstellung seien die folgenden Hilfsgrößen definiert: Zunächst gelte für den relativen Bedarf  $\delta$  eines einzelnen Operators im Vergleich zu seiner Ursprungsallokation  $R_{\S} = B/N$ :

$$\delta := D_0(s) - R_{\S}. \quad (4.26)$$

Dabei sind die Vorzeichen derart gewählt, dass  $\delta > 0$  einen Bedarf des Operators an zusätzlichen Ressourcen kennzeichnet,  $\delta < 0$  zeigt eine Angebotsituation. Für  $\delta = 0$  wird der Bedarf des Operators exakt durch die Zuteilung gedeckt. Die Verteilung errechnet sich durch einfache Verschiebung aus der Verteilung der Verkehrslast  $P_{D_0(s)}$ , da  $R_{\S} = \text{const.}$  keine Zufallsvariable ist:

$$P_{\delta}(d) = P_{D_0(s)}(d + R_{\S}). \quad (4.27)$$

Die relative Last  $\delta$  ist für alle Operatoren identisch und unabhängig verteilt.

Analog zum relativen Bedarf  $\delta$  kann auch die Menge der reallokierten Ressourcen als Differenz zur Ursprungsallokation  $R_{\S}$  ausgedrückt werden:

$$\rho := R_0(s) - R_{\S}. \quad (4.28)$$

Positive  $\rho$  zeigen an, dass der Operator in der Auktion zusätzliche Ressourcen dazubekommen hat, umgekehrt bedeuten negative Werte von  $\rho$ , dass erfolgreich Ressourcen verkauft wurden. Es ist plausibel, dass  $\delta$  und  $\rho$  niemals verschiedene Vorzeichen haben werden. Für  $\delta = 0$  ist auch  $\rho = 0$ , da der Operator ohne besonderen Bedarf nicht an der Auktion teilnehmen wird. Dennoch kann für  $\delta \neq 0$  trotzdem in bestimmten Situationen keine Reallokation stattfinden, also  $\rho = 0$  gelten.

Für die Darstellung von (4.25) kann somit ohne Weiteres statt  $P(D_0(s), R_0)$  auch

$$P_{\delta, \rho}(d, r) = P_{D_0(s), R_0}(d + R_{\S}, r + R_{\S}) \quad (4.29)$$

betrachtet werden.  $P_{\delta, \rho}$  beschreibt also die gemeinsame Verteilung von relativem Bedarf  $\delta$  und der erhaltenen bzw. abgegebenen Ressourcen  $\rho$ .

### Angebot und Nachfrage der übrigen Operatoren

Der bisher betrachtete Operator  $j$  tritt nun im Rahmen der Auktion mit seinen Geboten der Gesamtheit der Gebote der übrigen Operatoren gegenüber. Die Gebote gliedern sich in zwei Gruppen, nämlich das kumulierte Angebot  $\Delta_+$  und die kumulierte Nachfrage  $\Delta_-$  der insgesamt  $N - 1$  anderen Operatoren ( $-j$ ). Da sich die Gebote ihrerseits wiederum aus den relativen Lasten  $\bar{\delta}_{(-j)}$  ableiten, lässt sich die Angebots- und Nachfragesituation aus Sicht des  $j$ -ten Operators über die Zufallsvariable  $\delta$  beschreiben:

$$\Delta_+ := \sum_{i \neq j | \delta_i > 0} \delta_i \quad (4.30)$$

$$\Delta_- := \sum_{i \neq j | \delta_i < 0} -\delta_i. \quad (4.31)$$

Der Vorzeichenwechsel in (4.31) bewirkt, dass sowohl  $\Delta_+$  als auch  $\Delta_-$  nur positive Werte annehmen. Beide Zufallsvariablen zählen letztlich Gebote, die dann im Verlauf der Auktion unterschiedlich interpretiert werden. Dabei ist zu beachten, dass jeder der anderen Operatoren ( $-j$ ) entweder zu genau einer dieser beiden Gruppen beiträgt oder aber selbst gerade einen relativen Bedarf von 0 hat. Dies bedeutet insbesondere, dass  $\Delta_+$  und  $\Delta_-$  nicht unabhängig voneinander sind. Gesucht ist also die gemeinsame Verteilung

$$P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l) = P(\Delta_+ = k, \Delta_- = l). \quad (4.32)$$

Um wie in (4.30) und (4.31) eine Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage zu erreichen, wird der Bedarf  $\delta$  in ebendiese Fälle unterteilt:

#### 4 Quantitative Untersuchungen

in den Nachfrageteil  $\delta_+$  und einen Angebotsteil  $\delta_-$ . Es ergeben sich die Verteilungen:

$$P_{\delta_+}(\kappa) := P(+\delta = \kappa | \delta > 0) \quad (4.33)$$

$$P_{\delta_-}(\lambda) := P(-\delta = \lambda | \delta < 0). \quad (4.34)$$

Sie lassen sich auf Basis der Verteilung  $P_\delta$  ausdrücken:

$$P_{\delta_+}(\kappa) := \begin{cases} \frac{1}{p_+} P_\delta(\kappa) & \kappa \geq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.35)$$

$$P_{\delta_-}(\lambda) := \begin{cases} \frac{1}{p_-} P_\delta(-\lambda) & 1 \leq -\lambda \leq R_\S \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.36)$$

mit den Abkürzungen

$$p_+ := P(\delta > 0) = \sum_{m=1}^{B-R_\S} P_\delta(m), \quad (4.37)$$

$$p_- := P(\delta < 0) = \sum_{m=-R_\S}^{-1} P_\delta(m), \quad (4.38)$$

$$p_0 := P(\delta = 0) = P_\delta(0) \quad (4.39)$$

und damit

$$p_+ + p_- + p_0 = 1. \quad (4.40)$$

Die Grenze  $-R_\S$  in (4.36) zeigt an, dass das Angebot nicht größer sein kann als die eigene Zuteilung,  $B - R_\S$  in (4.37) gibt die Obergrenze der überhaupt zu ersteigernden Anzahl von Ressourcen an.

