

TU
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**Verkehrsmodelle für die
Parameteroptimierung in GSM-Netzen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des
akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Weinmann
E376
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

und in Zusammenarbeit mit

Dipl.-Ing. Martin Kutscherer
max.mobil.

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Martin HAIDINGER
9626249
Föhrenstraße 13, 3580 Horn

Wien, im Mai 2002

Danksagung

Ich möchte mich bei O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Weinmann (Vorstand Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU-Wien) recht herzlich für die Betreuung und die wissenschaftliche und organisatorische Unterstützung bedanken.

Bei Mag. Norbert Entstrasser (Leiter der Abteilung 'Netzentwicklung') möchte ich mich für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit bei der Firma max.mobil. im Bereich Funknetz, Abteilung Netzentwicklung bedanken.

Für die besonders interessante Themenvorgabe, die fachliche Unterstützung und die Gewährung des notwendigen Freiraumes möchte ich Ing. Gerhard Leonhardsberger (Leiter des Teams 'Netzmanagement') danken.

Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer seitens max.mobil., Dipl.-Ing. Martin Kutscherer, bedanken, der mich, neben der Themenvorgabe, im Speziellen auf der fachlichen Ebene sehr gut unterstützt hat. Seine Inputs führten oftmals zu sehr fruchtbaren und neuen Ideen. Daneben hat er auch diese schriftliche Ausarbeitung einer besonders gewissenhaften Durchsicht unterzogen, aus der viele Verbesserungsvorschläge resultierten.

Außerdem gebührt dem gesamten Team 'Netzmanagement' mein Dank, dessen Mitglieder immer für Fragen offen waren und die mich immer mit Engagement unterstützt haben.

Bei meinen Eltern, Franz und Elisabeth Haidinger, muss ich mich für die Ermöglichung dieses Studiums ganz besonders bedanken. Durch die menschliche und finanzielle Unterstützung war es mir möglich, mich voll auf das Studium zu konzentrieren und dieses mit gutem Erfolg voranzutreiben. Für die gewissenhafte Durchsicht dieser schriftlichen Ausarbeitung möchte ich mich bei meiner Mutter ebenfalls bedanken.

Dank gebührt außerdem meiner Lebensgefährtin, Marion Haberl, die immer Rücksicht auf mein Studium nahm und mir sehr guten Rückhalt gab.

Kurzfassung

Netzbetreiber von GSM-Netzen stehen vor der Aufgabe, die verfügbaren Netzressourcen möglichst effizient einzusetzen, um den Kunden ein Höchstmaß an Qualität bieten zu können. Die Systemtechnik bietet hierfür mit den GSM-Parametern eine große Anzahl von Einstellmöglichkeiten, um dieses Ziel zu erreichen. Um jedoch die zukünftigen Auswirkungen von Parametereinstellungen abschätzen zu können, wäre es von Vorteil, theoretische Verkehrsmodelle zur Verfügung zu haben, die zur Simulation eingesetzt werden können. Durch die Einbringung dieser Verkehrsmodelle in den ständig laufenden Parameteroptimierungsprozess ist es möglich, diesen besser und effizienter zu gestalten.

Nach einer genaueren Einführung in die Thematik der Multilayer-Netzwerke und deren Betrieb wird auf die theoretischen Grundlagen der Telefonverkehrstheorie eingegangen. Danach erfolgt eine Datenanalyse von Messdaten aus dem laufenden Netzbetrieb, deren Blickrichtung das Sättigungsverhalten von einzelnen GSM-Zellen ist. Mit dieser Erkenntnis wird im Folgenden ein Modell einer solchen GSM-Zelle realisiert, welches zur Simulation der Auswirkungen von Parametereinstellungen bei zwei deckungsgleichen GSM-Zellen eingesetzt werden kann. Jedoch kann dieses Modell nur auf jene GSM-Parameter eingehen, die den Gesprächsaufbau beeinflussen.

Neben dem Gesprächsaufbau ist der vom GSM-System geführte Wechsel zwischen verschiedenen GSM-Zellen (Handover) ein weiterer wichtiger Bestandteil eines typischen Telefongesprächs. Um diesen Prozess und die ihn beeinflussenden GSM-Parameter zu erfassen, ist ein Modell notwendig, welches einen gesamten Zellverbund betrachtet. Daher behandelt das zweite Verkehrsmodell die Verkehrsströme innerhalb der so genannten GSM-Layer und zwischen diesen. Es arbeitet auf globalerer Ebene als das vorherige, wodurch alle wesentlichen Phasen eines Gesprächs im Modell enthalten sind. Dadurch ist es möglich, dieses Verkehrsmodell für die Simulation eines breiten Feldes von GSM-Parametern zu verwenden.

An Hand von Messdaten aus dem laufenden Betrieb und gezielt durchgeführten Parametertests werden sodann die Einflüsse von Handover-Parametern auf die Verkehrsaufteilung zwischen den Layern untersucht. Aus diesen Erkenntnissen werden die allgemeinen Grundlagen für die Prediktion und den weiteren Einsatz des Modells geschaffen. Dieser wird zuletzt mit einigen Simulationsergebnissen dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Multilayer-Netzwerke	4
1.2.1	Verkleinerung der Zellgröße	6
1.2.2	Teilung einzelner Zellen in Sektoren	6
1.2.3	Zusätzliche, punktuelle Verwendung des GSM1800-Systems	7
1.2.4	Einführung einer flächendeckenden <i>Layerstruktur</i> („Overlay - Netzwerk“)	7
1.3	Qualitäts- / Auslastungsoptimierung, Verkehrslenkung	8
1.3.1	Überlastsituation	9
1.3.2	Verteilung des Telefonverkehrs auf die Layer	10
1.3.3	Verkehrslenkung	11
2	Verkehrstheorie	13
2.1	Begriffe und Größen	13
2.2	Der ungestörte Telefonverkehr	15
2.2.1	Einfallende Anrufe, Beginn einer Belegung	15
2.2.2	Die Belegungsdauer, Ende einer Belegung	16
2.2.3	Die Wahrscheinlichkeitsfunktion des ungestörten Verkehrs	16
2.3	Allgemeiner Ansatz über den Belegungszustand eines Systems . .	18
2.4	Mathematische Formulierung verkehrstheoretischer Begriffe	22
2.4.1	Das Verkehrsangebot	22
2.4.2	Die Verlustwahrscheinlichkeit	22
2.4.3	Die mittlere Verkehrsbelastung	22
2.4.4	Die Blockierungszeit	22
2.5	Die Erlangsche Verlustformel	23
2.5.1	Voraussetzungen	23
2.5.2	Resultate	23
2.5.3	Anwendung, Grade of Service	24
3	Theoretisches Verhalten einer GSM-Zelle	26
3.1	Idealisiertes Verkehrsangebot	26
3.2	Verhalten ohne Ressourcenbeschränkung	28

3.3	Verhalten mit Ressourcenbeschränkung	29
3.4	Sättigungsverhalten nach Erlang	30
4	Datenanalyse für das Zellmodell	31
4.1	Das Messsystem „Metrica/NPR“	31
4.2	Fehlerhafte Belegungsversuche	32
4.3	Zusammenhang Belegungsversuche / abgeführter Verkehr	33
4.3.1	Normierung und mittlere Kanalbelegungsdauer	35
4.3.2	Datenreduzierung	36
4.3.3	Identifikation	38
5	Entwicklung des Zellmodells und dessen Anwendung	39
5.1	Simulink-Modell	39
5.1.1	Ansatz	39
5.1.2	Zellmodell	40
5.1.3	Erprobung des Modells	41
5.1.4	Verbesserung des Modells	44
5.1.5	Zusätzliche Simulationsgrößen	46
5.2	Vergleich mit der Theorie	47
5.3	Einsatz des Zellmodells	47
5.3.1	GSM-Parameter für den Idle-Mode	48
5.3.2	Untersuchungen zu den Auswirkungen von Parametereinstellungen im Idle-Mode	50
5.3.3	Simulationseinsatz	53
5.3.4	Anwendungsgrenzen des Modells	55
6	Verkehrsmodell einer GSM-Multilayerstruktur	57
6.1	Formulierung des Verkehrsmodells	57
6.1.1	Begonnene Belegungen (Gesprächsaufbauten)	59
6.1.2	Handover	60
6.1.3	Beendete Belegungen	63
6.1.4	Fehlerhafte Belegungsversuche	63
6.1.5	Formulierung des Differentialgleichungssystems	64
6.2	Die DGL-Koeffizienten und der Einfluss der GSM-Parameter	66
6.2.1	Begonnene Belegungen (Gesprächsaufbau)	66
6.2.2	Handover	69
6.2.3	Beendete Belegungen	75
6.2.4	Fehlerhafte Belegungsversuche	76
6.3	Erprobung des Modells mit ANA	77
6.3.1	Simulationsergebnisse	78
6.4	Einsatz des Modells	82
7	Zusammenfassung und Ausblick	85

Kapitel 1

Einleitung

Mobilfunknetze sind ein wichtiger Bestandteil unserer Kommunikationsgesellschaft. Bei der Erstellung des Standards für GSM konnte nicht mit derart rasanten Teilnehmerzuwächsen gerechnet werden. Die Mobilnetzbetreiber standen und stehen noch immer vor der Aufgabe, die bestehenden Ressourcen möglichst effizient auszunutzen und Strategien zu entwickeln, die es ermöglichen, den ständig wachsenden Telefonverkehr abzuführen.

Eine dieser Strategien ist es, ein *Multilayer-Netzwerk* einzuführen. Darunter versteht man eine Netzstruktur, die es erlaubt, an einem geographischen Ort über eine von mehreren, parallel bestehenden Netzebenen ein Gespräch oder eine Datenverbindung aufzubauen. Dadurch ist es möglich, ein Vielfaches an Belegungen mit hoher Gesprächsqualität abzuführen.

Tatsächlich werden Multilayer-Netzwerke von einigen Netzbetreibern in Österreich, vor allem in Ballungszentren, erfolgreich eingesetzt. Durch die Einführung mehrerer Netzebenen ergibt sich allerdings die Aufgabe, dass diese Ebenen auch möglichst gleichmäßig ausgelastet sind. In der Praxis ist dies nicht immer der Fall, was zu der Aufgabenstellung führt, die in dieser Diplomarbeit behandelt wird.

1.1 Aufgabenstellung

Diese gliedert sich in zwei Hauptteile:

1. Erstellung eines Angebot-/Nachfragemodells auf Zellebene zur Ermittlung des maximal möglichen Telefonverkehrsaufkommens innerhalb einer Zelle. Insbesondere soll hier das Sättigungsverhalten der Zellen nachgebildet werden. Die Einsatzmöglichkeiten für die Zwecke einer Auslastungsoptimierung über GSM-Parameter sollen geprüft werden.
2. Entwicklung und Verifikation eines Verkehrsmodells zur Telefonverkehrlenkung innerhalb einer Multilayer-Struktur. Der Einsatz des Modells soll

insbesondere eine homogene Auslastung und hohe (Gesprächs-) Qualität innerhalb der Layer gewährleisten. Aus regelungstechnischer Sicht stellt dieses System einen Regelkreis mit den Sollgrößen 'homogene Auslastung' und 'Gesprächsqualität' dar. Als Stellgrößen sind die entsprechenden GSM-Parameter zu betrachten.

1.2 Multilayer-Netzwerke

GSM-Netze [1] [2] sind öffentliche Mobilkommunikationsnetze, welche funkseitig durch ein flächendeckendes, zellulares Netzwerk gebildet werden. Abbildung 1.1 zeigt ein idealisiertes Bild einer solchen Versorgungsstruktur, welche aus mehreren GSM-Einzelzellen gebildet wird, in deren Mitte sich jeweils eine Basisstation befindet.

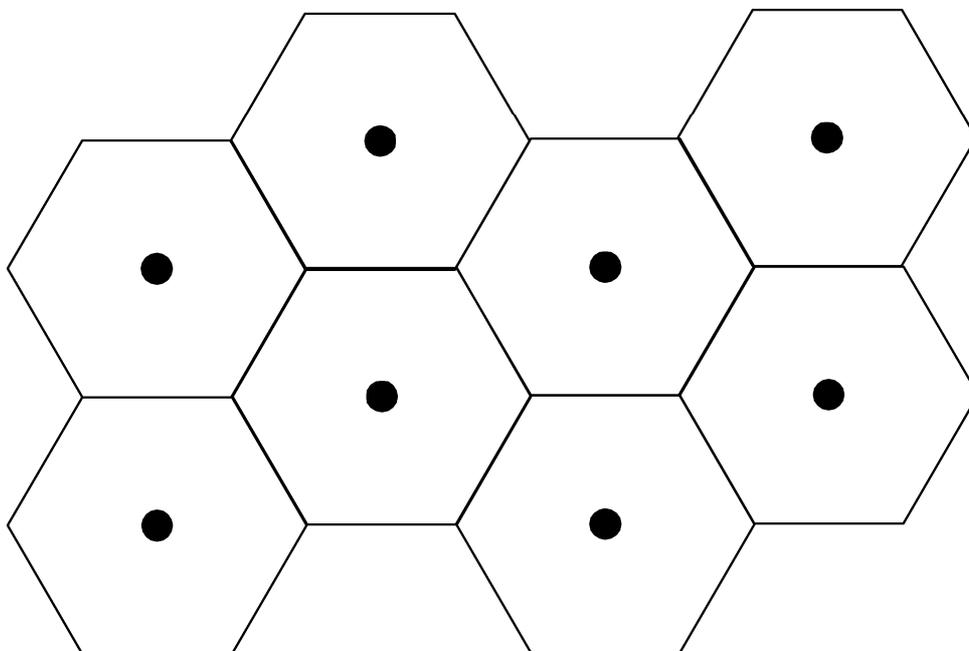


Abbildung 1.1: GSM Funkversorgungsstruktur

Die Mobilstation (Handy) eines Teilnehmers kann über die Basisstationen (BTS - base transceiver station) eine Verbindung über Funk aufbauen, und so ein Gespräch oder einen Daten-Call abwickeln. Dabei kann sich der Teilnehmer innerhalb dieses Gebietes frei bewegen und wird dabei von der ihm am nächsten liegenden Basisstation versorgt.

Jeder Basisstation stehen eine oder mehrere Funkkanäle zur Verfügung, die sie innerhalb ihres Versorgungsgebietes ausstrahlt. Um Interferenzen zu vermeiden, ist es notwendig, dass ein verwendeter Kanal erst in einem gewissen Abstand

wieder verwendet wird (frequency reuse). Abbildung 1.2 zeigt das Spektrum, welches den GSM-Netzbetreibern zur Verfügung steht.

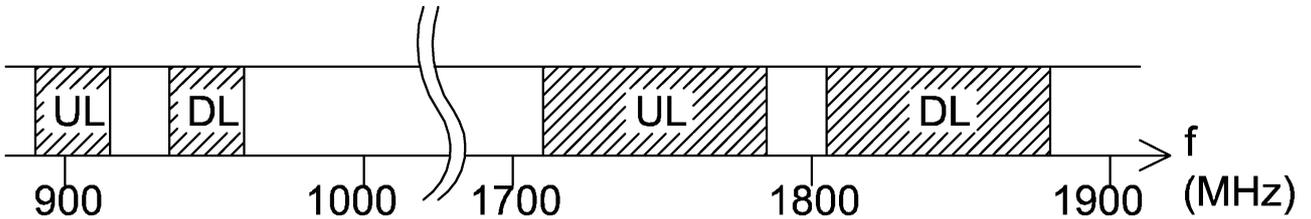


Abbildung 1.2: GSM-Frequenzbereiche

Legende:

UL: Uplink – Verbindung von der Mobilstation zur Basisstation

DL: Downlink – Verbindung von der Basisstation zur Mobilstation

Diese Frequenzbereiche sind in Funkkanäle mit jeweils 200kHz Bandbreite eingeteilt und werden außerdem von mehreren Netzbetreibern genutzt. Die Aufteilung sieht in Österreich folgendermaßen aus (Anzahl der Kanäle / Netzbetreiber):

GSM900: 124 Kanäle / 2 Netzbetreiber

GSM1800: 375 Kanäle / 4 Netzbetreiber

Daraus ergibt sich, dass die zur Verfügung stehenden Frequenzressourcen für den einzelnen Netzbetreiber sehr beschränkt sind. Im ländlichen Bereich mag die Anzahl der Kanäle durchaus ausreichen, jedoch im städtischen Bereich kommt es zu sog. Kapazitätsproblemen. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Kanalbelegungsversuche so hoch ist, dass diese mit konventionellen Mitteln nicht mehr bewältigt werden kann. Die Folge sind nicht zustande gekommene oder unterbrochene Belegungen (Gespräche, Datenverbindungen). Es stellt sich im Netz eine Überlastsituation ein, welche zu einem Absinken der Gesprächsqualität führt.

Um diese Überlastsituationen zu vermeiden, bieten sich dem Netzbetreiber nun verschiedene Strategien an, alle mit dem Ziel, die Netzkapazität zu steigern und so die Qualität im Netz zu sichern.

1. Leistungsfähigere Codierungs-, Zugriffs- und Modulationstechniken

Die Anwendung dieser Maßnahmen stellt sich jedoch als äußerst schwierig und kostspielig dar, da eine umfangreiche internationale Standardisierung notwendig wäre. Daher werden primär die nachfolgenden Möglichkeiten in Betracht gezogen.

2. Adaption der Netzstruktur

- (a) Verkleinerung der Zellgröße

- (b) Teilung einzelner Zellen in Sektoren
- (c) Zusätzliche, punktuelle Verwendung des GSM1800-Systems
- (d) Einführung einer flächendeckenden *Layerstruktur* ("Overlay-Netzwerk")

1.2.1 Verkleinerung der Zellgröße

Je kleiner die GSM-Zellen werden, desto mehr Zellen benötigt man, um ein bestimmtes Gebiet zu versorgen, jedoch können dadurch auch auf dieser Fläche mehr Kanalbelegungen abgeführt werden. Aus diesem Grund wurden im GSM mehrere Größenklassen von Zellen eingeführt. Man unterscheidet folglich (Bezeichnung / Ausdehnung):

1. Makrozellen - bis 30 km
2. Mikrozellen - bis 500 m
3. Pikozellen - Versorgung einzelner Gebäude ("Inhouse-Versorgungen")

Um die Interferenzwahrscheinlichkeit bei kleinen Zellen nicht zu steigern braucht man aber mehr Kanäle, was unweigerlich zu einem Kompromiss zwischen der Zellgröße und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle führt. Der Einsatz von Mikro- und Picozellen ist in größeren Städten (Wien, Landeshauptstädte) bereits Standard.

1.2.2 Teilung einzelner Zellen in Sektoren

Hierbei wird eine GSM-Zelle in zwei bis vier Sektoren aufgeteilt, in denen jeweils unterschiedliche Kanäle eingesetzt werden. Der so erzielte Effekt ist gleich mit der Verkleinerung der Zellfläche.

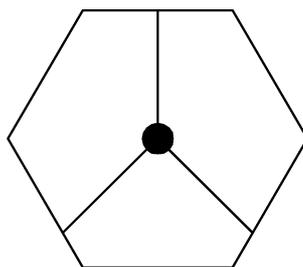


Abbildung 1.3: Teilung einer Funkzelle in Sektoren

Die Abb. 1.3 zeigt ein Beispiel für eine Dreifach-Sektorisierung einer GSM-Zelle. Mit einem Schlag kann also in dieser Zelle ein Vielfaches an Belegungen abgeführt werden. Auch hier muss wieder ein Kompromiss zwischen den verfügbaren Kanälen und der Anzahl der sektorisierten Zellen gefunden werden. Außer auf dem Freiland wird die Sektorisierung bereits überall eingesetzt.

1.2.3 Zusätzliche, punktuelle Verwendung des GSM1800-Systems

Diese Strukturmaßnahme kann nur von Netzbetreibern ergriffen werden, deren GSM-Lizenz ursprünglich für den GSM900-Bereich vergeben wurde. Im Zuge der Vergabe des GSM1800-Frequenzbereiches konnten in weitere Folge auch von diesen Netzbetreibern Frequenzpakete ersteigert werden, wodurch zunächst im städtischen Bereich eine Erweiterung der bestehenden GSM900-Standorte durch Kanäle des GSM1800-Bereiches möglich wurde. Der Einsatz dieser zusätzlichen Frequenzkanäle führte wiederum zu einer Erhöhung der verfügbaren Netzkapazität.

1.2.4 Einführung einer flächendeckenden *Layerstruktur* („Overlay - Netzwerk“)

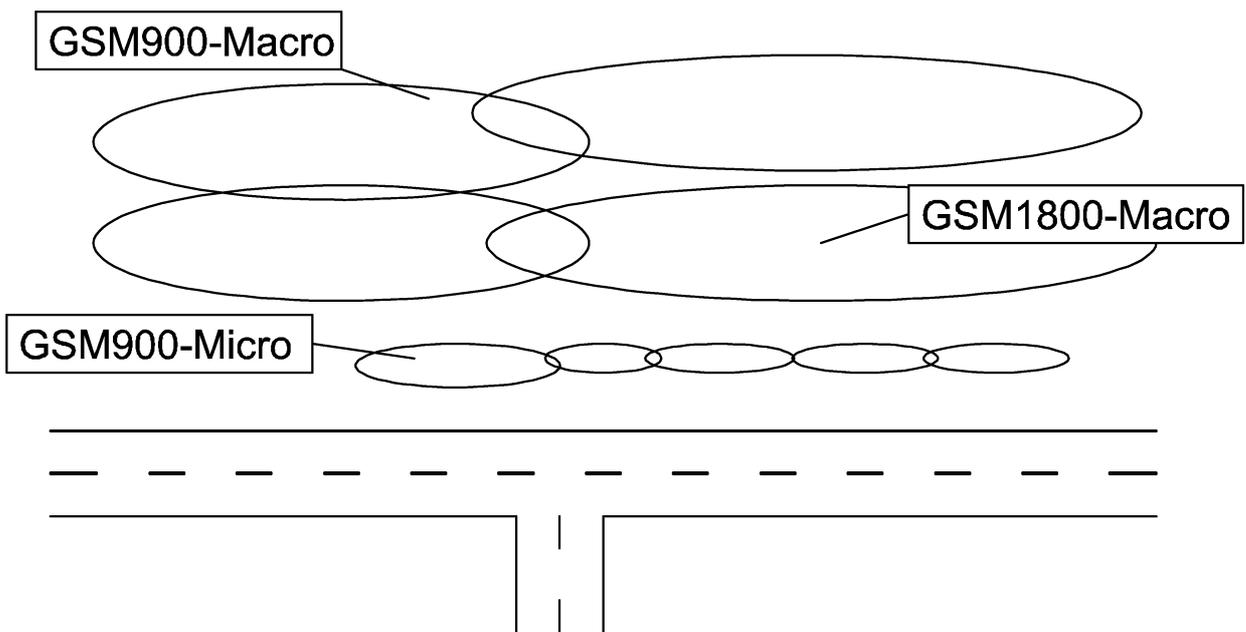


Abbildung 1.4: GSM-Layerstruktur

Abbildung 1.4 zeigt ein Beispiel einer Netzstruktur, wie sie sich schematisch über einem Straßenzug darstellt. Entlang dieses sind gleichzeitig drei verschiedene Systeme verfügbar, über die ein Gespräch oder eine Datenverbindung aufgebaut werden kann. Die GSM900-Makro- und GSM1800-Makrozellen treten immer paarweise auf, da diese von dem gleichen geographischen Ort abgestrahlt werden (Colocacted Standorte). Die Konfiguration dieser beiden Zelltypen (Sendeleistung, Antennentypen, Absenkung, ...) ist zumeist so gewählt, dass deren Ausdehnung in etwa gleich groß ist. Die Standorte der GSM900-Mikrozellen sind

jedoch nicht mit denen der Makro-Standorte in Verbindung, da diese oftmals zu Versorgung ganz spezifischer Punkte herangezogen werden (z.B.: Straßenzüge, Plätze, ...).

Flächendeckende Layerstrukturen finden sich zur Zeit nur in Wien und den größeren Landeshauptstädten, wo sie aber ein unverzichtbares Mittel zur Steigerung der Netzkapazität sind.

1.3 Qualitäts- / Auslastungsoptimierung, Verkehrslenkung

Es ist das erklärte Ziel jedes Netzbetreibers, dem Kunden ein Höchstmaß an Qualität zur Verfügung zu stellen. Unter dem Begriff „Qualität“ versteht man in diesem Kontext:

- keine Abbrüche
- subjektiv hohe Gesprächsqualität
- hohe Datenübertragungsraten
- totale Mobilität (grenzüberschreitend)
- hohe Erreichbarkeit (immer und überall)
- Vielzahl von Zusatzdiensten
- ...

Ein Mittel, um den geforderten Qualitätskriterien zu genügen, ist eine wirkungsvolle *Auslastungsoptimierung*. Ziel dieser Optimierung ist es, die zur Verfügung stehenden Netzressourcen möglichst effizient einzusetzen. Denn, in welchem dieser Systeme eine Belegung stattfindet, hängt einerseits von den momentanen Funkfeldbedingungen ab, kann aber andererseits auch gezielt über die Parametrisierung beeinflusst werden. Hierzu hat der Netzbetreiber eine Vielzahl von Möglichkeiten, um den Gesprächsaufbau und das Verhalten bei der Übergabe von Gesprächen von einer Zelle zu einer anderen (Handover) nach seinen Vorstellungen zu beeinflussen. Wenn allerdings die entsprechenden Parameter in einem Gebiet nicht optimal eingestellt sind, so kann es in einzelnen Layern zu Überlastsituationen kommen. Dies ist besonders unangenehm, da es durchaus möglich ist, dass in anderen Layern noch freie Kapazitäten zur Verfügung stehen, die allerdings nicht genutzt werden.

Alle Maßnahmen, die ergriffen werden, um den vorhandenen Telefonverkehr möglichst optimal auf die Layerstruktur aufzuteilen, werden unter dem Begriff *Verkehrslenkung* zusammengefasst.

1.3.1 Überlastsituation

Von einer Überlastsituation in einer Zelle spricht man dann, wenn alle zur Verfügung stehenden Telefonverkehrskanäle belegt sind, es jedoch noch weitere Kanal-anforderungen gibt, die aber zu diesem Zeitpunkt nicht befriedigt werden können.

Es können also weder durch Gesprächsaufbauten noch durch Handover in der Zelle neue Kanäle belegt werden. Die Abb. 1.5 stellt diese Situation schematisch dar. In der Zelle gibt es bereits eine Vielzahl von bestehenden Belegungen, so-dass alle Verkehrskanäle der Basisstation (BTS) belegt sind. Die Mobilstation 1 versucht ein neues Gespräch aufzubauen, scheitert jedoch. Ebenso versuchen die beiden Mobilstationen 2 und 3 einen Zellwechsel in diese Zelle. Das Handover ge-lingt jedoch aus den zuvor erläuterten Gründen nicht und die Gespräche müssen in anderen Zellen fortgesetzt werden, die aber unter Umständen nicht die beste Funkversorgung gewährleisten. Dadurch kann es wiederum zu Qualitätseinbußen kommen.

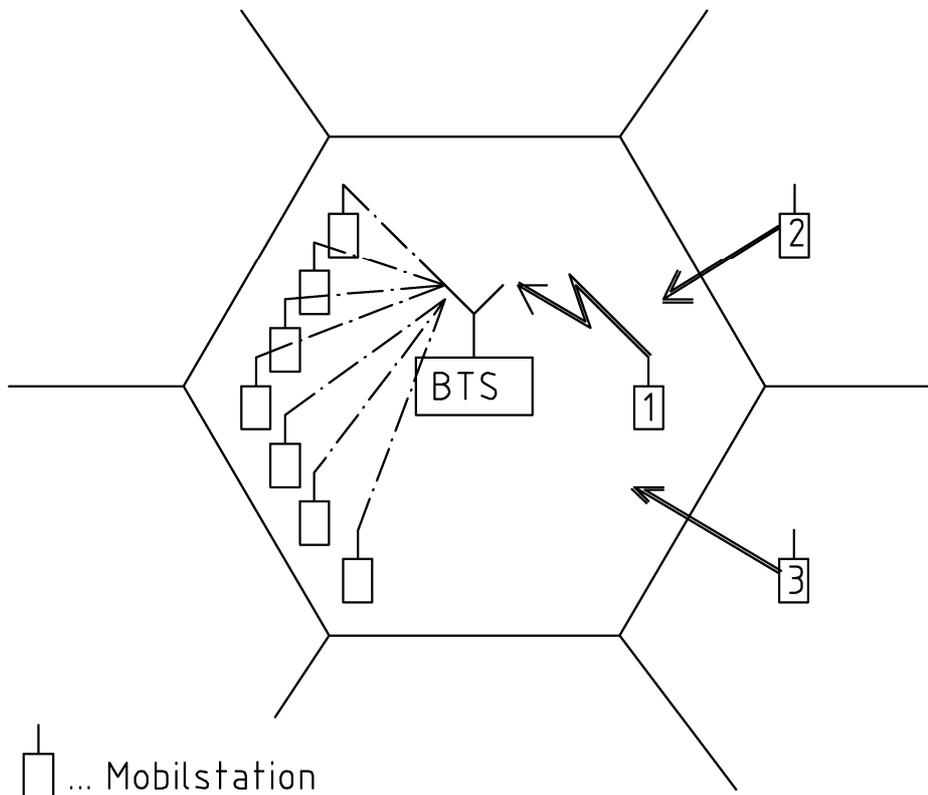


Abbildung 1.5: GSM-Zelle in Überlast

1.3.2 Verteilung des Telefonverkehrs auf die Layer

Das vorhandene Verkehrsangebot teilt sich während des Betriebs eines Mobilfunknetzes auf die vorhandenen Layer auf. Schematisch kann man sich dieses Verhalten wie in Abb. 1.6 vorstellen. Die einzelnen Layer werden in Form von Behältern dargestellt, welche den ihnen zukommenden Telefonverkehr aufnehmen. Diese Behälter weisen im Allgemeinen unterschiedliches Volumen auf, da die Kapazität der Layer (maximal aufnehmbarer Telefonverkehr) in der Praxis ebenfalls verschieden ist.

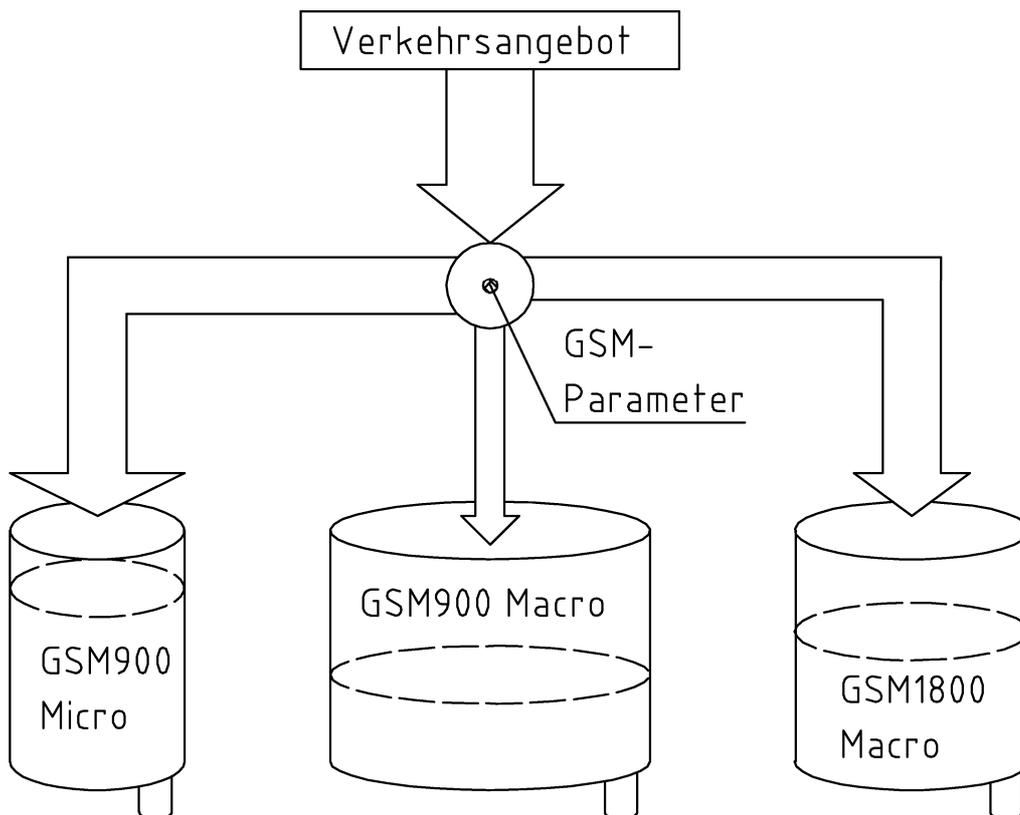


Abbildung 1.6: Schema der Verkehrsverteilung

Abhängig vom aktuellen Zu- und Abfluß stellt sich in den Behältern ein bestimmter Füllstand ein, welcher natürlich ständig variiert. Dabei wird der Zufluß, oder das Verkehrsangebot, dadurch bestimmt, wie sich das insgesamt vorhandene Verkehrsangebot auf die Layer aufteilt. Die Aufteilung wird unter anderem durch die GSM-Parametrisierung der Systemtechnik bestimmt, welche durch den Netzbetreiber gewählt wird.

Ist die Parametrisierung nicht optimal gewählt, so kann es passieren, dass ein zu großer Zufluß einen Behälter zum Überlaufen bringt. Das heißt dieser Layer befindet sich in Überlast, wo hingegen in den anderen Behältern durchaus noch Kapazität frei wäre, um diesen überschüssigen Verkehr aufzunehmen. Diese

Situation ist sowohl für den Kunden als auch für den Netzbetreiber nachteilig, woraus die Forderung entsteht, dass die Layer immer prozentuell gleichmäßig ausgelastet sein sollen.

