

Ein Modellierungsframework für die technologieübergreifende Verwaltung von Funkressourcen in mobilen Kommunikationssystemen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

durch die Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Universität Duisburg-Essen
Campus Essen

vorgelegt von
Andreas Pillekeit
aus Bad Frankenhausen (Kyffhäuser)
Essen, Januar 2010

Tag der mündlichen Prüfung: Montag der 15.03.2010

Erstgutachter: **Prof. Dr. Bruno Müller-Clostermann**
(Universität Duisburg-Essen)

Zweitgutachter: **Prof. Dr.-Ing. Andreas Mitschele-Thiel**
(Technische Universität Ilmenau)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Systemmodellierung“ der Universität Duisburg-Essen in den Jahren 2004 bis 2010. Während dieser Zeit erhielt ich die umfassende Unterstützung vieler Menschen, für die ich mich recht herzlich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Bruno Müller-Clostermann, der als Leiter der Arbeitsgruppe eine sehr kreative und freundliche Atmosphäre schafft, in der neue Ideen einfach umgesetzt werden können. Seine Ratschläge, Ideen und die zahlreichen Diskussionen verhalfen mir immer wieder zu neuen Einsichten. Neben meiner fachlichen Weiterbildung danke ich ihm für die Förderung der Erlangung vielfältiger nützlicher Fertigkeiten.

Meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Andreas Mitschele-Thiel möchte ich für die vielen Anregungen danken, die zur Verbesserung dieser Arbeit führten und ganz besonders möchte ich ihm für seine Unterstützung in der Endphase meines Studiums danken. Ohne diese Unterstützung gäbe es diese Dissertationsschrift mit großer Sicherheit nicht.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Echtle, der als Vorsitzender des Prüfungsausschusses für eine zügige und reibungslose Abwicklung des Verfahrens gesorgt hat.

All meinen Kollegen aus der Schützenbahn danke ich für die gewährte Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima. Besonderer Dank gilt dabei Anne Fischer, die mir beim Kampf mit der Bürokratie immer mit Rat und Tat zur Seite stand sowie Christina Braun, die immer ein offenes Ohr für auf Silizium zurückzuführende Probleme hatte. Meinen ehemaligen Kollegen Dr. Corinna Flüs und Dr. André Best möchte ich sehr für die Hilfe am Anfang meiner Zeit am Lehrstuhl danken. Für die vielen interessanten Gespräche bei der einen oder anderen Tasse Kaffee und natürlich für den Doktorhut danke ich besonders meinen Kollegen Thorsten Kimmeskamp, Axel Langhoff, Dominik Stein, Dr. Stefan Hanenberg und Christian Derksen.

Ohne Freunde, die neben der Arbeit ein erfülltes Leben ermöglichen, ist so eine Dissertationsphase schlecht durchzustehen. Für die vielen schönen Erlebnisse in dieser Zeit möchte ich mich bedanken bei Michael Tinnefeld, all meinen Freunden aus dem Ruhrgebiet und meinen langjährigen Schulfreunden Anett Funda, Mario Gläber, Mathias Bründel und Diana Brüder sowie meinen Freunden aus der Studienzeit in Ilmenau Sven Richter, Kumanan Kanagasabapathy, Dirk Behrendt, Martina Zobel, Medhaporn Anuyahong, Kyle Joachim, Marcus Hernandez und Pedro Uria Recio.

Vielen Dank auch an meinen lieben Freund Peter Jasch, der durch seinen „ausgeprägten Sinn für Humor“ die Zeit während der Dissertation verschönerte.

Mein größter Dank aber gebührt meiner Familie, ohne die mein Leben so gut wie es bisher verlaufen ist nicht möglich gewesen wäre.

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modellierungsframework für die Untersuchung der technologieübergreifenden Verwaltung von Ressourcen heterogener Funkzugangsnetze (Common Radio Resource Management – CRRM) entwickelt. Die fünf Komponenten Umwelt (ENV), Nutzerendgerät (UE), Funkzugangssystem (RAS), CRRM-Informationsmanager (CRRM-IM) und CRRM-Entscheider (CRRM-D) können für die Gestaltung von zentralen bis dezentralen CRRM-Architekturen kombiniert werden. Sie decken damit ein weites Spektrum an möglichen CRRM-Einsatzszenarien ab. Dabei ermöglicht eine klare Struktur des zugrunde liegenden Modells die einfache Übertragung von Lösungsmethoden aus dem Gebiet der Multikriterienoptimierung. Ein integriertes Kostenmodell ermöglicht eine Kosten-/ Nutzen-Analyse für CRRM-Algorithmen und Architekturen. Die Verwendung eines hybriden Simulationsmodells ermöglicht die einfache Integration analytischer Funkzugangstechnologiemodelle und die Simulation komplexer Szenarien mit geringem Zeit- und Speicherbedarf. Hierbei liefern simulative Teilmodelle zeitgetreu neue Eingabeparameter für analytische Teilmodelle, deren Ausgabeparameter wiederum die Eingabeparameter der simulativen Teilmodelle sind. Nach diesem Modell wurde der auf OMNeT++ basierende diskrete ereignisorientierte Simulator HEKATE entwickelt. Der Simulator erwies sich als geeignet die zeiteffiziente Untersuchung von CRRM-Szenarien für UMTS- und GSM/EGPRS-Funkzugangssysteme durchzuführen.

Abstract

This work presents a modeling framework for the efficient evaluation of Common Radio Resource Management (CRRM). Centralized as well as decentralized scenarios can be clearly defined by five standard components, namely the radio access system (RAS), the environment (ENV), the user equipment (UE), the CRRM information manager (CRRM-IM), and the CRRM decider (CRRM-D). The clarity of the model enables an efficient investigation of CRRM algorithms based on multi-criteria optimization theory. The integrated cost model makes possible a cost-benefit investigation of different CRRM algorithms and architectures. A hybrid simulation model, where a simulation model and an analytical model operate in parallel over time, leads to low time and memory demands even for the simulation of complex scenarios. Additionally it allows for a convenient and straightforward integration of different analytical models for wireless network technologies. A discrete event simulator named HEKATE is based on this hybrid simulation model which has been implemented using OMNeT++. The scope of the proposed framework is demonstrated by the evaluation of realistic CRRM scenarios for UMTS and GSM/EGPRS.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problembeschreibung	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.2.1	Überblicksveröffentlichungen	3
1.2.2	Projekte und Dissertationen	3
1.2.3	CRRM-Architekturvorschläge	4
1.2.4	Methoden zur Analyse von CRRM-Szenarien und Algorithmen	5
1.2.5	Algorithmen für CRRM	6
1.2.6	Zusammenfassung	7
1.3	Inhalt der Arbeit	8
1.3.1	Ziele	8
1.3.2	Begriffe	10
1.3.3	Aufbau	12
2	Gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen	13
2.1	Ziele und Einflussfaktoren	13
2.2	Betrachtungen zu möglichen Gewinnen	16
2.3	Infrastrukturelle Voraussetzungen	18
2.3.1	Nutzerendgeräte (UE)	18
2.3.2	Funkzugangstechnologien (RAT)	19
2.4	Generelle Eigenschaften von Funkressourcen	20
2.4.1	Grundlegende Struktur drahtloser Netze	20
2.4.2	CRRM-Struktur- und Integrationsebenen	21
2.4.3	Kategorisierungsmöglichkeiten	23
2.4.4	CRRM-Regelkreis	25

3	Modellierung von CRRM-Szenarien	29
3.1	Modellierungskonzept.....	29
3.1.1	Modellkomponenten.....	30
3.1.2	Kommunikationsbeziehungen.....	34
3.1.3	Kostendefinition	35
3.1.4	Szenariodefinition	36
3.2	Beispielszenarien	37
3.2.1	Netzseitiges CRRM.....	37
3.2.2	Endgeräteseitiges CRRM	39
3.3	Umsetzung des Modellierungskonzepts	40
3.3.1	Anforderungen	40
3.3.2	Schlussfolgerungen	42
4	Simulator für CRRM-Szenarien	47
4.1	Umsetzung der Modellkomponenten.....	47
4.1.1	Environment (ENV)	47
4.1.2	User Equipment (UE).....	53
4.1.3	Radio Access System (RAS).....	60
4.1.4	CRRM-IM	90
4.1.5	CRRM-D	92
4.2	Umsetzung der Kommunikationsbeziehungen.....	93
4.3	Umsetzung der Kostendefinition.....	101
4.4	Umsetzung der Szenariodefinition.....	102
4.5	Allgemeine Eigenschaften des Simulators.....	104
4.5.1	Dynamik der Zustandsänderungen.....	104
4.5.2	Allgemeiner Aufbau von HEKATE-Szenarien.....	106