Bezeichne nun  $\alpha$  die Anzahl der Operatoren, die zu  $\Delta_+$  beitragen,  $\beta$  die Anzahl derjenigen, die zu  $\Delta_-$  gehören. Die verbleibenden  $\gamma := N - 1 - \alpha - \beta$  sind dann ohne aktuellen relativen Bedarf.

Bedingt man sodann  $\Delta_+$  nach  $\alpha$  und  $\Delta_-$  nach  $\beta$ , erhält man die Zufallsvariablen für Angebot und Nachfrage bei einer gegebenen Aufteilung

der Operatoren auf die jeweilige Gruppe. Unter dieser Bedingung sind die relativen Lasten der Operatoren untereinander unabhängig, die Verteilungen für Nachfrage  $\Delta_+|\alpha = \sum_{i=1}^{\alpha} \delta_i$  und  $\Delta_-|\beta = \sum_{i=1}^{\beta} -\delta_i$  lassen sich also durch die  $\alpha$ - bzw.  $\beta$ -fachen Faltungen der Verteilungen  $P_{\delta_+}$  bzw.  $P_{\delta_-}$  mit sich selbst angeben:

$$\Delta_+|\alpha : P_{\Delta_+|\alpha}(k|\alpha) = \{P_{\delta_+} * P_{\delta_+} * \dots^{\alpha \text{ mal}}\}(k) \quad (4.41)$$

$$\Delta_-|\beta : P_{\Delta_-|\beta}(l|\beta) = \{P_{\delta_-} * P_{\delta_-} * \dots^{\beta \text{ mal}}\}(l). \quad (4.42)$$

Dabei gelten (4.41) und (4.42) zunächst nur für  $\alpha, \beta, k, l > 0$ . Um die Schreibweise in den weiteren Formeln möglichst einfach zu halten, gelte zusätzlich:

$$P_{\Delta_+|\alpha}(0|\alpha) = P_{\Delta_-|\beta}(0|\beta) = 0 \quad (4.43)$$

$$P_{\Delta_+|\alpha}(i|0) = P_{\Delta_-|\beta}(i|0) = \begin{cases} 0 & i > 0 \\ 1 & i = 0. \end{cases} \quad (4.44)$$

Zur Berechnung von  $P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l)$  kommt der Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit zur Anwendung. Dazu wird über alle möglichen Kombinationen  $(\alpha, \beta, \gamma)$  summiert, die zum gegebenen Gesamtangebot  $\Delta_+ = k$  bzw. zur Gesamtnachfrage  $\Delta_- = l$  beitragen.

Die Anzahl der möglichen Kombinationen von  $N-1$  Operatoren zu den Gruppen  $\alpha, \beta, \gamma$  kann durch den Multinomialkoeffizienten

$$\begin{aligned} \binom{N-1}{\alpha, \beta, \gamma} &= \binom{\alpha}{\alpha} \binom{\alpha + \beta}{\beta} \binom{\alpha + \beta + \gamma}{\gamma} \\ &= \binom{\alpha + \beta}{\beta} \binom{N-1}{N-1-\alpha-\beta} \end{aligned} \quad (4.45)$$

angegeben werden, einer verallgemeinerten Form des Binomialkoeffizienten, der als

$$\binom{N-1}{\alpha, \beta, \gamma} := \frac{(N-1)!}{\alpha! \beta! \gamma!} \quad (4.46)$$

definiert ist.

Für die Angebots- und Nachfragesituation  $P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l)$ , die von den  $N - 1$  anderen Operatoren dargestellt wird, lässt sich schließlich die Verteilung angeben:

$$\begin{aligned}
 P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l) &= \\
 &\sum_{\substack{\alpha, \beta, \gamma \\ \alpha + \beta + \gamma = N - 1}} \binom{N - 1}{\alpha, \beta, \gamma} \cdot p_+^\alpha P_{\Delta_+|\alpha}(k|\alpha) \cdot p_-^\beta P_{\Delta_-|\beta}(l|\beta) \cdot p_0^\gamma \\
 &= \sum_{\alpha=0}^{N-1} \sum_{\beta=0}^{N-1-\alpha} \binom{\alpha + \beta}{\beta} \binom{N - 1}{N - 1 - \alpha - \beta} \cdot \\
 &\quad \cdot p_+^\alpha P_{\Delta_+|\alpha}(k|\alpha) \cdot p_-^\beta P_{\Delta_-|\beta}(l|\beta) \cdot p_0^{(N-1-\alpha-\beta)}. \quad (4.47)
 \end{aligned}$$

Diese Verteilung ist ihrerseits aber weiterhin unabhängig von der Verkehrslast des Operators  $j$ . Erst während der Auktion wird sie dem Angebot bzw. der Nachfrage dieses Operators gegenübergestellt.

### Reallokationswahrscheinlichkeiten

Mit der jetzt bekannten Statistik der übrigen Operatoren ( $-j$ ), also der Verteilung  $P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l)$ , kann (4.29) durch die Anwendung des Satzes von der totalen Wahrscheinlichkeit so umgeformt werden, dass direkt die Situation einer einzelnen Auktion unter einer bestimmten Angebots-/Nachfragesituation  $P_{\Delta_+, \Delta_-}$  ablesbar wird:

$$P_{\delta, \rho}(d, r) = P_\delta(d) \cdot \sum_{k, l \geq 0} P_{\Delta_+, \Delta_-}(k, l) P_{\rho|\delta, \Delta_+, \Delta_-}(r|d, k, l). \quad (4.48)$$

$P_{\rho|\delta, \Delta_+, \Delta_-}(r|d, k, l)$  lässt sich anschaulich interpretieren:  $r$  bezeichnet die Anzahl der erhaltenen ( $r > 0$ ) oder abgegebenen ( $r < 0$ ) Ressourcen in Abhängigkeit vom eigenen Bedarf  $d$  sowie dem Angebot  $l$  und der Nachfrage  $k$  der Anderen.