Im GSM-System stehen dem Netzbetreiber eine Vielzahl von Parametern zur Verfügung, die unter anderem auch den Gesprächsaufbau und das Verhalten beim Zellwechsel (Handover) beeinflussen. Über diese Parameter kann nun die Auslastung der Layer gezielt gesteuert werden und so das Ziel einer gleichmäßigen Auslastung verfolgt werden.

1.3.3 Verkehrslenkung

Der Vorgang der Verkehrslenkung kann, aus regelungstechnischer Sicht, in Form eines geschlossenen Regelkreises dargestellt werden. Abbildung 1.7 zeigt diesen Regelkreis.

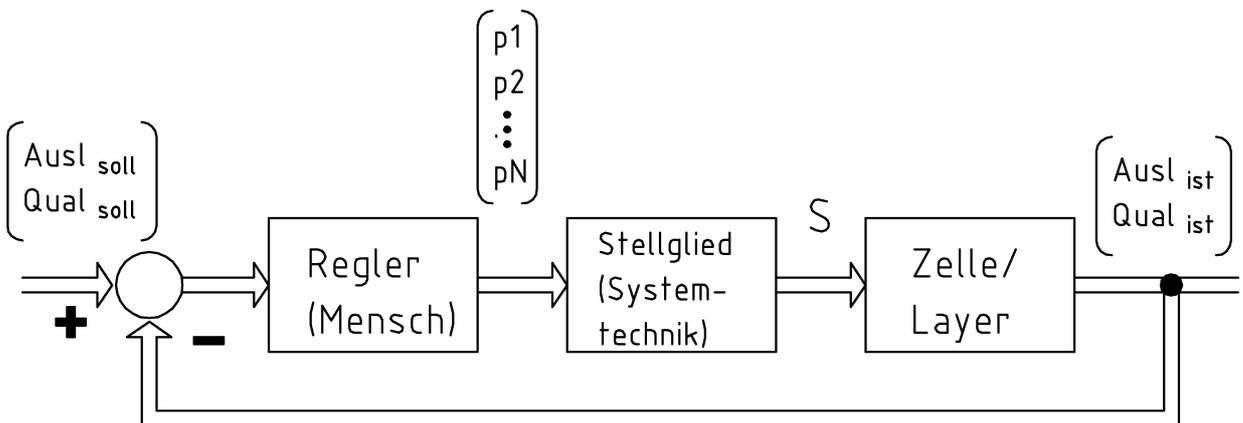


Abbildung 1.7: Regelkreis der Verkehrslenkung

Als Regelgrößen dienen die aktuelle Auslastung und Qualität in der einzelnen Zelle oder im gesamten Layer. Als Regler dient der Mensch, welcher die gemessenen Istgrößen mit den vorgegebenen Sollgrößen vergleicht, und an Hand der Regelabweichung einen Parametersatz bestimmt. Dieser Parametersatz wird der GSM-Systemtechnik übergeben, welche als Stellglied dient. Es stellt sich in Folge ein Systemverhalten 'S' ein, welches wiederum die aktuelle Auslastung und Qualität bestimmt.

Bei max.mobil. dient ein Mensch (der Netzmanager) als Regler. Dies ist deshalb der Fall, da die verwendete Systemtechnik zur Zeit nicht in der Lage ist, dynamisch auf die aktuelle Auslastungssituation im Netz zu reagieren. Die Systemtechnik und das Netz wirken lediglich in Form einer Steuerung. Erst der regelnde Einsatz des Menschen macht es möglich, dass aus dieser Steuerung eine Regelung wird. Als Basis für die Entscheidungen des Netzmanagers dienen verschiedenste Messdaten, aus denen sich dieser ein Bild über die Situation im

Netz machen kann. Um im Folgenden einen optimalen Parametersatz zu finden, bedarf es einiger Entscheidungskriterien. Die ersten Anhaltspunkte liefert die GSM-Recommendation, die als Standardisierungswerk alle Funktionalitäten und ihr Zusammenspiel im Netz beschreibt. Weiters liefert der Systemhersteller eine genaue Spezifikation der vorhandenen Parameter, über deren Verwendung, Wertebereich und Wirkung. Ein wichtiges Entscheidungskriterium ist außerdem die Erfahrung, die der Netzmanager in Testläufen und im laufenden Betrieb sammelt. Denn oftmals kann das Zusammenspiel verschiedener Parameter erst in einem Feldtest oder während des laufenden Netzbetriebes in vollem Umfang erkannt werden.

Um auf neue Situationen jedoch schnell und gut reagieren zu können, wäre es von Vorteil, wenn theoretische Modelle zur Verfügung stünden, welche die Entscheidungsfindung für die Parameter erleichtern. Mit Hilfe solcher Modelle könnten die Auswirkungen der Parameteränderungen im Voraus simuliert, und so die Gefahr von suboptimalen Einstellungen vermindert werden.

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Erstellung solcher theoretischer Modelle, auf Basis der Telefonverkehrstheorie, der GSM-Technik und der vorhandenen Messdaten.

Kapitel 2

Verkehrstheorie

Dieses Kapitel soll eine kurze Einführung in das Gebiet der Verkehrstheorie [3] darstellen. Diese befasst sich mit der mathematischen Formulierung des Verhaltens von Benützern von Telefonnetzen mit Hilfe statistischer Methoden. Unter Einbeziehung der Systemeigenschaften der Telefonnetze gewinnt man Grundlagen für deren Dimensionierung.

Es werden zunächst wichtige Begriffe erläutert und in weiterer Folge eine mathematische Formulierung des Teilnehmerverhaltens dargestellt. Dabei werden Annahmen getroffen, die es ermöglichen, die Anzahl der Teilnehmer zu berechnen, die gleichzeitig telefonieren können. In einem weiteren Schritt werden die Belegungszustände in einem System allgemein betrachtet und daraus einige verkehrstheoretische Begriffe genauer formuliert. Mit diesem Werkzeug ist es möglich, unter Formulierung bestimmter Randbedingungen, die Erlangsche Verlustformel herzuleiten. Diese dient als wichtige Grundlage für die Dimensionierung von Telefonnetzen.

2.1 Begriffe und Größen

Grundsätzlich ist bei Telefonsystemen zwischen *Verlustsystemen* und *Wartesystemen* zu unterscheiden. Bei ersteren kommt es zum Verlust eines Gespräches, wenn alle vorhandenen Verkehrskanäle belegt sind. Das Gespräch kommt also nicht zustande, und der Teilnehmer muss es zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal versuchen. Wenn dann ein oder mehrere Verkehrskanäle frei sind, so kann er sein Gespräch abwickeln. Wenn bei einem Wartesystem alle Kanäle belegt sind und ein weiterer Teilnehmer versucht, ein Gespräch aufzubauen, so muss dieser so lange warten, bis eine bestehende Verbindung beendet wird. Der Teilnehmer wird nicht, wie zuvor, sofort abgewiesen, sondern er wird beispielsweise in eine Warteschleife eingereiht, was durch einen Ansagetext oder Musik dem Teilnehmer signalisiert wird.

GSM-Netze sind entweder als reine Verlustsysteme ausgeführt oder sie stel-

len eine Kombination beider Systeme dar. Dies bedeutet, dass ein ankommendes Gespräch, welches nicht sofort vermittelt werden kann, zunächst in eine Warteschleife (Queue) kommt. Die zeitliche Länge dieser Warteschleife kann vom Netzbetreiber bestimmt werden. Kann während dieser Zeit das Gespräch noch immer nicht vermittelt werden, so wird dieses abgewiesen. Diese Strategie wird im GSM als „Queuing“ bezeichnet.

Wenn ein Teilnehmer ein Gespräch oder eine Datenverbindung über ein Telefonnetz unterhält, so spricht man allgemein von einer *Belegung*. Die Dauer dieser Belegung wird demnach als *Belegungsdauer* bezeichnet. Diese kann durchaus unterschiedlich zur Gesprächsdauer sein, da zweitens lediglich die Zeitspanne des Gespräches bemisst. Zu einer Belegung gehören allerdings auch der Gesprächsaufbau und der Gesprächsabbau, welcher ebenfalls Zeit in Anspruch nimmt. Wenn man die Belegungsdauern aller innerhalb eines gewissen Zeitraumes abgewickelten Belegungen aufsummiert, so erhält man die *Verkehrsmenge*, deren Dimension die Zeit ist. Zur Ehre von A. K. Erlang, eines dänischen Fernsprechkommunikationstheoretikers, der einen großen Beitrag zu diesem Gebiet geleistet hat, wird die Verkehrsmenge in „Erlangstunden“ (Eh) angegeben.

Bezieht man die Verkehrsmenge auf die Zeitdauer, innerhalb der diese erreicht wurde, so spricht man vom *Verkehrswert*. Diese Größe ist eigentlich dimensionslos, jedoch wurde ihr die Pseudoeinheit „Erlang“ (E) zugewiesen. Der Zahlenwert gibt die mittlere Anzahl der gleichzeitig bestehenden Belegungen an.

Weiters ist die *mittlere Belegungsdauer* ein wichtiger Begriff in der Verkehrstheorie. Wie der Name schon sagt, handelt es sich hier um die mittlere Dauer der Belegungen innerhalb eines Beobachtungszeitraumes. Multipliziert man die mittlere Belegungsdauer mit der Anzahl der Belegungen je Zeiteinheit, so erhält man den zugehörigen Verkehrswert in „Erlang“.

Je nachdem in welchem „Stadium“ sich eine Belegung befindet, verwendet man unterschiedliche Begriffe hierfür. Möchte ein Teilnehmer in einer Zelle ein Gespräch aufbauen oder gelangt er durch ein Handover in diese Zelle, so spricht man von einem *Belegungsversuch* oder *Attempt*. Ist in dieser Zelle ein Verkehrskanal frei, so wird ihm dieser zugewiesen und man spricht nun von einer *erfolgreichen Belegung* oder *Seizure*. Ist dies jedoch nicht möglich, da alle Kanäle belegt sind, so spricht man in einem Verlustsystem von einer *blockierten Belegung* oder *Blocking*.

Entsprechend diesen Belegungs Begriffen unterscheidet man auch die zugehörigen Verkehrswerte *Angebot*, *abgeführter Verkehr* und *blockierter Verkehr*. Konnte dem Teilnehmer ein Verkehrskanal erfolgreich zugewiesen werden und bricht die Verbindung zu einem späteren Zeitpunkt ab, so spricht man von einer *abgebrochenen Belegung* oder *Drop*. Die Gründe für eine solche abgebrochene Belegung können beispielsweise Interferenzen, fehlende Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Zellen oder zu geringer Empfangspegel sein. Die Verkehrstheorie befasst sich jedoch nicht mit den Ursachen und Eigenschaften abgebrochener Belegungen.

2.2 Der ungestörte Telefonverkehr

Hier soll ein Modell gezeigt werden, welches, unter Voraussetzung bestimmter Randbedingungen, den angebotenen Verkehr beschreibt. Genauer gesagt, wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Belegungen untersucht, welche im Weiteren das Angebot bestimmen. Dazu ist es notwendig, dass man genaue Annahmen über die einfallenden Anrufe und deren Belegungsdauern macht, woraus sich die gesuchte Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt.

2.2.1 Einfallende Anrufe, Beginn einer Belegung

Die Basis, um die einfallenden Anrufe zu beschreiben, bildet der Anrufabstand, das heißt, die Zeitspanne zwischen zwei Belegungsversuchen. Zumeist wird für die Verteilungsfunktion der Anrufabstände die Exponentialverteilung zu Grunde gelegt, deren Verteilungsdichtefunktion gleich

$$f(x) = \frac{1}{a} * e^{-x/a} \quad (2.1)$$

ist. a bezeichnet hierbei den mittleren Anrufabstand.

Der Prozess der ankommenden Anrufe ist ein stochastischer, welcher auch als *Geburtenprozess* bezeichnet wird. Dies kommt daher, da immer nur Belegungen hinzukommen, und nicht wegfallen. Wenn wir nun die zuvor gemachte Annahme von exponentialverteilten Anrufabständen zu Grunde legen, so ergibt sich für die Anzahl der innerhalb der Zeitspanne t ankommende Anrufe eine Poissonverteilung mit dem Erwartungswert t/a . Die Wahrscheinlichkeitsfunktion für diesen Prozess ist durch

$$p_k = \frac{(t/a)^k}{k!} * e^{-t/a} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.2)$$

gegeben. Hieraus folgt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der Zeitspanne Δt genau ein Anruf kommt, gleich

$$p(1 | \Delta t) = \frac{\Delta t}{a} * e^{-\Delta t/a} \quad (2.3)$$

ist. Führt man für $e^{-\Delta t/a}$ eine Reihenentwicklung ein, so ergibt sich

$$p(1 | \Delta t) = \frac{\Delta t}{a} * \left(1 - \frac{\Delta t}{a * 1!} + \frac{(\Delta t)^2}{(a)^2 * 2!} - \dots + \frac{(\Delta t)^n}{(a)^n * n!}\right), \quad (2.4)$$

und bricht man die Reihe nach dem ersten Glied ab, so stellt sich das Ergebnis

$$p(1 | \Delta t) = \frac{\Delta t}{a} + o(\Delta t) \quad (2.5)$$

eine, worin $o(\Delta t)$ für das Landausche Symbol ¹ steht.

¹Bedeutung: $f(x) = o(g(x)); \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = 0, g(x) \neq 0$ in der Umgebung von a

2.2.2 Die Belegungsdauer, Ende einer Belegung

Für die Belegungsdauer wird zumeist die Annahme getroffen, dass diese exponentialverteilt sei. Diese Vorstellung deckt sich auch gut mit der Realität, was Messungen ergeben haben. Neben dieser Art der Verteilung wird in der Verkehrstheorie ebenfalls mit konstanter Belegungsdauer gerechnet, was hier allerdings nicht weiter verfolgt wird.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Belegungsdauer b gleich einer Zeit x ist, ist durch

$$F_b(x) = P(b \leq x) = 1 - e^{-x/t_m} \quad (2.6)$$

gegeben. Die Größe t_m bedeutet darin den Erwartungswert der Belegungsdauer. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass innerhalb der Zeitspanne Δt genau eine Belegung endet, wenn in diesem Moment j Belegungen gleichzeitig bestehen, ist durch

$$q(1 | \Delta t, j) = \frac{j\Delta t}{t_m} + o(\Delta t) \quad (2.7)$$

gegeben.

2.2.3 Die Wahrscheinlichkeitsfunktion des ungestörten Verkehrs

Nachdem nun zwei Annahmen über die einfallenden Anrufe und die Belegungsdauer gemacht wurden, kann man daran gehen, den sich daraus entwickelnden Verkehr zu beschreiben. Wichtig ist hierbei, dass es keine Einschränkungen bezüglich der Systemtechnik (Ressourcenbeschränkung) gibt, das heißt, jeder Belegungsversuch endet in einer erfolgreichen Belegung, woraus sich der Begriff des „ungestörten Verkehrs“ ergibt.

Bei diesem ungestörten Verkehr handelt es sich wieder um einen stochastischen Prozess, welcher durch seine Zustandswahrscheinlichkeiten beschrieben wird. Man sucht also die Verteilung $P(x(t) = j)$, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich eine bestimmte Anzahl von Belegungen (j) ergibt. Die Bestimmungsgleichung hierfür erhält man, indem man ein Zeitintervall h betrachtet, und überlegt, welche Zustandsänderungen hier vor sich gehen können. Die Möglichkeiten lauten:

1. Es kann eine Belegung einfallen.
2. Der Zustand kann unverändert bleiben.
3. Es kann eine Belegung enden.
4. Es können mehrere Belegungen einfallen und enden.

Die Wahrscheinlichkeit für die Möglichkeit 4 ist von der Ordnung $o(h)$, weshalb diese nicht weiter betrachtet werden muss.

Stellt man nun an Hand dieser Möglichkeiten die Bestimmungsgleichung auf und verwendet dafür die Gleichungen 2.5 und 2.7, so erhält man nach einem Grenzübergang $h \rightarrow 0$ den Zusammenhang

$$\frac{d}{dt} P_j(t) = \frac{1}{a} P_{j-1}(t) - \left(\frac{1}{a} + \frac{j}{t_m}\right) P_j(t) + \frac{j+1}{t_m} P_{j+1}(t). \quad (2.8)$$

Von dieser Gleichung interessieren die Lösungen für $t \rightarrow \infty$, da diese unabhängig von der Zeit t und den Anfangsbedingungen sind. Wenn man die Abkürzung $t_m/a = A$ einführt, so hat man die Gleichungen

$$AP_{j-1} - (A + j) P_j + (j + 1) P_{j+1} = 0 \quad (2.9)$$

und für $j = 0$

$$AP_0 - P_1 = 0 \quad (2.10)$$

zu lösen. Durch vollständige Induktion erhält man mit Hilfe der Normierungsvorschrift

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_j = 1 \quad (2.11)$$

schließlich die Lösung

$$P_j = \frac{A^j}{j!} * e^{-A}. \quad (2.12)$$

Es ergibt sich also wieder ein Poissonprozess, mit dem Erwartungswert A . Bei diesem Erwartungswert handelt es sich um das Verkehrsangebot, welches bestimmt, wie viele gleichzeitige Belegungen am wahrscheinlichsten sind. Auf Grund des poissonverteilten Ankunftsprozesses und der exponentiell verteilten Belegungsdauern kann es jedoch zu anderen Belegungskonstellationen kommen, die jedoch weniger wahrscheinlich sind.

Wenn man beispielsweise einen mittleren Abstand der Belegungsversuche von $a = 6\text{Sekunden}$ annimmt, und die mittlere Belegungsdauer $t_m = 60\text{Sekunden}$ ansetzt, so erhält man ein Verkehrsangebot von $A = t_m/a = 60s/6s = 10\text{Erlang}$. Dieses Angebot hätte im ungestörten Fall eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Folge, wie diese in Abb 2.1 dargestellt ist. Man erkennt, dass sich um den Wert von 10 Belegungen ein Maximum einstellt, welches durch das Verkehrsangebot von 10 Erlang zu erwarten war.

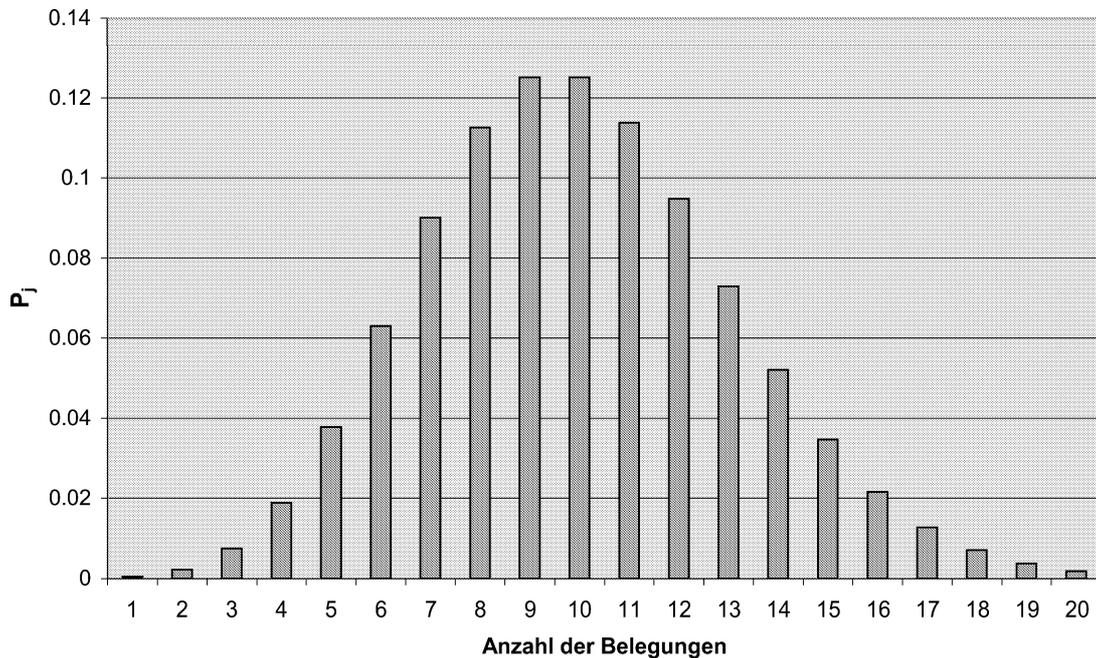


Abbildung 2.1: Wahrscheinlichfunktion der Belegungen

2.3 Allgemeiner Ansatz über den Belegungszustand eines Systems

Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen ist eine Markovsche Kette, wie diese in der Abb. 2.2 dargestellt ist. Die Markovschen Ketten [4] dienen zur Beschreibung von stochastischen Prozessen und sind für eine Vielzahl von Problemen in Wissenschaft und Technik gut einsetzbar.

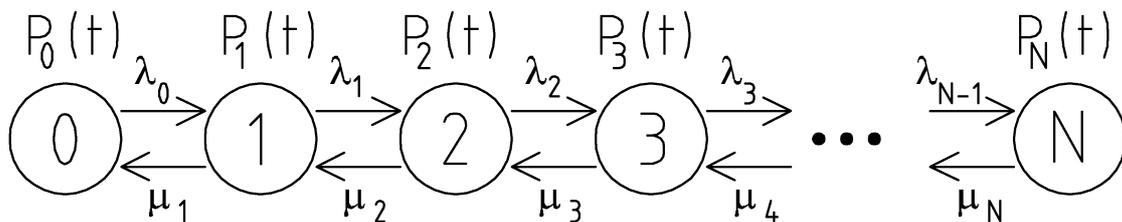


Abbildung 2.2: Markov Kette

Die Zustände in dieser Kette sind gleich den Belegungszuständen im Telefonnetz. Das heisst, im Zustand 0 telefoniert kein Teilnehmer, im Zustand 1 einer, im Zustand 2 zwei, u.s.w.. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine bestimmte Anzahl von Teilnehmern gerade im Netz befindet, ist durch $P_x(t)$ gegeben. Die Übergangswahrscheinlichkeit λ_j stellt die „Geburtenrate“ dar, also die Wahrschein-

lichkeit, dass ein zusätzliches Gespräch hinzukommt. Mathematisch formuliert lautet diese

$$\lambda_j = g(j)/a_j, \quad (2.13)$$

wobei $g(j)$ die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein einfallender Anruf im System bleibt. Für Verlustsysteme ist $g(j) = 1$ für $0 \leq j \leq n$ ($n \dots$ Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle) und $g(j) = 0$ für $j > n$, für Wartesysteme ist $g(j)$ immer gleich Eins. a_j steht für den mittleren Abstand zwischen den Belegungsversuchen, wenn sich das System gerade im Zustand j befindet. Komplementär dazu stellt die Übergangswahrscheinlichkeit μ_j eine „Sterberate“ dar, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein Gespräch endet. Diese wird durch

$$\mu_j = \min(j, n)/t_m \quad (2.14)$$

formuliert, wobei t_m wiederum den Erwartungswert der Belegungsdauer meint. Die Minimumfunktion ist hier deshalb notwendig, da in Wartesystemen mehr Belegungen eintreten können, als auch tatsächlich Verkehrskanäle zur Verfügung stehen. Die überschüssigen Belegungen befinden sich, wie schon erwähnt, während der Wartezeit zum Beispiel in einer Warteschleife mit Ansage oder Musik. In Verlustsystemen kann die Anzahl der Belegungen die Anzahl der Verkehrskanäle nicht übersteigen, da es hier zu Verlust kommt, wenn das System voll ausgelastet ist. Für diesen Fall würde die Gleichung 2.14 also $\mu_j = j/t_m$ lauten.

Da die Übergangswahrscheinlichkeiten unabhängig vom Beobachtungszeitpunkt sind, handelt es sich um eine homogene Markovsche Kette, deren Übergangsmatrix

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \mu & 0 & \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

lautet. Da sich die Teilnehmer eines Telefonnetzes unabhängig von der aktuellen Belegungssituation im Netz verhalten, sind die Geburten- bzw. die Sterberate konstant. Das bedeutet, ein Teilnehmer wird sein Gespräch dann beginnen, wenn er den Wunsch danach verspürt, und nicht wenn die Anzahl der Belegungen im Netz gerade günstig ist. Selbiges gilt natürlich auch für das Beenden eines Gesprächs.

Für die mathematische Formulierung des Belegungszustandes geht man nun davon aus, dass sich dieses System im statischen Gleichgewicht befindet. Das bedeutet, dass die Zustandsverteilung der Markovschen Kette zeitlich konstant ist. Die Anzahl der begonnenen Gespräche ist (ungefähr) gleich der Anzahl der beendeten Gespräche, wodurch sich ein stationärer Belegungszustand einstellt. Wäre diese Vorbedingung nicht gegeben, so würde das System unweigerlich in einen

Extremzustand laufen, welcher einerseits durch Null Belegungen oder andererseits durch volle Belegung gekennzeichnet ist. Für einen Zustand, der zwischen P_0 und P_N liegt, gilt daher die Gleichung

$$\lambda_{i-1} * P_{i-1} + \mu_{i+1} * P_{i+1} = \mu_i * P_i + \lambda_i * P_i. \quad (2.16)$$

Für den Anfang der Kette kann die Gleichung

$$\lambda_0 * P_0 = \mu_1 * P_1 \quad (2.17)$$

aufgestellt werden und für das Ende

$$\lambda_{N-1} * P_{N-1} = \mu_N * P_N. \quad (2.18)$$

Zusätzlich ist die Nebenbedingung

$$\sum_{i=0}^N P_i = 1 \quad (2.19)$$

einzuhalten, da sich das System in einem der N Zustände befinden muss.

Aus diesen vier Gleichungen folgt nun die Zustandswahrscheinlichkeit für einen beliebigen Zustand in diesem System, welche durch

$$P_k = \left(\prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \right) * P_0 \quad (2.20)$$

gegeben ist, wobei für die Zustandswahrscheinlichkeit des ersten Zustandes

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \prod_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}}} \quad (2.21)$$

gilt.

Wenn man nun die Zustände k gleich der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle setzt, so kann man aus den Gleichungen 2.20 und 2.21 bereits eine Dimensionierungsrichtlinie ableiten. Das Ziel der Dimensionierung ist es nämlich, dass in der Hauptverkehrsstunde ² (auch „Busy Hour“) beispielsweise 98% aller Gespräche auch tatsächlich abgeführt werden können. Dies ist dann der Fall, wenn bei bekannten Geburts- und Sterberaten λ_i und μ_i die Anzahl der verfügbaren Kanäle k so gewählt wird, dass die Zustandswahrscheinlichkeit hierfür gerade 0,02 (2%) beträgt. Der Belegungszustand k wird also nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 2% eingenommen.

An dieser Stelle sei noch der Beweis für die Richtigkeit der Gleichungen 2.20 und 2.21 angeführt. Die Beweisführung erfolgt über vollständige Induktion, wobei zunächst die Gleichung 2.20 betrachtet wird.

²Jene vier aufeinander folgenden Viertelstunden im Laufe eines Tages, in denen im Schnitt das größte Verkehrsaufkommen herrscht.

Induktionsanfang: Einsetzen von $k = 1$ in die Gleichung 2.20 liefert

$$P_1 = \frac{\lambda_0}{\mu_1} * P_0, \quad (2.22)$$

was der Gleichung 2.17 in der Herleitung entspricht. Somit ist die Richtigkeit dieses Falls bewiesen.

Induktionsschritt: Es sei nun bewiesen, dass die Gleichung 2.20 für alle $k \leq n$ gilt. Nun wird von n auf $n + 1$ geschlossen. Die Gleichung 2.16 liefert, nach deren Umformung einen Ausdruck für P_{n+1} , welcher durch

$$P_{n+1} = \frac{(\mu_n + \lambda_n) * P_n - \lambda_{n-1} * P_{n-1}}{\mu_{n+1}} \quad (2.23)$$

gegeben ist. Hier wird nun die zu beweisende Formel eingesetzt, und das Ergebnis muss wiederum der Gleichung 2.20 für $k = n + 1$ genügen, was durch

$$\left(\prod_{v=0}^n \frac{\lambda_v}{\mu_{v+1}} \right) * P_0 = \frac{(\mu_n + \lambda_n) * \left(\prod_{v=0}^{n-1} \frac{\lambda_v}{\mu_{v+1}} \right) * P_0 - \lambda_{n-1} * \left(\prod_{v=0}^{n-2} \frac{\lambda_v}{\mu_{v+1}} \right) * P_0}{\lambda_{n+1}} \quad (2.24)$$

gezeigt werden soll. Nachdem durch P_0 und $\prod_{v=0}^{n-2} \frac{\lambda_v}{\mu_{v+1}}$ gekürzt wurde, stellt sich der Ausdruck

$$\frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} * \frac{\lambda_n}{\mu_{n+1}} = \frac{(\mu_n + \lambda_n) * \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_n} - \lambda_{n-1}}{\mu_{n+1}} \quad (2.25)$$

ein, welcher sich nach weiterem Kürzen als richtig herausstellt. Somit ist der Induktionsschritt bewiesen.

Um die Gleichung 2.21 herzuleiten, muss man nur noch die zuvor bewiesene Gleichung 2.20 in die Nebenbedingung 2.19 einsetzen, was zu dem Ausdruck

$$\sum_{i=0}^N \left(\prod_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}} \right) * P_0 = 1 \quad (2.26)$$

führt. Drückt man hier P_0 explizit aus, so gelangt man zu

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \left(\prod_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda_j}{\mu_{j+1}} \right)}, \quad (2.27)$$

was nach der Berücksichtigung, dass der Nenner für den Fall $N = 1$ gleich Eins ist, zu der gesuchten Gleichung 2.21 führt.

2.4 Mathematische Formulierung verkehrstheoretischer Begriffe

2.4.1 Das Verkehrsangebot

Im Kapitel 2.2.3 wurde bereits eine Möglichkeit vorgestellt, wie das Verkehrsangebot berechnet werden kann. Es ergibt sich einfach aus der mittleren Belegungs-dauer dividiert durch den mittleren Abstand zwischen den Belegungsversuchen. Es gibt jedoch eine allgemeinere Formulierung, die berücksichtigt, dass die Einfallrate und die Zustandswahrscheinlichkeiten in jedem Zustand unterschiedlich sein können. In diesem Fall ist das Angebot durch

$$A = t_m * \sum_{j=0}^{\infty} \frac{P_j}{a_j} \quad (2.28)$$

gegeben, wobei a_j den mittleren Abstand zwischen ankommenden Belegungen angibt, wenn sich das System gerade im Zustand j befindet.

2.4.2 Die Verlustwahrscheinlichkeit

Diese gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein einfallender Anruf nicht zu einer erfolgreichen Belegung wird. Ihr Wert ergibt sich zu

$$B = \frac{\sum_{j=0}^{\infty} (1 - g(j)) P_j / a_j}{\sum_{j=0}^{\infty} P_j / a_j}. \quad (2.29)$$

2.4.3 Die mittlere Verkehrsbelastung

Diese gibt die mittlere Anzahl der gleichzeitig bestehenden Belegungen an. Sie errechnet sich aus

$$y = t_m * \sum_{j=0}^{\infty} g(j) * \frac{P_j}{a_j}, \quad (2.30)$$

wodurch sich die Beziehung

$$y = (1 - B) * A \quad (2.31)$$

ergibt.

2.4.4 Die Blockierungszeit

Dieser Wert, der auch als „congestion time“ bezeichnet wird, ergibt sich zu

$$B_1 = \sum_{j=n}^{\infty} P_j, \quad (2.32)$$

woraus ersichtlich ist, dass es sich nicht wirklich um eine Zeitdauer handelt. Viel mehr ist damit gemeint, dass im Mittel während des Anteils B_1 der Zeitspanne t alle zur Verfügung stehenden Kanäle belegt sind. Es kann also innerhalb dieser Zeit keine neue Belegung mehr hinzukommen.

2.5 Die Erlangsche Verlustformel

Ausgehend von den Überlegungen im Kapitel 2.3 und den allgemein formulierten Begriffen im Kapitel 2.4 soll nun die Erlangsche Verlustformel hergeleitet werden. Dazu ist es notwendig, dass einige Einschränkungen und Voraussetzungen gemacht werden, aus deren Anwendung sich die in der Telekommunikationsbranche sehr bekannte und wichtige Formel ergibt.

2.5.1 Voraussetzungen

Wie der Name der Formel schon sagt, ist diese für den Fall eines reinen Verlustsystems hergeleitet, was sich mathematisch durch

$$g(j) = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq j < n \\ 0 & \text{für } j > n \end{cases} \quad (2.33)$$

ausdrücken lässt. Die Geburtenrate ist daher für $j < n$ gleich

$$\lambda_j = 1/a_j \quad (2.34)$$

und die Sterberate

$$\mu_j = j/t_m. \quad (2.35)$$

Der Verkehr sei ein reiner Poissonverkehr, wie dieser bereits im Kapitel 2.2 dargestellt wurde. Dies bedeutet, dass die Ankunftsrate a_j nicht vom aktuellen Zustand des Systems abhängt, weshalb $a_j = a, j = 0, \dots, n$ ist. Für die Belegungsdauer existiert ein Erwartungswert t_m , der auch als mittlere Belegungsdauer bezeichnet werden kann.

2.5.2 Resultate

Aus der Gleichung 2.28 ergibt sich, nach den oben genannten Voraussetzungen und unter Berücksichtigung der Nebenbedingung laut Gleichung 2.19, für das Verkehrsangebot

$$A = \frac{t_m}{a} \sum_{j=0}^n P_j = \frac{t_m}{a}, \quad (2.36)$$

welches in dieser Form schon im Kapitel 2.2.3 eingeführt wurde.