5	Untersuchung und Überprüfung des Simulators	109
5.1	Untersuchung des Modellverhaltens	109
5.1.1	Verhalten der analytischen Modelle der RAS-Komponente	109
5.1.2	Verhalten des Simulationsmodells	119
5.2	Vergleichende Untersuchungen	130
5.2.1	Überprüfung des SR-ARQ-Modells für $E[B(K)]$ und $V[B(K)]$	130
5.2.2	Überprüfung der Processor Sharing Approximation für $E[V]$	132
5.2.3	Vergleich mit Simulationsstudien des IST Everest Projekts	135
6	Anwendungsbeispiele	145
6.1	MATS-Strategie	145
6.1.1	Beschreibung	145
6.1.2	Ergebnisse	148
6.2	GMKP-Algorithmus	150
6.2.1	Beschreibung	150
6.2.2	Ergebnisse	154
6.3	Analyse von transienten Verhalten	159
6.3.1	Beschreibung	159
6.3.2	Ergebnisse	160
7	Zusammenfassung	167
8	Ausblick	171
8.1	Forschungsmöglichkeiten	171
8.2	HEKATE Erweiterungen	172

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Dynamik des CRRM-Multikriterien-Optimierungsproblems	15
Bild 2.2	Unterschiedliche Kapazitätsregionen von Ressourcen.....	17
Bild 2.3	Allgemeine logische Struktur mobiler Kommunikationsnetze	21
Bild 2.4	CRRM-Systemgrenzen	22
Bild 2.5	CRRM-Integrationsstufen [PeSAKB2005].....	23
Bild 2.6	CRRM-Regelkreis.....	25
Bild 3.1	Komponente Umwelt (ENV)	31
Bild 3.2	Komponente Funkzugangssystem (RAS)	32
Bild 3.3	Komponente Nutzerendgerät (UE)	32
Bild 3.4	Komponente Informationmanager (CRRM-IM).....	33
Bild 3.5	Komponente Entscheider (CRRM-D).....	33
Bild 3.6	Nachrichtenaufbau	34
Bild 3.7	Kommunikationsverbindungen der Modellkomponenten.....	35
Bild 3.8	Modellierung der CRRM-Level.....	36
Bild 3.9	Beispiel: Hierarchisches Informationsmanagement und dezentrale Entscheidung	38
Bild 3.10	Beispiel: Roaming mit hierarchischen CRRM.....	38
Bild 3.11	Beispiel: Lokales Informationsmanagement und lokale Entscheidung.....	39
Bild 3.12	Hybrides Modell der Klasse II [ShSa1983]	42
Bild 3.13	Lösungsprozess: Interaktion bei hybriden Modell der Klasse II.....	43
Bild 3.14	Modellapproximation und Gültigkeitszeiträume	44
Bild 4.1	RAS-Empfangsklassen und deren Abbildung auf ENV-Rasterelemente.....	49
Bild 4.2	Ebenen und Rasterelemente der Umwelt	49
Bild 4.3	ENV Ablaufdiagramm für ein Nutzerendgerät	53
Bild 4.4	Anforderungsprofil (P) für einen Dienstqualitätsparameter	55
Bild 4.5	Phasen der Real-Time und Non-Real-Time Dienste.....	56
Bild 4.6	UE Ablaufdiagramm	59
Bild 4.7	Modellaktualisierungszeitpunkte und Phasenaufteilung	61
Bild 4.8	Schnittstellen für analytisches Modell in der RAS-Komponente.....	63
Bild 4.9	RAS Ablaufdiagramm.....	64
Bild 4.10	UMTS- und GSM-Kanalmodell mit Kenngrößen.....	70
Bild 4.11	Beispiel eines orthogonalen Codebaums.....	86
Bild 4.12	Übersichtsgrafik über Zusammenhang der analytischen Modellteile	89
Bild 4.13	der RAS-Komponente.....	89
Bild 4.13	CRRM-IM Ablaufdiagramm.....	92
Bild 4.14	CRRM-D Ablaufdiagramm.....	93
Bild 4.15	Ablauf des normalen Lebenszyklus einer paketvermittelten Verbindung.....	96
Bild 4.16	Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und erfolgreiche Wiederaufnahme	97
Bild 4.17	Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und erfolglose Wiederaufnahme	97
Bild 4.18	Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und Überschreitung der maximalen	98
Bild 4.19	Nutzerwartezeit.....	98
Bild 4.19	Ablauf eines erfolglosen Verbindungsaufbaus mit mehrmaliger Blockierung	99
Bild 4.20	Ablauf eines netzseitig initiierten Intersystem-Handovers.....	99
Bild 4.21	Ablauf Start/Stop periodischer Messungen in der Umwelt.....	100
Bild 4.22	Beispiel: Hierarchisches Informationsmanagement und dezentrale Entscheidung	103
Bild 4.23	(OMNeT++ Ausgabe der CRRM-Level).....	103
Bild 4.23	Aufbau von Szenarien in HEKATE	106
Bild 5.1	Auslastung unter unterschiedlichen Empfangsqualitätsklassen – oben: gute	111
Bild 5.1	Empfangsqualität unten: mittlere Empfangsqualität	111
Bild 5.2	Werte für E[B] und E[S] abhängig von der Anzahl aktiver Dienste.....	112
Bild 5.3	Werte des Simulators und des Visualisierungswerkzeugs für E[V] (einer SDU) abhängig ..	112
Bild 5.4	von der Anzahl aktiver Nutzer	112
Bild 5.4	Mittlere Übertragungsdauer E[V] einer SDU unter veränderten Kanalannahmen.....	113

Bild 5.5	Auswirkung der M/M/1-Heuristik auf $E[B]$ (links ohne, rechts mit aktiver Heuristik) ...	114
Bild 5.6	Auswirkung der M/M/1-Heuristik auf $VB[B]$ (links ohne, rechts mit aktiver Heuristik)	114
Bild 5.7	Einfluss der Kanalauslastung auf den $VK[B]$ mit M/M/1-Heuristik	114
Bild 5.8	Einfluss der RLC-PDU-Paketfehlerwahrscheinlichkeit ($P_{e,k}$)	115
Bild 5.9	Einfluss der SDU-Paketgröße (Θ_i)	115
Bild 5.10	Einfluss der Nettokapazität der RLC-PDU-Pakete (Ψ_k).....	116
Bild 5.11	Einfluss des Transmission Time Interval (TTI_k).....	116
Bild 5.12	Einfluss der ARQ-Round Trip Time (RTT_k).....	117
Bild 5.13	Einfluss der Parameter Tp_k und H_k auf die Zeit $E[T_1]$	117
Bild 5.14	Vergleich der mittleren Übertragungsdauer im EGPRS- (links) und UMTS-Kanal (rechts).....	118
Bild 5.15	Vergleich der mittleren Auslastung im EGPRS- (links) und UMTS-Kanal (rechts).....	118
Bild 5.16	Szenario mit neun Zellen und 4500 m Torusumfang	119
Bild 5.17	Einfluss der unterschiedlichen Rasterelementauflösungen	121
Bild 5.18	Geschätzte und beobachtete Geschwindigkeitsverteilungen für unterschiedliche Lebensdauern	123
Bild 5.19	Mittlere Geschwindigkeiten bei Test des Palm Calculus Verfahrens.....	124
Bild 5.20	Mittlere Geschwindigkeiten und Langfristverhalten bei Test der Intervallbeschränkung	124
Bild 5.21	χ^2 -Testergebnisse für Mobilitätsmodell.....	125
Bild 5.22	Wahrscheinlichkeitsdichte der OFF-Phasendauer.....	127
Bild 5.23	Komplementäre Verteilungsfunktion der OFF-Phasendauer	127
Bild 5.24	Einfluss der Geschwindigkeit der UE auf die Verteilung von G.....	128
Bild 5.25	Einfluss der Datenrate auf die Verteilung von G	128
Bild 5.26	Einfluss der Rasterelementauflösung auf die Verteilung von G	129
Bild 5.27	Einfluss der Anzahl der UE auf die Verteilung von G	129
Bild 5.28	Einfluss der Zwischenankunftszeit A auf die Verteilung von G	130
Bild 5.29	Ergebnisse für $E[B(K)]$ bei MCS 1 und $P_e=1\%$, 3% , 10%	131
Bild 5.30	Ergebnisse für $E[B(K)]$ für MCS 9 und $P_e=1\%$, 3% , 10%	132
Bild 5.31	Approximationsgüte für $E[S]$ bei a) Basis KLB-Approximation b) Basis Simulation.....	133
Bild 5.32	Dehn-Faktor-Trajektorie für $H_2/E_4/1/PS$ bei a) Basis KLB-Approximation b) Basis Simulation	134
Bild 5.33	Anordnung der sieben Zellen pro RAS in einer Umwelt mit 2,25 km Kantenlänge	136
Bild 5.34	Mittlere Anzahl Web-Nutzer die Ressourcen im RAS belegen	137
Bild 5.35	Mittlere ON-Phasendauer im Downlink im Web-Nutzerszenario	138
Bild 5.36	Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Web-Nutzerszenario	138
Bild 5.37	Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Sprach-Nutzerszenario	139
Bild 5.38	Downlink-Zugangswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen im Sprach-Nutzerszenario	140
Bild 5.39	Abbruchwahrscheinlichkeit im Downlink für Verbindungen im Sprach-Nutzerszenario	140
Bild 5.40	Mittlere ON-Phasendauer im Downlink im Mix-Nutzerszenario.....	142
Bild 5.41	Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Mix-Nutzerszenario	142
Bild 5.42	Downlink-Zugangswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen im Mix-Nutzerszenario	143
Bild 6.1	MATS schematischer Ablaufplan für ankommende Verbindung [PeCa2009]	146
Bild 6.2	CRRM Level B Szenario für GMKP-Algorithmus	152
Bild 6.3	Zellebenen mit 9 und 4 Zellen in Umwelt mit 4500 m Torusumfang	153
Bild 6.4	Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf den getragenen Verkehr	155
Bild 6.5	Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf die Zahl der erfolglosen Verbindungen im Beobachtungszeitraum	155
Bild 6.6	Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf die Handover-Zahl im Beobachtungszeitraum.....	155
Bild 6.7	Einfluss der Geschwindigkeit auf den getragenen Verkehr (gesamt).....	156
Bild 6.8	Einfluss der Geschwindigkeit auf den getragenen Verkehr (pro Nutzerendgeräteklasse)	157
Bild 6.9	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Zahl der erfolglosen Verbindungen im Beobachtungszeitraum.....	157
Bild 6.10	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Handover-Zahl im Beobachtungszeitraum.....	157