Sobald sich eigenes Angebot zusammen mit eventuellem Angebot der Anderen und die Nachfrage der Übrigen gegenüberstehen, oder sich

respektive die eigene Nachfrage zusammen mit möglicher Nachfrage der Übrigen dem Angebot der Anderen gegenüberstehen, kann es zu Transaktionen kommen. Diese finden, je nach Relation, nicht sicher statt, sondern aufgrund der im Auktionsverfahren festgelegten zufälligen Auswahl, vgl. Abschnitt 3.3.

Zunächst wird aus Sicht des betrachteten Operators eine Fallunterscheidung nach dessen Bedarf  $\delta$  durchgeführt:

- Im Fall  $\delta = 0$  besteht für Operator  $j$  kein Bedarf und kein Angebot. Es findet keine Änderung in der Zuteilung dieses Operators statt, unabhängig von der Situation der Anderen. Es ist also mit Sicherheit  $\rho = 0$  und deshalb  $P_{\rho|\delta, \Delta_+, \Delta_-}(0|0, \cdot, \cdot) = 1$ .
- Auch für alle Fälle, in denen  $\delta$  und  $\rho$  zwar beide von 0 verschieden sind, jedoch unterschiedliche Vorzeichen haben, wird sich kein Wahrscheinlichkeitsbeitrag ergeben. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass ein Operator mit aktuellem Bedarf keine Ressourcen abgeben wird, oder umgekehrt bei zu geringer Auslastung keine weiteren dazunehmen würde.
- Im Fall von Bedarf  $d = \delta > 0$  bildet Operator  $j$  zusammen mit dem Bedarf  $\Delta_+ = k$  der anderen das Gesamtangebot  $(\Delta_+ + \delta) = k + d$ . Dem gegenüber steht das Angebot  $\Delta_- = l$  der Anderen.

Die Höchstzahl der möglichen Transaktionen bestimmt sich aus dem kleineren dieser beiden Werte, also  $\min\{l, k + d\}$ . Ist  $l \geq k + d$ , so wird auf jeden Fall  $r = d$  gelten, da alle nachfragenden Gebote bedient werden können. Umgekehrt jedoch ist die Zahl der zugeordneten Ressourcen vom Auktionsmechanismus abhängig.

- Für den Fall von Angebot bei Operator  $j$ , also  $\delta = d < 0$ , stellt sich die Situation genau umgekehrt dar. Die Anzahl der selbst angebotenen Ressourcen addiert sich zum Angebot der Übrigen  $\Delta_- = l$  und das Gesamtangebot beträgt  $(l + (-d))$ . Die Anzahl der abgegebenen Ressourcen  $(-r)$  ist vom Ergebnis der Auktion abhängig.

Wie eingangs schon bemerkt, wird für die Betrachtungen hier von bestmöglicher Reallokation ausgegangen. Es gibt also keine Transaktionen, die ausschließlich aufgrund nicht passender Preisvorstellungen ausgeschlossen werden. Ebenso wird kein Operator einem anderen vorgezogen. Bei einem Überschuss auf Angebots- oder Nachfrageseite werden zufällig und mit gleicher Wahrscheinlichkeit Paare von Geboten gelöst, die zu einer Transaktion führen.

Durch diese Annahmen kann nun eine Aussage für den Reallokationsanteil  $\rho$  von Operator  $j$  getroffen werden. Über die Wahrscheinlichkeit, dass von den  $\bar{k}$  Geboten dieses Operators gerade  $x$  ausgewählt werden, gibt die *hypergeometrische Verteilung* Auskunft: Aus  $\bar{M}$  Elementen, darunter  $\bar{k}$  speziellen, werden  $\bar{N}$  zufällig gewählt. Die Wahrscheinlichkeit, dass genau  $x$  spezielle darunter sind, ist gegeben durch:

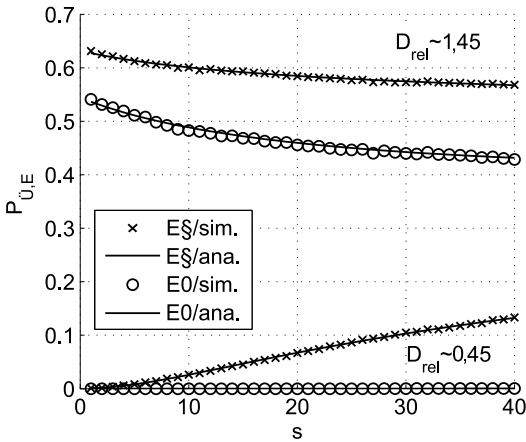
$$h(x|\bar{M}, \bar{k}, \bar{N}) = \frac{\binom{\bar{k}}{x} \binom{\bar{M}-\bar{k}}{\bar{N}-x}}{\binom{\bar{M}}{\bar{N}}} \quad (4.49)$$

Mit der angegebenen Fallunterscheidung lässt sich  $P_{\rho|\delta, \Delta_+, \Delta_-}(r|d, k, l)$  damit ausdrücken als

$$P_{\rho|\delta, \Delta_+, \Delta_-}(r|d, k, l) = \begin{cases} h(r|k+d, d, \min\{l, k+d\}) & r > 0, d \geq 0 \\ & \text{oder } r \geq 0, d > 0 \\ h(-r|l-d, -d, \min\{k, l-d\}) & r \leq 0, d \leq 0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.50)$$

Somit stehen Ausdrücke für alle Teile von (4.50) bereit und  $P_{\delta, \rho}(d, r)$  kann aus den bekannten Parametern und dem Verkehrsmodell gemäß (4.48) berechnet werden.





**Abbildung 4.27:** Vergleich von Simulation und analytischen Ergebnissen anhand der Überlastwahrscheinlichkeit  $P_{\ddot{U},E}$  im Verlauf einer Auktionsfolge für zwei verschiedene Werte der Verkehrslast  $D_{rel}$

#### 4.4.2 Vergleich mit der Simulation

Mit Hilfe von  $P_{\delta,\rho}(d,r)$  lassen sich im Szenario mit 2 Ebenen die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Bewertungsgrößen auch durch Rechnung ermitteln.