Die Zustandswahrscheinlichkeiten ergeben sich für diesen Fall aus den Gleichungen 2.20 und 2.21, wenn man für λ_j und μ_j die oben angeführten Ausdrücke (Glg. 2.34 und 2.35) einsetzt, zu

$$P_j = \frac{\prod_{i=0}^{j-1} \frac{t_m}{(i+1)*a}}{\sum_{j=0}^n \prod_{i=0}^{j-1} \frac{t_m}{(i+1)*a}} = \frac{\frac{A^j}{j!}}{\sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!}}. \quad (2.37)$$

Die Verlustwahrscheinlichkeit entspricht genau der Zustandswahrscheinlichkeit des letztmöglichen Zustandes, da genau ab jenem Belegungsstand jeder weitere Belegungsversuch zu einem Verlust führt. Dies bedeutet, dass

$$B = P_n = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!}} \quad (2.38)$$

ist. Diese Formel wird als die *Erlangsche Verlustformel* bezeichnet, wobei dieser an sich dimensionslosen Wahrscheinlichkeit die Pseudoeinheit „Erlang“ zur Seite gestellt wird.

Die mittlere Verkehrsbelastung ist daher laut Gleichung 2.31 durch

$$y = (1 - B) * A = \frac{A \sum_{j=0}^{n-1} \frac{A^j}{j!}}{\sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!}} \quad (2.39)$$

gegeben.

Die Blockierungszeit ist für den Fall des Poissonverkehrs gleich dem Verlust, also ist

$$B1 = B = P_n. \quad (2.40)$$

2.5.3 Anwendung, Grade of Service

Die Erlangsche Verlustformel spielt in der Praxis eine wichtige Rolle bei der Dimensionierung und im laufenden Betrieb von GSM-Netzen. Für die Auslegung dieser Netze wird im Allgemeinen ein bestimmtes Maß vorgegeben, welches bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine in der Hauptverkehrsstunde ankommende Belegung nicht abgeführt werden kann. Dieses Maß wird als „Grade of Service“ (GOS) bezeichnet und entspricht genau der Blockierungswahrscheinlichkeit B in Prozent. Wenn man daher eine Annahme über das zu erwartende Verkehrsangebot macht, so kann man über den Grade of Service die benötigte Anzahl an Verkehrskanälen errechnen.

Das GSM-System ist ein FDMA/TDMA³ System, welches pro physikalischem Kanal acht Zeitschlitz zulässt. Jeder Zeitschlitz kann als Verkehrskanal genutzt werden, wobei zumeist ein Zeitschlitz für die Signalisierungsinformationen genutzt wird. Daher hat man es in der Praxis zumeist mit einem Vielfachen von 7

³Frequency Division Multiple Access / Time Division Multiple Access

Verkehrskanälen zu tun, woraus die Fragestellung entsteht, wieviel Verkehr mit der gegebenen Konfiguration abgeführt werden kann. Diese Frage kann natürlich wieder über die Erlangsche Verlustformel geklärt werden, jedoch stellt sich hier noch das Problem ein, dass diese Formel nicht explizit nach dem Verkehrsangebot A aufgelöst werden kann. Daher gibt es umfangreiche Tabellen, die als Parameter den Grade of Service und die Kanalanzahl enthalten. Aus diesen Tabellen kann dann der gesuchte Verkehrswert abgelesen werden. Die nachfolgende Tabelle stellt einen Auszug aus diesen Tabellen dar, wobei nur einige, häufig verwendete Werte eingetragen sind.

Tabelle 2.1: Tabelle des zulässigen Verkehrsangebots nach der Erlangischen Verlustformel

n	Grade of Service		
	1%	2%	5%
7	2.50	2.94	3.74
14	7.35	8.20	9.73
21	12.84	14.04	16.19
28	18.64	20.15	22.87

Für den laufenden Betrieb ist die Erlangsche Verlustformel insofern von Bedeutung, als über diese eine Bewertung des aktuellen Auslastungsgrades von GSM-Zellen geschieht. Wie zuvor beschrieben, ergibt sich aus der installierten Systemkonfiguration und der Annahme eines gewünschten Grad of Service ein maximaler Verkehrswert, der abgeführt werden kann. Dieser Verkehrswert dient als Bezugsgröße für die Auslastungsangaben, wobei der vom System gemessene Verkehrswert ins Verhältnis zu dieser Größe gesetzt wird. Es kann daher durchaus vorkommen, dass eine Zelle mit über 100% ausgelastet ist, da der durch die Erlangsche Verlustformel errechnete, theoretische Verkehrswert in der Praxis übertroffen wird. In diesen Fällen steigt natürlich auch die Blockierungswahrscheinlichkeit magels verfügbarer Ressourcen und die Anzahl der abgewiesenen Belegungsversuche erhöht sich. Es liegt nun am Netzbetreiber, diese Situation zu erkennen und Maßnahmen, wie Parameteroptimierung oder Kapazitätserweiterung einzuleiten.

Kapitel 3

Theoretisches Verhalten einer GSM-Zelle

Es soll nun eine GSM-Zelle betrachtet werden, welcher ein idealisierter Verkehr angeboten wird. Es ist die Frage zu klären, welchen Verkehr die Zelle abführt, wenn diese mit einem stetig steigenden Verkehrsangebot konfrontiert ist. Denn mit diesen Erkenntnissen sind die in der Praxis auftretenden Phänomene besser und schneller zu verstehen.

3.1 Idealisiertes Verkehrsangebot

Wenn man die Anzahl der Belegungsversuche im Laufe eines Tages betrachtet, so ist diese keinesfalls konstant. Einerseits stellt sich ein gewisser Rhythmus über den Tag hinweg ein, andererseits, wenn man kürzere Zeiträume betrachtet, so ist dieser globale Rhythmus ständigen, lokalen Schwankungen unterworfen. Die Abbildung 3.1 zeigt ein Beispiel für einen solchen Tagesverlauf, der von einer Zelle in Wien stammt. Man erkennt, dass sich nach der Phase der Nachtruhe, in der nur sehr wenige Gespräche anfallen, sich das Verkehrsangebot während des Vormittags ständig erhöht. Um die Mittagszeit verflacht dieser Anstieg und es stellt sich ein mehr oder minder konstantes Niveau ein. Am späten Nachmittag erreicht der Verlauf ein Maximum, nach dem wieder ein rückläufiger Trend beim Übergang vom Abend in die Nacht zu erkennen ist. Erst in der Nacht geht das Verkehrsangebot wieder auf ein sehr niedriges Niveau zurück. Dieser Verlauf ist typisch für eine GSM-Zelle, wobei aber das Maximum der Belegungsversuche zwischen der Mittagszeit und, wie hier, spätem Nachmittag variieren kann. Außerdem legt dieses Maximum die *Busy Hour* fest, welche, wie schon erwähnt, eine wichtige Rolle in der Dimensionierung und dem Betrieb von GSM-Netzen darstellt.

Um nun über das theoretische Verhalten einer GSM-Zelle Aussagen machen zu können, ist es notwendig, dass das Verkehrsangebot bestimmten Restriktionen unterworfen wird. Dies bedeutet, dass eine konstante Belegungsdauer (Holding

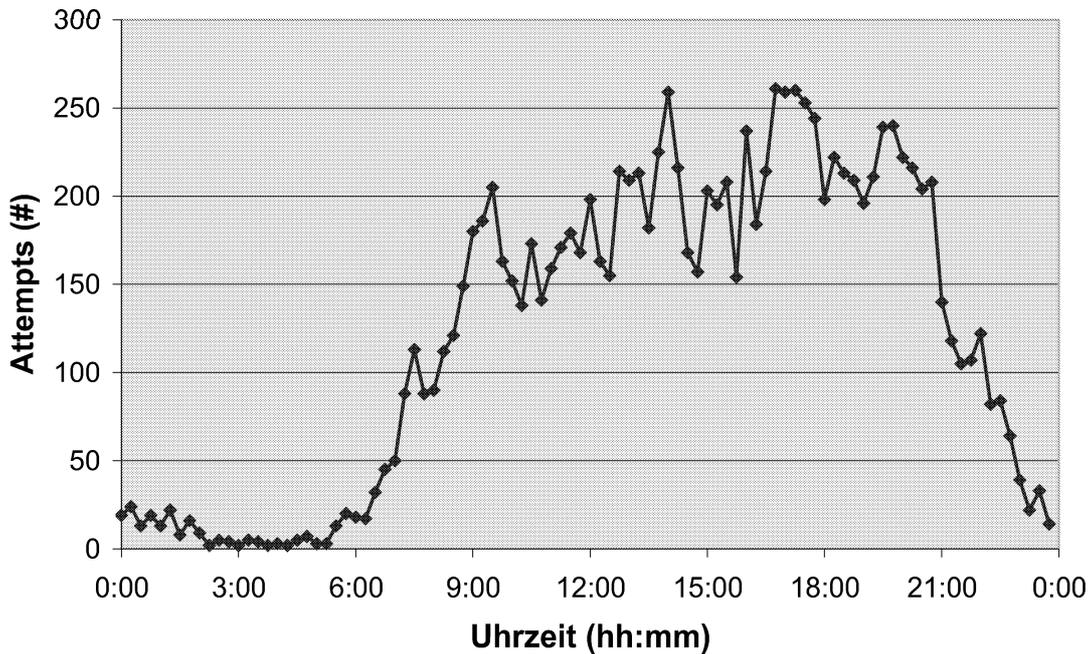


Abbildung 3.1: Typischer Verlauf der Kanalbelegungsversuche (Attempts) für eine GSM-Zelle während eines Tages

Time, HT) vorausgesetzt wird, wodurch das Verkehrsangebot nur mehr von der Anzahl der Belegungsversuche je Zeitintervall bestimmt wird. Außerdem wird der Abstand zwischen den ankommenden Belegungsversuchen ebenfalls als konstant angenommen. Es soll also gelten, dass

$$HT_i = const = MHT \quad (3.1)$$

ist, wobei MHT für die mittlere Belegungsdauer (Mean Holding Time) steht. Für das Verkehrsangebot (Offered Load) A ergibt sich dadurch der lineare Zusammenhang

$$A = MHT * Attempts . \quad (3.2)$$

Das Verkehrsangebot A ist von der Dimension *Erlang*, wenn die mittlere Belegungsdauer beispielsweise in *Stunden* angegeben ist, und die Belegungsversuche (*Attempts*) ebenfalls 'pro Stunde' gezählt werden.

3.2 Verhalten ohne Ressourcenbeschränkung

In diesem Fall sei angenommen, dass die Zelle unendlich viele Verkehrskanäle zur Verfügung habe. Wenn nun das idealisierte Verkehrsangebot auf die Zelle losgelassen wird, so kann diese natürlich jeden ihr angebotenen Wert sofort abführen. Der abgeführte Verkehr (carried load) ist also gleich dem angebotenen Verkehr, welcher linear von den Belegungsversuchen abhängt. Setzt man eine mittlere Belegungsdauer von $MHT = 60s$ voraus, trägt die Anzahl der Belegungsversuche auf der Abszisse auf und den abgeführten Verkehr auf der Ordinate, so stellt sich die Abb. 3.2 ein. Der Verlauf der Geraden ist dabei nicht nach oben hin beschränkt.

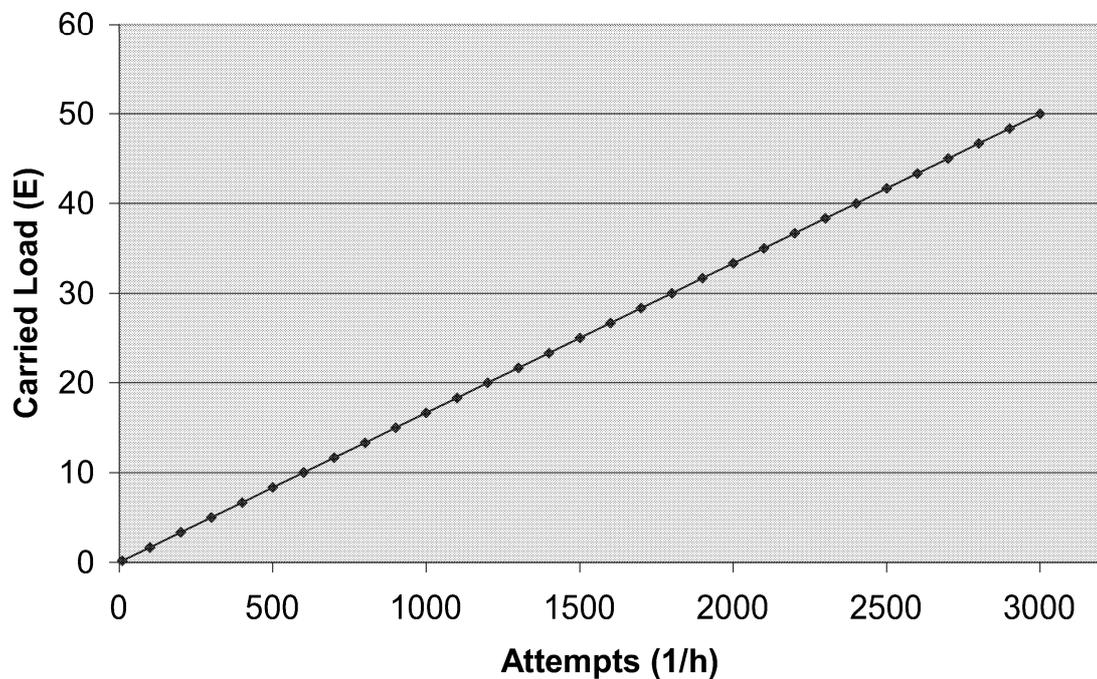


Abbildung 3.2: Abgeführter Verkehr (Carried Load) einer nicht ressourcenbeschränkten GSM-Zelle

3.3 Verhalten mit Ressourcenbeschränkung

In der Realität hat jeder Netzbetreiber nur eine begrenzte Anzahl von GSM-Kanälen zur Verfügung. Mit diesem Spektrum an Frequenzen muss dieser eine saubere Frequenzplanung durchführen, sodass einerseits genügend freie Ressourcen pro Zelle zur Verfügung stehen und andererseits es nicht zu Interferenzen kommt, welche die Gefahr von Gesprächsabbrüchen mit sich bringen. Es kann also jeder Zelle nur eine bestimmte Anzahl von Verkehrskanälen zugewiesen werden, woraus sich ein Maximum an abführbarem Verkehr ergibt. In der Abb. 3.3 wird dies deutlich, da hier ab einer gewissen Anzahl von Kanalbelegungsversuchen pro Stunde nicht mehr Verkehr abgeführt wird. Dieses Diagramm dient nur zur Veranschaulichung, da hier wiederum ein idealisiertes Verkehrsangebot mit einer mittleren Belegungsdauer von $MHT = 60s$ zu Grunde gelegt ist. Außerdem sei die Zelle mit 28 Verkehrskanälen ausgestattet. Durch diese Beschränkung kann der Verkehrswert auch nicht mehr als $28Erlang$ erreichen.

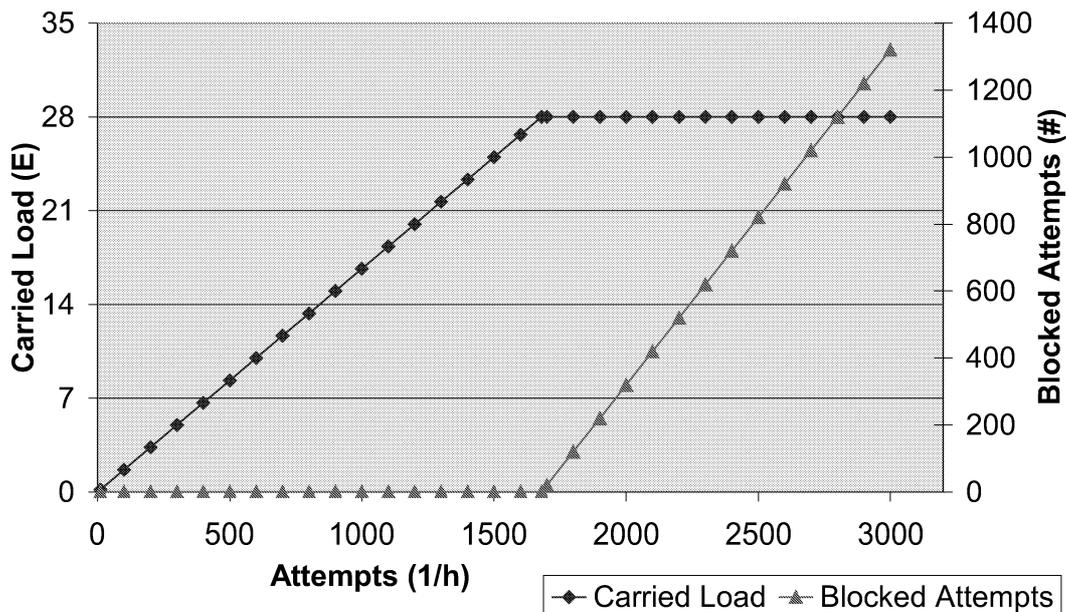


Abbildung 3.3: Abgeführter Verkehr (Carried Load) und blockierte Kanalbelegungsversuche (Blocked Attempts) einer ressourcenbeschränkten GSM-Zelle

Die Belegungsversuche, denen kein freier Verkehrskanal mehr zugewiesen werden kann, werden abgewiesen und zu den blockierten Belegungen gezählt. In dem Beispiel von Abb. 3.3 kommt es ab einem Wert von $Attempts = 1680$ 1/h zu Blockierungen. Während im nicht ressourcenbeschränkten Fall jeder Belegungsversuch zu einer erfolgreichen Belegung wird, erreichen hier die erfolgreichen Belegungen eine Sättigung, wenn alle Verkehrskanäle belegt sind. Die Differenz zwi-

schen diesem Maximalwert an erfolgreichen Belegungen und den Belegungsversuchen stellt die blockierten Belegungen dar, welche ab der zuvor erwähnten Grenze demnach linear ansteigen.

3.4 Sättigungsverhalten nach Erlang

Die im Kapitel 2.5 hergeleitete Erlangsche Verlustformel (Glg. 2.38) gibt uns die Möglichkeit, das Sättigungsverhalten einer GSM-Zelle unter „realen“ Bedingungen zu betrachten. Es handelt sich also nicht mehr um ein idealisiertes Verkehrsangebot, sondern um ein Angebot, welches den im Kapitel 2 (Verkehrstheorie) dargestellten Bedingungen genügt. Das Ergebnis dieser Formel ist eine Blockierungswahrscheinlichkeit B , die dazu genutzt werden kann, aus dem Verkehrsangebot A den abgeführten Verkehr (*CarriedLoad*) zu berechnen. Für diesen ergibt sich

$$\text{CarriedLoad} = (1 - B(A, n)) * A, \quad (3.3)$$

wenn n gleich der Anzahl der Verkehrskanäle ist. Das Diagramm 3.4 zeigt diesen Zusammenhang graphisch am Beispiel einer GSM-Zelle mit 14 Verkehrskanälen. Für das Verkehrsangebot ist wiederum eine mittlere Belegungsdauer von $MHT = 60s$ vorausgesetzt. Es zeigt sich eine allmähliche Annäherung des abgeführten Verkehrs an das theoretische Maximum von 14 Erlang.

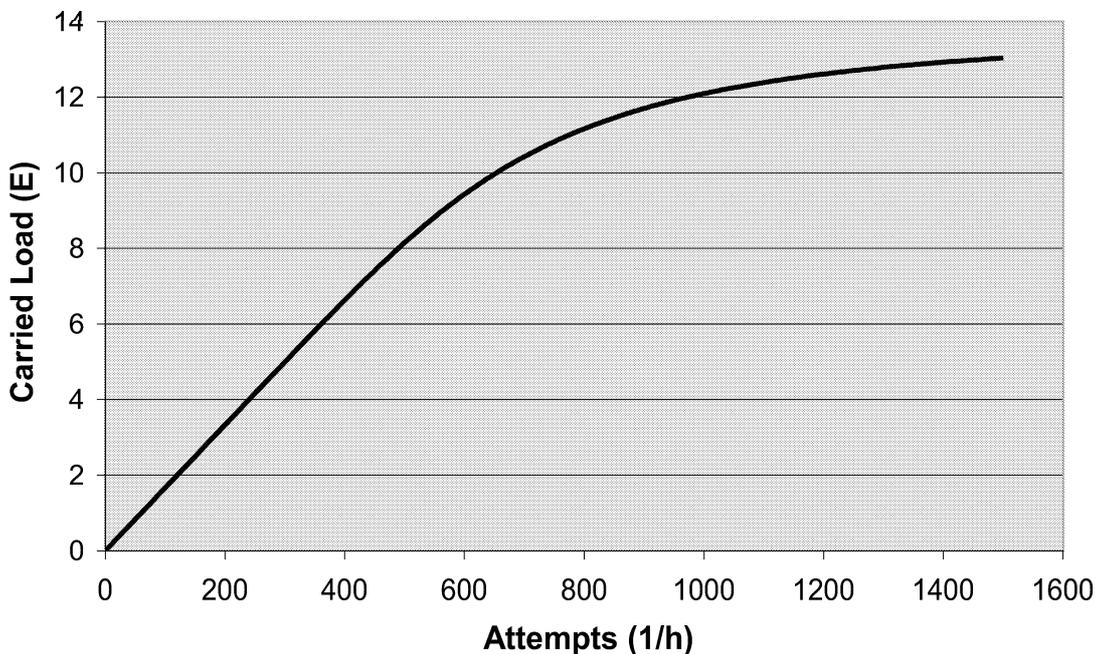


Abbildung 3.4: Abgeführter Verkehr nach der Erlangschen Verlustformel

Kapitel 4

Datenanalyse für das Zellmodell

Das in dieser Arbeit zu entwickelnde GSM-Zellmodell soll einerseits auf die Erkenntnisse der Verkehrstheorie fußen, andererseits aber aus einer Analyse von Messdaten gewonnen werden. Dadurch soll der Realitätsbezug des Modells immer gewährleistet sein. Es gilt also im Folgenden ein geeignetes Messsystem zu finden, dessen Merkmale und Arbeitsweise kennenzulernen und daraus die geeigneten Daten für das weitere Vorgehen herauszufiltern. Aus diesen Daten sollen die charakteristischen Eigenschaften einer GSM-Zelle gewonnen werden, die im nächsten Schritt in die Modellbildung einfließen.

4.1 Das Messsystem „Metrica/NPR“

Bei max.mobil. gibt es, neben zahlreichen anderen Systemen, ein Messsystem namens „Metrica/NPR“ (*Metrica/Network Performance Reporting*), welches zur Ermittlung der Netzwerk-Performance entwickelt wurde. Diese Software- Applikation, die in kabelgebundenen -, leitungsgeführten - oder Funk- Telekommunikationsnetzwerken eingesetzt werden kann, ermöglicht es dem Betreiber, sich einen genauen Überblick über den aktuellen und vergangenen Zustand seines Netzwerkes zu verschaffen. Metrica/NPR sammelt die Daten jedes Netzelementes auf und verwaltet diese an zentraler Stelle in einer Datenbank. Diese Daten können dann vom Benutzer in tabellarischer oder graphischer Form abgerufen und ausgewertet werden. Auf Grund der Größe eines GSM-Netzes und der damit verbundenen hohen Anzahl von Netzelementen ergibt sich täglich eine enorme Anzahl von Daten, die von diesem System effizient gespeichert werden.

Die Daten, die von den Netzelementen generiert werden, sind im Wesentlichen Zählwerte von bestimmten Schlüsselereignissen, die innerhalb der Abtastperiode angefallen sind. Als Abtastperiode dient ein Intervall von 15 Minuten, nach dem der aktuelle Zählerstand an Metrica/NPR übermittelt wird. Es werden also zum Beispiel nach dieser Zeit die Anzahl der Belegungsversuche, die Anzahl der erfolgreichen Belegungen oder auch die Anzahl der blockierten Belegungen

weitergegeben. Neben diesen reinen Zählerwerten wird auch ein Verkehrswert in Erlang bestimmt, der aber ebenfalls durch hochfrequente Abtastung der Anzahl der belegten Verkehrskanäle und anschließende Mittelung über das 15 Minuten Intervall entsteht. Aus diesen Daten werden im Weiteren einige Zeitwerte berechnet, wie zum Beispiel die mittlere Kanalbelegungsdauer oder die Blockierungszeit. Es fallen also pro Tag und pro Zähl-Event 96 Messwerte an, was zu der, wie schon erwähnten, riesigen Datenmenge führt.

4.2 Fehlerhafte Belegungsversuche

Es hat sich gezeigt, dass neben den blockierten Belegungen, welche nur in Überlastsituationen auftreten, ein weiterer Anteil von „verlorenen“ Belegungen besteht. Es handelt sich dabei um Belegungsversuche, die zwar als solche noch gezählt werden, denen jedoch kein regulärer Verkehrskanal zugewiesen werden konnte. Es erfolgte also ein Abbruch der Verbindung in der Signalisierungsphase, da entweder kein Signalisierungskanal zugewiesen werden konnte (Überlastsituation) oder ein Abbruch während der Belegung des Signalisierungskanals (Interferenz) erfolgte. Durch die Datenanalyse stellte sich heraus, dass mit einem bestimmten Anteil von fehlerhaften Belegungsversuchen immer zu rechnen ist, was natürlich auch im GSM-Zellmodell berücksichtigt werden soll. Die Abbildung 4.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der fehlerhaften Belegungsversuche (Failed Attempts) im Raum Wien im Halbjahresrückblick. Es wurde dabei ein Durchschnitt über alle sich in Wien befindlichen max.mobil.-GSM- Zellen gebildet. Es zeigt sich, dass mit einer Rate von 2,24% zu rechnen ist, wobei Detailanalysen ergaben, dass dieser Wert pro Layer durchaus schwanken kann.

Die Tabelle 4.1 zeigt eine detaillierte Aufspaltung der fehlerhaften Belegungsversuche für den Monat Februar 2002 für die hier behandelten GSM-Layer.

Tabelle 4.1: Tabelle der fehlerhaften Belegungsversuche pro GSM-Layer (im Mittel)

Layer	Failed Attempts (%)
GSM900 - Makro	2,4
GSM1800 - Makro	2,2
GSM900 - Mikro	1,8

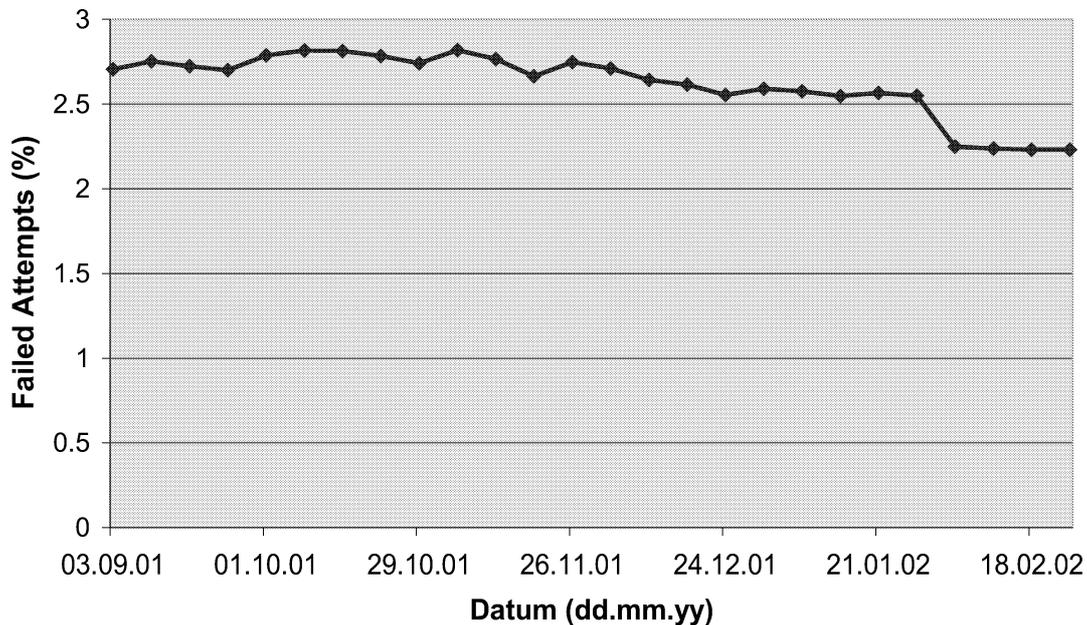


Abbildung 4.1: Entwicklung der fehlerhaften Belegungsversuche im Raum Wien im Halbjahresrückblick

4.3 Zusammenhang Belegungsversuche / abgeführter Verkehr

Dieser Zusammenhang hat sich als besonders nützlich erwiesen, da er zeigt, wie sich die GSM-Zellen in der Praxis bezüglich des angebotenen und abgeführten Verkehrs verhalten. Die Abbildung 4.2 zeigt diesen für GSM-Zellen mit 14 Verkehrskanälen, wobei die Daten von Metrica/NPR stammen und jeder Messpunkt einem Verkehrswert der jeweiligen Busy Hour entspricht. Diese und die folgenden Auswertungen sind am Beispiel von Zellen mit 14 Verkehrskanälen dargestellt, jedoch wurden diese auch mit anderen Anzahlen von Verkehrskanälen durchgeführt, um die Allgemeingültigkeit nachzuweisen.

Die im Kapitel 3 dargestellten Eigenschaften finden sich auch hier, in der Abbildung 4.2, wieder. Betrachtet man den Verlauf der Messpunkte, so stellt man fest, dass mit zunehmender Anzahl der Belegungsversuche auch der abgeführte Verkehr zunimmt. Jedoch gibt es hier eine starke Schwankungsbreite, die dadurch zustande kommt, dass hier die im Kapitel 3 gemachte Annahme über das idealisierte Verkehrsangebot nicht zutrifft. Die Belegungsversuche kommen nicht mit konstantem Abstand, sondern sind mehr oder minder zufällig verteilt. Auch die Kanalbelegungsdauer der einzelnen Gespräche ist nicht konstant, sondern schwankt in einem weiten Bereich. Aus diesen Gründen können sich für eine be-

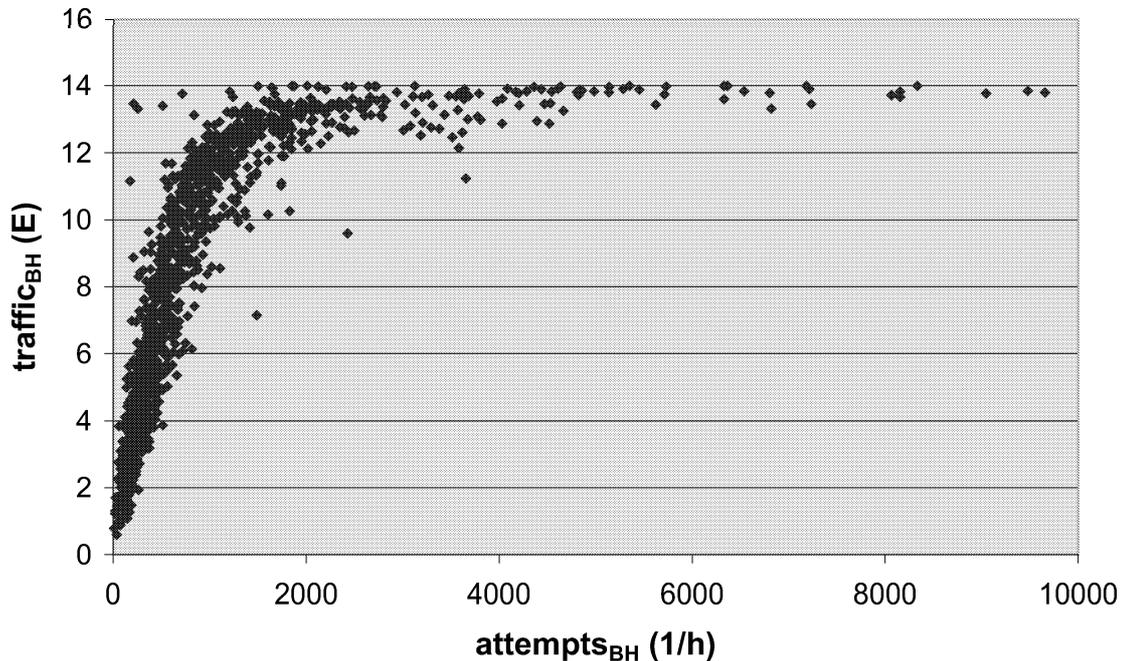


Abbildung 4.2: Abgeführter Verkehr ($traffic_{BH}$) von GSM-Zellen mit 14 Verkehrskanälen

stimmte Anzahl von Belegungsversuchen durchaus unterschiedliche abgeführte Verkehrswerte ergeben. Je höher die durchschnittliche Kanalbelegungsdauer ist, desto höher ist auch der gemessene Verkehrswert.

Zusätzlich ist noch zu bedenken, dass eine hohe Anzahl von Belegungsversuchen mit einer niedrigen mittleren Kanalbelegungsdauer den gleichen Verkehrswert ergibt, wie eine niedrige Anzahl von Belegungsversuchen mit einer hohen mittleren Kanalbelegungsdauer. Man kann aber aus dem Diagramm bereits erkennen, in welchem Bereich sich typische Verkehrswerte bewegen.

Neben der Eigenschaft des zunehmenden Verkehrs ist außerdem das Erreichen eines oberen Grenzwertes deutlich zu erkennen. Wie zuvor erwähnt, handelt es sich hier nur um Messwerte von GSM-Zellen mit 14 Verkehrskanälen. Bei Vollbesetzung dieser Kanäle kann also maximal ein Verkehrswert von 14 Erlang abgeführt werden. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, wird dieser Maximalwert aber nicht bei einer bestimmten Anzahl von Belegungsversuchen plötzlich erreicht, sondern es geschieht eine allmähliche Annäherung an diesen. Bei einer hohen Anzahl von Belegungsversuchen fällt jedoch die Größe der mittleren Kanalbelegungsdauer nicht mehr ins Gewicht, sodass sich nur mehr eine Vollauslastung ergeben kann. Auch wird der Wert von 14 Erlang schon bei niedrigeren Werten der Belegungsversuche erreicht, was auf eine sehr hohe mittlere Kanalbelegungsdauer zurückzuführen ist.