Bild 6.11	Einfluss der Geschwindigkeit auf die mittlere Zahl der verbundenen Nutzerendgeräte ..	158
Bild 6.12	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Handover-Zahl pro UE-Klasse..... im Beobachtungszeitraum.....	158
Bild 6.13	CRRM-Kosten für die Übermittlung von Zellinformationen im Beobachtungszeitraum	161
Bild 6.14	CRRM-Kosten für die Übermittlung von Informationen über erfolgreiche Verbindungen von Sprach-Nutzern im Beobachtungszeitraum	162
Bild 6.15	Vergleich von Handover-Zahlen im Beobachtungszeitraum	162
Bild 6.16	Anzahl aktiver Verbindungen der Sprach-Nutzer im GSM/EGPRS-RAS.....	162
Bild 6.17	Anzahl aktiver Verbindungen der Sprach-Nutzer im UMTS-RAS.....	163
Bild 6.18	Anzahl der erfolglosen Verbindungen der Web-Nutzer.....	163
Bild 6.19	Anzahl der erfolglosen Verbindungen der Sprach-Nutzer	164
Bild 6.20	Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall) ohne CRRM	164
Bild 6.21	Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall)	164
	im Szenario CRRM intensiv zeitlos	164
Bild 6.22	Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall)	165
	im Szenario CRRM zeitbehaftet	165

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1	Für CRRM-relevante Eigenschaften der Funkzugangssysteme	14
Tabelle 2.2	Für CRRM-relevante Eigenschaften der Verbindungen.....	14
Tabelle 2.3	Aktuelle Funkzugangstechnologien mit ihren maximalen Downlink-Bruttodatenraten	19
Tabelle 2.4	Kategorien für CRRM-Architekturen und CRRM-Algorithmen.....	24
Tabelle 4.1	Ein-/ Ausgabeparameter der Komponente ENV	48
Tabelle 4.2	Berechnung der initialen Position und Geschwindigkeit eines Nutzerendgeräts	52
Tabelle 4.3	Ein-/ Ausgabeparameter der Komponente UE	54
Tabelle 4.4	Parameter des Modells nach Choi und Limb.....	58
Tabelle 4.5	Ein-/Ausgabeparameter der Komponente RAS.....	60
Tabelle 4.6	Werte für $P[S n]$ aus [ChDa2003]	68
Tabelle 4.7	Abhängigkeiten der Berechnung von $E[T_i]$ für eine Dienstverbindung	69
Tabelle 4.8	Abhängigkeiten der Berechnung von $E[T_A]$ des Dienstes i	72
Tabelle 4.9	Eingabeparameter für SR-ARQ-Modell zur Berechnung von $E[B(K)_i]$ und $V[B(K)_i]$	73
Tabelle 4.10	Ausgabeparameter des SR-ARQ-Modells der SDU-Übertragung	76
Tabelle 4.11	Eingabeparameter G/G/1/∞/∞/PS.....	78
Tabelle 4.12	Ausgabeparameter G/G/1/∞/∞/PS.....	78
Tabelle 4.13	Eingabeparameter zur Berechnung von α_i im GSM/EGPRS Teilmodell	81
Tabelle 4.14	Eingabeparameter zur Berechnung von α_i im UMTS-Teilmodell.....	82
Tabelle 4.15	Eingabeparameter der Heuristik zur Berechnung der Störeinflüsse im UMTS-Teilmodell	84
Tabelle 4.16	Parameter zur Bestimmung der Verfügbarkeit von orthogonalen Spreading Codes	86
Tabelle 4.17	Ein- /Ausgabeparameter der CRRM-IM-Komponente	90
Tabelle 4.18	Ein- / Ausgabeparameter der CRRM-D-Komponente	92
Tabelle 4.19	Definierbare Bedingungen für den Nachrichtenversand pro Modellkomponente	94
Tabelle 4.20	Matrix der systeminhärenten Kommunikationsbeziehungen	95
Tabelle 4.21	Informationen pro Nutzerendgeräte-Objekt (MobileBase).....	105
Tabelle 4.22	Informationen pro Zell-Objekt (RASStationCoverage)	105
Tabelle 4.23	Informationen pro Rasterelement-Objekt ()	106
Tabelle 5.1	Eingabeparameter für Kanalmodell eines EGPRS- und UMTS-Kanals.....	110
Tabelle 5.2	Verhältnis der Kantenlänge zur Anzahl der Rasterelemente	120
Tabelle 5.3	Szenarienparameter für Untersuchung der mittleren Gültigkeitsdauern	127
Tabelle 5.4	Varianz der SDU-Bedienzeit analytisch und simulativ	131
Tabelle 6.1	Szenarioeinstellung für M/M/10/10 System.....	149
Tabelle 6.2	Ergebnisse M/M/10/10 Szenario	149
Tabelle 6.3	Gute Übereinstimmung der HEKATE Ergebnisse mit den Ergebnissen des MATS	150
Tabelle 6.4	Markov-Modells für gleiche Szenarioparameter	150
Tabelle 6.4	Anzahl Verbindungen pro Zelle im UMTS-RAS und GSM/EGPRS-RAS	153
	im Fußgängerverkehr-Basisszenarios.....	153
Tabelle 6.5	Geschwindigkeitsbereiche der Szenarien	156
Tabelle 6.6	Szenariovarianten für die Untersuchung des transienten Verhaltens.	160

Liste der Abkürzungen

2G/3G/4G	2. bis 4. Mobilfunkgeneration – Sammelbegriff für RAT Technologiestufen
3GPP	Third Generation Partnership Project
AAA	Authentication, Authorization and Accounting
AWK	Aho, Weinberger, Kernighan – Programmiersprache
BWU	BandWidth Unit
CAC	Call Admisson Control
CDMA	Code Division Multiple Access – Multiplexverfahren
CRRM	Common Radio Ressource Management – Gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen (auch JRRM, MRRM, MxRRM)
CRRM A	Common Radio Ressource Management Level A
CRRM B	Common Radio Ressource Management Level B
CRRM C	Common Radio Ressource Management Level C
CRRM-D	CRRM-Decider - Modellkomponente die die Entscheidung und Umsetzung der CRRM-Maßnahmen realisiert
CRRM-IM	CRRM-Infomation Manager - Modellkomponente die das Ermitteln, Übertragen und speichern von CRRM-Informationen realisiert
CS	Circuit Switched
DCH	Dedicated CHannel
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DVB-H	Digital Video Broadcasting – Handheld – Standard für mobile Broadcast Dienste – RAT
E ₄	Erlang Verteilung mit 4 Phasen
EGPRS	Enhanced General Packet Radio Service – RAT
ENV	Environment - Modellkomponente die das Verhalten der Umwelt realisiert
FCFS	First-Come, First-Served
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GMKP	Gruppenbasierte Lösung des Multiple-Knapsack Problems – CRRM-Algorithmus
GSM	Global System for Mobile Communications – RAT
H ₂	Hyper-exponential Verteilung mit 2 Phasen
HARQ	Hybrid Automatic Repeat-reQuest
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data – RAT
HSPA	High Speed Packet Access – Erweiterung von UMTS – RAT
i.i.d.	independent and identically distributed - unabhängig und identisch verteilt
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISHO	InterSystemHandOver
ISO/OSI	International Organization for Standardization / Open System Interconnection reference model
IST	Information Society Technology - Forschungsrahmenprogramm der EU
ITU	International Telecommunications Union
JCAC	Joint Call Admisson Control
KLB	Krämer/Langenbach-Belz – Approximationsverfahren für G/G/m Systeme
LTE	Long Term Evolution – Erweiterung von UMTS – RAT
MATS	Multimedia Adaptive Threshold Strategy – RRM Algorithmus
MCS	Modulation and Coding Scheme
MSC	Message Sequence Chart
NACK	Negative-Acknowledge
NED	NEtwork Description language
OMNeT++	Object-oriented Modular discrete event Network simulation Tool
PDCH	Packet Data CHannel
PDU	Packet Data Unit - OSI-Schichtenmodell