Auf Ebene  $E\ddot{S}$  kann die Überlastwahrscheinlichkeit nach (4.23) für jeden Operator unabhängig von den Anderen ermittelt werden:

$$P_{\ddot{U},\ddot{S}}(s) = P(D_0(s) > R_{\ddot{S}}) = \sum_{k=R_{\ddot{S}}+1}^B P_{D_0(s)}(k). \quad (4.51)$$

Für die Situation nach der Reallokation auf Ebene  $E0$  muss die gemeinsame Verteilung von  $(D_0(s), R_0(s))$  herangezogen werden, die sich durch Rücksubstitution gemäß (4.29) ergibt. Anschließend ist über alle Fälle zu summieren, die zu einer Überlastsituation führen, nämlich

dann, wenn  $R_0(s) < D_0(s)$  und gleichzeitig  $D_0(s) > R_{\S}$ :

$$P_{\ddot{U},0}(s) = P(D_0(s) > R_0(s)) = \sum_{\substack{r < d, \\ d > R_{\S}}} P_{R_0(s), D_0(s)}(r, d) \quad (4.52)$$

$$= \sum_{d=R_{\S}+1}^B \sum_{r=R_{\S}}^d P_{R_0(s), D_0(s)}(r, d). \quad (4.53)$$

Die so berechneten Werte stimmen gut mit den Ergebnissen der Monte-Carlo-Simulationen überein, wie Abbildung 4.27 zeigt. Die Parameter sind dieselben wie in Abschnitt 4.1 in Tabelle 4.2 angegeben. Einzig die Ebene E1 fällt weg und es werden ausgehend von der Allokation  $\vec{R}_{\S}$  die  $s_{\max}$  Auktionen zur Bestimmung von  $\vec{R}_0$  durchgeführt. Nochmals sei betont, dass auch im hier betrachteten Spezialfall alle Gebote während der Auktion gleichwahrscheinlich zu Transaktionen beitragen, da von identischer Wertschätzung ausgegangen wird.

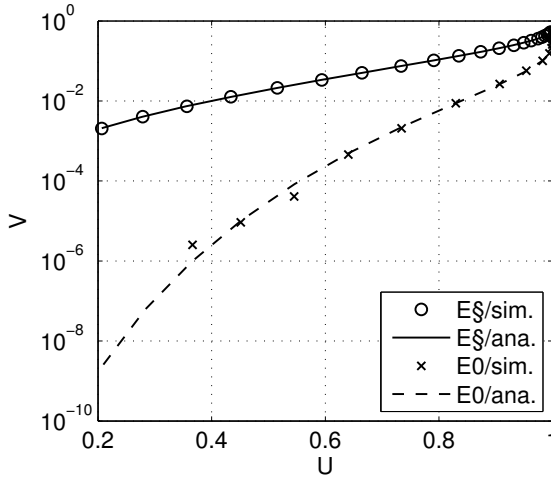
Für den Anteil der nicht bedienten Last findet man gemäß (4.24) auf der statischen Ebene E $_{\S}$  den zu erwartenden Anteil für einen Nutzer. Dieser kann einzig auf der Verteilung  $P_{D_0(s)}$  beruhen, da es sich noch um die feste Allokation  $R_{\S}$  handelt:

$$V_{\S}(s) = \sum_{d=R_{\S}+1}^B P_{D_0(s)}(d) \cdot \frac{(d - R_{\S})}{d}. \quad (4.54)$$

Nach der Auktion berechnet sich der gewichtete Anteil als Summe über den gleichen Bereich wie in (4.53):

$$V_0(s) = \sum_{d=R_{\S}+1}^B \sum_{r=R_{\S}}^d P_{R_0(s), D_0(s)}(r, d) \cdot \frac{(d - r)}{d}. \quad (4.55)$$

Aus Symmetriegründen sind sowohl  $V_{\S}(s)$  als auch  $V_0(s)$  für alle Operatoren gleich.



**Abbildung 4.28:** Vergleich von Simulation und analytischen Ergebnissen anhand der Gegenüberstellung von Netzauslastung  $U$  sowie dem Anteil der nicht bedienten Last  $V$ ; gemittelt über alle E0-Schritte  $s$

Für die mittlere Auslastung  $U_E(s)$  nach (4.20) findet man ausgehend von einem Nutzer für E§:

$$U_{\S}(s) = N \cdot \sum_{d=0}^B \frac{\max(d, R_{\S})}{R_{\S}} P_{D_0(s)}(d). \quad (4.56)$$

Für die Ebene E0 kann die Gesamtlast  $P_{D_0, N(s)}$  nach (4.16) herangezogen werden. Unter der Annahme idealer Reallokation werden alle angeforderten Ressourcen bis hin zur vollen Auslastung genutzt:

$$U_0(s) = \sum_{d=0}^{NB} \frac{\max(d, B)}{B} P_{D_0, N(s)}(d) \quad (4.57)$$

#### 4 *Quantitative Untersuchungen*

Bildet man schließlich über  $V(s)$  und  $U(s)$  jeweils den Erwartungswert über alle Schritte  $s$ , so lässt sich die Übereinstimmung von Simulation und Rechnung in einer einzelnen Abbildung 4.28 gut veranschaulichen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### Ausgangspunkt und vorgeschlagenes Konzept