4.3.1 Normierung und mittlere Kanalbelegungsdauer

Um unabhängig von der Anzahl der Verkehrskanäle in der GSM-Zelle zu sein, wurde im nächsten Schritt eine geeignete Normierung für beide Achsen eingeführt. Als Bezugswert für die Ordinate wurde der maximal abführbare Verkehr herangezogen, wodurch sich ein Wertebereich zwischen 0 und 1 ergibt. Da der maximale Verkehrswert gleich der Anzahl der in der Zelle eingesetzten Verkehrskanäle ist, ergibt sich

$$traffic_{BH,norm} = \frac{traffic_{BH}(E)}{Anz(Verkehrskanaele)(E)} \quad (4.1)$$

als Normierungsvorschrift. Für die Abszisse wurde jene Anzahl von Belegungsversuchen pro Stunde als Bezugswert gewählt, welche, unter Voraussetzung einer konstanten Kanalbelegungsdauer, den maximalen Verkehrswert ergibt. Die Normierungsvorschrift hierzu lautet

$$attempts_{BH,normiert} = \frac{attempts_{BH}(1/h)}{\frac{Anz(Verkehrskanaele)}{MHT(h)}}, \quad (4.2)$$

wobei für die mittlere Kanalbelegungsdauer in der Hauptverkehrsstunde ein Wert von $MHT = 63s$ eingesetzt wurde. Diese durchschnittliche Kanalbelegungsdauer ergab sich durch eine Analyse der Messwerte, die Metrica/NPR lieferte. Die Mittelung erfolgte über die Messdaten aller Wiener GSM-Zellen über eine Zeitdauer von einem halben Jahr. Die Abbildung 4.3 zeigt ein Histogramm für die Kanalbelegungsdauer, welches graphisch veranschaulicht, wie sich diese verteilt.

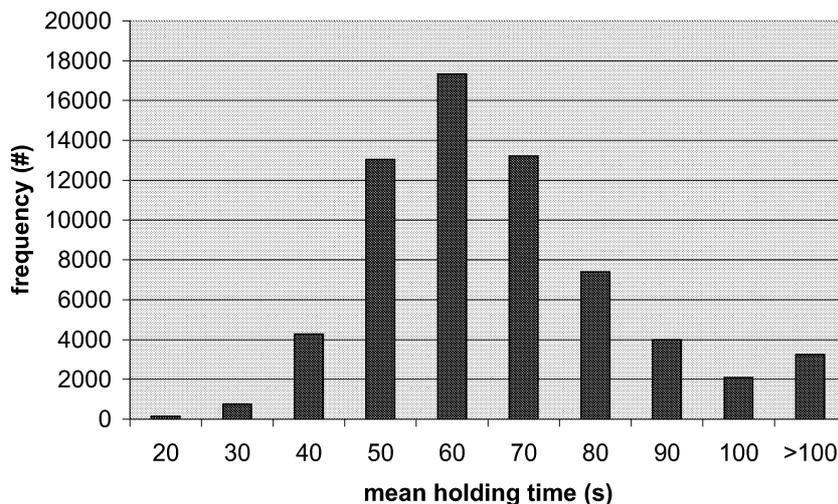


Abbildung 4.3: Histogramm der mittleren Kanalbelegungsdauer in der Hauptverkehrsstunde in Wien

Nach der Einführung der beiden Normierungen ergibt sich nun für den Zusammenhang zwischen den Belegungsversuchen in der Hauptverkehrsstunde und dem abgeführten Verkehr für Zellen mit 14 Verkehrskanälen das Diagramm laut Abbildung 4.4.

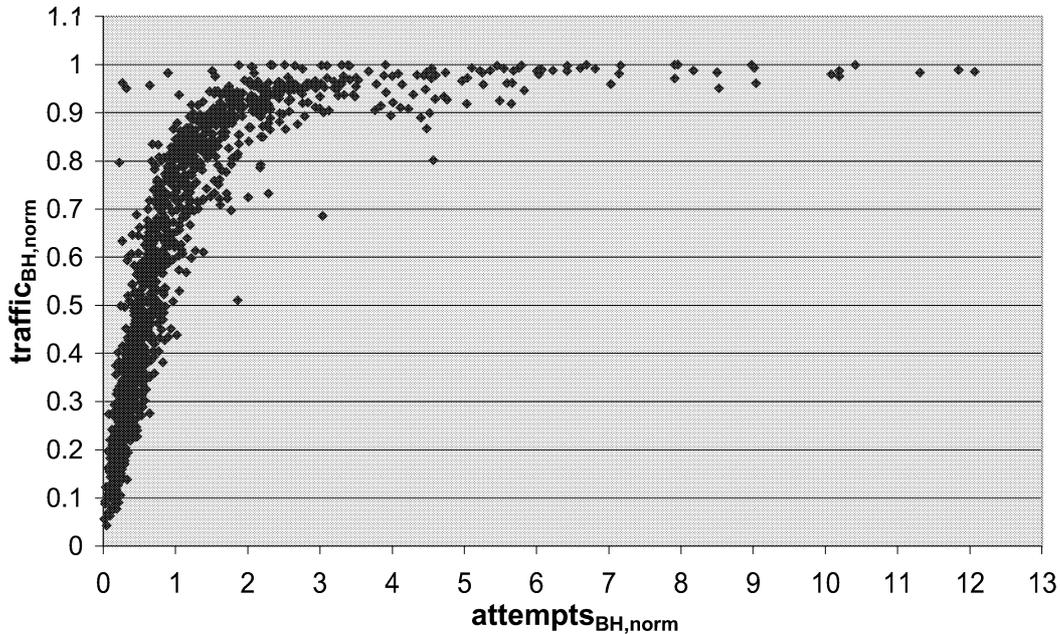


Abbildung 4.4: Abgeführter Verkehr von GSM-Zellen unter Einführung einer Normierung

4.3.2 Datenreduzierung

Es galt nun, aus der großen Menge an Daten mit Hilfe von statistischen Methoden eine repräsentative Kurve zu finden. Dazu wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate [5] gewählt, was bedeutet, dass eine Form der gleitenden Mittelwertbildung durchgeführt wurde. Dafür wurde das Diagramm laut Abbildung 4.4 in mehrere vertikale Fenster gleicher Breite eingeteilt und für jeden dieser Bereiche eine Mittelung aller darin befindlicher Punkte durchgeführt. Dies geschah mit Hilfe des Programmpakets Maple V, welches eine rasche Durchführung dieser Aufgabe erlaubte. Die Fensterbreite war in diesem Mittelungsprogramm ein Parameter, der in Folge variiert wurde. Bei einer Breite von 0.1 stellte sich ein sehr gutes Ergebnis ein, welches in Abbildung 4.5 dargestellt ist.

Wie schon erwähnt, wurde dieser Zusammenhang mehrmals für Zellen mit unterschiedlicher Verkehrskanalananzahl ausgewertet. Nach der Normierung und Datenreduzierung konnte eine weitgehende Übereinstimmung dieser Diagramme festgestellt werden, was durch die Abb. 4.6 untermauert wird.

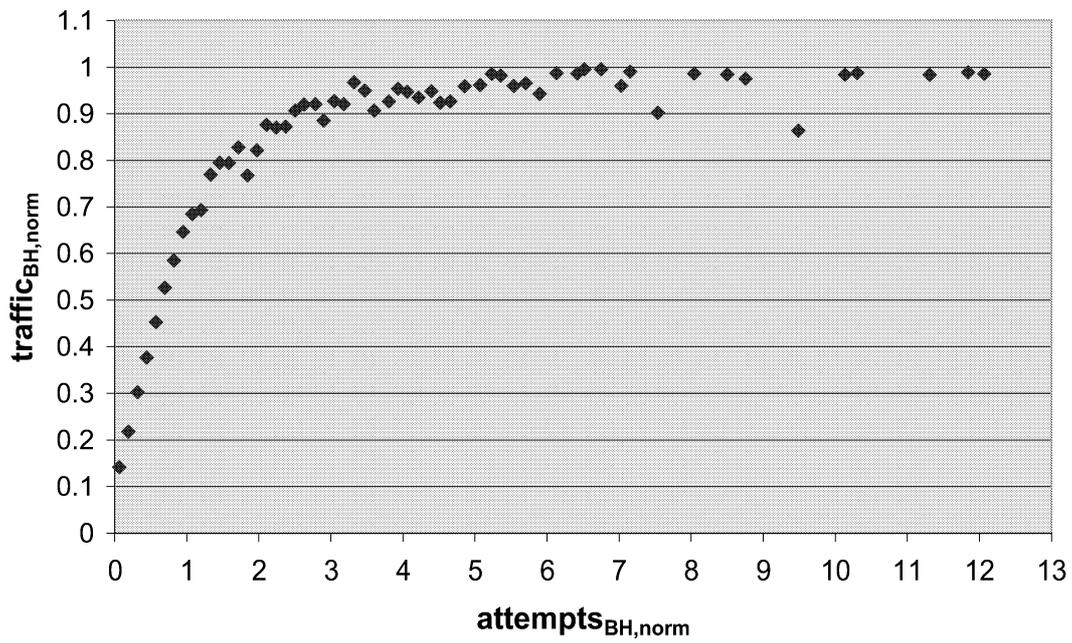


Abbildung 4.5: Repräsentative Kurve für den abgeführte Verkehr

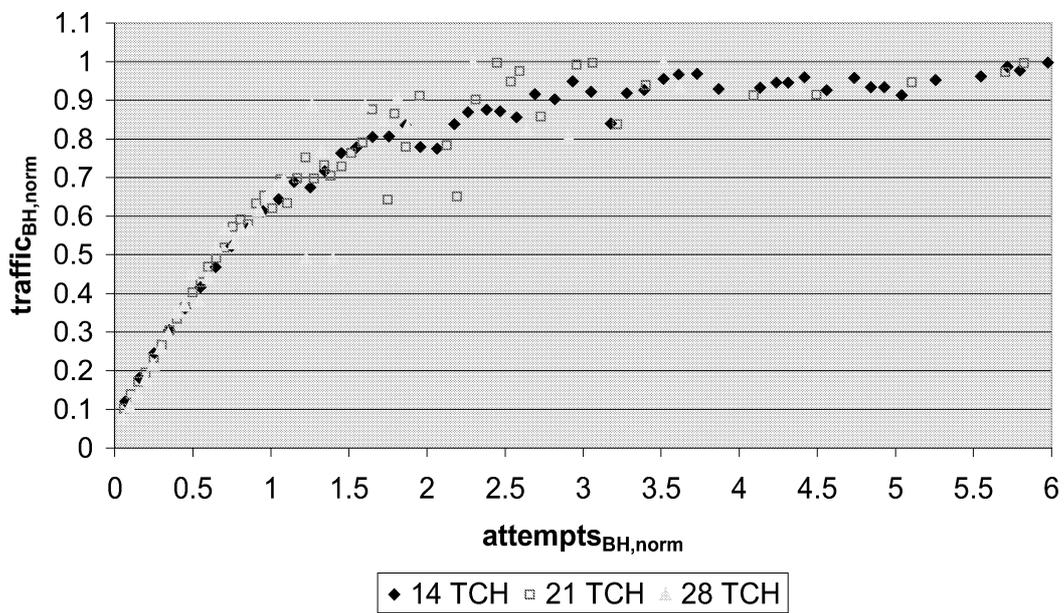


Abbildung 4.6: Vergleich zwischen Zellen mit unterschiedlichen Verkehrskanalanzahlen

4.3.3 Identifikation

Um die gewonnenen Erkenntnisse in ein Modell einfließen lassen zu können, ist es nun notwendig, die Kurve, laut Abb. 4.5, mathematisch zu formulieren. Aus der Regelungstechnik sind Kurven von solcher Gestalt bereits bekannt, da einige Regelungsstrecken ein Verhalten zeigen, das durch den gleichen Verlauf charakterisiert ist. Es handelt sich um ein PT_1 -Verhalten, welches durch eine Funktion der Form

$$f(x) = V * (1 - e^{-\frac{x}{x_0}}) \quad (4.3)$$

beschrieben wird. Die Parameter V und x_0 waren nun in Folge aus dem zuvor erzeugten Diagramm, laut Abb. 4.5, zu ermitteln. Für den Parameter V kann sofort der Wert $V = 1$ angegeben werden, da sich der Wertebereich der Ordinate nach der Normierung nur mehr zwischen 0 und 1 bewegen kann. Für den Parameter x_0 wurde die Tangentenmethode gewählt, aus welcher, laut dem Schnittpunkt der Anfangstangente mit dem Endwert ($= 1$), ein Wert $x_0 = 1$ abgelesen werden kann. Die beschreibende Funktion lautet daher

$$traffic_{BH,norm} = 1 - e^{-(attempts_{BH,norm})} . \quad (4.4)$$

Mit Hilfe dieser identifizierten Funktion wurde nun ein Vergleich zwischen dem Messergebnis und der berechneten Funktion angestellt. Die Abbildung 4.7 zeigt diesen Vergleich, der eine gute Übereinstimmung beider Kurven erkennen lässt. Die anfängliche Annahme über die beschreibende Funktion ist also durchaus brauchbar.

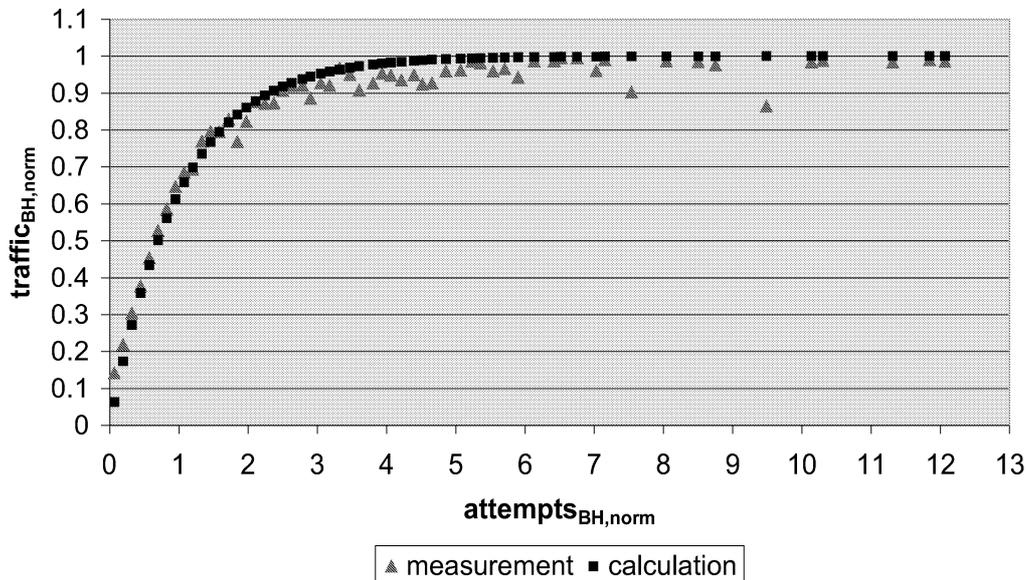


Abbildung 4.7: Vergleich der Messung mit der identifizierten Kurve

Kapitel 5

Entwicklung des Zellmodells und dessen Anwendung

Nachdem nun die theoretischen Eigenschaften und das praktische Verhalten einer GSM-Zelle in Bezug auf den Verkehr bekannt sind, kann im nächsten Schritt die Modellbildung erfolgen. Deren Ziel ist es, allein aus der Angabe des Verkehrsangebots, durch die Belegungsversuche pro Zeiteinheit und deren Kanalbelegungsdauer den abgeführten Verkehr zu simulieren. Dabei soll insbesondere das Verhalten im Überlastzustand (Sättigungsverhalten) gut nachgebildet werden, was für den weiteren Einsatz dieses Modells von besonderer Wichtigkeit ist. Weiters werden die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen dieses Modells aufgezeigt, wobei bereits auf einen Teil der GSM-Parameter eingegangen wird.

5.1 Simulink-Modell

Die Modellbildung erfolgte zunächst mit Hilfe von dem in MATLAB 5.3 enthaltenen Programmpaket 'Simulink'. Dieses ist durch die große Anzahl von Standardkomponenten und die daraus entstehende Übersichtlichkeit der Modelle sehr gut für diese Zwecke geeignet. Ausgehend von einem allgemeinen Ansatz wird nun ein Modell entwickelt, welches die zuvor beschriebenen Eigenschaften so gut wie möglich widerspiegelt.

5.1.1 Ansatz

Die Abbildung 5.1 zeigt den Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen. Das Modell soll aus drei Hauptteilen bestehen, einem Generator, einem Speicher und einer Begrenzung. Der Generator gibt den Anstoß für den Beginn bzw. das Ende der Belegungen, wobei die Rate und die Dauer der Gespräche von außen vorgegeben werden. Der Speicher bildet das natürliche speichernde Verhalten einer GSM-Zelle nach, denn die hinzukommenden Belegungen werden in der Zelle auf-

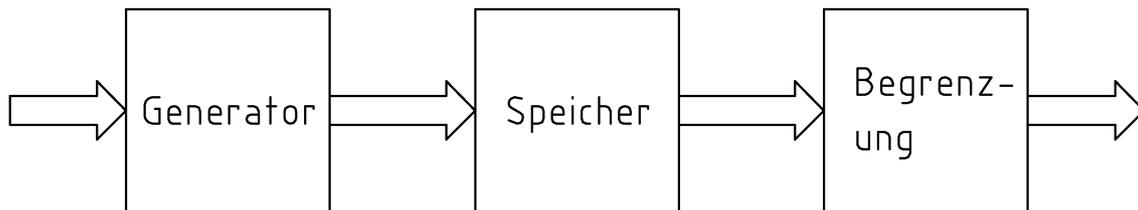


Abbildung 5.1: Blockschaltbild der GSM-Zellmodells

summiert und bleiben dort so lange, bis diese wieder explizit beendet werden. Die Begrenzung simuliert zuletzt die Ressourcenbeschränktheit der Zelle, wodurch das Überlastverhalten bestimmt wird.

5.1.2 Zellmodell

Ausgehend von dem Blockschaltbild, laut Abb. 5.1, wurde nun das in Abb. 5.2 dargestellte Simulink Modell entwickelt. Der Generator besteht aus einem Puls-

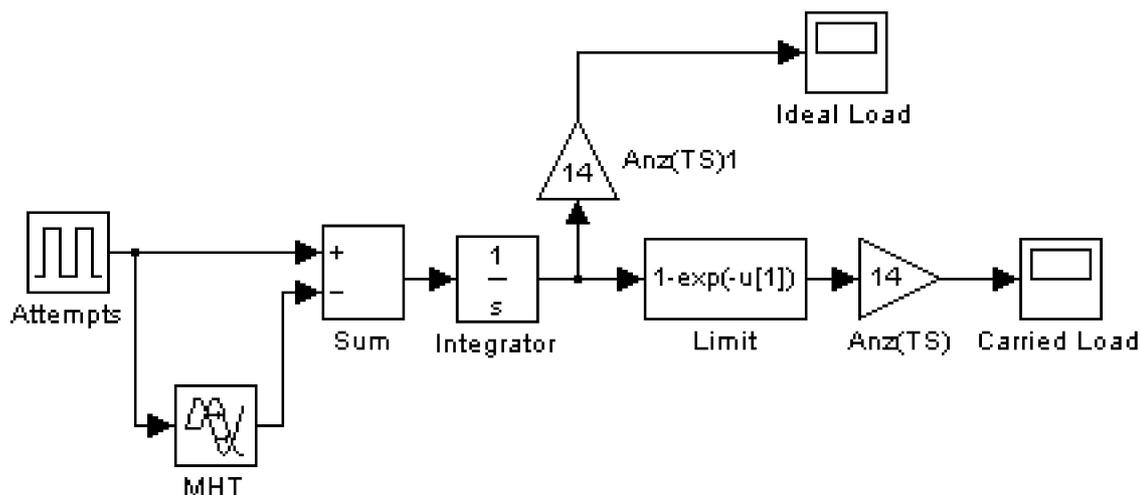


Abbildung 5.2: Simulink Zellmodell

generator ('Attempts'), einem Totzeit-Element ('MHT') und einem Summierglied ('Sum'). Der Pulsgenerator erzeugt eine Folge von positiven Impulsen, deren Rate und Höhe von außen vorgegeben werden kann. Jeder dieser Impulse stellt den Beginn eines Gesprächs dar. Die Impulse gelangen einerseits zum positiven Eingang des Summierers und andererseits zum Totzeit-Element. Letzteres simuliert die Kanalbelegungszeit, welche wiederum von außen vorgegeben werden kann.

Nach Verstreichen der Totzeit wird der Impuls an den negativen Eingang des Summierers weitergegeben. Es stellt sich also nach dem Summierglied eine Folge

von positiven und negativen Impulsen ein, welche auf den speichernden Teil des Modells, den Integrator, wirkt.

Der Integrator ('Integrator') macht aus der Folge von Impulsen eine Folge von Sprüngen in die positive oder negative Richtung. Wird das Modell gestartet, so werden bis zum Verstreichen der Totzeit nur positive Impulse an den Integrator herangeführt. Er integriert also so lange hoch, bis sich auch negative Impulse einstellen, und sich ein Gleichgewicht ergibt. Ab diesem Zeitpunkt bewegt sich der Ausgang des Integrators auf einem mehr oder weniger stabilen Niveau.

Der Ausgang des Integrators ist mit dem Begrenzungsglied ('Limit') gekoppelt, welches nun dafür Sorge trägt, dass das Ausgangssignal nicht über alle Maßen anwachsen kann. Die Begrenzung wird durch die Funktion gebildet, wie sie im Abschnitt 4.3.3 beschrieben wurde. Nach dem Verstreichen der mittleren Kanalbelegungszeit (= Totzeit) stellt sich also auf der Exponentialfunktion ein Arbeitspunkt ein, der den tatsächlich abgeführten Verkehr repräsentiert.

Das Modell arbeitet intern mit normierten Größen (zwischen '0' und '1'), weshalb vor den Ausgängen ('Carried Load' und 'Ideal Load') die beiden Elemente 'Anz(TS)' und 'Anz(TS)1' geschaltet sind. Dabei handelt es sich um Verstärker, die die Anpassung des Ausgangssignals an die Anzahl der verfügbaren Verkehrskanäle in der Zelle bewerkstelligen. Erst so stellt sich der richtige Verkehrswert in der Simulation ein.

Betrachtet man nur jenen Teil des Modells, der durch den Generator und den Speicher gebildet wird, so stellt dieser eine ideale, nicht ressourcenbeschränkte GSM-Zelle dar. Es kann sich nämlich hier, abhängig von der Rate der Impulse und der Länge der Totzeit, jeder beliebige Verkehrswert einstellen. Dieser wird über den Ausgang 'Ideal Load' ausgegeben. Erst die Begrenzung schafft den Bezug zum realen Verhalten einer GSM-Zelle (Ausgang 'Carried Load').

5.1.3 Erprobung des Modells

Nun soll die Leistungsfähigkeit des Modells unter Beweis gestellt werden. Dazu wurde im ersten Schritt der Zusammenhang zwischen den Belegungsversuchen in der Hauptverkehrsstunde und dem jeweils abgeführten Verkehr simuliert. Es wurde also das in Abb. 4.2 dargestellte Messergebnis nachgebildet. Das Modell braucht als Eingangsgrößen die Rate der Belegungsversuche und die durchschnittliche Kanalbelegungsdauer, wobei ersteres direkt von der zuvor angesprochenen Messung übernommen wurde. Die durchschnittliche Kanalbelegungsdauer ist künstlich mit Hilfe einer exponentiell verteilten Zufallszahl erzeugt worden, deren Verteilungsfunktion durch

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\mu x} & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

gegeben ist. Als Parameter für die Verteilung diente der in Abschnitt 4.3.1 gefundene Wert von $\mu = 63s$. Das Ergebnis dieser Simulation zeigt die Abbildung 5.3,

wobei auffällt, dass sich bis zu einem Verkehrswert von ca. $traffic_{BH, norm} = 0.8$ nur diskrete Werte für den Verkehr einstellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Integrator auf Grund der Integration von Impulsen ebenfalls nur diskrete Werte annehmen kann. Welche Werte dies sind, hängt von der Impulshöhe ab, welche wiederum von der Anzahl der Verkehrskanäle in der Zelle abhängt. Im Bereich von $traffic_{BH, norm} > 0.8$ kommt der Charakter der Begrenzungsfunktion zum Tragen, was zu quasi-kontinuierlichen Verkehrswerten führt.

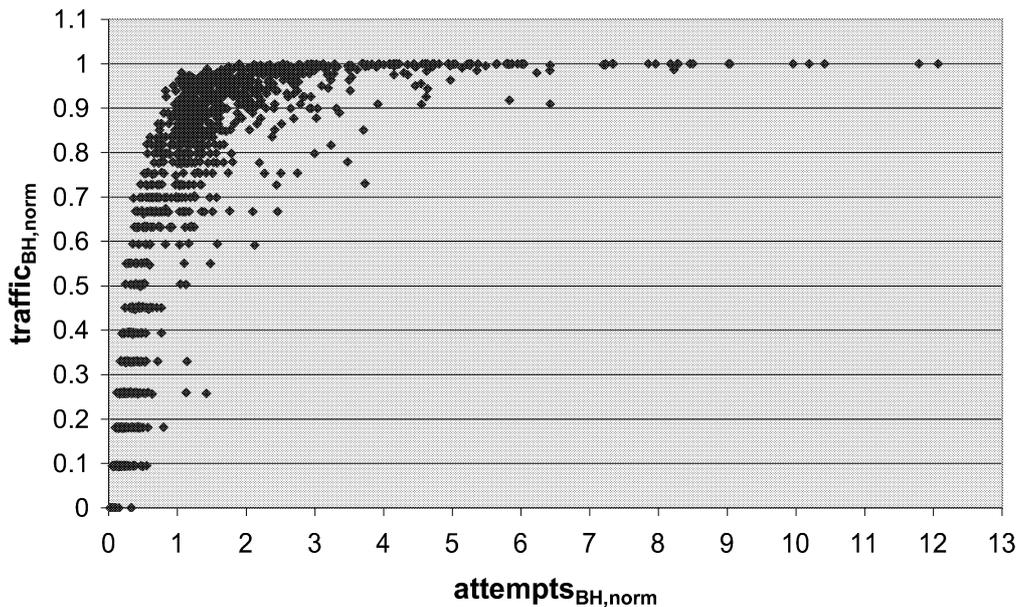


Abbildung 5.3: Simulation des abgeführten Verkehrs bei exponentiell verteilter Kanalbelegungsdauer

Um einen Vergleich zwischen dem Mess- und dem Simulationsergebnis durchführen zu können, wurde im Folgenden das Simulationsergebnis der schon zuvor angewandten Datenreduktion unterworfen. Die Abbildung 5.4 zeigt nun diesen Vergleich, woraus eine gute Übereinstimmung zu erkennen ist. Bis jetzt hat sich das Modell also als durchaus brauchbar erwiesen.

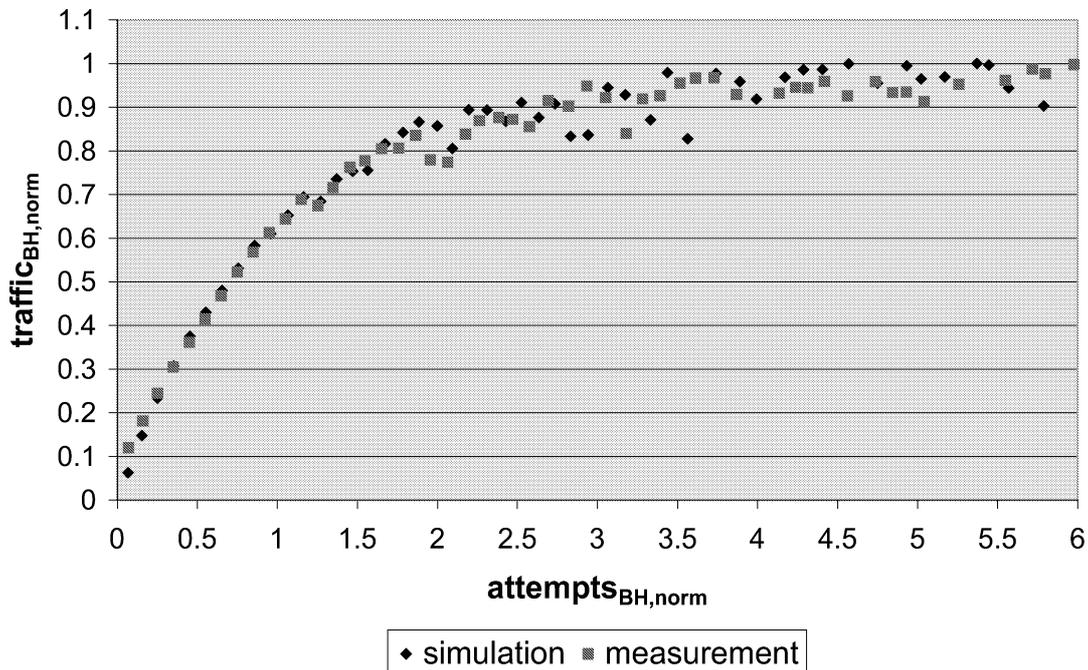


Abbildung 5.4: Vergleich der Simulation mit der Messung nach der Datenreduktion

Im zweiten Schritt wurden nun Tagesverkehrsverläufe konkreter GSM-Zellen in Wien simuliert. Hierzu wurden die entsprechenden Messdaten unterschiedlich stark ausgelasteter GSM-Zellen herangezogen, um das Verhalten des Modells in allen Bereichen zu untersuchen. Die Daten stammten wieder von Metrica/NPR, welche einerseits aus der Anzahl der Belegungsversuche pro Viertelstunde und andererseits der durchschnittlichen Kanalbelegungsdauer für diesen Zeitraum bestanden. Mit diesen beiden Eingangsgrößen wurde der abgeführte Verkehr simuliert und dieser in einem Diagramm mit den Messwerten aufgetragen. Die Abbildung 5.5 zeigt diesen Vergleich für eine stark ausgelastete GSM-Zelle, bei dem auffällt, dass das Simulationsergebnis im Bereich von hohen Verkehrswerten eine Art „Offset“ aufweist. Außerdem stellt sich bei sehr kleinen gemessenen Verkehrswerten in der Simulation durchwegs der Wert 0 ein. Das Modell hat sich also für diesen Fall als eher ungenau erwiesen, was zu der Forderung führt, dass es noch einer Verbesserung unterzogen werden muss.

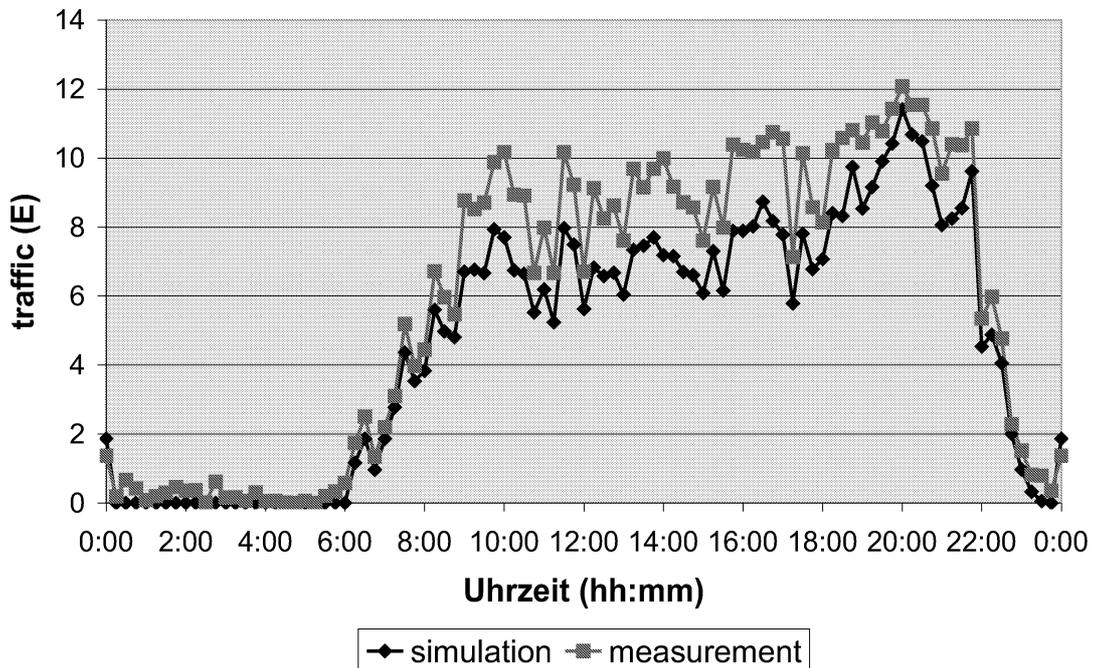


Abbildung 5.5: Tagesverkehrsverlauf einer GSM-Zelle; Simulation und Messung

5.1.4 Verbesserung des Modells

Es hat sich also gezeigt, dass das entwickelte Modell nicht in jedem Fall das gewünschte Ergebnis erbringt. Es ist nun zu überlegen, welche die Einflussfaktoren für das gegenwertige Defizit sind und wie aus dieser Erkenntnis eine Verbesserung zu erzielen ist.