PS	Processor Sharing (Scheduling-Verfahren) oder Packet Switched (Vermittlungsverfahren)
RAN	Radio Access Network
RAS	Radio Access System – Funkzugangssystem. Hier auch Modellkomponente die das Verhalten der Funkzugangssysteme realisiert
RAS HO	Radio Access System internal HandOver – Intrasystemhandover
RAT	Radio Access Technology
RLC	Radio Link Control
RRM	Radio Ressource Management
RTT	Round-Trip Time
SDU	Service Data Unit - OSI-Schichtenmodell
SF	Spreading Factor
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SR-ARQ	Selective Repeat Automatic Repeat-reQuest
TBF	Temporary Block Flow
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access – Multiplexverfahren
TR	Technical Report
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment – Nutzerendgerät. Hier auch Modellkomponente die das Verhalten der Nutzerendgeräte realisiert.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System – RAT
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access – CDMA Multiplexverfahren
WGAN	Wireless Global Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access - IEEE 802.16 Standard
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
XML	eXtensible Markup Language

Liste der Formelzeichen

a	Aktivitätsfaktor eines Dienstes
A_{UE}	Zwischenankunftszeit neuer Dienstverbindungen
c	Kapazität einer Zelle (GMKP-Algorithmus)
C_{CH}	Anzahl der Verkehrskanäle einer Zelle
C_{ON}	Anzahl der ON-Phasen innerhalb der Lebensdauer eines Dienstes
C_{SF}	Anzahl verwendeter Spreading Codes mit dem Faktor SF
d	Abstand eines Nutzerendgerätes von der Basisstation
D	Aktueller Wert für einen Dienstqualitätsparameter
$DATA_{ON}$	Menge der in einer ON-Phase zu übertragenden Daten
E	Empfangsqualitätsklasse
$E[A]$	Mittlere Zwischenankunftszeit von SDU-Paketen
$E[A_{UE}]$	Mittlere Zwischenankunftszeit von neuen Dienstverbindungen
$E[B(K)]$	Mittlere Bedienzeit von K PDU-Paketen
$E[B]$	Mittlere Bedienzeit einer SDU
$E[N]$	Mittlere Anzahl von SDU
$E[Q]$	Mittlere Anzahl von wartenden SDU
$E[R]$	Mittlere Datenrate
$E[S]$	Mittlere Schedulingverzögerung aufgrund gemeinsamer Kanalnutzung für PS-Bedienstrategie
$E[S i]$	Mittlere Anzahl der erfolgreichen Nutzerendgeräte bei Kanalzugriff bei i Konkurrenten um den Kanal
$E[T_A]$	Mittlere Phasendauer des aktiven Datentransfers
$E[T_i]$	Mittlere Zeitdauer bis zum erfolgreichen Kanalzugriff
$E[T_{ON}]$	Mittlere Dauer der ON-Phase
$E[V]$	Mittlere Verzögerung einer SDU
$E[W]$	Mittlere Wartezeit einer SDU für FCFS-Bedienstrategie
E_b/N_0	Signal-zu-Rauschabstand
F	Anzahl der aktiven Dienstverbindungen auf einem Kanal
G	Gültigkeitsdauer des analytischen Modellergebnisses
H	Anzahl der Slotted Aloha Contention Slots bei konkurrierendem Kanalzugriff
K	Anzahl zu übertragender PDU
M	Anzahl der PDU die in einem Zeitslot (innerhalb eines TTI) übertragen werden können
N_{Neben}	Anzahl der Nebenobjekte einer Webseite
O_B	Lastgrenzwerte für Handover-Verbindungen (MATS)
O_T	Lastgrenzwerte für neue Verbindungen (MATS)
p	Profit einer Verbindung (GMKP)
P	Grad der Erfüllung eines Dienstqualitätsparameters
$P[C]$	Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Kanalzugriffs

$P[n i]$	Wahrscheinlichkeit für n Wettbewerber um das Senderecht in einem Contention Slot bei i Konkurrenten um den Kanal
$P[S i]$	Wahrscheinlichkeit für erfolgreiche Nutzung eines Contention Slots bei i Konkurrenten um den Kanal
$P[S n]$	Wahrscheinlichkeit für das Erhalten des Senderechts in einem Slot bei n Wettbewerbern um den Contention Slot
P_e	Wahrscheinlichkeit für fehlerhafte Übertragung einer PDU
QoS	Aggregierte Dienstqualitätserfüllung
R	Datenrate
r	Radius der Zelle
RTT	Dauer einer ARQ-Round-Trip-Time
$S_{Anforderung}$	Größe des des Anforderungsobjekts zur Anforderung einer Web-Seite
SF	Spreading-Faktor
S_{Gesamt}	Gesamtmenge der zu übertragenden Daten in der Lebenszeit einer Dienstverbindung
S_{Haupt}	Größe des Hauptobjektes einer Web-Seite
S_{Inhalt}	Gesamtgröße einer angeforderten Web-Seite innerhalb einer ON-Phase
T_A	Phasendauer des aktiven Datentransfers
T_{BFdown}	Benötigte Zeitdauer für das TBF Setup im Downlink
T_{BFup}	Benötigte Zeitdauer für das TBF Setup im Uplink
T_C	Wartezeit bis zum erfolgreichen Kanalzugriff
T_I	Wartezeit bis zur Kanalbenutzung
T_{ld}	Wartezeit bis zur Kanalbenutzung im Downlink
T_{lu}	Wartezeit bis zur Kanalbenutzung im Uplink
T_{OFF}	Dauer der Lesephase (Phase ohne Ressourcenbelegung)
T_{ON}	Dauer der Anforderungs-/ Übertragungsphase der Daten (Phase der Ressourcenbelegung)
T_P	Zeitraum bis zur nächsten Wettbewerbsphase im Kanal
T_{RT}	Zeitdauer in TTI bis zur Retransmission einer fehlerhaften PDU
TTI	Zeitdauer eines RLC-Transmission-Time-Intervalls
U	Anzahl belegter Verkehrskanäle
v	Geschwindigkeit
$V[B(K)]$	Varianz der Bedienzeit von K PDU-Paketen
$VK[A]$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit von SDU-Paketen
$VK[A_{UE}]$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit von neuen Dienstverbindungen
$VK[B]$	Variationskoeffizient der Bedienzeit von SDU-Paketen
w	Gewicht einer Verbindung (GMKP)
W_0	Wartezeit eines Auftrages unabhängig von der Klassenzugehörigkeit
W_{CR}	Chiprate einer Zelle
x	Eine Verbindung (GMKP)
x/y	Position in der Umwelt
z	Prioritätsklasse für Verbindungen
Z	Anzahl der Nachbarzellen einer Zelle
α	Anteiliger Ressourcenverbrauch einer Dienstverbindung

δ	Verhältnis der Signalstärke zur Interferenzstörung
ε	Untere Schranke für tollerierbare Dienstqualitätserfüllung
η	Grad des Ressourcenverbrauchs in einer Zelle
Θ	Größe einer SDU
λ	Ankunftsrate für Verbindungen (MATS)
μ	Bedienrate von Verbindungen (MATS)
ρ	Auslastung des Kanals
ρ_{AVG}	Gleitender Mittelwert der Auslastung des Kanals
ρ_{ch}	Gesamtauslastung des Kanals über alle Dienstverbindungen auf dem Kanal
ρ_{ch-est}	Geschätzte Auslastung des Kanals
σ	Gesamtauslastung des Kanals durch Dienste höherer oder gleicher Priorität
Y	Anzahl der Kanäle für EGPRS (PDCH)
φ	Orthogonalität des Codes der Signalkodierung
Ψ	Größe einer PDU
Ω	Anzahl der GSM-Frequenzbänder

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problembeschreibung

Die steigende Zahl der Mobilfunknutzer und Multimediaangebote führt zu einer höheren Auslastung und eventuellen Überlastung der existierenden Mobilfunkinfrastruktur (z.B. [HeiseNews09, Bitkom08]). Eine mögliche Antwort auf diese Herausforderung besteht in der Entwicklung und Installation neuer Funkzugangstechnologien (wie Long Term Evolution - LTE), um die für die Nutzer zur Verfügung stehende Bandbreite zu erhöhen. Eine Alternative ist die Entwicklung neuer Verfahren, um die bereits zur Verfügung stehenden Ressourcen besser zu nutzen. Dies kann bedeuten, dass Ressourcen innerhalb einer Funkzugangstechnologie besser verwaltet werden; es kann aber auch sinnvoll sein technologieübergreifend Ressourcen zusammenzuführen. In allen Fällen müssen die Auswirkungen neuer Technologien und Verfahren vor dem Einsatz ausreichend untersucht werden.