Aufbauend auf der Idee von selbstständig agierenden Cognitive Radios und dem Konzept des Spectrum Pooling einerseits und andererseits dem Bestreben, das vorhandene elektromagnetische Spektrum möglichst effizient zu nutzen, hat sich eine große Zahl an Forschungsfeldern entwickelt. Sie schlagen neue Methoden und Szenarien vor, wie der Spektrumszugriff der Zukunft aussehen könnte. Dennoch verlangen viele der bisherigen Beiträge zur Umsetzung effizienter Modelle und Algorithmen nach gänzlich neu zu widmenden Frequenzbändern zusammen mit der Ausrüstung von Endgeräten mit passenden Zugriffsprotokollen. Auf der anderen Seite benötigen aber gerade die existierenden und insbesondere erfolgreich von großen Unternehmen bewirtschafteten Mobilfunksysteme gemäß bestehender Standards immer mehr Ressourcen im elektromagnetischen Spektrum. Zwar ist die Hinzunahme respektive Umwidmung zusätzlicher Bänder in Grenzen möglich, dennoch bietet die starre Aufteilung der bestehenden Frequenzbänder an die verschiedenen Operatoren schon jetzt ein Hindernis auf dem Weg zu höherer spektraler Effizienz.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz ist demzufolge ein konservativer und geht den Weg eines *Sekundärmarktes* für Nutzungslizenzen in den bereits vergebenen Mobilfunkbändern. Damit bleiben zunächst die gegebenen Frequenzzuteilungen bestehen, es wird allerdings den Inhabern der Lizenzen erlaubt, diese an Mitbewerber zu vermieten. Auch für den Mieter einer Lizenz gelten wie für den Hauptnutzer die bestehenden Regelungen hinsichtlich des verwendeten Mobilfunkstandards und aller damit verbundenen regulatorischen Rahmenbedingungen.

Die Einführung von *Auktionen* und damit auch der Bepreisung von Funklizenzen dient insbesondere als Anreiz für die Teilnehmer, auch als *Vermieter* von Ressourcen aufzutreten. Ohne diesen Anreiz hätte kein Operator aus seiner Perspektive einen direkten Vorteil aus der, auch nur zeitweiligen, Überlassung seiner Lizenzen an den Wettbewerber. Ebenso kann durch Auktionen sichergestellt werden, dass derjenige für bestimmte Ressourcen den Zuschlag erhält, der ihnen am meisten Wert beimisst. Das verwendete Auktionsschema verhindert unehrliches Bieten, womit bereits im Vorhinein Spekulation ein Riegel vorgeschoben wird.

Die *Teilnehmer* der Auktionen sind eine überschaubare Anzahl von Mobilfunkanbietern. Sie haben bereits für die Kalkulation und Planung ihrer Dienste eine umfassende Datengrundlage über die auftretenden Verkehrslasten und Nutzerprofile. Sie bringen also die für das vorgeschlagene Auktionssystem notwendigen Informationen bereits mit. Für die *Kunden* der Mobilfunkanbieter, also die Endnutzer mit existierenden Geräten, bleibt das Auktionssystem zwischen den Operatoren transparent. Für sie ändert sich nichts an ihren Endgeräten, genauso wenig wie eine Einführung neuer Preis- und Vertragsmodelle nötig wird.

Im Hinblick auf die Umsetzung des Systems kann schrittweise vorgegangen werden: Da die vorgegebenen Hierarchieebenen von den Teilnehmern frei festgesetzt werden können, ist eine regionale Gruppierung auf höheren Ebenen nicht unbedingt zwingend. Das vorgeschlagene System kann so zunächst nur in besonders stark ausgelasteten Gebieten zum Einsatz kommen und sukzessive erweitert werden. Auch müssen nicht von Anfang an alle Mobilfunkanbieter teilnehmen, die in einem bestimmten Bereich ihre Dienste anbieten, da das Auktionsverfahren frei in der Zahl der Teilnehmer ist. Zudem ist der Austausch von Ressourcen zwischen nur zwei Teilnehmern prinzipiell möglich und würde die übrigen Operatoren nicht im Bereich ihrer eigenen Lizenzen stören.

## Simulative und analytische Untersuchungen

In den Simulationen eines Modellszenarios wurde untersucht, ob die Anwendung des vorgeschlagenen hierarchischen Auktionssystems die gewünschten Vorteile bringt. Wie zu erwarten war, spielt es seine Stärken insbesondere in Bereichen hoher Gesamtverkehrslast aus, da dann bei variabler Verkehrslast Operatoren wechselweise sowohl die Anbieter- als auch die Nachfrager-Rolle einnehmen können.

Aus Sicht des Regulierers konnte die Auslastung der Ressourcen bei gleicher netzweiter Gesamtverkehrslast signifikant durch die dynamische Anpassung der Allokationen von Ressourcen erhöht werden. Die hier vorgelegte Arbeit gibt also einen Hinweis darauf, dass ein Sekundärmarkt für Übertragungslizenzen im Sinne des Regulierers sein kann. Anhand von Überlastwahrscheinlichkeiten wurde untersucht, ob jeder einzelne Mobilfunkanbieter einen Vorteil aus dem Handel mit seinen Lizenzen ziehen kann. Desweiteren konnten die vorgelegten Untersuchungen einen klaren Hinweis darauf geben, dass im Mittel die Teilnehmer der Auktionen ihre eigene Überlast reduzieren können und somit nicht nur durch die Vermietung profitieren, sondern auch durch die Hinzunahme von Übertragungsressourcen zur besseren Bedienung ihrer Kunden in der Lage sind.

Im Hinblick auf die eingeführte Auktionshierarchie wird die Überlegenheit der sehr *kurzfristigen* Reallokation deutlich. Die eben genannten Vorteile stellen sich nur dann in vollem Umfang ein, wenn die Auktionen häufig stattfinden und die resultierende Zuteilung stets der tatsächlichen Verkehrslast folgen kann. Dennoch sind eine oder mehrere längerfristige Allokationsebenen bewusst in das Konzept eingefügt worden, um einen Kompromiss im Hinblick auf die Verlässlichkeit der Zuteilung zu finden. Die Operatoren sollen die Möglichkeit haben, bereits frühzeitig vor einer erwarteten höheren Last längerfristig Ressourcen zu erwerben, um nicht nach jedem kurzfristigen Zuteilungsintervall befürchten zu müssen, auf einen Schlag deutlich weniger Übertragungsressourcen zur Verfügung zu haben. Auf diese Weise ist es für die Mobilfunkanbieter möglich, je nach Situation und nach eigenem Ermessen schnelle

Anpassung an Lastspitzen gegen die Sicherheit einer länger geltenden Zuteilung aufzuwiegen.