Offensichtlich wirkt die Begrenzung bei hohen Verkehrswerten zu stark, was zu dem beschriebenen Offset führt. Ein entscheidender Faktor für dieses Verhalten ist der Parameter x_0 in der Begrenzungsfunktion, laut Gl. 4.3. Dieser bestimmt den Anstieg und den Verlauf der Funktion bei der Annäherung an den Grenzwert. Es gilt also nun diesen Parameter so anzupassen, dass sich eine Verbesserung ergibt. Durch eine Variation des Parameters und einer großen Anzahl von Simulationsläufen mit unterschiedlichen Zelldaten hat sich gezeigt, dass ein fest eingestellter Wert x_0 nicht das gewünschte Ergebnis bringt. Denn, wird ein zu niedriger Wert gewählt, so verschlechtert sich das Ergebnis im Bereich kleiner und mittlerer Verkehrswerte. Ein zu hoher Wert bewirkt im Gegensatz dazu ein verschlechtertes Überlastverhalten. Um nun in allen Bereichen ein gutes Ergebnis zu erzielen, ist es daher notwendig, dass der Parameter x_0 dynamisch an die aktuelle Lastsituation angepasst wird. Dies geht so vor sich, dass aus den Eingangsdaten „Belegungsversuche pro Zeiteinheit“ (attempts) und „mittlere Kanalbelegungs-

dauer" (MHT) das theoretische, normierte Verkehrsangebot

$$A_{norm} = \frac{attempts(1/h) * MHT(h)}{Anz(Verkehrskanaele)} \quad (5.2)$$

errechnet wird, welches als Entscheidungskriterium für die Wahl von x_0 herangezogen wird. Durch eine empirische Optimierung hat sich gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Verkehrsangebot und x_0 , wie dieser in der Tabelle 5.1 angegeben ist, für alle Fälle günstig ist.

Tabelle 5.1: Wertetabelle für den Parameter x_0 in Abhängigkeit vom theoretischen Verkehrsangebot

A	$1/x_0$
$0 \leq A < 0,4$	1,2
$0,4 \leq A < 0,5$	1,3
$0,5 \leq A < 0,7$	1,4
$0,7 \leq A < 1$	1,5
$A \geq 1$	1,6

Als zweites Problem stellte sich die Ungenauigkeit des Modells bei niedrigen Verkehrswerten heraus. Dies konnte einfach umgangen werden, indem unterhalb einer bestimmten Schranke des theoretischen Verkehrsangebots der abgeführte Verkehr gleich dem angebotenen Verkehr gesetzt wurde. Es gilt für diesen Fall also

$$traffic(E) = attempts(1/h) * MHT(h) , \quad (5.3)$$

was durchaus zulässig ist, solange keine Blockierungen zu erwarten sind. Denn dann gehen alle Belegungsversuche in erfolgreiche Belegungen über, was dem Verhalten der idealen, nicht ressourcenbeschränkten GSM-Zelle entspricht.

Nach Einarbeitung dieser beiden Verbesserungen ergibt sich nun für den zuvor durchgeführten Simulationslauf, laut Abb. 5.5, der in Abb. 5.6 gezeigte Verlauf. Der Offset und das Verhalten bei kleinen Verkehrswerten hat sich deutlich verbessert.

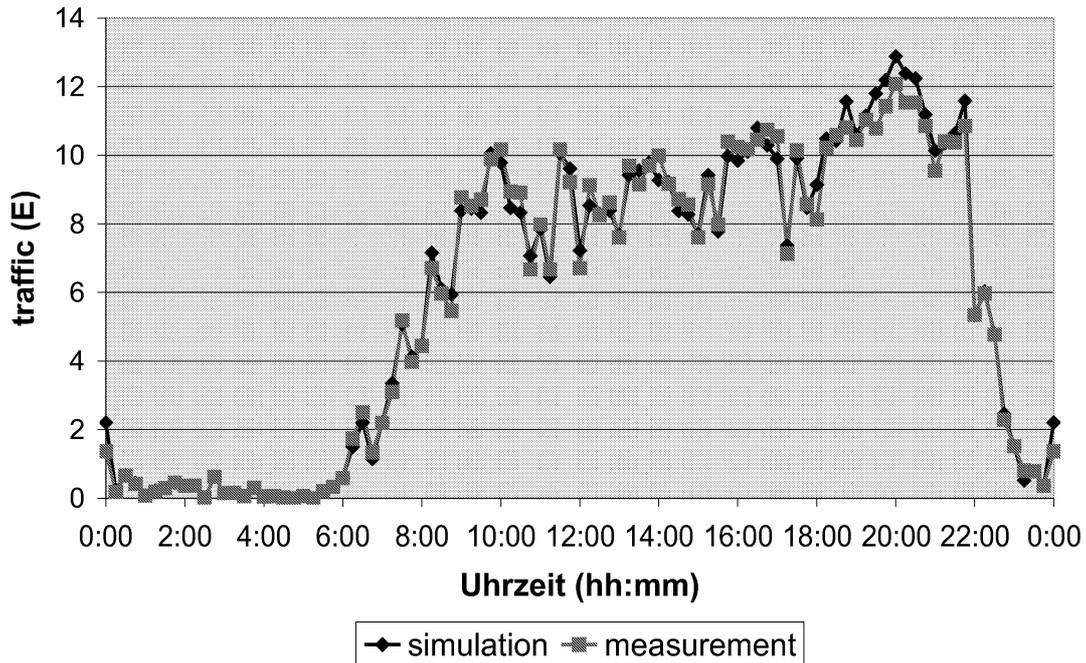


Abbildung 5.6: Tagesverkehrsverlauf einer GSM-Zelle; Verbessertes Simulationsergebnis und Messung

5.1.5 Zusätzliche Simulationsgrößen

Bis zu diesem Zeitpunkt lieferte das Modell lediglich den abgeführten Verkehr in Abhängigkeit vom Verkehrsangebot. Für künftige Überlegungen war es jedoch ebenfalls interessant, wieviele Belegungsversuche zu erfolgreichen Belegungen werden, und wieviele blockiert werden. Dazu war es notwendig, den Begrenzungsteil wieder aus dem Simulink-Modell zu nehmen und diesen Schritt rein rechnerisch, innerhalb eines Matlab m-Files, durchzuführen. Durch einen Vergleich zwischen dem theoretischen Verkehrsangebot (Ausgang des Integrators) und dem abgeführten Verkehr war es so möglich, die interessierenden Größen zu errechnen. Die erfolgreichen Belegungen (*seizures*) ergeben sich zu

$$seizures(1/h) = \frac{traffic(E)}{MHT(h)}, \quad (5.4)$$

die blockierten Belegungsversuche (*blocks*) zu

$$blocks(1/h) = attempts(1/h) - seizures(1/h). \quad (5.5)$$

5.2 Vergleich mit der Theorie

Es soll nun das im vorangegangenen Kapitel gefundene Sättigungsverhalten mit jenem verglichen werden, welches sich nach der Erlangschen Verlustformel (Kapitel 3.4) ergibt. Den Vergleich für eine Zelle mit 14 Verkehrskanälen zeigt die Abbildung 5.7. Trotz der völlig unterschiedlichen Ausgangspunkte für die Modell-

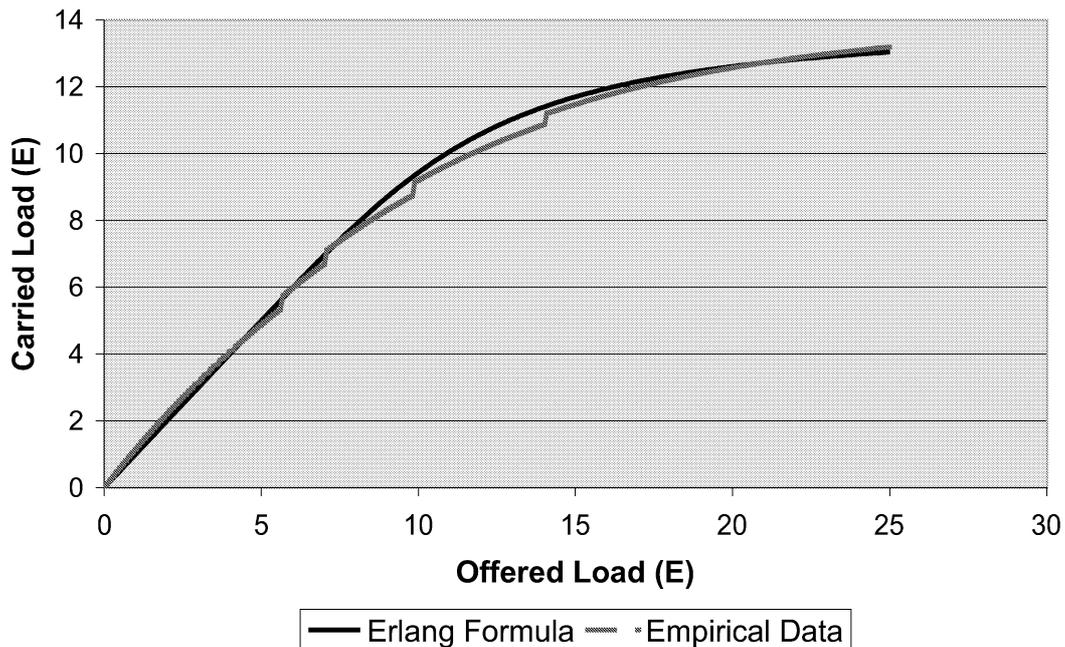


Abbildung 5.7: Vergleich des Sättigungsverhaltens einer GSM-Zelle nach Erlang und nach der Datenanalyse

bildung weisen die beiden Verläufe eine sehr große Ähnlichkeit auf. Es können also die von Erlang getroffenen Annahmen über einfallende Gespräche, Gesprächsdauer und den Belegungszustand eines Telefonsystems nur voll bestätigt werden. Die Theorie wurde somit durch praktische Untersuchungen untermauert.

5.3 Einsatz des Zellmodells

Dieses Verkehrsmodell eignet sich besonders gut für die Untersuchung der Auswirkung von GSM-Parameteränderungen, die den Gesprächsaufbau beeinflussen. Man kann mit Hilfe dieser Parameter nämlich bestimmen, in welchem Layer bevorzugt Belegungen stattfinden. Wird mit einer Mobilstation gerade kein Gespräch geführt und ist diese eingeschaltet, so befindet sie sich im sog. „Idle-Mode“. In diesem Betriebszustand werden ständig Pegelmessungen durchgeführt, die im Falle eines Gesprächsaufbaus bestimmen, über welche Zelle das Gespräch

aufgebaut wird. Genau hier hat der Netzbetreiber die Möglichkeit, einzugreifen. Denn die Zellauswahl erfolgt nicht direkt über die Ergebnisse der Pegelmessung, sondern über ein eigens für diesen Fall eingeführtes Kriterium. In das sog. „Cell Reselection“-Kriterium (C2-Kriterium) gehen, neben den Messdaten, einige GSM-Parameter ein, die vom Netzbetreiber administriert werden. Dadurch ist der Gesprächsaufbau natürlich von den momentanen Funkverhältnissen abhängig, kann aber zusätzlich nach den Wünschen des Betreibers beeinflusst werden. Auf das C2-Kriterium und die angesprochenen GSM-Parameter wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Das Einsatzgebiet für das Modell sind „Colocated-Zellen“. Darunter versteht man zwei parallele Zellen, die die gleiche geographische Ausdehnung haben. Dies wird erreicht, indem die Antennenanlagen der beiden Zellen am gleichen Ort montiert sind. Da es sich im max.mobil.-Netz bei den Colocated-Zellen immer um eine GSM900 Makrozelle und eine GSM1800 Makrozelle handelt, wurde durch entsprechende Auslegung der Ausgangsleistung und der Antennen dafür gesorgt, dass das Versorgungsgebiet der beiden Zellen auch tatsächlich identisch ist. Diese Anordnung bringt den Vorteil, dass nicht die Lage der beiden Zellen zueinander den Ausschlag für die Aufteilung des Telefonverkehrs gibt, sondern nur die GSM-Parameter. Das Ergebnis einer Untersuchung der Auswirkungen von Parametereinstellungen auf die Verkehrsaufteilung kann daher auf jede dieser Colocated-Zellen angewendet werden.

5.3.1 GSM-Parameter für den Idle-Mode

Das entscheidende Kriterium für den Gesprächsaufbau ist das „Cell Reselection“-Kriterium. Dieses ist in den GSM-Spezifikationen [6] exakt definiert, wobei hier nur eine *verkürzte Form* angeführt ist, die jedoch alle wichtigen Bestandteile enthält, die für die nachfolgende Simulation von Bedeutung sind. Das Kriterium sei in Form einer IF-Klausel angeführt, wie diese in Programmiersprachen Verwendung findet, und lautet

IF ($t < PENTIME$) *THEN*

$$C2 = (RXLEV DL - RXLEV ACCESS MIN) + CRESOFF - TEMPOFF \quad (5.6)$$

ELSE

$$C2 = (RXLEV DL - RXLEV ACCESS MIN) + CRESOFF. \quad (5.7)$$

ENDIF

Erläuterung der Größen und Parameter:

t: „time“; Der Zeitnullpunkt ist jener, sobald ein Funkkanal zum ersten Mal von der Mobilstation erfasst wird.

PENTIME: „Penalty Time“; Zeitdauer, die angibt, wie lange der Parameter „TEMPOFF“ vom C2-Kriterium subtrahiert wird.

RXLEV DL: „Receive Level Downlink“; Gemessener Empfangspegel der Mobilstation in der Dimension „dBm“¹.

RXLEV ACCESS MIN: „RXLEV Access Minimum“; Einbuchschwelle in das GSM-Netz².

CRESOFF: „Cell Reselection Offset“; Offset in dB, welcher ständig aufgeschlagen wird.

TEMPOFF: „Temporary Offset“; Offset in dB, welcher für die Zeitdauer „PENTIME“ abgezogen wird.

Wie hoch die Wahrscheinlichkeit für die Belegung in einer Zelle ist, hängt daher in erster Linie vom Abstand des Empfangspegels von der vom Netzbetreiber gewählten Einbuchschwelle ab. Je höher dieser Pegel ist, desto wahrscheinlicher ist auch der Gesprächsaufbau über den gemessenen Kanal. Der Parameter CRESOFF dient als ein zunächst positiver Offset, der bewirkt, dass die Wahrscheinlichkeit für den Gesprächsaufbau über den gemessenen Kanal größer wird. Um den Stellbereich zu vergrößern, wurde zusätzlich ein Mechanismus eingebaut, mit dem der Parameter CRESOFF negativ aufgeschlagen wird. Dadurch ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit für die Belegung in der jeweiligen Zelle unter das natürliche, durch die Pegelverhältnisse gegebene Maß zu senken. Der entscheidende Parameter hierfür ist die „PENTIME“, die bei einem Einstellungswert von $PENTIME = 31$ für diese negative Aufschaltung des CRESOFF sorgt.

Durch den Parameter „PENTIME“ hat man außerdem die Möglichkeit, während der durch ihn definierten Zeitdauer einen zusätzlichen negativen Offset aufzuschalten. Dies bietet die Möglichkeit, dass die Belegungen, die von Teilnehmern in schnell bewegenden Fahrzeugen stammen, in einem bestimmten Layer aufgebaut werden. Dieser Layer zeichnet sich dann durch relativ große Zellen aus, sodass die Anzahl der zwangsläufig folgenden Handover gering bleibt. Denn, würde man sich mit dem Auto entlang einer Straße bewegen, die durch einen GSM900 Mikrolayer und einen GSM900 Makrolayer versorgt wird, so würde man bei einem Gesprächsaufbau im Mikrozellenlayer mehr Handover machen, als im Makrolayer. Der Telefonverkehr, der durch Fußgänger und nicht bewegende Personen erzeugt wird, würde jedoch bevorzugt über die Mikrozellen abgeführt werden.

Die Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die Einheiten und Wertebereiche der zuvor beschriebenen GSM-Parameter. Die derzeitigen Defaulteinstellungen für die drei Typen von Zellen (GSM900 Makro, GSM1800 Makro und GSM900 Mikro) sind in der nachfolgenden Tabelle 5.3 aufgelistet.

¹Leistungsmaß, welches durch Bezug des Empfangspegels in Watt auf die Bezugsgröße 1 mW gebildet wird.

²Minimal notwendiger Empfangspegel, um sich in das GSM-Netz einbuchen zu können

Tabelle 5.2: GSM-Parameter für den Idle-Mode

Parameter	Wertebereich	Einheit
PENTIME	0 - 31	Sec
RXLEV ACCESS MIN	-110 - (-48)	dBm
CRESOFF	0 - 126	dB
TEMPOFF	0 - ∞	dB

Tabelle 5.3: Defaulteinstellungen der Idle-Parameter für drei Zelltypen

Parameter	GSM900 Makro	GSM1800 Makro	GSM900 Mikro
PENTIME	31 Sec	0 Sec	0 Sec
RXLEV ACCESS MIN	-105 dBm	-105 dBm	-105 dBm
CRESOFF	0 dB	4 dB	14 dB
TEMPOFF	0 dB	0 dB	0 dB

5.3.2 Untersuchungen zu den Auswirkungen von Parametereinstellungen im Idle-Mode

Mit Hilfe der Messdaten von METRICA/NPR wurden die Auswirkungen von bestimmten Parameterkonstellationen im Wirknetz untersucht. Diese Erkenntnisse dienen als Basis für die nachfolgende Simulation. Im max.mobil.-Netz werden zur Steuerung der Verkehrsaufteilung im Idle-Mode vor allem die zwei Parameter $CRESOFF_{1800}$ und $PENTIME_{1800}$ verwendet. Die entsprechenden Parameter der GSM900-Zelle werden immer konstant gehalten, um die Auswirkungen von Änderungen klar nachvollziehen zu können. Außerdem kann durch die Möglichkeit der negativen Aufschaltung des Parameters $CRESOFF$ der volle Stellbereich abgedeckt werden, wodurch sich keine Notwendigkeit und auch keine Einschränkungen durch den exklusiven Einsatz der GSM1800-Parameter ergeben. Die Möglichkeit der Verkehrslenkung über die Parameter TEMPOFF und PENTIME wird bei max.mobil. nicht wahrgenommen, da sich im laufenden Betrieb keine wesentlichen Vorteile dadurch ergeben. Eine Steuerung des Verkehrsflusses im Connected-Mode³ kann wesentlich effektiver über die Parameter erfolgen, die das Handoververhalten⁴ beeinflussen.

Wie im obigen Kapitel bereits ausgeführt, kann über diese beiden Parameter eine Bevorzugung bestimmter Zellen erreicht werden. Daher wurde im Wochenrhythmus die mittlere Verkehrsaufteilung im Idle-Mode für jeweils gleich parametrisierte Zellen in Wien ausgewertet. Das Ergebnis zeigt das Diagramm in der Abb. 5.8, in dem auf der Abszisse die Parameterkonstellation aufgetragen ($CRESOFF_{1800} / PENTIME_{1800}$) ist und auf der Ordinate der jeweilige

³ „Gesprächsmodus“; Betriebsmodus, in dem eine aktive Funkverbindung zum GSM-Netz besteht.

⁴ „Handover“: Ein durch das GSM-System gesteuerter Zellwechsel.

mittlere Verkehrsanteil der GSM1800-Zelle in Prozent. Man erkennt, wie sich die mittlere Verkehrsbelastung mit steigendem Parameter $CRESOFF_{1800}$ immer mehr zur GSM1800-Zelle hin verschiebt. Komplementär dazu sinkt natürlich der Verkehrsanteil der GSM900-Zelle im gleichen Maße.

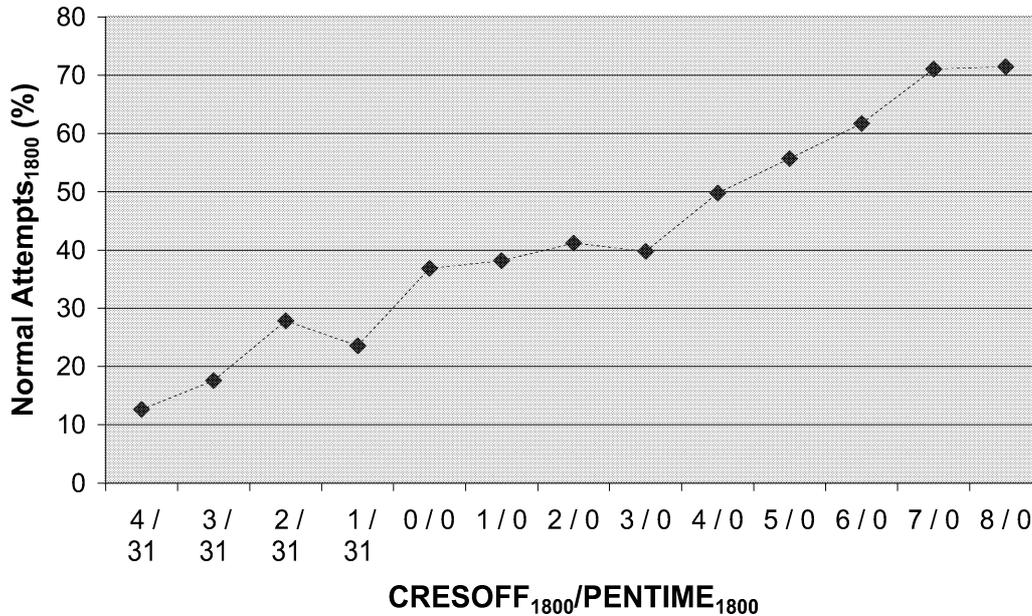


Abbildung 5.8: Gemessener mittlerer Verkehrsanteil im Idle-Mode der GSM1800 Makrozellen in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen

Eine Linearisierung des in Abb. 5.8 dargestellten Verlaufs ergibt für den mittleren Anteil der Gesprächsaufbauten in der GSM1800 Zelle (NA_{1800} in %)

$$NA_{1800} = \begin{cases} 32,22\% + (4,9 * CRO_{1800}) & \text{für } PT_{1800} = 0 \\ 32,22\% - (4,9 * CRO_{1800}) & \text{für } PT_{1800} = 31 \end{cases} \quad (5.8)$$

Hier steht CRO für den Parameter „CRESOFF“ und PT für „PENTIME“. Der Wertebereich von NA_{1800} kann sich klarerweise nur zwischen 0% (keine Belegungsversuche) und 100% (alle Belegungsversuche in der GSM1800-Zelle) bewegen. Wie zuvor erwähnt, wird für diese Gleichungen vorausgesetzt, dass die Idle-Parameter der Colocated GSM900-Zelle konstant bleiben. Ist dies nicht der Fall, so kann man allgemeiner die Verkehrsaufteilung von der Differenz der beiden CRESOFF-Werte ($\Delta CRESOFF$) abhängig machen. Diese Parameterdifferenz

errechnet sich aus

$$\Delta CRESOFF = \begin{cases} CRO_{1800} - CRO_{900} & \text{für } PT_{1800} = 0, PT_{900} = 0 \\ CRO_{1800} + CRO_{900} & \text{für } PT_{1800} = 0, PT_{900} = 31 \\ -(CRO_{1800} + CRO_{900}) & \text{für } PT_{1800} = 31, PT_{900} = 0 \\ (-CRO_{1800}) + CRO_{900} & \text{für } PT_{1800} = 31, PT_{900} = 31 \end{cases} \quad (5.9)$$

Da es sich um reine Pegeloffsets handelt, kann die Aufteilung der Normal Attempts folglich durch

$$NA_{1800} = 32, 22\% + (4.9\% * \Delta CRESOFF) \quad (5.10)$$

und

$$NA_{900} = 100\% - (32, 22\% + (4.9\% * \Delta CRESOFF)) \quad (5.11)$$

beschrieben werden, was in der Abb. 5.9 graphisch dargestellt ist.

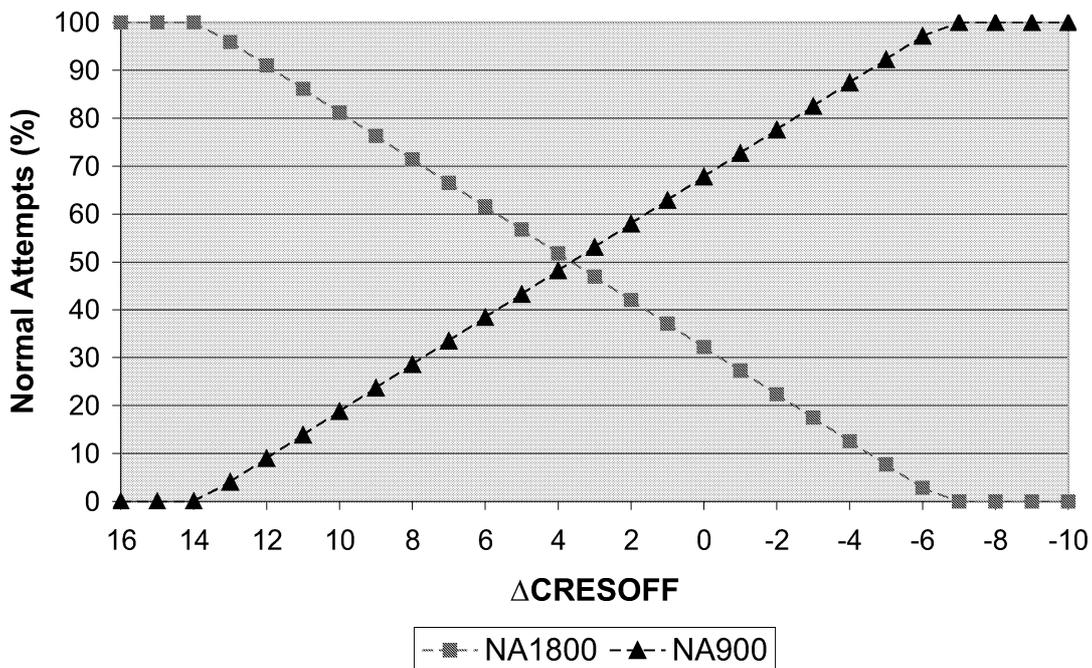
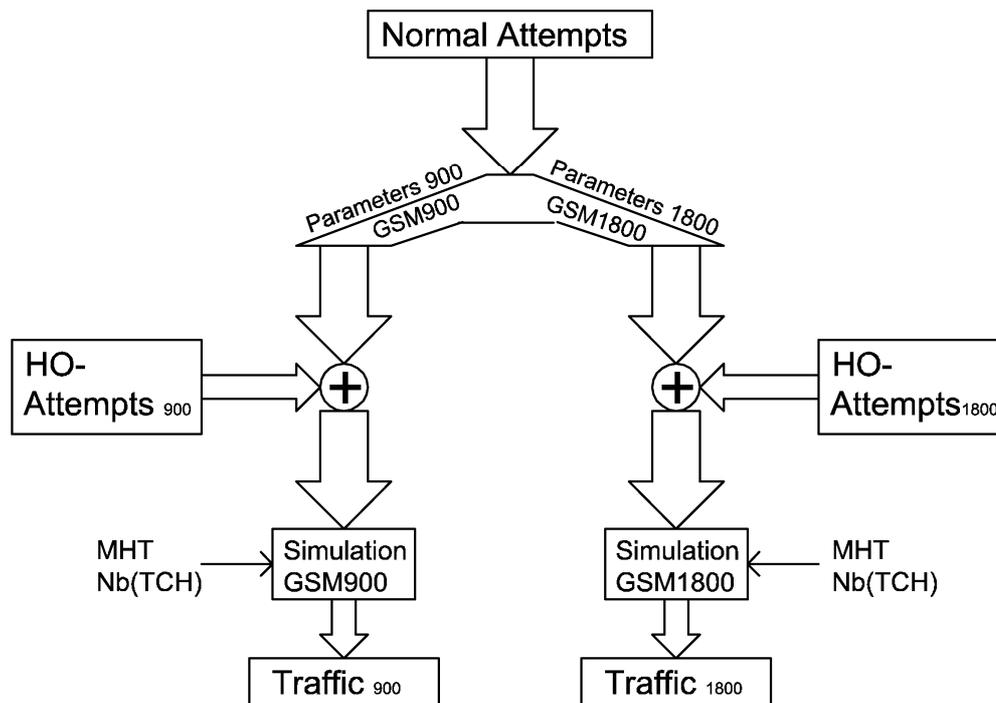


Abbildung 5.9: Idealisierte mittlere Verkehrsaufteilung im Idle-Mode für Colocated Zellen

5.3.3 Simulationseinsatz

Es wird nun anhand eines Beispiels gezeigt, wie dieses Modell eingesetzt werden kann, um eine Auslastungsoptimierung durchzuführen. Der Simulationsprozess, der in Abb. 5.10 dargestellt ist, arbeitet in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und liefert als Output den abgeführten Verkehr der GSM900 Makrozelle und GSM1800 Makrozelle. Die zeitliche Auflösung wurde so gewählt, um die Messdaten von METRICA/NPR direkt verwenden zu können.

Als Eingangsgröße dient die Anzahl der Gesprächsaufbauten, die innerhalb der 15 Minuten stattgefunden haben (*NormalAttempts*). Dabei handelt es sich um die *Gesamtanzahl* von Gesprächsaufbauten, die auf diese beiden Zellen einwirkt, denn die Aufteilung erfolgt erst im nächsten Schritt. Hier spielen nun die GSM-Parameter die entscheidende Rolle, denn durch diese wird das Aufteilungsverhältnis zwischen beiden Zellen bestimmt. Die Untersuchungen und Ergebnisse hierzu wurden bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert.



Legende: MHT...Mean Holding Time (Durchschnittliche Belegungsdauer)
Nb(TCH)...Anzahl der Verkehrskanäle

Abbildung 5.10: Blockschaltbild für den Simulationsprozess

Nachdem die *NormalAttempts* in den Anteil der GSM900- und der GSM1800-Zelle aufgespalten sind, werden nachfolgend jene Belegungsversuche addiert, die durch Handover in die jeweilige Zelle gelangen. Die sich so ergebende Anzahl von Belegungsversuchen bildet das gesamte Verkehrsangebot, welches auf die Zelle

einströmt. Diese Größe dient daher als Eingangsgröße für den Simulationsblock, der am Ausgang den tatsächlich abgeführten Verkehr unter Berücksichtigung des Sättigungsverhaltens der Zelle liefert. Als Parameter für die Simulation dienen die beiden Größen „Durchschnittliche Kanalbelegungsdauer“ und „Anzahl der Verkehrskanäle“. Man erhält aus dieser Simulation also den Verkehr, der im Mittel während der 15 Minuten von der GSM900- oder GSM1800-Zelle abgeführt wird. Über ein wiederholtes Durchführen des Simulationsprozesses, kann der Verkehrsverlauf während eines ganzen Tages nachgebildet werden.

Die Abb. 5.11 zeigt einen solchen simulierten Verkehrsverlauf zweier Colocated-Zellen über einen Tag. In dieser Situation sind die beiden Zellen defaultparametrisiert, was bedeutet, dass die Einstellungen jenen der Tabelle 5.3 entsprechen. In dieser Grundeinstellung übernimmt die GSM900-Zelle etwas mehr Verkehr als die GSM1800-Zelle. Man erkennt außerdem den typischen Tagesrhythmus, der von geringem Verkehr in der Nacht, steigendem Verkehr vormittags und einer Spitze am Nachmittag oder Abend geprägt ist.

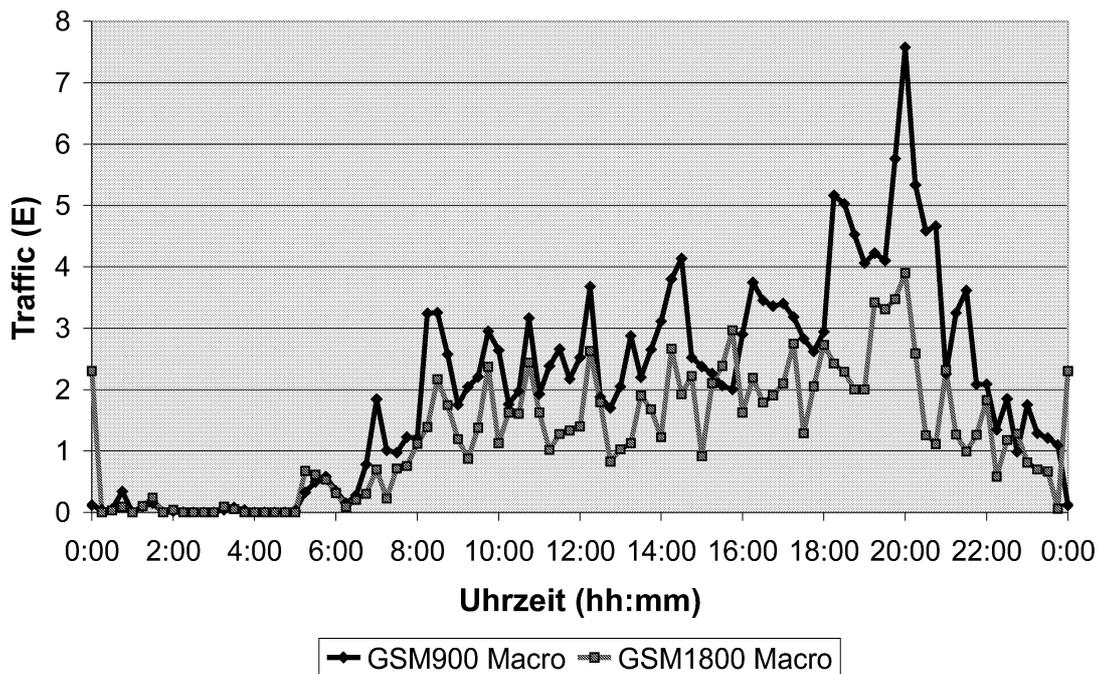


Abbildung 5.11: Verkehrsverläufe zweier Colocated-Zellen (GSM900/1800 Makro) mit Default-Parametrisierung

Möchte man erreichen, dass die beiden Zellen gleichmäßig ausgelastet sind, so kann man nun den Parameter *CRESOFF* verändern (falls notwendig auch *PENTIME*) und die Auswirkungen sogleich am Modell ersehen. Um das Ziel zu erreichen, hat man nun zwei Möglichkeiten. Entweder man „stärkt“ die GSM1800-Zelle durch Erhöhen des Parameters $CRESOFF_{1800}$, oder man „schwächt“ die

GSM900-Zelle durch Erniedrigen des Parameters $CRESOFF_{900}$. Beide Fälle führen zum selben Ergebnis, da, wie im vorigen Kapitel erwähnt, nur die Differenz der Parameter entscheidend ist. Das Ergebnis einer solchen Auslastungsoptimierung kann zu einer Verkehrsverteilung führen, wie diese in der Abb. 5.12 dargestellt ist. Hier wurde durch eine Erhöhung des Parameters $CRESOFF_{1800}$ auf 8 (bei $CRESOFF_{900} = 0$) eine ausgewogene Verkehrsaufteilung in der Simulation erreicht.