Momentan sind Mobilfunksysteme der zweiten und dritten Generation (wie GSM und UMTS) und ihre Weiterentwicklungen (wie EGPRS und HSPA) weit verbreitet. Vor allem in Städten sind auf IEEE 802.11 basierende drahtlose Netze vorhanden, die typischerweise einen örtlich begrenzten breitbandigen Internetzugang ermöglichen. Für die Nahbereichskommunikation hat sich Bluetooth etabliert. Zusätzlich dazu stellen satellitenbasierte Kommunikationssysteme (wie Inmarsat) großflächig ihre Dienste zur Verfügung. Vereinzelt existieren auch WiMAX oder DVB-H Installationen. Dabei ist es möglich, dass sich die Empfangsbereiche der einzelnen Funkzugangssysteme der Mobilfunkbetreiber räumlich überlagern. Auch in Zukunft wird sich mit hoher Wahrscheinlichkeit an dieser Koexistenz verschiedener Funkzugangssysteme und deren räumlicher Überlagerung nichts ändern. Zum einen werden die Funktechnologien für unterschiedliche Aufgabenstellungen optimiert, zum anderen existieren grundlegende organisatorische Probleme, die eine Koexistenz verschiedener Funktechnologiegenerationen herbeiführen: Bei infrastrukturbasierten Netzen fallen enorme Aufbaukosten an, die zu einem schrittweisen Ausbau neuer Netze führen. Zusätzlich besteht für die Betreiber die Notwendigkeit der Überführung des Kundenstamms aus den alten Systemen. Aufgrund dieser Situation existieren immer mehr mobile Nutzerendgeräte (Smartphones, Netbooks, Mobiltelefone etc.), die mehrere Funkzugangstechnologien gleichzeitig unterstützen – wenn auch die gleichzeitige Verwendung nicht immer möglich ist. Technologien wie Software Defined Radio [BoDFNO2002] werden die Möglichkeiten der Unterstützung verschiedener Funkzugangstechnologiestandards für Nutzerendgeräte zukünftig weiter verbessern.

Durch die beschriebene räumliche Überlagerung von Empfangsbereichen und die gleichzeitige Unterstützung verschiedener Funkzugangstechnologien durch die Nutzerendgeräte entsteht in logischer Folge das Problem der optimalen Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Welche Funkzugangssysteme sollten die Nutzerendgeräte für ihre Verbindungen nutzen und welche Dienstqualitätseinstellungen sollten verwendet werden? Dieses Optimierungsproblem wurde bereits intensiv untersucht (Siehe Stand der Forschung im Abschnitt 1.2), aber bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Grund dafür ist die Komplexität und Vielfalt der möglichen Einflussfaktoren (Siehe Abschnitt 2.4).

Diese Arbeit möchte einen Beitrag zur besseren Lösung des beschriebenen Multikriterien-Optimierungsproblems liefern (Siehe Ziele der Arbeit im Abschnitt 1.3.1).

Mögliche Vorteile aus einer besseren Lösung dieses Problems sind für die Netzbetreiberseite eine bessere Auslastung ihrer bestehenden Infrastruktur und verbesserte Dienstqualität bei geringeren Betriebskosten (Infrastrukturaufwand und Energieaufwand). Die Nutzer profitieren von einer umfassenderen Zugangsmöglichkeit zu mobilen Diensten mit zusätzlich verbesserter Dienstqualität.

Durch die weltweit vielfältige Forschungsarbeit in diesem Gebiet entstanden mehrere Bezeichnungen für die Handhabung dieses Optimierungsproblems. Aus Tradition wird in dieser Arbeit der Begriff Common Radio Resource Management (CRRM) als Bezeichnung für die gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen gewählt.

1.2 Stand der Forschung

Im Jahr 1999 stellten Mitola und Maguire [MiMa1999] mit dem Begriff „Cognitive Radio“ ein Konzept zur umfassenden, intelligenten und gemeinsamen Verwaltung von unterschiedlichen Funkressourcen vor. Im Jahr 2003 prägten Gustafsson und Jonsson den Begriff „Always Best Connected“ [GuJo2003]. Common Radio Resource Management betrachtet die Ziele des Always Best Connected Networks von der Seite der Ressourcen Verwaltung, verlangt dabei aber keine so umfassende Änderung an der Konzeption der Funkzugangstechnologien wie „Cognitive Radio“. Es kann als Erweiterung von bisherigen Konzepten zur separaten Ressourcenverwaltung von Funkzugangstechnologien verstanden werden. Die Perspektive des CRRM ist jedoch langfristig das „Cognitive Radio Network“ [MaRG2007].

Eine Vielzahl unterschiedlicher aber teilweise synonyme Schlagwörter ist relevant für das Thema CRRM. Im engeren Sinne: Joint Radio Resource Management- JRRM, Multi Radio Resource Management – MRRM, Multi Standard Radio Resource Management – MxRRM. Ein Spezialfall des CRRM ist das Joint Call Admission Control – JCAC. Die Begriffe Intersystem Handover Control bzw. Vertical Handover Control bezeichnen ebenfalls Bereiche aus dem CRRM – werden aber oft synonym für CRRM verwendet.

1.2.1 Überblicksveröffentlichungen

Falowo et al. [FaCh2008] gibt in seiner Überblicksveröffentlichung Entwurfskriterien für CRRM-Algorithmen an und stellt über ein Ordnungsschema eine umfangreiche Sammlung verschiedener CRRM-Algorithmen zur Verfügung. Niyato et al. [NiHo2005] erstellt eine Übersicht möglicher Ansätze für CRRM. Hossain [Hos2008] liefert einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich der heterogenen Funkzugangnetze.

1.2.2 Projekte und Dissertationen

Das DFG Schwerpunktprogramm „Adaptivität in heterogenen Kommunikationsnetzen mit drahtlosem Zugang“ [DFG-AKOM] bearbeitete Themen aus den Bereichen der adaptiven drahtlosen Übertragung, Kommunikationsprotokolle, Netzorganisation und Netzmanagement, Dienste und Dienststeuerung sowie Modellierung und Planung. Im Kontext dieser Arbeit interessant sind die Teilarbeiten „Lastadaption in Mobilfunknetzen, mathematische Planungs- und Steuerungsansätze“ sowie „Adaptive Verfahren zum integrierten Netzmanagement von Dienstgüte und finanziellem Gewinn in 3G and Beyond“.

Die intelligente Verwaltung heterogener Funkressourcen ist ein wichtiger Förderungsschwerpunkt im sechsten und siebten EU IST Forschungsrahmenprogramm. Das CAUTION++ Projekt (2002-2005) [CAUTION] beschäftigte sich mit der Erfassung und Auswertung von Performanceindikatoren unterschiedlicher Funkzugangnetze, um eine gemeinsame Verwaltung der zur Verfügung stehenden Ressourcen zu ermöglichen. Das EVEREST Projekt (2004-2005) [EVEREST] beschäftigte sich mit Architekturvorschlägen für End-to-End QoS in einer kombinierten WWAN/WLAN Umgebung. Unterschiedliche CRRM-Prinzipien wurden untersucht. Vorgestellte Algorithmen waren „policy based“ und basierten entweder auf den Eigenschaften der angeforderten Dienste, der Last in den Zellen, der Signaldämpfung an der Position des Nutzers oder voreingestellten Prioritätslisten für Funkzugangstechnologien. Fortgesetzt wurden diese Arbeiten im AROMA Projekt (2006-2007) [AROMA]. Hier wurden weitere Algorithmen untersucht die letztendlich in eine „fittingness“ Metrik münden mit deren Hilfe CRRM-Entscheidungen getroffen werden können. Außerdem wurden Implementierungsvorschläge und betriebswirtschaftliche Aspekte von CRRM untersucht. Das Ambient Networks Projekt (2004-2007) [AN] widmete sich Architekturvorschlägen für die integrierte Nutzung verschiedener Funkzugangstechnologien. Es wurden Untersuchungen hinsichtlich der technologieübergreifenden Suche nach Funkzugangnetzen und dem effizienten Zugriff auf diese durchgeführt. Außerdem werden Verfahren für die Berücksichtigung der Kosten und Nutzerzufriedenheit vorgestellt.