### **Ausblick**

Die in dieser Arbeit gezeigten Vorschläge und Ergebnisse werfen ein positives Licht auf die Flexibilisierung bestehender Lizenzierung im Mobilfunkbereich im Sinne eines Sekundärmarktes. Das vorgeschlagene System kann dabei sukzessive umgesetzt werden, da bereits bestehende Systeme nachträglich erweitert werden können und sich nicht nur Vorteile für die Nutzungseffizienz aus Regulierersicht, sondern auch für den einzelnen Anbieter von Mobilfunkdienstleistungen ergeben. Wie dargestellt wurde, können aktuelle Entwicklungen wie beispielsweise Site-Sharing in das Szenario integriert werden; Systemparameter sind durch Absprache unter einer überschaubaren Anzahl von Marktteilnehmern auch im Nachhinein noch anpassbar.

Insgesamt konnte diese Arbeit ein Konzept zur *dynamischen Reallokation von spektralen Ressourcen in einem hierarchischen Auktionssystem* einführen, das den Abstand hin zu einer möglichen Umsetzung in Regulierung und existierenden Systemen verkleinert hat.



## Literaturverzeichnis

- [1] AKYILDIZ, I. F., W.-Y. LEE, M. C. VURAN und S. MOHANTY: *NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey*. Comput. Networks, 50(13):2127–2159, 2006.
- [2] AMITAY, N. und L. GREENSTEIN: *Resource auction multiple access (RAMA) in the cellular environment*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 43(4):1101–1111, Nov. 1994.
- [3] ANALYSIS CONSULTING LTD, DOTECON LTD und HOGAN & HARTSON LLP: *Final report for the European Commission: Study on conditions and options in introducing secondary trading of radio spectrum in the European Community*. Techn. Ber., Analysis Consulting Ltd et. al., May 2004. Available at: [http://rspg.groups.eu.int/doc/documents/meeting/rspg4/rspg04\\_40\\_study\\_secondtrad\\_summary.pdf](http://rspg.groups.eu.int/doc/documents/meeting/rspg4/rspg04_40_study_secondtrad_summary.pdf).
- [4] BERLEMANN, L., S. MANGOLD und B. WALKE: *Policy-based reasoning for spectrum sharing in cognitive radio networks*. In: *IEEE 1<sup>st</sup> International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN*, S. 1–10, 2005.
- [5] BLASCHKE, V., H. JAEKEL, T. RENK, C. KLOECK und F. K. JONDRALE: *Occupation Measurements Supporting Dynamic Spectrum Allocation for Cognitive Radio Design*. In: *Proc. 2nd Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications CrownCom*, S. 50–57, 2007.
- [6] BLASCHKE, V., T. RENK und F. K. JONDRALE: *Analysis of Occupation Measurements Concerning Overlay Systems*. In: *17th Annual MPRG Symposium on Wireless Personal Communications*, 2007.

- [7] BRODERSEN, R., A. WOLISZ, D. CABRIC, S. M. MISHRA und D. WILLKOMM: *CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum*. Techn. Ber., Berkeley Wireless Research Center, University of California, Berkeley, 2004.
- [8] BUDDHIKOT, M., P. KOLODZY, S. MILLER, K. RYAN und J. EVANS: *DIMSUNet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum*. In: *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM*, S. 78–85, 2005.
- [9] BUDDHIKOT, M. M.: *Cognitive Radio, DSA and Self-X: Towards Next Transformation in Cellular Networks (Extended Abstract)*. In: *Proc. IEEE Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum*, S. 1–5, 2010.
- [10] BURGHARDT, D., I. COSOVIC, G. AUER und F. K. JONDRAL: *Reducing the probability of network overload by spectrum trading*. In: *Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE '09*, S. 363–367, 3–6 May 2009.
- [11] BURGHARDT, D., I. COSOVIC und F. K. JONDRAL: *Dynamic Spectrum Allocation by Hierarchical Resource Trading*. In: *IEEE 67<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference, VTC Spring*, Mai 2008.
- [12] BURGHARDT, D., C. KLÖCK, H. JÄKEL und F. JONDRAL: *Fast Bidding Strategy for Auction-Based Radio Resource Allocation Mechanisms*. In: *IST Mobile & Wireless Communication Summit*, 2006.
- [13] CABRIC, D., S. M. MISHRA, D. WILLKOMM, R. BRODERSEN und A. WOLISZ: *A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum*. In: *IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit*, 2005.
- [14] CAICEDO, C. E. und M. B. H. WEISS: *Spectrum Trading: An Analysis of Implementation Issues*. In: *New Frontiers in Dyna-*

- mic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, S. 579–584, 17-20 April 2007.
- [15] CAICEDO, C. E. und M. B. H. WEISS: *The Viability of Spectrum Trading Markets*. In: *Proc. IEEE Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum*, S. 1–10, 2010.
- [16] CAO, L. und H. ZHENG: *Distributed spectrum allocation via local bargaining*. In: *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2005. IEEE SECON 2005. 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on*, S. 475–486, 26-29 Sept., 2005.
- [17] CAPAR, F., I. MARTOYO, T. WEISS und F. JONDRAL: *Analysis of coexistence strategies for cellular and wireless local area networks*. In: *IEEE 58<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference, VTC Fall*, S. 1812–1816, 2003.
- [18] CHANDRASEKHAR, S.: *Stochastic Problems in Physics and Astronomy*. *Reviews of Modern Physics*, 15(1):1–89, Jan. 1943.
- [19] CHIN, C. M., S. OLAFSSON, B. VIRGINAS und G. OWUSU: *Radio Resource Management via Spectrum Trading*. In: *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. VTC Spring 2008*, S. 1781–1785, 2008.
- [20] DELAERE, S. und P. BALLON: *Flexible Spectrum Management and the Need for Controlling Entities for Reconfigurable Wireless Systems*. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, S. 347–362, 17-20 April 2007.
- [21] DEMESTICHAS, P. et al.: *Wireless beyond 3G: managing services and network resources*. *IEEE Computer*, 1:80–82, 2002.
- [22] DENKER, G., D. ELENUS, R. SENANAYAKE, M.-O. STEHR und D. WILKINS: *A Policy Engine for Spectrum Sharing*. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, S. 55–65, 17-20 April 2007.