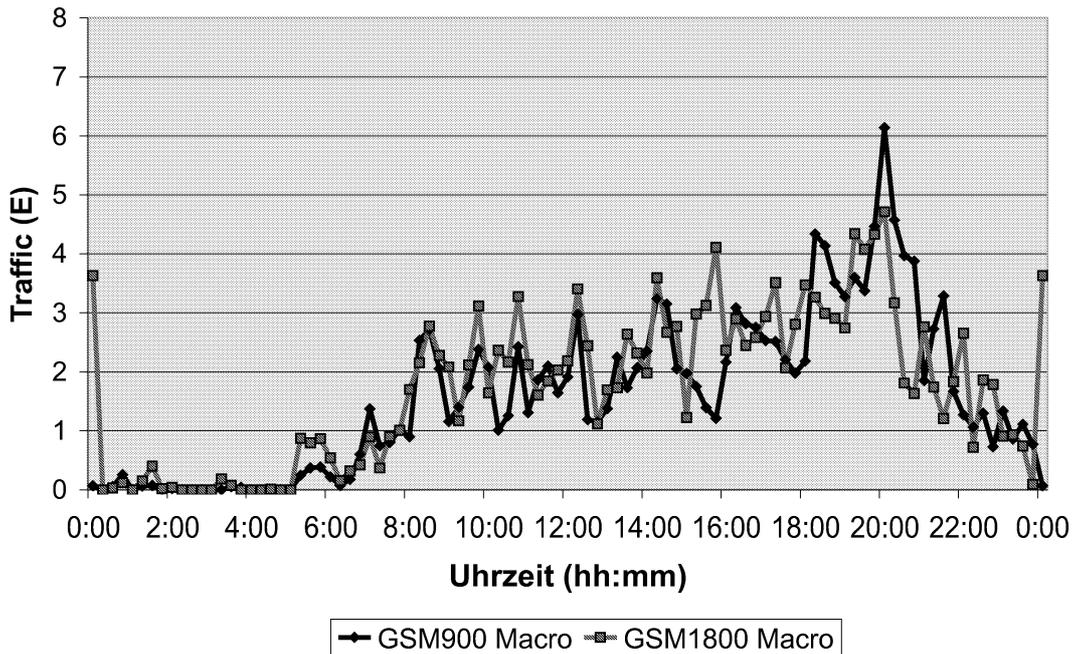


Abbildung 5.12: Ausgeglichenen Verkehrsverlauf zweier Colocated-Zellen (GSM900/1800 Makro)

5.3.4 Anwendungsgrenzen des Modells

Dieses Modell kann nur für die Untersuchung der Auswirkungen von Parametereinstellungen verwendet werden, die den Gesprächsaufbau beeinflussen („Idle Parameter“). Die Connected-Mode Parameter können hier nicht einfließen, da sich beim Übertritt von einer Zelle in eine andere (Handover) immer die Parametrisierung beider oder mehrerer betroffener Zellen auswirkt. Es handelt sich also um ein Wechselspiel von zumindest zwei GSM-Zellen. Das hier aufgestellte Modell betrachtet allerdings nur das Verhalten von Einzelzellen. Daher werden die Belegungsversuche, die von Handover in die jeweilige Zelle herrühren, lediglich addiert, wie in der Abb. 5.10 dargestellt. Eine Änderung des Aufteilungsverhältnisses der Gesprächsaufbauten beeinflusst die einströmenden Handover

nicht, weshalb diese Vorgehensweise legitim ist.

Möchte man zusätzlich die Einflüsse der Connected-Parameter einbringen, so ist ein Modell notwendig, welches auf globalerer Ebene arbeitet. Dieses konzentriert sich nicht mehr auf die Einzelzellen, sondern auf den Verbund mehrerer Zellen, die gemeinsam einen Layer bilden. Im nachfolgenden Kapitel wird solch ein Modell entwickelt.

Das Anwendungsgebiet beschränkt sich außerdem auf Colocated-Zellen. Wie schon erwähnt, ist hier die Parametrisierung der ausschlaggebende Punkt für die Aufteilung der Belegungsversuche durch Gesprächsaufbauten. Würde man das Modell für beliebige Zellkonstellationen verwenden wollen, so müsste man die jeweilige Lage der Zellen zueinander in das Modell einbringen. Da diese relative Lage individuell unterschiedlich sein kann, verliert das Modell so seinen allgemeingültigen Charakter. Eine zusätzliche Einbringung von Informationen über die Netzstruktur im betrachteten Simulationsgebiet könnte hier Abhilfe schaffen, was aber, neben dem enormen Aufwand, wieder zu einer Einschränkung des Anwendungsgebiets führen würde.

Kapitel 6

Verkehrsmodell einer GSM-Multilayerstruktur

Im Folgenden wird ein Modell aufgebaut, welches die wichtigsten Komponenten beinhaltet, die für die Auslastung eines GSM-Netzes verantwortlich sind. Das Modell konzentriert sich auf die Belegungssituation der Verkehrskanäle im Funknetz und geht nicht auf die Signalisierungslast ein. Die Signalisierung ist ein wichtiger Bestandteil in allen Phasen der Kommunikation über ein Mobilfunknetz, jedoch belegt diese im Vergleich zu den Nutzdaten wenig Ressourcen, wodurch die Beschränkung auf den Verkehrskanalanteil keine wesentliche Ungenauigkeit darstellt. Außerdem wird auch das Sättigungsverhalten der Layer nicht in Betracht gezogen, da, wie sich aus Messungen gezeigt hat, die Gesamtauslastung der Layer in der Praxis weit unterhalb des theoretisch abführbaren Verkehrs liegt.

Es werden alle Verkehrsströme mit einbezogen, sei es innerhalb eines Layers oder auch zwischen den Layern. Zum Unterschied zu den bisherigen Betrachtungen handelt es sich hier um zeitabhängige Größen, deren Zusammenspiel die Vorgänge innerhalb einer solchen Layerstruktur beschreibt. Das Modell dient als Basis für die Untersuchung der Auswirkung von Parametereinstellungen im Funknetz und soll daher die wahren Verhältnisse möglichst gut widerspiegeln. Der Konnex zu den GSM-Parametern wird im nachfolgenden Kapitel 6.2 hergestellt, welches deren Einfluß auf die Koeffizienten des Differentialgleichungssystems untersucht.

6.1 Formulierung des Verkehrsmodells

Zu Beginn soll ein Modell betrachtet werden, welches aus drei Layern besteht, die das gleiche Versorgungsgebiet abdecken, jedoch nicht jeder Layer an jedem Ort verfügbar ist. Die Abbildung 6.1 zeigt die Ausgangssituation schematisch.

Diese Netzstruktur stellte sich ein, da reale GSM-Netze ständigen Änderungen unterworfen sind. Mit den wachsenden Anforderungen an die Netze, mussten sie auch immer wieder verändert und erweitert werden. Zu Beginn der Aufbau

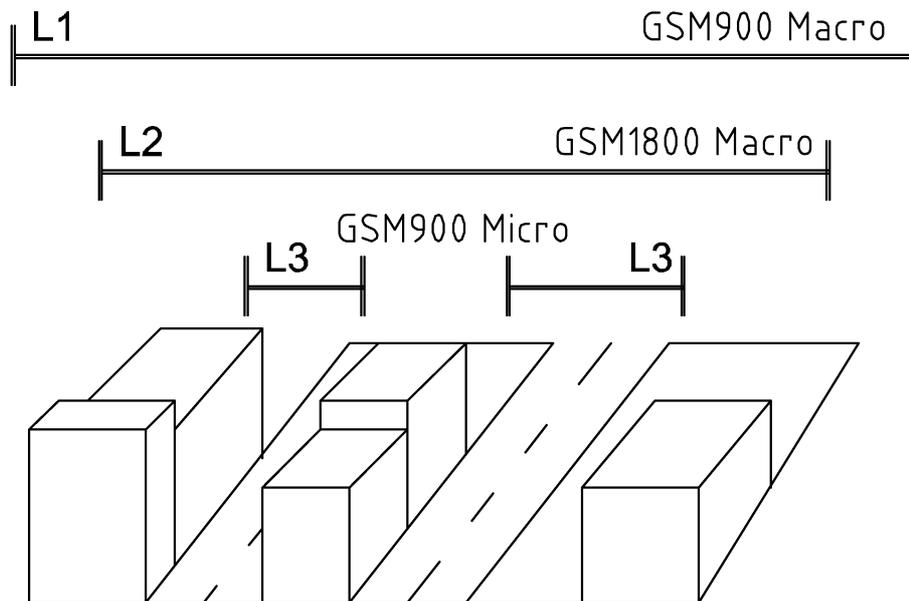


Abbildung 6.1: Drei Layer über einem Stadtgebiet (schematisch)

wurde von jenen Netzbetreibern, die eine GSM900 Lizenz erworben hatten, ein reines GSM900-Netz installiert, mit dem Ziel eine möglichst große Fläche zu versorgen. Mit wachsenden Teilnehmerzahlen kam es zumeist im großstädtischen Bereich zu Kapazitätsengpässen. Daher wurden in einer nächsten Ausbaustufe parallel zu den relativ großen GSM900 Makrozellen kleine GSM900 Mikrozellen installiert, die ein Zusätzliches an Netzkapazität an besonders hoch belasteten Stellen brachten. Ab diesem Zeitpunkt hatte man es also an gewissen Stellen schon mit einem „Multilayer-Netzwerk“ im kleinen Rahmen zu tun.

In einem nächsten Schritt wurde den Netzbetreibern der GSM900-Netzwerke der zusätzliche Kauf von GSM1800 Frequenzen angeboten. Die Netzbetreiber nützten dieses Angebot, um einerseits wiederum die Netzkapazität zu steigern, aber andererseits auch die Verbindungsqualität zu verbessern. Denn mit Hilfe dieser zusätzlichen Frequenzen konnte nun eine bessere Frequenzplanung durchgeführt werden, sodass das Interferenzniveau absank. Die GSM1800 Frequenzen wurden in diesem Ausbauschritt dazu benutzt, um im städtischen Bereich parallel zu den GSM900 Makrozellen gleich große GSM1800 Makrozellen zu installieren. Man spricht bei Stationen, die mit GSM900 und GSM1800 ausgebaut sind von sogenannten „Colocated Standorten“ und dementsprechend bei einem Gebiet in dem dieser Ausbau flächenhaft besteht, von einem „Colocated Gebiet“. Ab diesem Zeitpunkt hatte man es nun wirklich mit einem Multilayer-Netzwerk zu tun, mit all seinen Vorteilen und Ausprägungen.

Mikrozellen werden also zumeist nur für die Versorgung von hochbelasteten Gebieten eingesetzt. Daneben sind der GSM900 Makro- und GSM1800 Makro-layer durch die historische Entwicklung nicht völlig flächengleich.

Innerhalb dieser Struktur werden nun *Gespräche* oder Datenverbindungen *aufgebaut*. Wenn sich der Teilnehmer während der Belegung bewegt, so muss ein oder müssen mehrere Zellwechsel durchgeführt werden. Diese vom GSM-System koordinierten Zellwechsel werden *Handover* bezeichnet. Nach einer bestimmten Zeit wird die *Belegung* wieder durch den Teilnehmer *beendet*, wodurch die zuvor beanspruchte Ressource wieder freigegeben wird. Diese drei elementaren Vorgänge sollen nun im Folgenden genauer betrachtet und mathematisch formuliert werden, um später ein Gesamtmodell entwickeln zu können.

6.1.1 Begonnene Belegungen (Gesprächsaufbauten)

Diese bilden die Basis dafür, dass sich in dem GSM-Netzwerk ein Telefonverkehr aufbaut. In der GSM-Technik wird die Größe als *Normal Attempts* (*NA*) bezeichnet und beschreibt, wie viele Kanalbelegungsversuche es innerhalb eines bestimmten Gebietes innerhalb einer bestimmten Zeit gegeben hat. Das Meßsystem METRICA/NPR gibt beispielsweise diese Größe für jede einzelne GSM-Zelle im Viertelstunden-Intervall aus. In das Modell gehen die begonnenen Belegungen in Form einer Rate mit der Einheit $1/s$ ein.

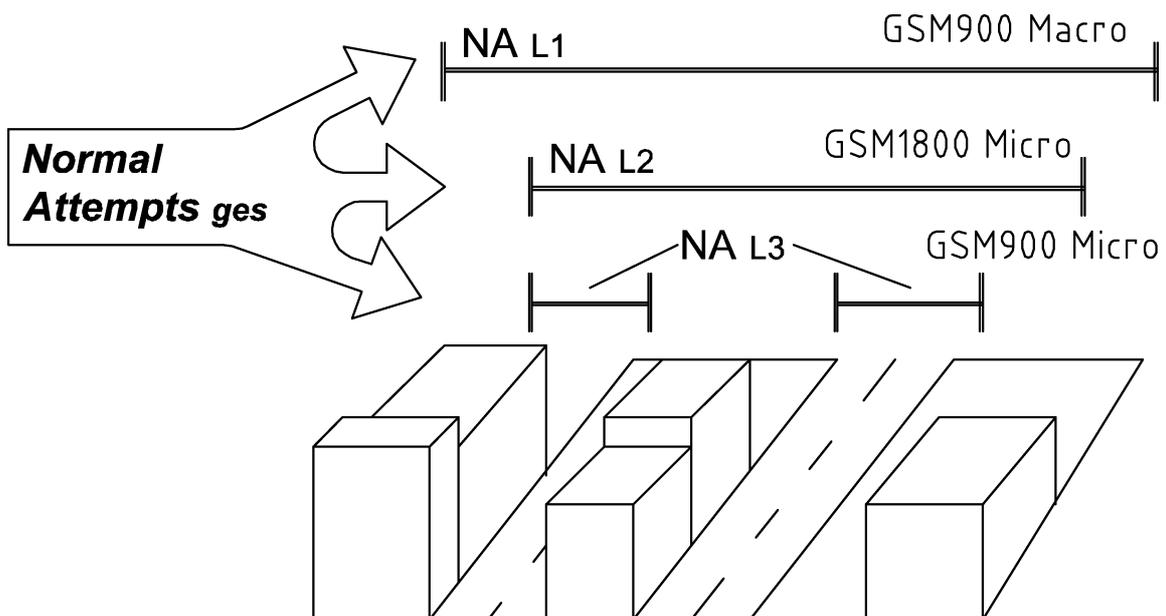


Abbildung 6.2: Aufteilung der begonnenen Belegungen auf die Layer

Die mathematische Formulierung der begonnenen Kanalbelegungen geht davon aus, dass innerhalb des betrachteten Gebietes eine bestimmte Anzahl von Belegungsversuchen pro Sekunde vorliegt, deren Größe durch $NA_{ges}(t)$ vorgegeben ist. Wie in Abb. 6.2 dargestellt, teilt sich diese Gesamtanzahl auf die Layer auf. Die Anzahl der versuchten Gesprächsaufbauten innerhalb der Layer ergibt

sich zu

$$\begin{pmatrix} NA_{L1}(t) \\ NA_{L2}(t) \\ NA_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{L1} \\ c_{L2} \\ c_{L3} \end{pmatrix} * NA_{ges}(t), \quad (6.1)$$

oder

$$\mathbf{NA}(t) = \mathbf{C}_{\mathbf{NA}} * NA_{ges}(t). \quad (6.2)$$

Die Elemente des Vektors $\mathbf{C}_{\mathbf{NA}}$ sind zeitunabhängige, dimensionslose Größen und bestimmen die Aufteilung der Normal Attempts.

6.1.2 Handover

Die durch das GSM-System geführten Zellwechsel sind ein integraler Bestandteil dieses Kommunikationssystems. In einem GSM-Netz wird die flächenhafte Versorgung durch ein zellulares Netzwerk gebildet, wobei jede Zelle ihr eigens zugewiesene Frequenzen verwendet. Führt ein Teilnehmer ein Gespräch und bewegt er sich dabei, so kommt er zumeist schon bald an den Rand seiner Funkzelle. Nun laufen parallel zu dem Gespräch einige komplexe Prozeduren ab, in denen der Mobilstation mitgeteilt wird, über welche Basisstation in Folge das Gespräch weitergeführt wird. Am Ende dieser Prozeduren hat die Mobilstation die Verbindung zur vorherigen Basisstation gänzlich abgebaut und sendet und empfängt ihre Informationen über einen Kanal der neuen Zelle. Dieser Vorgang wird auch als *Intercell-Handover* bezeichnet. Da die Mobilität der Benutzer von Mobiltelefonen sehr hoch ist, laufen diese Handover-Prozesse ständig und in hoher Anzahl in einem GSM-Netz ab. Daher ist die Erfassung dieses Anteils im Rahmen eines Verkehrsmodells von besonderer Bedeutung.

Bei der Analyse der Verkehrsströme in einem GSM-Netz unterscheidet man, je nachdem wohin der Zellwechsel passiert, zwischen *Intralayer-* und *Interlayer-*Handover. Bei einem Intralayer-Handover bleibt der Teilnehmer in seinem Ursprungslayer und führt hier sein Gespräch oder seine Datenverbindung fort. Die Verkehrsströme innerhalb eines Layers sind schematisch in der Abbildung 6.3 dargestellt. Neben dem Handover-Vorgang, bei dem tatsächlich eine neue Zelle die Funkverbindung übernimmt (*Intercell-HO*), gibt es auch die Möglichkeit, dass ein Handover innerhalb der versorgenden Zelle durchgeführt wird (*Intracell-HO*). Dies ist beispielsweise notwendig, wenn Interferenzen zu einem so starken Qualitätsverlust führen, dass nur ein Kanalwechsel die Funksituation verbessert. Der Teilnehmer bleibt also in seiner Zelle, wechselt jedoch den Funkkanal.

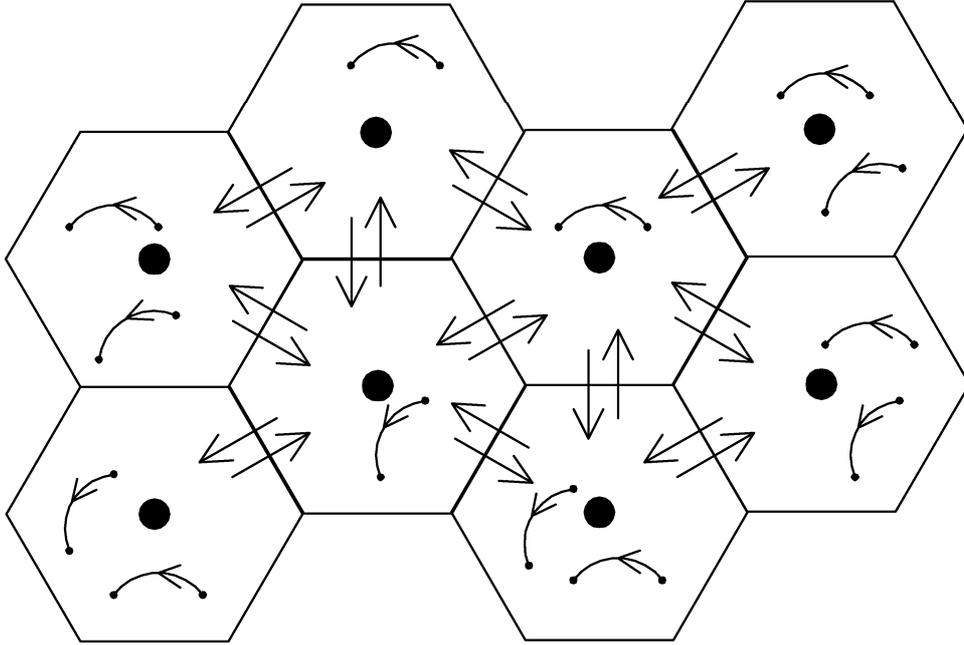


Abbildung 6.3: Verkehrsströme innerhalb eines Layers (Intracell- und Intercell Handover)

Den zweiten wichtigen Anteil an den Handover-Verkehrsströmen bilden die Interlayer-Handover. Hierbei erfolgt ein Zellwechsel, dessen Zielzelle sich in einem anderen Layer befindet. Grundsätzlich sind solche Handover zwischen allen zur Verfügung stehenden Layern möglich. Welche Zelle tatsächlich als Zielzelle ausgewählt wird, wird einerseits durch die momentanen Funkverhältnisse bestimmt, kann aber andererseits auch vom Netzbetreiber durch gezielte Parametrisierung mit beeinflusst werden. Die Abb. 6.4 zeigt die möglichen Verkehrsströme zwischen drei unterschiedlichen Layern über einem Stadtgebiet, wie diese auch im Modell zu berücksichtigen sind.

Incoming Handover

Zunächst sollen jene Verkehrsströme mathematisch formuliert werden, die für den jeweiligen Layer einen Zufluss bedeuten. Dies erfolgt über die Kanalbelegungsversuche, die von Handovern herrühren (Incoming Handover Attempts - $IHOA(t)$) und der momentanen Anzahl der Kanalbelegungen innerhalb des Layers (Traffic - $TR(t)$). Sie ergeben sich zu

$$\begin{pmatrix} IHOA_{L1}(t) \\ IHOA_{L2}(t) \\ IHOA_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{L11} & c_{L12} & c_{L13} \\ c_{L21} & c_{L22} & c_{L23} \\ c_{L31} & c_{L32} & c_{L33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} TR_{L1}(t) \\ TR_{L2}(t) \\ TR_{L3}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.3)$$

oder

$$\mathbf{IHOA}(t) = \mathbf{IC}_{\text{HO}} * \mathbf{TR}(t). \quad (6.4)$$

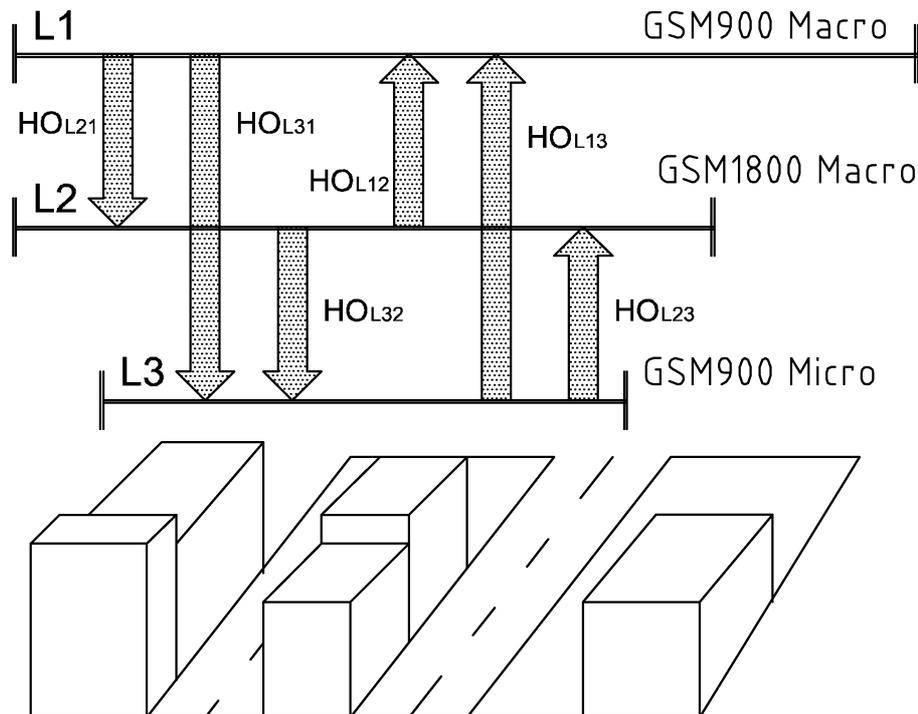


Abbildung 6.4: Verkehrsströme zwischen verschiedenen GSM-Layern

Die Matrix \mathbf{IC}_{HO} ist die Handover-Matrix, die für diesen Modellansatz als zeitunabhängig angenommen wurde. Ihre Elemente bestimmen, gemeinsam mit dem jeweiligen Verkehr, die einzelnen Übertrittsraten. Dabei stellen die Elemente der Hauptdiagonale die Intralayer-Handover dar und die übrigen Elemente den Anteil der Interlayer-Handover. Für den Layer 1 repräsentiert der Term $c_{L11} * TR_{L1}$ daher den Verkehrsstrom innerhalb des Layers und der Term $c_{L12} * TR_{L2} + c_{L13} * TR_{L3}$ jene Anteile, die von Layer 2 bzw. Layer 3 zuströmen. Die Handover-Attempts sind von der Dimension $1/s$ und der Verkehr trägt die (Pseudo-)Einheit *Erlang* (E). Daher müssen die Elemente der Handover-Matrix in der Dimension $1/(E * s)$ angegeben werden, um die Richtigkeit der Einheiten zu wahren.

Outgoing Handover

Jeder Zustrom von Verkehr in einen Layer durch Handover bedeutet natürlich für einen anderen Layer einen Abgang. Es wird also eine Kanalbelegung von einem Layer nur in einen anderen Layer verschoben. Wir wollen hier voraussetzen, dass jedes Handover erfolgreich verläuft, und können so die zuvor verwendeten Konstanten direkt für die Formulierung dieses Anteils verwenden. Es liegt natürlich auf der Hand, dass nicht jedes Handover in einem realen technischen System problemlos abläuft. Diese „fehlerhaften Handover“ werden jedoch im nachfolgenden

Kapitel 6.1.4 gesondert behandelt. Der Anteil der Outgoing Handover $OHOA(t)$ in der Dimension $1/s$ ergibt sich zu

$$\begin{pmatrix} OHOA_{L1}(t) \\ OHOA_{L2}(t) \\ OHOA_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{L21} & c_{L31} \\ c_{L12} & c_{L32} \\ c_{L13} & c_{L23} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} TR_{L1}(t) & TR_{L2}(t) & TR_{L3}(t) \\ TR_{L1}(t) & TR_{L2}(t) & TR_{L3}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.5)$$

oder

$$\mathbf{OHOA}(t) = \mathbf{OC}_{\text{HO}} * \mathbf{TR}(t). \quad (6.6)$$

6.1.3 Beendete Belegungen

Nach der Gesprächsdauer wird die Belegung als finaler Akt beendet. Dieser „natürliche Abgang“ von Belegungen wird durch eine individuelle Rate je Layer beschrieben. Als entscheidender Parameter ergibt sich hier die mittlere Verweildauer eines Teilnehmers auf einem Funkkanal (Mean Holding Time - MHT). Die *Terminated Calls* - $TC(t)$ - in der Dimension $1/s$ ergeben sich über die *MHT* in Sekunden und den Traffic - $TR(t)$ - in *Erlang* zu

$$\begin{pmatrix} TC_{L1}(t) \\ TC_{L2}(t) \\ TC_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{MHT_{L1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{MHT_{L2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{MHT_{L3}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} TR_{L1}(t) \\ TR_{L2}(t) \\ TR_{L3}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.7)$$

oder

$$\mathbf{TC}(t) = \mathbf{MHT} * \mathbf{TR}(t). \quad (6.8)$$

6.1.4 Fehlerhafte Belegungsversuche

In der Praxis kann der Fall eintreten, dass ein Kanalbelegungsversuch, welcher entweder von einem Gesprächsaufbau oder einem Handover herrührt, zwar als ein solcher vom System erkannt wird, aber diesem, trotz freier Ressourcen, kein Verkehrskanal zugewiesen werden kann. Man spricht in diesem Fall von „fehlerhaften Belegungsversuchen“ oder „Failed Attempts“ ($FA(t)$). Wie schon im Kapitel 4.2 beschrieben, liegen die Gründe für diesen Verlustanteil am Verkehrsstrom in Problemen in der Signalisierungsphase, die funktechnischer oder festnetzspezifischer Natur sein können.

Für den Gesprächsaufbau wird der Anteil der Failed Attempts (FNA) durch

$$\begin{pmatrix} FNA_{L1}(t) \\ FNA_{L2}(t) \\ FNA_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fc_{L1} \\ fc_{L2} \\ fc_{L3} \end{pmatrix} * NA_{ges}(t), \quad (6.9)$$

oder

$$\mathbf{FNA}(t) = \mathbf{FC}_{\text{NA}} * NA_{ges}(t) \quad (6.10)$$

beschrieben. Die Failed Attempts entsprechen wiederum einer Rate in $1/s$, die sich über die zeitunabhängigen und dimensionslosen Faktoren fc und der Gesamtheit der Belegungsversuche innerhalb des Gebietes in $1/s$ ergeben.

Für die fehlerhaften Handover-Attempts ($FHOA$) erfolgt die mathematische Beschreibung durch

$$\begin{pmatrix} FHOA_{L1}(t) \\ FHOA_{L2}(t) \\ FHOA_{L3}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fc_{L11} & fc_{L12} & fc_{L13} \\ fc_{L21} & fc_{L22} & fc_{L23} \\ fc_{L31} & fc_{L32} & fc_{L33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} TR_{L1}(t) \\ TR_{L2}(t) \\ TR_{L3}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.11)$$

oder

$$\mathbf{FHOA}(\mathbf{t}) = \mathbf{FC}_{\mathbf{HO}} * \mathbf{TR}(\mathbf{t}). \quad (6.12)$$

Die Rate der fehlerhaften Belegungsversuche in $1/s$ wird hier über die Elemente der Failed-Handover Matrix (in $1/(E * s)$) und den layerspezifischen Verkehr (in E) berechnet.

6.1.5 Formulierung des Differentialgleichungssystems

Nun gilt es noch, die einzelnen zuvor beschriebenen Faktoren zu vereinen, um das System in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Zunächst sei eine kompakte Form des DGL-Systems angeführt, welche einen guten Überblick über alle Einflussfaktoren gibt. Es ergibt sich zu

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{TR}(\mathbf{t})}{dt} &= \mathbf{NA}(\mathbf{t}) + \mathbf{IHOA}(\mathbf{t}) - \\ &\quad - \mathbf{OHOA}(\mathbf{t}) - \mathbf{FNA}(\mathbf{t}) - \mathbf{FHOA}(\mathbf{t}) - \mathbf{TC}(\mathbf{t}) \end{aligned} \quad (6.13)$$

oder

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{TR}(\mathbf{t})}{dt} &= \mathbf{C}_{\mathbf{NA}} * NA_{ges}(t) + \mathbf{IC}_{\mathbf{HO}} * \mathbf{TR}(\mathbf{t}) - \\ &\quad - \mathbf{OC}_{\mathbf{HO}} * \mathbf{TR}(\mathbf{t}) - \mathbf{FC}_{\mathbf{NA}} * NA_{ges}(t) - \\ &\quad - \mathbf{FC}_{\mathbf{HO}} * \mathbf{TR}(\mathbf{t}) - \mathbf{MHT} * \mathbf{TR}(\mathbf{t}). \end{aligned} \quad (6.14)$$

Schreibt man eine Differentialgleichung explizit an, so ergibt sich für den ersten Layer

$$\begin{aligned} \frac{dTR_{L1}(t)}{dt} &= c_{L1} * NA_{ges}(t) + c_{L11} * TR_{L1} + c_{L12} * TR_{L2}(t) + c_{L13} * TR_{L3}(t) - \\ &\quad - c_{L21} * TR_{L1}(t) - c_{L31} * TR_{L1}(t) - fc_{L1} * NA_{ges}(t) - \\ &\quad - fc_{L11} * TR_{L1}(t) - fc_{L21} * TR_{L1}(t) - fc_{L31} * TR_{L1}(t) - \\ &\quad - \frac{1}{MHT_{L1}} * TR_{L1}(t) \\ &= (c_{L1} - fc_{L1}) * NA_{ges}(t) + c_{L12} * TR_{L2}(t) + c_{L13} * TR_{L3}(t) - \\ &\quad + (c_{L11} - c_{L21} - c_{L31}) * TR_{L1}(t) - \\ &\quad - \left(fc_{L11} + fc_{L21} + fc_{L31} + \frac{1}{MHT_{L1}} \right) * TR_{L1}(t). \end{aligned} \quad (6.15)$$

Das gesamte DGL-System hat die Form

$$\begin{aligned}
& \text{Glg. I :} \\
\frac{dTR_{L1}(t)}{dt} &= (c_{L1} - fc_{L1}) * NA_{ges}(t) + c_{L12} * TR_{L2}(t) + c_{L13} * TR_{L3}(t) - \\
&+ \left(c_{L11} - c_{L21} - c_{L31} - fc_{L11} - fc_{L21} - fc_{L31} - \frac{1}{MHT_{L1}} \right) * TR_{L1}(t) \\
& \text{Glg. II :} \\
\frac{dTR_{L2}(t)}{dt} &= (c_{L2} - fc_{L2}) * NA_{ges}(t) + c_{L21} * TR_{L1}(t) + c_{L23} * TR_{L3}(t) - \\
&+ \left(c_{L22} - c_{L12} - c_{L32} - fc_{L22} - fc_{L12} - fc_{L32} - \frac{1}{MHT_{L2}} \right) * TR_{L2}(t) \\
& \text{Glg. III :} \\
\frac{dTR_{L3}(t)}{dt} &= (c_{L3} - fc_{L3}) * NA_{ges}(t) + c_{L31} * TR_{L1}(t) + c_{L32} * TR_{L2}(t) - \\
&+ \left(c_{L33} - c_{L13} - c_{L23} - fc_{L33} - fc_{L13} - fc_{L23} - \frac{1}{MHT_{L3}} \right) * TR_{L3}(t) .
\end{aligned} \tag{6.16}$$

Wie man erkennt, handelt es sich um ein verkoppeltes Differentialgleichungssystem ersten Grades. Die Verkopplung entsteht durch die Incoming-Handover Terme, da der Zustrom an Handover vom aktuellen Verkehr in einem anderen Layer abhängt. Die einzige Eingangsgröße sind die Normal Attempts (NA_{ges}), die insgesamt in dem betrachteten Gebiet entstehen. Denn nur ein begonnenes Gespräch kann zu einem Handover oder einem beendeten Gespräch führen. Der Verkehr in einem Layer hängt also in erster Linie von der Anzahl der begonnenen Belegungen ab, und erst in zweiter Linie vom Handoververkehr, der eine Folge der Gesprächsaufbauten ist. Die Größe der einzelnen Verkehrsströme wird durch die Koeffizienten des DGL-Systems bestimmt. Diese passen das Modell an die wahren Verhältnisse in einem GSM-Netz an. Auf deren Bestimmung wird im nachfolgenden Kapitel 6.2 genau eingegangen.