Das ARAGORN Projekt (ab 2008) [ARAGORN] widmet sich der Entwicklung eines Cognitive Radio Managers der eine optimale Nutzung der Funkressourcen mit Hilfe von Konzepten aus dem Bereich der künstlichen Intelligenzforschung sicherstellen soll. Ein Prototypsystem soll entwickelt werden, welches im ISM Band (2.4 GHz) arbeiten soll.

Auch das E3 Projekt (ab 2008, Fortsetzung des E2R Projekts) [E3] beschäftigt sich mit der Realisierung eines Cognitive Radio Networks. Untersucht werden sollen Architekturvorschläge und Algorithmen die die Interoperabilität unterschiedlicher Funkzugangstechnologien und deren automatische Konfiguration bzw. „Selbstorganisation“ ermöglichen sollen. Der Begriff „self-x“ wird hier verwendet um mehrere Ebenen der Selbstorganisation in Funkzugangssystemen zusammenzufassen.

Zum Thema CRRM entstanden auch Dissertationen – teilweise im Zusammenhang mit den genannten DFG und EU-Projekten.

Matthias Hildebrand [Hild2005] stellt in seiner Arbeit Konzepte und Systemlevel-Simulationen für Intersystem-Handover Algorithmen für leitungs- und paketvermittelte Dienste zwischen UTRAN/GERAN vor. Untersucht wird der getragene Verkehr, Blockierungs- und Abbruchwahrscheinlichkeit, Durchsatz und die Kosten werden durch die Zahl der benötigten Intersystem-Handover berücksichtigt. Genutzt werden „policy based“ Algorithmen.

Telemaco Melia [Meli2007] stellt in seiner Arbeit Konzepte und System Level Simulationen für Intersystem-Handover Algorithmen für paketvermittelte Dienste zwischen UTRAN/WLAN vor. Untersucht werden „mobile initiated handover“ und „network initiated handover“ hinsichtlich Anzahl der Nutzer im System, Ablehnungswahrscheinlichkeit, Anzahl der Handover. Zusätzlich wird der Einfluss der Mobilität (Geschwindigkeit) des Nutzers für Handover von UTRAN zu WLAN hinsichtlich WLAN-Nutzungszeit, Zahl der Handover und Paketverluste untersucht.

Aurelian Bria [Bria2006] untersucht Konzepte und Algorithmen zur Multicast und Broadcast Übermittlung von Multimediainhalten über Funkzugangsnetze. Um dies zu verwirklichen untersucht er CRRM für UTRAN/GERAN/DVB-H und entwickelt Kostenfunktionen zur Abschätzung der Eignung der Netze für Multicast- bzw. Broadcast.

Mika Ylianttila [Ylia2005] stellt in seiner Arbeit Konzepte und Algorithmen für Intersystem-Handover zwischen GERAN und WLAN vor. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf die Einbeziehung von Ortsinformationen gelegt.

1.2.3 CRRM-Architekturvorschläge

Notwendige Architekturen, Funktionen und Schnittstellen, die eine gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen im Sinne von CRRM in 3G und 4G Funkzugangssystemen ermöglichen, werden in unterschiedlichen Arbeiten vorgestellt [HaVSW2001, KyKGCJ2003, LiLR2004, MaRG2007, McZ2004, MoMBBT2003, NaHH2006, PeSAKB2005, Sal2004, SaPG2007, SoJZS2005, SoZS2007]. Auch 3GPP widmet zwei Technical Reports dem Thema Architekturvorschläge für CRRM [TR 25.891, TR 25.881]. Weitere relevante Standardisierungsarbeiten sind unter IEEE 802.21 zu finden.

Interessante Architekturüberlegungen werden in [DePSTV2002] und [WuMH2002] angestellt. In [DePSTV2002] wird als Bestandteil eines „Service and Network Resource

Management“ ein „Network and Environment Simulator“ vorgestellt. Diese Simulationskomponente soll die Auswirkungen möglicher Entscheidungen in Echtzeit vorausberechnen und somit mögliche Fehlentscheidungen eines CRRM-Algorithmus abfangen. In [WuMH2002] wird ein Basic Access Network vorgeschlagen. Dieses drahtlose Netzwerk soll als allgemeines Signalisierungsnetzwerk den Zugang zu vorhandenen Funkzugangssystemen ermöglichen. Es soll durch niedrige Datenratenanforderungen hinsichtlich Reichweite und Energieeffizienz optimiert sein. Durch dieses Netz sollen aufwändige Suchvorgänge nach erreichbaren Funkzugangssystemen entfallen und eine Erweiterung der Infrastruktur um neue Funkzugangssysteme soll aufgrund einer gemeinsamen Basisinfrastruktur vereinfacht werden.

1.2.4 Methoden zur Analyse von CRRM-Szenarien und Algorithmen

Analytische Modelle zur Bestimmung möglicher Gewinne in CRRM-Szenarien:

Furuskär et al. [FuZa2005] stellt eine Methode zur analytischen Beschreibung der möglichen Vorteile der gemeinsamen Verwaltung von Funkzugangstechnologien vor. Er verwendet Kapazitätsregionen und bestimmt darüber mögliche Bündelungs- und Servicezuweisungsgewinne. Berggren et al. [BeLi2006] präsentiert ein analytisches Modell zur Untersuchung der Performance (Durchsatz, Transferzeit) co-lokierter interoperabler Funkzugangssysteme.

Analyse von CRRM-Algorithmen unter Verwendung von Markovmodellen:

Gelabert et al. [GePSA2008] stellt ein vielseitiges Markovmodell vor, mit dem die Performance (Blockierungswahrscheinlichkeiten, Getragener Verkehr, mittlere Auslastung, maximaler Durchsatz) unterschiedlicher „RAT-Selection-Policies“ untersucht werden kann. Diese „Policies“ können den Servicetyp, den Zustand des Funkzugangszernetzwerkes und die Eigenschaften des User Equipments berücksichtigen. Falowo et al. [FaCh2007] stellt einen „Joint Call Admission Control“-Algorithmus vor und analysiert diesen anhand eines Markovmodells hinsichtlich Blockierungs- und Abbruchwahrscheinlichkeiten sowie der mittleren Auslastung. Lincke [Linc2007] untersucht die Lastverteilung von paket- und leitungsvermittelten Diensten und diskutiert die Problematiken iterativer Lösungsverfahren für komplexe Markovmodelle in diesem Zusammenhang. Hasib et al. [HaFa2008] präsentiert einen CRRM-Algorithmus für Call Admission und Intersystem-Handover zwischen WWAN und WLAN Funkzugangstechnologien für RT und NRT Services. Über ein Markovmodell ermitteln sie Blockierungs- und Abbruchwahrscheinlichkeiten sowie Durchsatz und Servicekosten. Nasser [Nass2006] und Yu [YuKr2007] formulieren Markov-Entscheidungsprozesse für Intersystem-Handover zwischen WWAN und WLAN.

Analyse von CRRM-Algorithmen unter Verwendung von System Level Simulatoren:

Erste Untersuchungen zu möglichen Gewinnen (Blockierungswahrscheinlichkeit, Transferzeit, getragener Verkehr) von CRRM wurden von Tölli et al. [TöHH2002] durchgeführt. Sie untersuchen die gemeinsame Verwaltung von zwei WWAN Funkzugangstechnologien mit überlagerten Zellen unterschiedlicher Größe die Echtzeit- und interaktive Dienste bedienen sollten. Hildebrand et al. [HiGDSZ2004] untersuchen CRRM für WWAN für leitungs- und paketvermittelte Dienste hinsichtlich getragenen Verkehr, Blockierungs- und Abbruchwahrscheinlichkeit, Durchsatz und berücksichtigen die Kosten durch die Zahl der benötigten Intersystem-Handover. Baraev et al. [BaJL2005] untersuchen eine servicebasierte Call Admission für WWAN und WLAN hinsichtlich Blockierungswahrscheinlichkeit und Durchsatz. Piao et al. [PiDKS2006] untersuchen CRRM für WWAN hinsichtlich Blockierungs- und Abbruchwahrscheinlichkeiten und nimmt dabei Bezug auf benötigten Signalisierungsaufwand und die Aktualität der Lastinformationen.

Weiterhin wurden/werden in den oben genannten EU-Projekten komplexe System Level Simulatoren entwickelt.

Analyse von CRRM-Szenarien unter Verwendung von Messungen:

Reichl et al. [ReJFLU2005] liefern Messungen zur Performance von UMTS, GSM/GPRS und Handover-Zeiten innerhalb von IEEE802.11b Netzwerken. Renk et al. [ReKJCH2007] liefern Messungen zur Performance von UMTS und GSM/GPRS im Zusammenhang mit Großereignissen.