- [23] EL-KHAZEN (EDITOR), K.: *WWI CI Reconfigurability – White Paper – Efficient Use of Spectrum*. Techn. Ber., Wireless World Initiative, Jan. 2006.
- [24] ELSNER, J., N. GROVE, D. BURGKHARDT, F. K. JONDRAL und A. PICOT: *Convergence of Mobile Communications and Broadcasting: A Long-Term Perspective*. In: *8th Conference on Applied Infrastructure Research*, Berlin, Okt. 2009.
- [25] FCC: *FCC 02-135, Spectrum Policy Task Force Report*, Nov. 2002.
- [26] FELEGYHAZI, M., M. CAGALJ und J.-P. HUBAUX: *Multi-radio channel allocation in competitive wireless networks*. In: *Distributed Computing Systems Workshops, 2006. ICDCS Workshops 2006. 26th IEEE International Conference on*, S. 36–36, 04-07 July 2006.
- [27] GANDHI, S., C. BURAGOHAJ, L. CAO, H. ZHENG und S. SURI: *A General Framework for Wireless Spectrum Auctions*. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, S. 22–33, 17-20 April 2007.
- [28] GJERSTAD, S. und J. DICKHAUT: *Price Formation in Double Auctions*. *Games and Economic Behavior*, 22:1–29, 1998.
- [29] GRANDBLAISE, D., K. MOESSNER, G. VIVIER und R. TAFAZOLLI: *Credit Token based Rental Protocol for Dynamic Channel Allocation*. In: *1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2006)*. Mykonos Island, Greece, jun 2006.
- [30] HAN, C., J. WANG, S. GONG und S. LI: *Detection and Performance of the OFDM-Based Transform Domain Communication System*. In: *Communications, Circuits and Systems Proceedings, 2006 International Conference on*, Bd. 2, S. 1332–1336, 25-28 June 2006.

- [31] HAYKIN, S.: *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2):201–220, Feb. 2005.
- [32] HEW, S.-L. und L. B. WHITE: *Fair Resource Bargaining Solutions for Cooperative Multi-Operator Networks*. In: *Proc. Int Communications Zurich Seminar*, S. 58–61, 2006.
- [33] HU, W., D. WILLKOMM, M. ABUSUBAIH, J. GROSS, G. VLANTIS, M. GERLA und A. WOLISZ: *Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation*. Communications Magazine, IEEE, 45(5):80–87, May 2007.
- [34] HUANG, J., R. BERRY und M. HONIG: *Spectrum sharing with distributed interference compensation*. In: *IEEE 1<sup>st</sup> International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN*, S. 88–93, 2005.
- [35] HUANG, J., R. BERRY und M. HONIG: *Auction-Based Spectrum Sharing*. Mobile Networks and Applications, 11(11):405–418, Apr. 2006.
- [36] IEEE: *802.22 Working Group*. <http://www.ieee802.org/22/>.
- [37] IRVING, L.: *Spectrum management: a balancing process*. IEEE Communications Magazine, 33(12):44–46, 1995.
- [38] JABBARI, B., R. PICKHOLTZ und M. NORTON: *Dynamic spectrum access and management [Dynamic Spectrum Management]*. IEEE Wireless Communications Magazine, 17(4):6–15, 2010.
- [39] JEHIEL, P. und B. MOLDOVANU: *The European UMTS/IMT-2000 license auctions*. Sonderforschungsbereich 504 Publications 01-20, 2001.
- [40] JI, Z. und K. LIU: *Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview*. Communications Magazine, IEEE, 45(5):88–94, May 2007.

- [41] JONDRAL, F.: *Funksignalanalyse*. Teubner-Studienbücher. Teubner, Stuttgart, 1991.
- [42] KANT, U. und D. GROSU: *Double auction protocols for resource allocation in grids*. In: *Information Technology: Coding and Computing, 2005. ITCC 2005. International Conference on*, Bd. 1, S. 366–371 Vol.1, 4-6 April 2005.
- [43] KASKIRIS, C., Y. BUTUN und R. JAIN: *An Experimental Analysis of a Combinatorial Market Mechanism for Bandwidth Trading*. In: *Proc. 1st IEEE Int Bandwidth Demand Workshop*, S. 19–26, 2006.
- [44] KASKIRIS, C., R. JAIN, R. RAJAGOPAL und V. PRAVIN: *Combinatorial Auction Design for Bandwidth Trading: An Experimental Analysis*. In: *Experiments in Economic Sciences - New Approaches to Solving Real-world Problems*, 2004.
- [45] KLÖCK, C., H. JÄKEL und F. JONDRAL: *Auction Sequence as a New Resource Allocation Mechanism*. In: *IEEE 62<sup>nd</sup> Vehicular Technology Conference, VTC Fall, 2005*.
- [46] KLOECK, C., H. JAEKEL und F. JONDRAL: *Dynamic and local combined pricing, allocation and billing system with cognitive radios*. In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, S. 73–81, 8-11 Nov. 2005.
- [47] KRIESTEN, R., U. KAAGE und F. K. JONDRAL: *Stochastic Self-Similarity in Teletraffic Modeling*. *Infinite Dimensional Analysis, Quantum Probability and Related Topics*, 2(3):475–486, 1999.
- [48] KRISHNA, V.: *Auction Theory*. Academic Press, San Diego, 2002.
- [49] LEAVES, P., S. GHAHERI-NIRI, R. TAFAZOLLI, L. CHRISTODOULIDES, T. SAMMUT, W. STAHL und J. HUSCHKE: *Dynamic spectrum allocation in a multi-radio environment: concept and algorithm*. In: *3G Mobile Communication Technologies*, S. 53–57, 2001.