Um der Realität möglichst nahe zu kommen, ist es neben der genauen Bestimmung der Koeffizienten notwendig, dass die Ausgangsgrößen quantisiert werden. Die Ausgangsgröße „Verkehr“ stellt eigentlich nichts anderes als den momentanen Belegungszustand im Layer dar. Da ein Verkehrskanal entweder belegt sein kann oder nicht, kann es auch nur ganzzahlige Belegungszustände geben. Daher wird der Verkehr in den Layern durch einfaches Runden quantisiert, um so den realen Verhältnissen gerecht zu werden. Intern arbeitet das DGL-System jedoch weiterhin mit kontinuierlichen Größen.

6.2 Die DGL-Koeffizienten und der Einfluss der GSM-Parameter

Nachdem die Modellbildung nun abgeschlossen ist, kann daran gegangen werden, das entwickelte mathematische Modell an die Realität anzupassen. Hierfür sind die zahlreichen Faktoren und Koeffizienten zuständig, auf deren Bedeutung und Größe hier eingegangen werden soll. Zusätzlich wird der Einfluss der GSM-Parameter auf die Koeffizienten untersucht, was auf Basis von Messwerten, die aus dem laufenden Betrieb und aus Testläufen stammen, passiert.

6.2.1 Begonnene Belegungen (Gesprächsaufbau)

Die in der Glg. 6.1 verwendeten Faktoren c_{L1} , c_{L2} und c_{L3} steuern die Aufteilung der begonnenen Belegungen im betrachteten Gebiet. Um sie zu bestimmen, ist es notwendig, das Versorgungsgebiet näher zu analysieren. Die Abb. 6.5 zeigt schematisch so ein Gebiet, welches mit den drei üblichen Layern ausgestattet ist. Das Gebiet A stellt hier ein Single Layer Gebiet dar, welches nur vom GSM900 Makrolayer versorgt wird. Im Gebiet B, dem Colocated Gebiet, übernehmen der GSM 900 Makro- und GSM1800 Makrolayer gemeinsam diese Aufgabe. Schließlich finden in den Gebieten C zusätzlich noch GSM900 Mikrozellen ihren Einsatz, wodurch hier alle drei Layer vertreten sind.

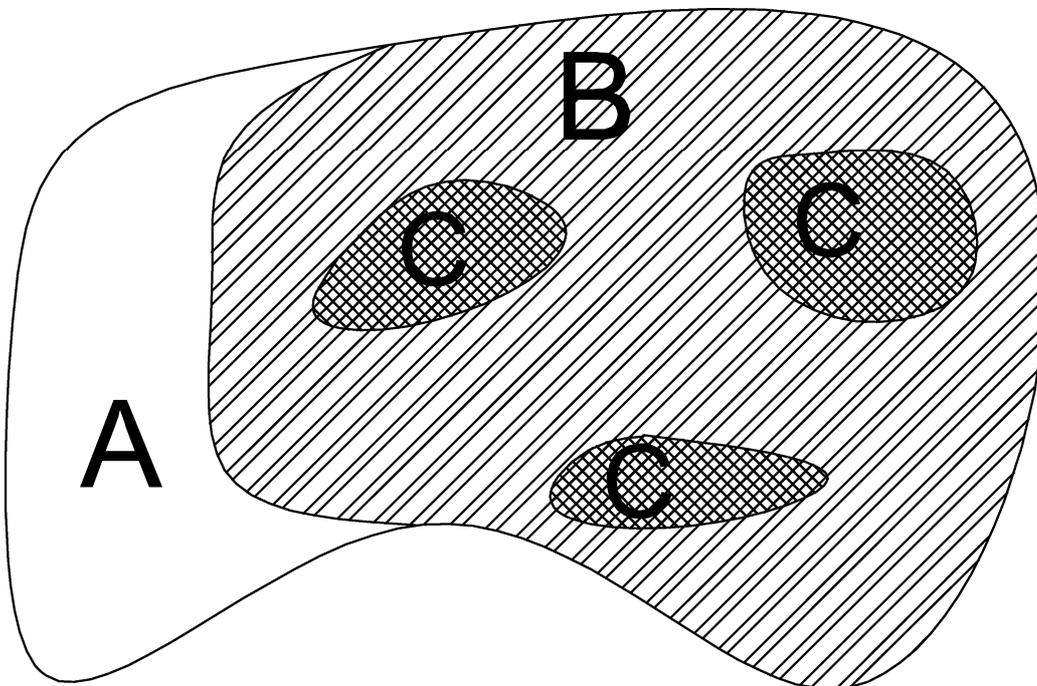


Abbildung 6.5: Drei Gebiete eines Multilayer-Netzwerkes

Man erkennt daraus, dass die Netzstruktur einen bedeutsamen Einfluss auf die angesprochenen Koeffizienten hat. Je nach Ausdehnung eines dieser Gebiete, wird ein gewisser Anteil der im Gesamtgebiet entstehenden Gesprächsaufbauten auf dieses entfallen. Neben diesem „geographischen“ Einfluss spielen aber auch die GSM-Parameter eine Rolle. Jedoch ist deren Rolle unterschiedlich stark in den einzelnen Gebieten ausgeprägt.

Im Gebiet A können sich Gespräche lediglich in dem einen vorhandenen Layer aufbauen. Daher ist hier die Einstellungen der Idle Parameter (CRESOFF, PENTIME, TEMPOFF - siehe Kap. 5.3.1) für das Verkehrsmodell nicht von Bedeutung.

Im Gebiet B gibt es zwei Layer, auf die sich der Verkehr aufteilen kann. Hier werden die Verkehrslenkungsmechanismen wirksam, wie sie bereits bei der Entwicklung des Zellmodells beschrieben wurden. Da die Untersuchungen über die Auswirkung von Parametereinstellungen im Colocated Gebiet statistische Mittelwerte darstellen, können die Ergebnisse aus dem Kapitel 5.3.2 auch hier eingesetzt werden.

Im Gebiet C sind alle drei Layer zur Aufnahme der Gespräche bereit. Auch hier gibt die Parametrisierung die Aufteilung der Kanalbelegungen vor. Dadurch, dass hier alle Layer vorhanden sind, hat der Netzbetreiber hier die größte Bandbreite an Einstellmöglichkeiten. Bei max.mobil. werden Mikrozellen vor allem zur Versorgung von hoch belasteten Stellen eingesetzt. Sie bringen zusätzliche Netzkapazität genau dort, wo diese gebraucht wird. Daher sind hier die Einstellungen so gewählt worden, dass beim Vorhandensein dieser Zellen die neu begonnenen Gespräche mit einer sehr großen Wahrscheinlichkeit dort beginnen. Dies ist sofort aus der Liste der Default-Einstellungen zu erkennen (Tab. 5.3), in der für die GSM900 Mikrozelle ein Wert von CRESOFF=14dB vorgesehen ist.

Netzwerkstruktur

Um den Einfluss der Netzstruktur mathematisch zu beschreiben, müssen drei Faktoren ($c_{N,A}$, $c_{N,B}$, $c_{N,C}$) bestimmt werden, die das Aufteilungsverhältnis auf die drei Gebiete beschreiben. Für diese muss immer gelten

$$c_{N,A} + c_{N,B} + c_{N,C} = 1, \quad (6.17)$$

da sich ein Gespräch in einem der vorhandenen Gebiete aufbauen muss (fehlerhafte Gesprächsaufbauten nicht berücksichtigt). Diese Faktoren wurden mit Hilfe von METRICA/NPR bestimmt und sind beispielhaft für den Bereich Wien in der Tabelle 6.1 angegeben.

Tabelle 6.1: Netzwerkstruktur-Faktoren für den Bereich Wien

Bereich	$c_{N,A}$	$c_{N,B}$	$c_{N,C}$
gesamt Wien	0,15	0,63	0,22

GSM-Parameter

Bei dem Einfluss der GSM-Parameter erfolgt die mathematische Formulierung über eine Matrix \mathbf{P} . Diese hat das Aussehen

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} c_{P,1A} & c_{P,1B} & c_{P,1C} \\ c_{P,2A} & c_{P,2B} & c_{P,2C} \\ c_{P,3A} & c_{P,3B} & c_{P,3C} \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

worin der Zeilenindex (1, 2, 3) der Elemente für den Layer und der Spaltenindex (A, B, C) für das Gebiet steht. Ähnlich wie bei den Netzstruktur-Faktoren muss auch hier gelten, dass

$$c_{P,1x} + c_{P,2x} + c_{P,3x} = 1 \quad (6.19)$$

ist, da sich der Teil der neuen Belegungen, der im Gebiet x entsteht, sicher in einem der vorhandenen Layer aufbaut.

Der linke Spaltenvektor bestimmt die Aufteilung der Gesprächsaufbauten zu Folge der Paramtrisierung im Single Layer Gebiet. Da hier, wie der Name schon sagt, nur ein Layer existiert, müssen auch alle Belegungen über diesen begonnen werden. Daher ist das Element $c_{P,1A} = 1$, wo hingegen die beiden anderen Elemente des Vektors ($c_{P,2A}$, $c_{P,3A}$) gleich 0 sein müssen.

Der mittlere Spaltenvektor beschreibt die Parametrisierung des Colocated Gebietes. Je nach Einstellung der Idle Parameter kann man hier den Verkehr in Richtung GSM900 Makrolayer oder GSM1800 Mikrolayer lenken. Wie schon zuvor erwähnt, gelten hier die Abhängigkeiten wie sie im Kapitel 5.3.2 gefunden wurden. Nach der linearen Näherung (Glg. 5.9, Glg. 5.10 und Glg. 5.11) ist der Faktor $c_{P,1B}$ daher gleich

$$c_{P,1B} = 1 - (0,3222 + (0,049 * \Delta CRESOFF)) \quad (6.20)$$

und der Faktor $c_{P,2B}$ gleich

$$c_{P,1B} = 0,3222 + (0,049 * \Delta CRESOFF) . \quad (6.21)$$

Das verbleibende Element des mittleren Spaltenvektors $c_{P,3B}$ muss gleich 0 sein, da sich im Colocated Gebiet keine Mikrozellen befinden.

Den Einfluss der Parameter im Gebiet C beschreibt der rechte Spaltenvektor der Matrix \mathbf{P} . Hier sind alle Layer vertreten und dem entsprechend kann auch jedes Element des Vektors einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Wie schon erwähnt, werden aber die Mikrozellen gegenüber den Makrozellen deutlich bevorzugt, weshalb hier lediglich das Element $c_{P,3C}$ gleich 1 gesetzt wird. Da so der Mikrozellenlayer alle in dem Gebiet entstehenden Gespräche aufnimmt, sind die beiden anderen Elemente des Vektors ($c_{P,1C}$, $c_{P,2C}$) gleich 0.

Die Matrix \mathbf{P} hat daher die Gestalt

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & c_{P,1B} & 0 \\ 0 & c_{P,2B} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \quad (6.22)$$

Gesamtergebnis

Nach der Aufschlüsselung der Beiträge zu den Faktoren, die die Aufteilung der begonnenen Gespräche steuern, kann eine kompakte Gleichung für diese aufgestellt werden. Sie lautet

$$\begin{pmatrix} c_{L1} \\ c_{L2} \\ c_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & c_{P,1B} & 0 \\ 0 & c_{P,2B} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} c_{N,A} \\ c_{N,B} \\ c_{N,C} \end{pmatrix}. \quad (6.23)$$

6.2.2 Handover

Zur Bestimmung der Elemente der Handover Matrix $\mathbf{IC}_{\mathbf{HO}}$ aus der Glg. 6.4 wurden wiederum Messdaten des Meßsystems METRICA/NPR herangezogen. Dieses verfügt über sog. Handover-Scanner, die für jeweils zwei Zellen, zwischen denen Handover erlaubt sind („eingetragene Nachbarschaftsbeziehung“), die Anzahl der Handover zählen. Dabei wird nicht nur die Zahl der Handover, sondern auch die Richtung, in die diese passieren, festgestellt. Das Messergebnis wird in Form von [Datum, Zeit, Ausgangszelle, Zielzelle, Anzahl der Handover] pro Viertelstunde und für jede Nachbarschaftsbeziehung ausgegeben.

Mit Hilfe der Daten der Handover-Scanner können die Handover Verkehrsströme innerhalb der Layer und zwischen den Layern analysiert werden. Diese Anzahl von Handover von Layer 'x' nach Layer 'y', im Folgenden $N_{HO,xy}$ genannt, kann mit Hilfe des im Ausgangslayer 'x' abgeführten Verkehr (TR_{Lx}) dazu benützt werden, die gesuchten Matrixelemente zu berechnen. Da diese von der Dimension $1/Es$ sind, ergeben sie sich zu

$$c_{Lxy} = \frac{N_{HO,xy}}{TR_{Lx} * 86400sec}, \quad (6.24)$$

wenn man gemittelte Tagesdaten für $N_{HO,xy}$ und TR_{Lx} zu Grunde legt. Diese Faktoren repräsentieren also Übertrittsraten, die von der Zeit und vom Verkehr im Ausgangslayer abhängig sind. Dies ist auch logisch, da sich umso mehr Handover ergeben, je mehr Teilnehmer in einem Layer telefonieren. Die Tabelle 6.2 zeigt die Koeffizienten für alle möglichen Ausgangs- / Ziellayer Kombinationen für gesamt Wien. Die gefundenen Faktoren spiegeln einerseits die statistischen Eigenschaften des Netzes und andererseits den Einfluss der GSM-Parameter wider. Denn wann und wie viele Handover passieren, kann durch Parameter mitbestimmt werden. Um welche GSM-Parameter es sich hier handelt und wie diese Einfluss nehmen, wird nun im Folgenden behandelt.

Tabelle 6.2: Handover Koeffizienten für alle Layerübergänge und für das Gebiet von gesamt Wien in $1/(E * s)$

Ausgangszelle	GSM900 Makro	GSM1800 Makro	GSM900 Mikro
GSM900 Makro	0,00511	0,00558	0,00066
GSM1800 Makro	0,00839	0,00497	0,00076
GSM900 Mikro	0,00514	0,0019	0,00441

Verteilung der Handover nach Auslösegründen („Handover-Causes“)

Im GSM-System wird zwischen verschiedenen „Arten“ von Handovern unterschieden. Diese Arten leiten sich vom Grund ab, warum ein Handover durchgeführt werden musste. Beispielsweise spricht man bei einem Handover auf Grund von zu geringem Empfangspegel von einem „Level-Handover“ oder „LEV-Handover“. Die folgende Aufzählung gibt Aufschluss über alle zur Zeit definierten Handoverarten und dem jeweiligen Auslösegrund:

LEV-Handover: zu geringer Empfangspegel („LEV“)

QUAL-Handover: zu hohe Bitfehlerrate („QUAL“)

PBGT-Handover: zu hohe Funkfelddämpfung („Power Budget“)

DIRRET-Handover: Überlast in der Zielzelle („Directed Retry“)

DISTANCE-Handover: zu große Entfernung von der Basisstation

Die beiden ersten Handoverarten (LEV- und QUAL-Handover) werden zusätzlich noch nach dem Funkkanal unterschieden, in dem der auslösende Grund besteht. Das heißt, es gibt ein „Uplink¹ Level Handover“ (UL-LEV-Handover), ein „Downlink² Level Handover“ (DL-LEV-Handover), ein UL-QUAL-Handover und ein DL-QUAL-Handover.

Diese Arten von Handover kommen mit unterschiedlicher Häufigkeit vor, was aus Abb. 6.6 zu entnehmen ist.

Man sieht deutlich, dass der Anteil der Power Budget Handover am höchsten ist. Dies wird auch durch die zahlenmäßige Auswertung in der Tabelle 6.3 unterstützt. Mehr als drei Viertel aller ausgeführten Handover sind Power Budget Handover. Dies ist auch gut so, denn diese Art von Handover trägt dazu bei, die Qualität im Netz zu steigern. Das Ziel dieses Handover ist es nämlich immer, von der am nächsten liegenden³ Basisstation versorgt zu werden. Ist dies der Fall, so kann auch die Sendeleistung der Mobilstation und der Basisstation auf

¹Funkkanal von der Mobilstation zur Basisstation

²Funkkanal von der Basisstation zur Mobilstation

³Basisstation mit der geringsten Funkfelddämpfung

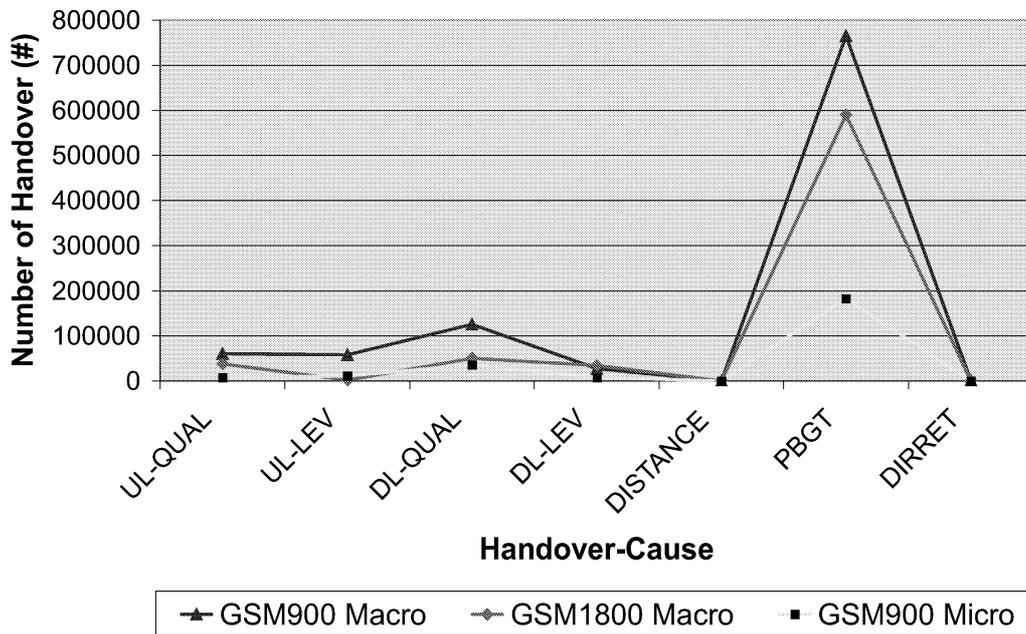


Abbildung 6.6: Verteilung der Handovergründe pro Layer in Wien

ein notwendiges Minimum reduziert werden. Der Vorteil liegt einerseits in einem geringeren Interferenzniveau im Netz und andererseits in der Energieeinsparung, was besonders auf Seiten der Mobilstation zu längeren Nachladeintervallen der Akkus führt.

Da das Power Budget Handover deutlich vorherrscht, haben Verkehrslenkungsmaßnahmen hier natürlich auch den größten Effekt. Daher wird im Folgenden auf die GSM-Parameter eingegangen, die diese Art von Handover steuern.

Tabelle 6.3: Prozentuelle Verteilung der Handover-Causes in Wien

Handover-Cause	Anteil (%)
PBGT	77
DL-QUAL	10,6
UL-QUAL	5,3
UL-LEV	3,6
DL-LEV	3,5
DIRRET	0,06
DISTANCE	0,00

GSM-Parameter für das Power Budget Handover

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass hier die Handover Algorithmen nicht in voller Breite behandelt werden. Lediglich die Teile, die Wichtigkeit für diese Diplomarbeit haben, sind angeführt. Eine detaillierte Beschreibung aller Handoverabläufe ist in [7] zu finden.

Die Bedingungen, die erfüllt werden müssen, um ein Power Budget Handover (PBGT-HO) durchzuführen, lauten

$$RXLEV_{NCELL}(n) > RXLEV_{min}(n) + Max(0, MSTXPWR_{max}(n) - P) \quad (6.25)$$

und

$$PBGT(n) > HOM(n) . \quad (6.26)$$

Erläuterung der Größen und Parameter:

$RXLEV_{NCELL}(n)$: „Receive Level Neighbourcell“; Der gemessene Empfangspegel der Nachbarzelle (n) in dBm^4 .

$RXLEV_{min}(n)$: „Receive Level Minimum“; Der vom Betreiber gewählte notwendige Mindestempfangspegel für die Nachbarzelle (n) in dBm .

$MSTXPWR_{max}$: „Mobile Station Transmit Power Maximum“: Die vom Betreiber gewählte maximale Sendeleistung einer Mobilstation in dBm .

P : „Power“; Die maximale Sendeleistung der Mobilstation in dBm .

$PBGT(n)$: „Power Budget“; Leistungsbilanz oder Funkfelddämpfung der Nachbarzelle (n) in dB .

$HOM(n)$: „Handover Margin“; Schwellwert, der überschritten werden muss, um ein Power Budget Handover in die Nachbarzelle (n) durchzuführen (in dB).

Die erste Ungleichung prüft, ob der Empfangspegel der Zielzelle ($RXLEV_{NCELL}(n)$) über dem notwendigen Minimum ($RXLEV_{MIN}(n) + Max(0, MSTXPWR_{MAX}(n) - P)$) liegt. Darin dient die Maximum-Funktion, um zu berücksichtigen, dass die Mobilstation die vom Netz geforderte Sendeleistung eventuell nicht erbringen kann. In diesem Fall sorgt der Korrekturterm dafür, dass der geforderte Empfangspegel größer wird, was gleichbedeutend mit einem geringeren Abstand zur Basisstation in der Zielzelle ist. Diese Bedingung ist eine „Basisbedingung“, die gewährleistet, dass das Gespräch in der Nachbarzelle fortgesetzt werden kann.

⁴Leistungsmaß, welches durch Bezug des Empfangspegels in Watt auf die Bezugsgröße 1 mW gebildet wird.

Die zweite Ungleichung prüft, ob die Funkfelddämpfung der Nachbarzelle das vom Netzbetreiber geforderte Maß unterschreitet. Dies wird über den Power Budget Wert festgestellt, der sich aus

$$PBGT(n) = RXLEV_{NCELL}(n) - (RXLEV_{DL} + BSTXPWR_{max} - BSTXPWR) + Min(MSTXPWR_{max}, P) - Min(MSTXPWR_{max}(n), P) \quad (6.27)$$

bildet.

Erläuterung der neu hinzugekommenen Größen und Parameter:

RXLEV_{DL}: „Receive Level Downlink“; Der gemessene Empfangspegel der gerade versorgenden Zelle in *dBm*.

BSTXPWR_{max}: „Basestation Transmit Power Maximum“; Die maximale Sendeleistung der gerade versorgenden Basisstation in *dBm*.

BSTXPWR: „Basestation Transmit Power“; Die aktuelle Sendeleistung der gerade versorgenden Basisstation in *dBm*.

Einfach ausgedrückt spiegelt dieser Wert den Unterschied der Empfangspegel zwischen der gerade versorgenden Zelle und einer Nachbarzelle wieder. Dabei wird aber berücksichtigt, dass die Sendeleistung sowohl der Mobilstation als auch der Basisstation durch die Leistungsregelung erniedrigt sein kann.

Mit dem Parameter „Handover Margin“ (*HOM(n)*) kann der Netzbetreiber wählen, um wie viel eine Nachbarzelle „besser“ sein muss, damit zu dieser ein Handover passiert. Würde es diesen Parameter nicht geben, so könnte es vorkommen, dass am Rande einer Zelle dauernde Handover von der versorgenden Zelle in eine benachbarte Zelle und wieder zurück passieren. Durch den Handover Margin wird das Handover erst dann ausgeführt, wenn die Zielzelle eine deutlich bessere Versorgung gewährleistet, und so der Effekt von „Ping Pong Handover“ nicht eintritt.

Die Tabelle 6.4 gibt einen Überblick über die Einheiten und Wertebereiche der zuvor beschriebenen GSM-Parameter.

Tabelle 6.4: GSM-Parameter für das Power Budget Handover

Parameter	Wertebereich	Einheit
<i>RXLEV_{min}(n)</i>	-110 - (-48)	dBm
<i>MSTXPWR_{max}</i>	0,001 - 8	Watt
<i>HOM(n)</i>	(-63) - 63	dB

Die derzeitigen Defaulteinstellungen für die drei Typen von Zellen (GSM900 Makro, GSM1800 Makro und GSM900 Mikro) sind in der nachfolgenden Tabelle 6.5 aufgelistet. Der Parameter „Handover Margin“ ist immer für den Übertritt von

Tabelle 6.5: Defaulteinstellungen der PBGT-Parameter für drei Zelltypen

Parameter	GSM900 Makro	GSM1800 Makro	GSM900 Mikro
$RXLEV_{min}(n)$	-105 dBm	-105 dBm	-105 dBm
$MSTXPWR_{max}$	0,8 W	1 W	0,5 W

einer Zelle zu einer anderen definiert. Daher sind die Defaulteinstellungen hier in einer eigenen Tabelle (Tab. 6.6) in Matrixform angeführt. In der linken Spalte ist die Ausgangszelle angegeben und in der obersten Zeile die jeweilige Zielzelle.

Tabelle 6.6: Defaulteinstellungen des HOM für drei Zelltypen

Ausgangszelle	GSM900 Makro	GSM1800 Makro	GSM900 Mikro
GSM900 Makro	6 dB	3 dB	6 dB
GSM1800 Makro	6 dB	6 dB	6 dB
GSM900 Mikro	6 dB	6 dB	6 dB

Durch die große Anzahl an Power Budget Handover im laufenden Netzbetrieb haben Änderungen des „Handover Margin“ auch die größte Auswirkung auf die Verkehrsströme. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden eigene gezielte Parametertests im max.mobil.-Wirknetz durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Tests sind im folgenden Kapitel angeführt.

Einfluss des HOM auf die Handover-Parameter des Verkehrsmodells

In den Parametertests wurden vor allem Handover Margin Änderungen vorgenommen, die die Schwellwerte zwischen dem GSM900 Makrolayer und dem GSM1800 Makrolayer betreffen. Ausgehend von den geltenden Defaulteinstellungen wurden verschiedene Testszenarien erprobt, die zumeist das Ziel hatten, den Verkehr aus einem Ausgangslayer abzuziehen und in einem Ziellayer zu bündeln. Dabei wurde zwischen einseitigen und beidseitigen Maßnahmen unterschieden. Bei einseitigen Maßnahmen wurde lediglich die Schwelle vom Ausgangslayer in den Ziellayer erniedrigt oder in umgekehrter Richtung erhöht. Bei beidseitigen Maßnahmen wurden die Änderungen in beide Richtungen zugleich vorgenommen.

Die Analyse der einseitigen Maßnahmen zeigte, dass hier der verkehrslenkende Effekt eher gering ist. Denn erniedrigt man die Schwelle vom Ausgangslayer in den Ziellayer, so finden zwar mehr Handover in diese Richtung statt, im Gegenzug erhöhen sich aber auch die Handover in die umgekehrte Richtung. In den Handoverkoeffizienten des Differentialgleichungssystems spiegeln sich diese Maßnahmen wider, indem pro Schwellwertänderung im 1dB der Koeffizient vom Ausgangs- in den Ziellayer im Mittel um 15% und in die Gegenrichtung im Mittel um 8% verändert wird. Das Vorzeichen dieser Änderungen ist gleich, was die zuvor ge-

machte Aussage unterstreicht, dass zwar insgesamt mehr Handover passieren, jedoch keine wesentliche Umverteilung des abgeführten Verkehrs passiert.

Zweiseitige Maßnahmen haben im Gegensatz dazu deutlich sichtbare Auswirkungen auf die Verkehrsaufteilung. Hier wird die Schwelle vom Ziellayer in den Ausgangslayer beispielsweise um 1dB erhöht und in die Gegenrichtung um 1dB erniedrigt. Dies hat zur Folge, dass mehr Handover vom Ausgangs- in den Ziellayer passieren und weniger (oder gleich viele) in umgekehrter Richtung. Es wird also der Verkehr tatsächlich im Ziellayer konzentriert. Die Handoverkoeffizienten werden von diesen Maßnahmen in jener Weise beeinflusst, dass sich der Ausgangs- / Ziellayerkoeffizient pro 1dB Schwellwertänderung im Mittel um 13% und in die Gegenrichtung im Mittel um -14% ändert. Am Vorzeichenunterschied ist hier klar ersichtlich, dass das System auf diesen Eingriff deutlich reagiert und eine Umverteilung des Verkehrs passiert.

Einfluss des Teilnehmerverhaltens auf die Handover-Parameter

Bei der Datenanalyse hat sich gezeigt, dass die Anzahl der Handover täglich (an Werktagen) zwischen ca. 18 Uhr und 20 Uhr über das „normale“ Maß ansteigt. Dies ist auf den Berufsverkehr zurückzuführen, da viele Berufstätige in diesem Zeitraum nach Hause fahren und während der Fahrt telefonieren. Dadurch steigt die Anzahl der Handover um ca. 2% an, was im Verkehrsmodell dadurch Berücksichtigung findet, indem die Handover-Parameter in diesem Zeitraum um genau diesen Prozentsatz angehoben werden.

6.2.3 Beendete Belegungen

Die Größe, die in die Matrix **MHT** der Glg. 6.8 eingeht, ist die mittlere Kanalbelegungsdauer in Sekunden. Bereits im Kapitel 4.3.1 wurden hierzu Untersuchungen angestellt, deren Ergebnisse hier verwendet werden können. Die in das Modell eingehenden Werte für die mittlere Kanalbelegungsdauer liegen im Bereich von 60 bis 70 Sekunden. Jedoch ist diese Größe abhängig von den aktuellen GSM-Parametereinstellungen und auch von der Tageszeit, was im Folgenden diskutiert wird.

Einfluss des HOM auf die mittlere Kanalbelegungsdauer

Natürlich haben die GSM-Parameter auch einen Einfluss auf diese Größe, allerdings nur die Connected-Parameter (HOM, ...), denn die mittlere Kanalbelegungsdauer wird erst ab tatsächlichen Belegung eines Funkkanals gezählt. Aus der Datenanalyse und den Parametertests hat sich gezeigt, dass eine Verringerung des Schwellwertes für ein Handover auch eine Verringerung der Belegungsdauer im Ausgangslayer mit sich bringt. Dies ist auch schlüssig, da ein schnellerer Zellwechsel zugleich eine kürzere Verweildauer in der Ausgangszelle bedeutet. Natürlich

verlängert sich im Gegenzug die mittlere Kanalbelegungsdauer im Ziellayer.

Einseitige Handover Margin Änderungen haben zur Folge, dass sich die mittlere Verweildauer auf einem Kanal in Ausgangs- und Ziellayer vorzeichengleich ändert. Dies bedeutet, dass eine verringerte Handoverschwelle einen schnelleren Wechsel von Layer 1 in Layer 2 zur Folge hat und somit eine kürzere mittlere Kanalbelegungsdauer. Da aber in die Gegenrichtung ebenfalls mehr Handover passieren, verringert sich diese Zeitdauer im Ziellayer ebenfalls. Im Mittel verändert sich die mittlere Kanalbelegungsdauer im Ausgangslayer um 4% und im Ziellayer um 2% je dB Änderung des Handover Margin.

Zweiseitige Parameteränderungen haben zur Folge, dass sich die mittlere Verweildauer auf einem Kanal dort erhöht, wo der Verkehr zunimmt und dort erniedrigt, wo der Verkehr abnimmt. Dieses durchaus logische Verhalten zeigt sich auch in der Datenauswertung. Je dB Änderung des Handover Margin verringert sich die mittlere Kanalbelegungsdauer im Ausgangslayer im Mittel um 1,5% und erhöht sich im Ziellayer im Mittel um 3%.

Einfluss des Teilnehmerverhaltens auf die mittlere Kanalbelegungsdauer

Eine Untersuchung der mittleren Gesprächsdauer⁵ hat ergeben, dass diese während des Tages charakteristischen Schwankungen unterworfen ist. Während diese Zeitdauer tagsüber eher konstant ist, wächst sie ab ca. 18:00 Uhr stetig an und bleibt in der Nacht auf einem relativ hohen Niveau von etwa 50% über dem Tageswert. Nach Mitternacht sinkt sie wieder ab, bis um ca. 6:00 Uhr das Tagesniveau erreicht wird.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der mittleren Kanalbelegungsdauer wieder. Denn ab ca. 18:00 Uhr nimmt auch diese kontinuierlich zu, was in dem Modell ebenfalls Berücksichtigung findet. Würde man dieses Verhalten nicht mit einbeziehen, so würde der simulierte Verkehr am Abend deutlich unter dem gemessenen liegen.