1.2.5 Algorithmen für CRRM

CRRM-Algorithmen können auf unterschiedlichen Ansätzen aus dem Bereich der Multikriterienoptimierung beruhen. Nachfolgend wird eine Übersicht über Algorithmen aus unterschiedlichen Teilbereichen angegeben. Die aufgezeigten Algorithmen verwenden hauptsächlich Access-Selection oder Handover, um eine optimale Zuordnung der Dienstverbindungen auf die Funkzugangsnetze zu erhalten. Die Anpassung der gebotenen Dienstqualität wird nur in wenigen Arbeiten als mögliche Option berücksichtigt.

Richtlinien (Policy)

Kaefle et al. [KaKY2005], Vanem et al. [VaSP2003], Ormond et al. [OrMM2006] treffen die CRRM-Entscheidung anhand von Funktionen, die die Nutzerzufriedenheit abbilden. Wang et al. [WaANPS2007] und Inzerilli [InVNC2008] verwenden die Signal-dämpfung als Entscheidungsgrundlage. Mirmotahary et al. [MiMAK2008] stellen einen Intersystem-Handover-Algorithmus vor, der auf der Geschwindigkeit des Nutzers und der empfangenen Signalstärke basiert. Bejaoui et al. [BeNa2009] und Zhu et al. [ZhMc2006] definieren Kostenfunktionen für die Kombination von nutzer- und netzwerk-basierten Einflüssen.

Agentensysteme

Xie et al. [XiHR2007] entwickeln ein Multiagentensystem für den Informationstransfer und die Steuerung benachbarter WLAN.

Lotka-Volterra-Konkurrenzgleichungen

Chen et al. [ChYYFJ2006] entwickeln einen Call Admission Algorithmus basierend auf dem „Kampf um Ressourcen“ konkurrierender Spezies.

Knapsack-Algorithmen

Xing et al. [XiVe2005] und Mariz et al. [MaCSF2006] bilden CRRM auf ein Knapsack-Problem ab. Blau et al. [BIWKS2007] formulieren Kostenfunktionen für den Ressourcenverbrauch und suchen die optimale Lösung über Lineare Programmierung.

Genetische Algorithmen

De Sousa et al. [SoNCCP2005] definieren Kostenfunktionen und Karabudak et al. [KaHB2004] definieren einen Markov-Entscheidungsprozess. Genetische Algorithmen werden in beiden Arbeiten verwendet um darauf basierend die optimale Zuordnung der Dienste zu den Funkzugangssystemen zu finden.

Fuzzy-Logik/Neurale Netzwerke

Chan et al. [ChSHCT2001] stellen erste Überlegungen zur Verwendung von Fuzzy-Logik für CRRM an. Murray et al. [MuPe2007] verwenden Kapazitätsregionen und eine Kostenfunktion, um über genetische Algorithmen eine optimale Dienstzuordnung zu finden. Fuzzy-Logik wird verwendet um einen optimalen Zeitpunkt für einen Intersystem-Handover zu ermitteln. Giupponi et al. [GiAPS2006] und Horrich et al. [HoJG2007] präsentieren einen Fuzzy-Neural-Regler in dem die Regeln der Fuzzy-Logik für CRRM-Entscheidungen kontinuierlich über Reinforcement-Learning angepasst werden. Falowo et al. [FaCh2006] präsentieren einen einfachen auf Fuzzy-Logik basierenden „Joint Call Admission“ Algorithmus.

Spieltheorie

Demestichas et al. [DeSt2004] stellen Überlegungen zur Preisfestlegung und der Anwendung der Spieltheorie für den Ressourcenaustausch zwischen Netzbetreibern an. Suliman et al. [SuPO2004] verwenden Konzepte der kooperativen Spieltheorie und Niyato et al. [NiHo2008] verwenden nichtkooperative Spieltheorie, um eine optimale Ressourcenaufteilung zu finden.

1.2.6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung neuer Algorithmen oder Architekturen für CRRM. Dabei stehen in den meisten Arbeiten zu CRRM-Algorithmen die erreichten Gewinne im Vordergrund. In wenigen Fällen wurden auch

die Anzahl der verursachten Handover oder die Aktualität der Informationen berücksichtigt. (z.B. [HiGDSZ2004, PiDKS2006, AN]). Die Methoden der Erfassung der benötigten Eingabeparameter und der Transport der Entscheidungen wurden vernachlässigt und eine Untersuchung der Eignung für dezentrale und zentrale Szenarien oder Stabilitätsuntersuchungen wurden nicht durchgeführt. Die Arbeiten zu Architekturen konzentrieren sich auf benötigte Strukturen und Protokolle um CRRM zu ermöglichen. Die EU-Projekte aus Abschnitt 2.1.4 untersuchen unter Verwendung sehr detaillierter Systemlevel-Simulatoren neue Konzepte für CRRM. Besonders das Ambient Networks Projekt beschäftigt sich mit Ansätzen für Kosten-Nutzenanalysen. Die Ansätze sind jedoch oft sehr speziell und schlecht übertragbar. Ein allgemeiner Ansatz der versucht Strukturinformationen und Algorithmen zusammenzuführen erscheint wünschenswert und ist ein Ziel dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.3.1)

1.3 Inhalt der Arbeit

1.3.1 Ziele

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Modellierungsframework für die technologieübergreifende Verwaltung von Ressourcen heterogener Funkzugangsnetze (Common Radio Resource Management – CRRM) entwickelt. Das Ziel bei der Entwicklung des Modellierungsframeworks ist es, ein weites Spektrum an möglichen CRRM-Einsatzszenarien abbilden zu können. Um dies zu erreichen, ist es erforderlich die Komponenten des Modellierungskonzeptes so zu gestalten, dass sie einfach kombinierbar sind. Besonders die Definition von zentralen bis dezentralen CRRM-Strukturen soll dadurch einfach möglich sein. Dabei ermöglicht eine klare Struktur des zugrunde liegenden Modells die einfache Übertragung von Lösungsmethoden aus dem Gebiet der Multikriterienoptimierung.

Das Einsatzgebiet des Modellierungsframeworks ist die Prototypentwicklung und der Test von CRRM-Algorithmen, bei der das Erfassen, Übertragen und Verwalten benötigter Informationen Beachtung findet. In diesem Zusammenhang soll eine in bisherigen Arbeiten oft vernachlässigte Kosten-/ Nutzen-Analyse und die Analyse des Einflusses gealterter Informationen möglich sein. Hierfür ist es notwendig ein geeignetes Kostenmodell zu entwickeln, welches Kosten mit CRRM-Aktionen verknüpfen kann. Kosten geben hierbei den Aufwand einer Operation hinsichtlich des Gebrauchs von Betriebsmitteln und den Zeitverbrauch für diese Operation wieder.

Als Bestandteil des Modellierungsframeworks wird ein HEKATE genannter Simulator entwickelt, der das Modellierungskonzept umsetzt. Dieser Simulator stellt die relevanten Eigenschaften der Funkzugangssysteme und der Verbindungen bereit, welche als Eingabewerte für die CRRM-Algorithmen genutzt werden. Unter anderem den Ressourcenverbrauch in einem Funkzugangssystem und pro Verbindung, die geforderte und erzielte Dienstqualität einer Verbindung und die Empfangssituation für an der Position

eines Nutzerendgerätes vorhandener Funkzugangssysteme sowie weitere in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 aufgeführte Eigenschaften. Die Werte dieser Eingabeparameter repräsentieren die aktuelle Situation im Gesamtsystem, welche durch die Mobilität und wechselnden Dienstanforderungen ständigen Änderungen unterworfen ist. HEKATE wird so konzipiert, dass Änderungsvorgänge durch die Interaktion der simulativen Teilmodelle zeitgetreu nachgebildet werden. Die Information über die Änderung des Systemzustandes ist dabei lokal in den Komponenten des Simulators vorhanden und muss über Messungen ermittelt sowie über Nachrichtenaustausch an andere Komponenten weitergeleitet werden. Um CRRM-Abläufe korrekt nachbilden zu können, muss der Nachrichtenaustausch die Transportzeiten und Kommunikationswege berücksichtigen.

Zur Erleichterung der Übertragung von Lösungsmethoden aus dem Gebiet der Multikriterienoptimierung, wird zwischen der Informationssammlung und Speicherung sowie der Verarbeitung der Daten (bzw. der Entscheidungsfindung) unterschieden. Dies soll durch die Definition eines Informationsmanagers und eines Entscheiders erreicht werden, wobei jeder geeignete Algorithmen benötigt. Diese Trennung in zwei Aufgabenbereiche ermöglicht auch eine vereinfachte Wiederverwendung und Optimierung der Algorithmen in unterschiedlichen Szenarien.