- [50] LEAVES, P., K. MOESSNER, R. TAFAZOLLI, D. GRANDBLAISE, D. BOURSE, R. TONJES und M. BREVEGLIERI: *Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks*. IEEE Communications Magazine, 42(5):72–81, Mai 2004.
- [51] LEHR, W. und J. CROWCROFT: *Managing shared access to a spectrum commons*. In: *Proc. First IEEE Int. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005*, S. 420–444, 2005.
- [52] MACKENZIE, A. und S. WICKER: *Game theory and the design of self-configuring, adaptive wireless networks*. Communications Magazine, IEEE, 39(11):126–131, Nov. 2001.
- [53] MCAFEE, R. P.: *A Dominant Strategy Double Auction*. Journal of Economic Theory, 56:434–450, 1992.
- [54] MCHENRY, M.: *NSF Spectrum Occupancy Measurements*. Techn. Ber., The Shared Spectrum Company, [http://www.sharespectrum.com/?section=nsf\\\_measurements](http://www.sharespectrum.com/?section=nsf\_measurements), 2005.
- [55] MITOLA III, J.: *Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications*. In: *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, S. 3–10, 1999.
- [56] MOULY, M. und M.-B. PAUTET: *The GSM system for mobile communications*. Palaiseau, 1992.
- [57] NIYATO, D., E. HOSSAIN und Z. HAN: *Dynamics of Multiple-Seller and Multiple-Buyer Spectrum Trading in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Modeling Approach*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 8(8):1009–1022, 2009.
- [58] NOAM, E.: *Taking the next step beyond spectrum auctions: open spectrum access*. IEEE Communications Magazine, 33:66–73, 1995.

- [59] OFCOM: *Award of available spectrum: 2500-2690 MHz, 2010-2025 MHz and 2290-2300 MHz*, Dec. 2006. <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/2ghzawards/2ghzawards.pdf>.
- [60] ORLOWSKI, M.: *1-D random walk in presence of a totally reflecting barrier*. *physica status solidi*, 239:158–167, Sep. 2003.
- [61] PAN, M., S. LIANG, H. XIONG, J. CHEN und G. LI: *A Novel Bargaining Based Dynamic Spectrum Management Scheme in Reconfigurable Systems*. In: *Systems and Networks Communication, 2006. ICSNC '06. International Conference on*, S. 54–54, Oct. 2006.
- [62] PEHA, J. M.: *Approaches to spectrum sharing*. *IEEE Communications Magazine*, 43:10–12, Feb. 2005.
- [63] SALGADO, H., M. SIRBU und J. M. PEHA: *Spectrum sharing through dynamic channel assignment for open access to personal communications services*. In: *IEEE International Conference on Communications*, S. 417–422, 1995.
- [64] SALGADO-GALICIA, H., M. SIRBU und J. M. PEHA: *A narrow-band approach to efficient PCS spectrum sharing through decentralized DCA access policies*. *IEEE Personal Communications Conference*, 1:24–35, Feb. 1997.
- [65] SALLENT, O., J. PEREZ-ROMERO, R. AGUSTI und P. CORDIER: *Cognitive Pilot Channel Enabling Spectrum Awareness*. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Communications Workshops ICC Workshops 2009*, S. 1–6, 2009.
- [66] SALLENT, O., J. PEREZ-ROMERO, R. AGUSTI, L. GIUPPONI, C. KLOECK, I. MARTOYO, S. KLETT und J. LUO: *Resource Auctioning Mechanisms in Heterogeneous Wireless Access Networks*. In: *Proc. VTC 2006-Spring Vehicular Technology Conf. IEEE 63rd*, Bd. 1, S. 52–56, 2006.
- [67] SIWIAK, K., P. WITHINGTON und S. PHELAN: *Ultra-wide band radio: the emergence of an important new technology*. In: *IEEE 53<sup>rd</sup>*



- Vehicular Technology Conference, VTC Spring*, Bd. 2, S. 1169–1172, 2001.
- [68] WALKE, B.: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle – Grundlagen, GSM, UMTS und andere zellulare Mobilfunknetze*, Bd. 1. Teubner, Stuttgart, 2001.
- [69] WEISS, T. und F. JONDRAL: *Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency*. IEEE Communications Magazine, 42:8–14, 2004.
- [70] WILLKOMM, D., S. MACHIRAJU, J. BOLOT und A. WOLISZ: *Primary user behavior in cellular networks and implications for dynamic spectrum access*. IEEE Communications Magazine, 47(3):88–95, March 2009.
- [71] WU, Z., C. NASSAR, B. NATARAJAN und D. WIEGANDT: *The road to 4G: two paradigm shifts, one enabling technology*. In: *IEEE 1<sup>st</sup> International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN*, S. 688–694, 2005.
- [72] XING, Y., R. CHANDRAMOULI und C. CORDEIRO: *Price dynamics in competitive agile spectrum access markets*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 25(3):613–621, 2007.
- [73] XING, Y., R. CHANDRAMOULI, S. MANGOLD und S. SHANKAR N: *Dynamic Spectrum Access in Open Spectrum Wireless Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 24(3):626–637, Mar. 2006.
- [74] YAMADA, T., D. BURGKHARDT, I. COSOVIC und F. K. JONDRAL: *Resource Distribution Approaches in Spectrum Sharing Systems*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2008:1–15, 2008.
- [75] ZANDER, J.: *Radio resource management in future wireless networks: requirements and limitations*. IEEE Communications Magazine, 35(8):30–36, Aug. 1997.

- [76] ZHENG, H. und L. CAO: *Device-centric spectrum management*.  
In: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005*.  
*DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, S.  
56–65, 8–11 Nov. 2005.

# Lebenslauf

## Zur Person

DENNIS MARTIN BURGKHARDT  
geboren am 21. März 1980 in Karlsruhe

## Schule und akademischer Werdegang

06/1999

*Abitur* am Otto-Hahn-Gymnasium Karlsruhe

10/2000–12/2005

Studium an der Universität Karlsruhe (TH) zum  
*Diplom-Ingenieur Elektro- und Informationstechnik*  
Vertiefungsrichtung Nachrichtensysteme

02/2006–12/2010

*Wissenschaftlicher Mitarbeiter* am  
Institut für Nachrichtentechnik (CEL) des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