6.2.4 Fehlerhafte Belegungsversuche

Für den Teil der fehlerhaften Belegungsversuche, der von den Gesprächsaufbauten herrührt, können die Erkenntnisse aus dem Kapitel 4.2 herangezogen werden. Die dort angestellte Datenanalyse zeigte, dass sich in jedem Layer ein bestimmter Prozentsatz an fehlerhaften Gesprächsaufbauten einstellt. Daher kann der Vektor \mathbf{FC}_{NA} in der Glg. 6.10 durch

$$\mathbf{FC}_{\text{NA}} = \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.022 \\ 0.018 \end{pmatrix} \quad (6.28)$$

⁵Achtung: Hier ist die gesamte Zeitdauer vom Beginn des Gesprächs bis zum Ende gemeint. Während eines Gesprächs können mehrere verschiedene Kanäle belegt werden.

beschrieben werden.

Die Failed-Handover Matrix $\mathbf{FC}_{\mathbf{HO}}$ aus der Glg. 6.12 wird, so wie die eigentliche Handover Matrix, aus den Ergebnissen der Handover Scanner berechnet. Denn neben der Anzahl der erfolgreich durchgeführten Handover wird auch die Anzahl der fehlerhaften Handover ($N_{FHO,xy}$) gezählt. Dadurch können die einzelnen Elemente aus

$$c_{Lxy} = \frac{N_{FHO,xy}}{TR_{Lx} * 86400sec} \quad (6.29)$$

berechnet werden. Es handelt sich hier wieder um zeitabhängige Raten, die vom Verkehr im Ausgangslayer abhängig sind. Neben dieser Abhängigkeit haben aber auch die GSM-Parameter ihren Einfluss, welcher aber schon im Kap. 6.2.2 hinlänglich diskutiert wurde.

Die Tabelle 6.7 zeigt die mittlere Anzahl der fehlerhaften Belegungsversuche durch Handover für Wien. Der Aufbau der Tabelle wurde so gewählt, dass alle möglichen Übergänge zwischen den vorhandenen GSM-Zellen beinhaltet sind. Die Daten sind in Prozent angegeben, wobei der Bezugswert jeweils die Gesamtanzahl von Kanalbelegungsversuchen für eine Ausgangs- / Zielzellen-Kombination ist.

Tabelle 6.7: Fehlerhafte Kanalbelegungsversuche durch Handover in Prozent (gemittelte Daten)

Ausgangszelle	GSM900 Makro	GSM1800 Makro	GSM900 Mikro
GSM900 Makro	4,65	2,65	3,66
GSM1800 Makro	2,39	2,55	2,05
GSM900 Mikro	2,49	1,61	2,26

6.3 Erprobung des Modells mit ANA

Für die Simulation wurde das Programmpaket ANA⁶ gewählt, welches sehr gut für die Erprobung verkoppelter Differentialgleichungssysteme geeignet ist. Durch die Möglichkeit, eigene Simulationsblöcke zu definieren und Datenfiles als Input zu verwenden, ist eine sehr hohe Flexibilität in der Anwendung gegeben. Außerdem ist die Laufzeit der Simulation bei geeignet gewählten Simulationsparametern gering, was einen raschen Fortschritt der Untersuchungen positiv unterstützt.

Die Abb. 6.7 zeigt die verwendeten Simulationsblöcke, wobei der linke Block („Input- & Referencefile Reader“) die Eingangs- und Vergleichsmessdaten für die Simulation liefert und der rechte Block („Traffic Model für 3 GSM-Layers“) das eigentliche Verkehrsmodell enthält.

⁶J. Goldynia und J. Marinits, TU Wien, Inst. für Elektrische Regelungstechnik, Version 2.52, 1997

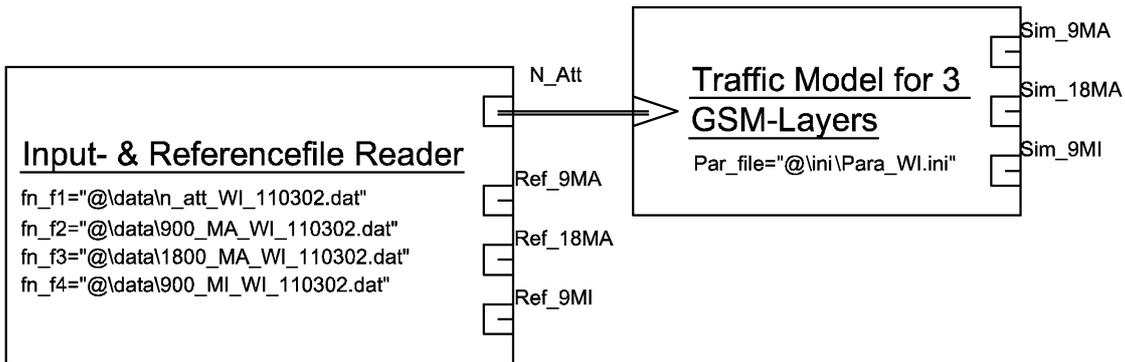


Abbildung 6.7: Simulationsblöcke in ANA

Die Eingangs- und Vergleichsmessdaten sind in Files abgelegt, deren Filenamen im linken Block angegeben sind. Um die Messdaten von METRICA/NPR direkt verwenden zu können, sind hier jeweils Viertelstundenwerte angegeben. Das Eingangsdatenfile enthält die Anzahl der Kanalbelegungsversuche (Normal Attempts), die in dem Gesamtgebiet unabhängig von Layern entstanden sind. Die Daten werden in die Dimension $1/s$ umgerechnet und bilden so die Eingangsgröße für die Simulation.

Um sofort einen Eindruck über die Richtigkeit des Simulationsergebnisses zu haben, sind in den Referenzdatenfiles die zu den Simulationsergebnissen korrespondierenden Messgrößen gespeichert. ANA liefert als Ergebnis eine oszilloskopähnliche Kurvendarstellung, in der einerseits die Simulationsgrößen aufgetragen sind, aber andererseits auch die entsprechenden Messdaten. So kann auf einen Blick der Vergleich angestellt werden und es können eventuell notwendige Adaptionen abgeleitet werden.

Im Simulationsblock (rechts) wurde das Differentialgleichungssystem laut Glg. 6.16 eingebracht. Die für das Verkehrsmodell notwendigen Parameter sind in einem Parameterfile angegeben, dessen Filename in dem Block angegeben ist. Es werden daher zu Beginn der Simulation zunächst die Parameter ausgelesen und mit diesen sodann die Berechnungen durchgeführt. Der Vorteil dieses Systems mit Eingangsdaten-, Vergleichsmessdaten- und Parameterfile liegt in der großen Flexibilität, die dadurch entsteht. Durch Änderung der Filenamen kann sofort zwischen den Daten verschiedener Tage oder verschiedener Gebiete umgeschaltet werden.

6.3.1 Simulationsergebnisse

Im Folgenden sind nun einige Kurven angeführt, die zum Einen Zwischenergebnisse der Simulation zeigen und zum Anderen das Endergebnis. Als Zwischenergebnis sind die Aufteilung der Kanalbelegungsversuche beim Gesprächsaufbau auf die drei Layer und die Anzahl der Kanalbelegungen durch Handover, wiederum für die drei Layer, angeführt. Das Simulationsergebnis ist der abgeführte Verkehr in

den Layern GSM900 Makro, GSM1800 Makro und GSM900 Mikro. Die Simulation wurde für das Gebiet von gesamt Wien durchgeführt und als Zeitraum diente jeweils ein gesamter Tag.

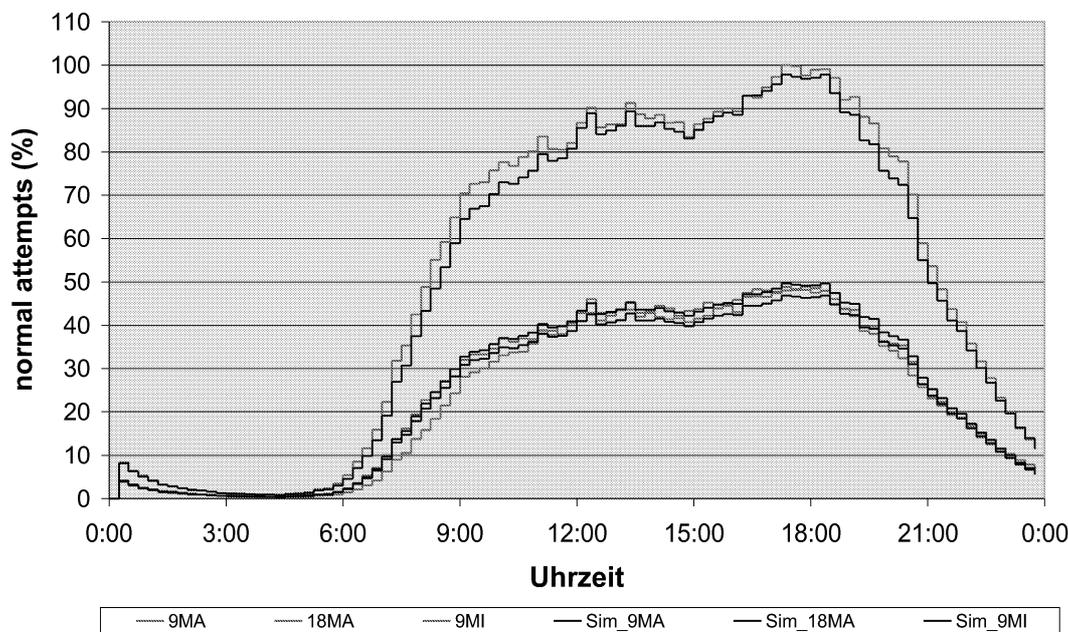


Abbildung 6.8: Tagesverlauf der Aufteilung der Gesprächsaufbauten (normal attempts) auf die drei Layer - Simulation und Messung

Die Abb. 6.8 zeigt die Aufteilung der Kanalbelegungsversuche auf die drei Layer beim Gesprächsaufbau. Jeweils zwei Kurven in dem Diagramm zeigen große Ähnlichkeit. Bei diesen beiden Kurven handelt es sich jeweils um das Simulationsergebnis und das Messergebnis. Die Stufigkeit ergibt sich aus der maximalen zeitlichen Auflösung des Meßsystems METRICA/NPR von einer Viertelstunde. Die Simulation würde zwar kontinuierliche Daten liefern, jedoch um den Vergleich besser anstellen zu können, werden diese Daten ebenfalls nur im Viertelstundenrhythmus ausgegeben.

Die oberen beiden Kurven zeigen Simulation und Messung der Kanalbelegungsversuche im GSM900 Makrolayer, die entsprechende Anzahl im GSM1800 Makro- und GSM900 Mikrolayer ist auf etwa gleichem Niveau, weshalb die vier Kurven fast übereinander liegen. Wichtig ist, dass hier nur die Idle-Parameter wirksam sind, welche bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Gespräch in dem einen oder anderen Layer aufgebaut wird.

In der Abb. 6.9 sind die Kanalbelegungsversuche durch Handover zu sehen. Wiederum zeigen die beiden ähnlichen Kurven die Simulations- und Messdaten. Hier sind aber die drei Layer deutlich zu unterscheiden, denn die oberen beiden Kurven geben den Tagesverlauf für den GSM900 Makrolayer, die mittleren für den GSM1800 Makrolayer und die unteren für den GSM900 Mikrolayer. Beim Vergleich mit der vorherigen Abbildung fällt auf, dass im GSM1800 Makrolayer wesentlich mehr Kanalbelegungen durch Handover zu Stande kommen als durch Gesprächsaufbauten. Dies ist eine Folge der derzeitigen Handover Default-Parametrisierung, welche den Handover vom GSM900 Makrolayer in den GSM1800 Makrolayer eher ermöglicht, als in die Gegenrichtung.

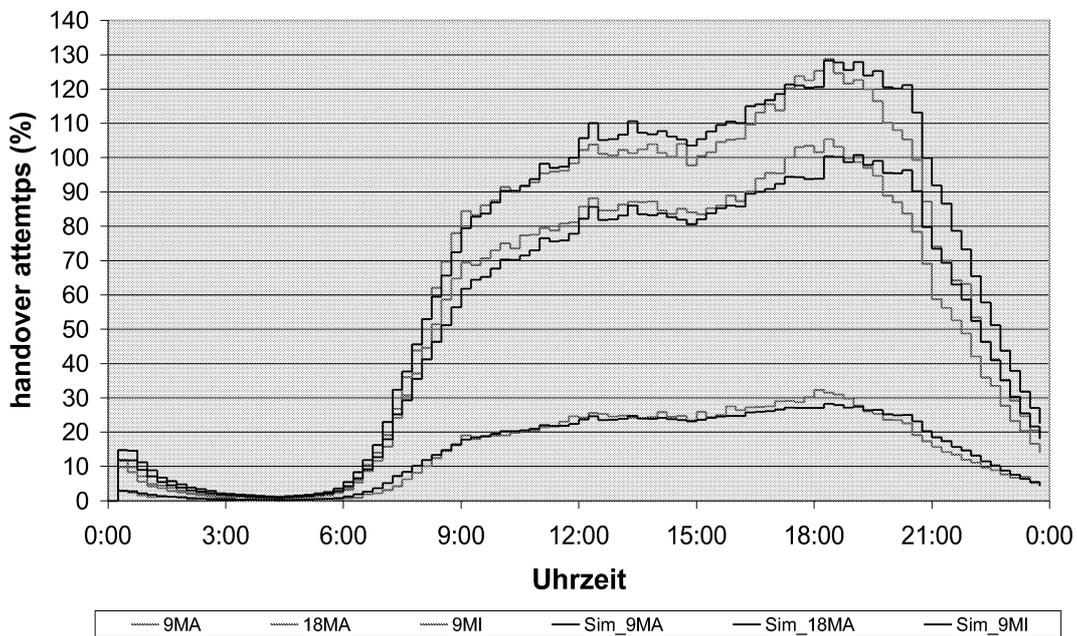


Abbildung 6.9: Tagesverlauf der Kanalbelegungsversuche durch Handover (handover attempts) - Simulation und Messung

Im GSM900 Mikrolayer zeigt sich dieser Trend in entgegengesetzter Richtung. Hier überwiegen die Kanalbelegungen durch Gesprächsaufbauten. Wiederum kann die Erklärung hierfür in den Parametern gefunden werden, denn auf Grund der Default Idle-Parametrisierung werden die Gespräche beim Vorhandensein von Mikrozellen fast ausschließlich dort aufgebaut. Erst am Rand des Mikrozellenlayers wird das Gespräch in einen Makrolayer übergeben. Handover aus den Makrolayern in den Mikrolayer finden hingegen weniger häufig statt.

Das eigentliche Simulationsergebnis ist in der Abb. 6.10 dargestellt. Es ist hier der abgeführte Verkehr der drei Layer aufgetragen. In diesem Diagramm ist der simulierte Verkehr jedoch als eine glatte Kurve dargestellt, was bei den Messdaten von METRICA/NPR nicht möglich ist (unstetiger Verlauf). Die simulierten Verläufe folgen den gemessenen zumeist recht gut, wobei sich am Vormittag Abweichungen zeigen. Diese könnten damit zusammenhängen, dass die tatsächliche durchschnittliche Kanalbelegungsdauer in diesem Bereich von der für die Simulation verwendeten abweicht. Wichtig ist aber, dass in den Spitzenlastzeiten (17 bis 21 Uhr) die Simulation und die Messung gut übereinstimmen, denn für diese Zeiten muss ein GSM-Netz dimensioniert sein und dort sollen auch die vorgegebenen Qualitätskriterien eingehalten werden. Daher würden sich Abweichungen in diesem Bereich bei den folgenden Prediktionen als besonders unangenehm erweisen.

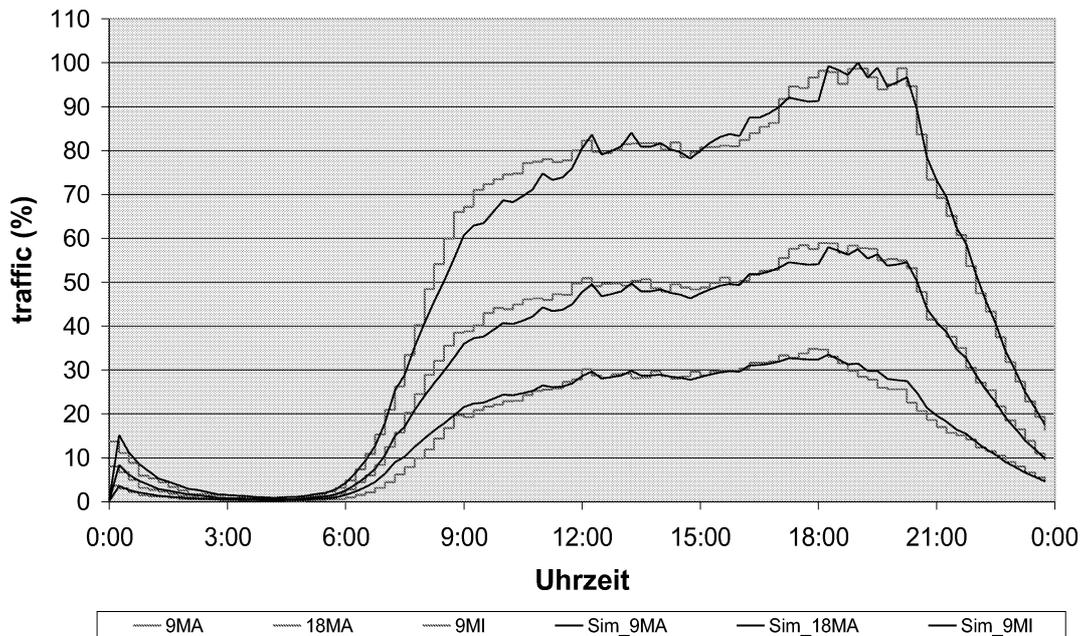


Abbildung 6.10: Vergleich Simulation und Messung für den Verkehr (traffic) dreier GSM-Layer

6.4 Einsatz des Modells

Um den Einsatz des Modells zu demonstrieren, gehen wir von der Auslastungssituation aus, wie diese in der Abb. 6.10 dargestellt ist. Die Zielvorgabe könnte sein, dass die Auslastung im GSM1800 Makrolayer in der Hauptverkehrsstunde um ca. 5% ansteigen soll. Dies soll auf Kosten des GSM900 Makrolayers passieren. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Default- Parametrisierung im betrachteten Gebiet geändert werden.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Gesprächsaufbauten vermehrt in den GSM-1800 Makrolayer zu lenken. Dies kann über die Parameter CRESOFF und PEN-TIME erreicht werden. Die Simulation ergibt, dass sich die Zielvorgabe einstellt, wenn der CRESOFF der GSM1800-Zellen von 4dB (aktuelle Defaulteinstellung) auf 10dB geändert wird. Die Abb. 6.11 zeigt das Simulationsergebnis im Vergleich zu den Messdaten, welche die gleichen sind, wie in der vorherigen Abbildung. So erkennt man, dass der Verkehr in der Busy Hour im GSM1800 Makrolayer tatsächlich um ca. 8% angestiegen ist (mittleres Kurvenpaar), wo hingegen dieser im GSM900 Makrolayer im gleiche Zeitraum um ca. 5% abgesunken ist (oberes Kurvenpaar).

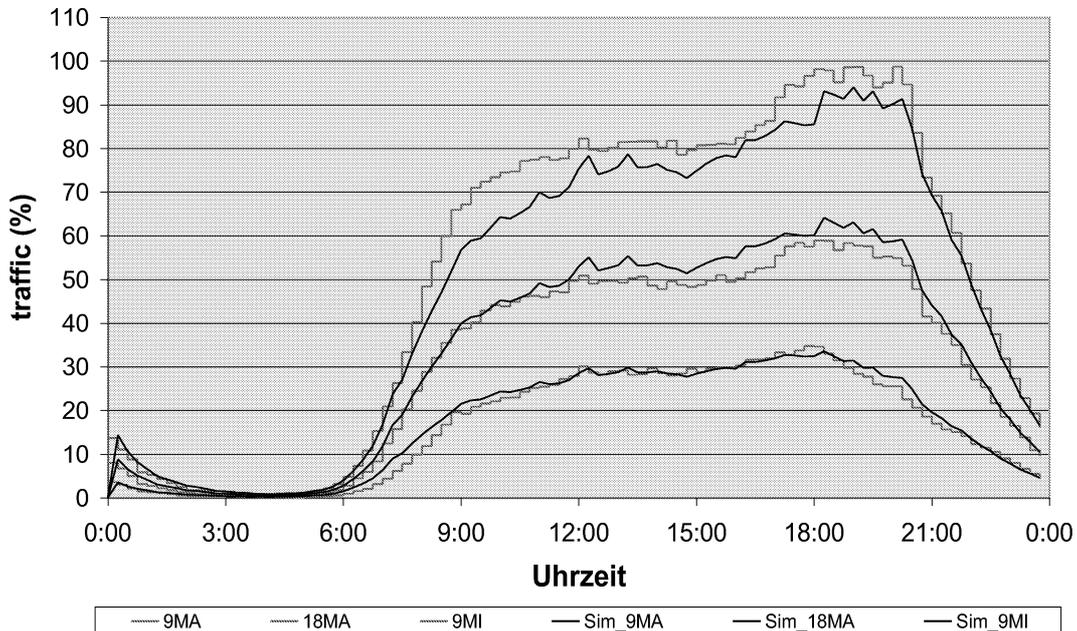


Abbildung 6.11: Geänderte Verkehrsaufteilung in den Layern durch eine Anpassung der Idle-Defaultparametrisierung

Ein andere Möglichkeit das geforderte Ziel zu erreichen besteht darin, die Handoverparameter zu verändern. In der Abb. 6.12 wurde der Parameter 'Handover Margin' von GSM900 Makro auf GSM1800 Makro von 3dB auf 2dB geändert und in der Gegenrichtung von 6dB auf 7dB. Es wird also der Handover von GSM900 Makrolayer in den GSM1800 Makrolayer erleichtert und in der Gegenrichtung erschwert. So wird mehr Verkehr in den GSM1800 Makrolayer „verschoben“ und dort gehalten. Die Vorgabe kann also durch diese Maßnahme ebenfalls erfüllt werden, da im GSM1800 Makrolayer (mittleres Kurvenpaar) ein Verkehrsanstieg von ca. 8% und im GSM900 Makrolayer (oberes Kurvenpaar) ein Absinken von ca. 6% zu verzeichnen ist.

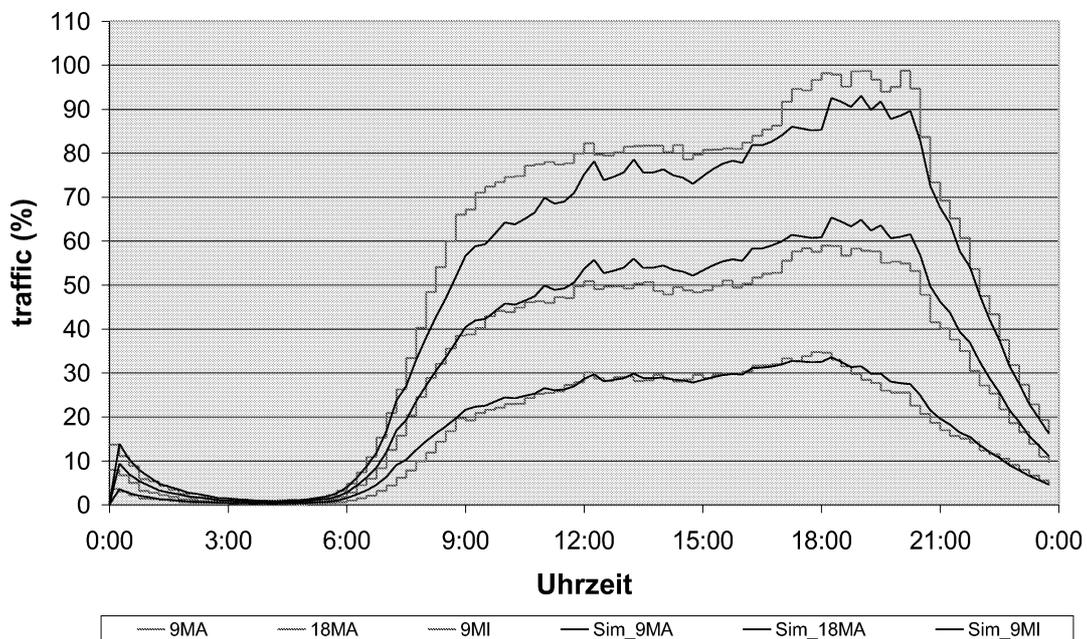


Abbildung 6.12: Geänderte Verkehrsaufteilung in den Layern durch eine Anpassung der Handover-Defaultparametrisierung

Natürlich kann auch eine Kombination dieser beiden Maßnahmen eingesetzt werden. Für welche man sich schlussendlich entscheidet, liegt in der Verantwortung des Netzmanagers, der für die Parametrisierung zuständig ist. Neben den reinen Auslastungsdaten müssen auch verschiedene andere Kriterien in Betracht gezogen werden, wie zum Beispiel die Abbruchrate oder die Relativauslastung der Layer. Aus dieser Vielzahl von Informationen, gestützt durch die Simulation, kann aber am Ende eine fundierte Entscheidung für die Parametereinstellungen getroffen werden.

Die Abb. 6.13 stellt schematisch den Einsatz dieses Verkehrsmodells im laufenden Optimierungsprozess dar. Hier werden die Sollwerte für die Auslastung und die Qualität in den Layern ebenfalls dem Modell zugeführt. Außerdem gehen die aktuellen Messdaten aus dem Netz hier ein. Mit diesen Informationen kann nun ein Simulationprozess gestartet werden, dessen Ziel die Erreichung der Vorgabewerte ist. Die Parametereinstellungen, die zum gewünschten Ergebnis führen, gehen als Zusatzinformation in den Entscheidungsprozess des Reglers (Netzmanager) ein. Auf diese Weise kann der Regelprozess besser und effizienter gestaltet werden.

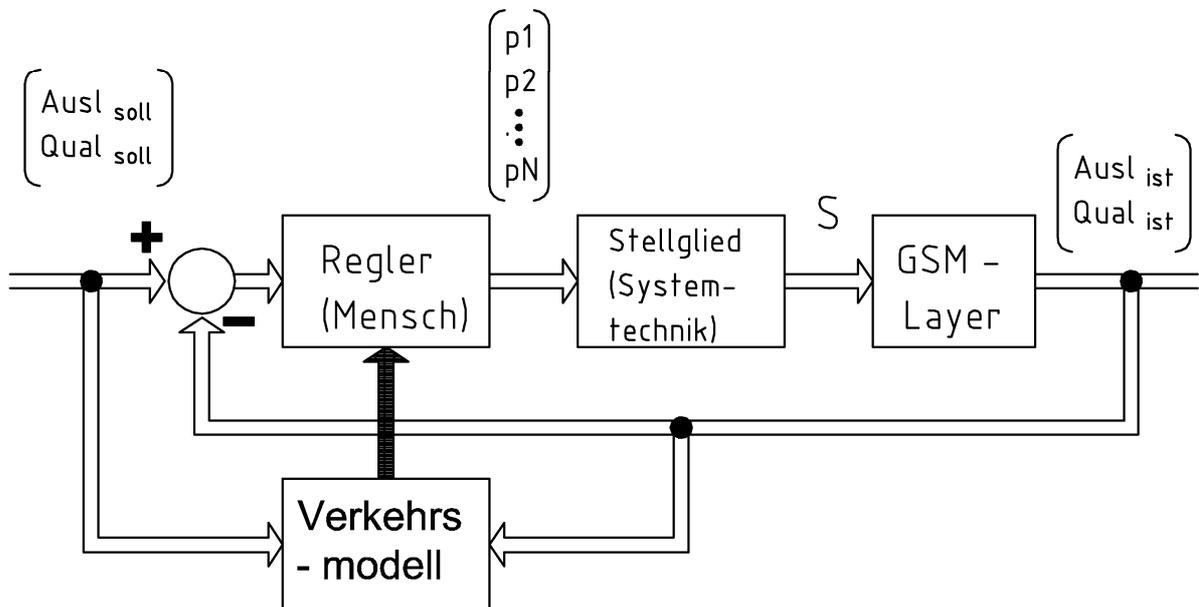


Abbildung 6.13: Schematischer Einsatz des Verkehrsmodells im Optimierungsprozess

Es wäre natürlich auch denkbar, den Menschen als Regler durch das Verkehrsmodell zu ersetzen, jedoch wäre dann eine wichtige Sicherheitsbarriere verloren gegangen. Würde dieses System im „normalen“ Betriebsbereich auch zuverlässig arbeiten, so kann man nicht mit Sicherheit sagen, was in Extremfällen passiert. Hier könnte dieser Regelkreis Reaktionen zeigen, die für einen Menschen völlig absurd sind. Daher denke ich, dass dieses Modell eher unterstützenden Charakter hat, als einen ersetzenden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Die beiden hier erarbeiteten Verkehrsmodelle können in unterschiedlicher Weise der Parameteroptimierung dienen. Das erste Modell ist zeitunabhängig und kann zur Prediktion der Auswirkung von Idle-Parametern in Colocated Gebieten eingesetzt werden. Gerade in diesen Gebieten ist eine optimale Verkehrsaufteilung für den Netzbetreiber von besonderer Bedeutung. Die entsprechende Verkehrslenkung geschieht zur Zeit vorwiegend über die Idle-Parameter, weshalb das Modell hier durchaus gewinnbringend eingesetzt werden kann. Der Vergleich der Simulation mit den entsprechenden Messdaten zeigt die Anwendbarkeit des Modells und über die statistische Auswertung von Messdaten wurden die Grundlagen für den prediktiven Einsatz des Modells geschaffen.

Die Basis für dieses Modell lieferte eine statistische Auswertung von Messdaten, die den Zusammenhang zwischen dem Verkehrsangebot und dem abgeführten Verkehr wiedergeben. Das Ergebnis dieser Auswertung zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit den Grundlagen aus der Verkehrstheorie, was ebenfalls die Praxistauglichkeit des Modells unterstreicht.

Im zweiten Schritt wurde ein Verkehrsmodell erarbeitet, welches nicht mehr die einzelnen GSM-Zellen betrachtet, sondern den Verbund einer Vielzahl von Zellen. Dadurch kann hier auch nicht mehr auf die Parametrisierung jeder einzelnen Zelle eingegangen werden, sondern nur mehr auf die Default-Parametrisierung, womit die allgemein vorherrschende Grundeinstellung gemeint ist. Durch die globale Betrachtung mehrerer Zellen ist es möglich, den Gesprächsaufbau, die folgenden Handover und das Ende der Gespräche zu erfassen. Pro GSM-Layer gehen diese elementaren Ereignisse in eine Differentialgleichung ein, wobei die Gleichungen untereinander über die Handover zwischen den Layern verkoppelt sind. Dieses Differentialgleichungssystem ist die mathematische Basis für das Verkehrsmodell.

Aus der Datenanalyse von Messdaten wurden die Koeffizienten dieses DGL-Systems abgeleitet, wodurch ein unmittelbarer Praxisbezug gewährleistet ist. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den entsprechenden Messdaten. Außerdem wurden aus dieser Datenanalyse der Einfluss der GSM-Parameter auf diese Koeffizienten untersucht. Hierfür wurden eigene ge-

zielte Tests im GSM-Netz durchgeführt, die zusätzliche Informationen brachten. Zwar wurden diese Untersuchungen speziell für jene Parameter durchgeführt, die das Power Budget Handover beeinflussen, jedoch ist dies der mit Abstand am häufigsten vorkommende Handovertyp. Daher sind über diese Parameter auch die größten Lenkungseffekte zu erzielen, was im Sinne einer Auslastungsoptimierung ist. Zukünftig ist es aber sicher zielführend mehr GSM-Parameter in das Modell einzubinden, um eine größere Bandbreite an Optimierungsmaßnahmen simulieren zu können.

Ein möglicher Einsatz dieses zweiten Verkehrsmodells ist wieder an Hand von Simulationsergebnissen dokumentiert, denen fiktive Zielsetzungen zu Grunde gelegt sind. Im laufenden Netzbetrieb können diese simulierten Tagesverkehrsverläufe dazu genutzt werden, die Default-Einstellungen der einzelnen Layer so zu bestimmen, dass sich im Mittel die erwünschten Auslastungs- und somit Qualitätsdaten ergeben. Außerdem kann der Optimierungsprozess durch Einbindung dieses Modells zumindest teilautomatisiert werden, was ein erklärtes Ziel von max.mobil. ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Jacek, B., 1995 *Mobilfunk und intelligente Netze, 2. neubearbeitete Auflage* (Vieweg, Braunschweig)
- [2] Mouly, M., and Pautet, M. B., 2000 *The GSM System for Mobile Communications* (Europe Media Duplication, Lassay-les-Châteaux)
- [3] Störmer, H., u. a., 1966, *Verkehrstheorie* (R. Oldenbourg, München, Wien)
- [4] Langrock, P., und Jahn, W., 1979 *Einführung in die Theorie der Markovschen Ketten und ihre Anwendungen* (BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig)
- [5] Brandt, S., 1992, *Datenanalyse* (BI-Wiss.-Verl., Mannheim, Wien)
- [6] *GSM-Spezifikationen* (ETSI Homepage, www.etsi.org, Stand: Mai 2002)
- [7] Bertermann, E., 2001 *SBS - BSC Database Parameter Description BR5.5* (Siemens AG, Bonn)