Gerade auf dem Gebiet des CRRM entstehen durch die Betrachtung unterschiedlicher Funkzugangstechnologien, Hierarchieebenen und Zell-Layouts schnell komplexe Szenarien. Die Zielsetzung einer Prototypentwicklung erfordert möglichst kurze Simulationslaufzeiten, um schnell auch umfangreiche Szenarien und mehrere Varianten von Algorithmen oder Parametersätzen untersuchen zu können. Die Verwendung eines hybriden Simulationsmodells soll die simulative Untersuchung dieser Szenarien bei geringer Simulationsdauer ermöglichen. Die simulativen Teilmodelle geben die Dynamik des Gesamtsystems wieder und ermöglichen die Interaktion von analytischen Teilmodellen. Die analytischen Teilmodelle werden verwendet, um den Ressourcen- und Zeitaufwand für die Simulation eines umfangreichen Szenarios zu minimieren - unter Beibehaltung einer ausreichend genauen Abbildung des realen Verhaltens des Gesamtsystems. Die Einschränkung auf die Betrachtung von CRRM-Szenarien mit geringer und mittlerer CRRM-Integrationsstufe (siehe Abschnitt 2.4.2) dient zusätzlich der Verminderung der Komplexität des Simulators.

Ein weiteres Ziel bei der Entwicklung des Simulationsmodells für HEKATE, ist die Abbildung des generellen Verhaltens von Funkzugangssystemen basierend auf unterschiedlichen Funkzugangstechnologien. Es soll einfach möglich sein, den Simulator um unterschiedliches Funkzugangstechnologieverhalten zu erweitern. Es wird daher darauf verzichtet spezielle technologiespezifische Protokollabläufe und Feinstrukturen abzubilden. Im Zentrum der Überlegungen liegt die Abbildung des Ressourcenverbrauchs für bestimmte Dienstqualitätseigenschaften einer Verbindung. Dabei wird ermittelt wie viel Zellressourcen für die Bereitstellung von Verbindungen verbraucht werden und wie viele Verbindungen eines Typs von einer Zelle einer bestimmten Funkzugangstechno-

logie getragen werden können. Weiterhin wird die gegenseitige Beeinflussung der aktiven Verbindungen abgebildet. Dazu zählen das Erfassen von Interferenzstörungen bei gemeinsamer Nutzung der Ressourcen einer Zelle über eine Heuristik und die Approximation der Veränderung der Übertragungszeit von Datenpaketen bei gemeinsamer Nutzung eines Kanals.

Zusammenfassend soll HEKATE die Dynamik und das generelle Verhalten eines Gesamtsystems bestehend aus mehreren Funkzugangssystemen basierend auf unterschiedlichen Funkzugangstechnologien und mehreren aktiven Nutzerendgeräteklassen abbilden. Als Entwicklungswerkzeug für CRRM-Algorithmen soll es die für CRRM relevanten Parameter bereitstellen und somit die spätere Implementierung der entwickelten CRRM-Verfahren vorbereiten.

1.3.2 Begriffe

Da diese Arbeit viele Abkürzungen und Formelzeichen enthält, werden dem Leser folgende Hilfen angeboten: Neben dem Abkürzungsverzeichnis (Seite XV) und dem Formelverzeichnis (Seite XVII) wird im Index (Seite XXVIII) der Ort der Definition und Verwendung der Formelzeichen bzw. der Abkürzungen angegeben.

Der als Bestandteil des Modellierungsframeworks entwickelte Simulator wird HEKATE genannt. **HEKATE** ist die griechische Göttin der Türschwellen, der Wegkreuzungen und eine Wächterin der Tore zwischen den Welten.

Ein **Funkzugangssystem** (engl. Radio Access System – RAS) ist eine Menge von Funkressourcen die über ein lokales Ressourcenverwaltungssystem (engl. Radio Resource Management – RRM) verfügen. Dies kann je nach Funkzugangstechnologie ein Zellsektor, eine einzelne Zelle, oder eine Gruppe von Zellen sein.

Eine **Funkzugangstechnologie** (engl. Radio Access Technology - RAT) ist eine standardisierte Sammlung von Protokollen und Verfahren, die die drahtlose Übertragung von Information ermöglicht.

Ein **Nutzerendgerät** (engl. User Equipment - UE) kann basierend auf einer Funkzugangstechnologie Verbindungen zu Funkzugangssystemen aufbauen und dem Nutzer dadurch die mobile Nutzung von Diensten ermöglichen.

In dieser Arbeit wird die Übergabe von Verbindungen zwischen Ressourcen innerhalb eines Funkzugangssystems **Intrasystem-Handover** (RAS HO) genannt (in der Literatur auch als horizontaler Handover bezeichnet). Wenn Verbindungen zwischen Funkzugangssystemen übergeben werden, wird dies **Intersystem-Handover** (ISHO) genannt (in der Literatur auch als vertikaler Handover bezeichnet).

Die folgenden Begriffe Dienst, Verbindung, Nutzer, Nutzerendgerät werden in der Arbeit stellenweise synonym verwendet. Daher folgende Klarstellung:

Ein Nutzer verwendet einen Dienst und benötigt dafür eine Verbindung, die über ein Nutzerendgerät hergestellt wird. Ressourcen belegt dabei nicht der Dienst selbst, sondern die Verbindung die benötigt wird, um den Dienst zu erbringen.

Die Begriffe „**Dienst**“, „**Dienstverbindung**“ oder „**aktiver Dienst**“ bezeichnen daher Verbindungen, die den Nutzern von Nutzerendgeräten aktuell einen bestimmten Dienst zur Verfügung stellen. Die Begriffe „**aktive Verbindung**“, „**aktiver Nutzer**“ werden dazu oft synonym verwendet, wobei ein Nutzer und ein Nutzerendgerät theoretisch mehr als eine aktive Verbindung besitzen können – auch zu unterschiedlichen Funkzugangssystemen. Die Mobilität der Nutzer schließt auch die Mobilität der Nutzerendgeräte ein und umgekehrt. Ein Nutzer kann theoretisch jedoch mehr als ein Nutzerendgerät verwenden.

Wenn ein Dienst, Nutzerendgerät oder Nutzer von einem Funkzugangssystem an ein anderes „übergeben“ wird, bezieht sich dies immer auf die Übergabe der zugeordneten Verbindungen. Es ist möglich, dass ein Nutzer bzw. Nutzerendgerät Verbindungen zu mehr als einem Funkzugangssystem unterhält.

Der Begriff **Grenzwert** wird in dieser Arbeit im Sinne eines Schwellwertes verwendet. Grenzwerte können daher überschritten werden.

Der Begriff **Szenario** dient in dieser Arbeit als Oberbegriff für die Gesamtheit der Eigenschaften des betrachteten Systems. Er umfasst Struktur- sowie Anwendungsszenario. Zum Strukturszenario gehören die vorhandenen Komponenten und Kommunikationswege in mobilen Kommunikationssystemen. Zum Anwendungsszenario gehört die Beschreibung der Eigenschaften der Umwelt und der Nutzerendgeräte. HEKATE wurde für die Entwicklung von CRRM-Algorithmen entwickelt. Aus Sicht der CRRM-Algorithmen ist die Struktur der Kommunikationssysteme ebenso Bestandteil des Einsatzszenarios wie die Umwelt, die auf das Kommunikationssystem einwirkt.

Die in Kapitel 5 und 6 gemachten Angaben zur verbrauchten **CPU-Zeit** und den benötigten **Hauptspeicher** beziehen sich auf einen Arbeitsplatzrechner mit Intel Core 2 Duo E8400 3 GHz CPU und 4 GByte Hauptspeicher. Die Angaben wurden unter openSUSE 11 über das Werkzeug „top“ ermittelt.

1.3.3 Aufbau

Kapitel 1 beschreibt die Motivation und Zielstellungen dieser Arbeit. Außerdem wird der aktuelle Stand der Forschung dargelegt.

Kapitel 2 enthält eine Erläuterung von CRRM. Dabei werden Ziele, Voraussetzungen und mögliche Gewinne beschrieben. Besonderes Augenmerk wird auf die Ermittlung von generellen Eigenschaften von CRRM gelegt - als Basis für eine Abstrahierung und Kategorisierung von realen CRRM-Szenarien.

Kapitel 3 enthält das Modellierungskonzept für CRRM-Szenarien und Hinweise zur Umsetzung.

Kapitel 4 beschreibt aufbauend auf den Überlegungen in Kapitel 3 die Umsetzung des Modellierungskonzepts in ein Simulationsmodell.

Kapitel 5 enthält eine Analyse des Verhaltens der analytischen und simulativen Teile des implementierten Simulationsmodells aus Kapitel 4. Zusätzlich wird das Verhalten des Simulators durch vergleichende Untersuchungen mittels Simulationsstudien überprüft.

Kapitel 6 enthält Anwendungsbeispiele für die Verwendung des Simulators. Die Möglichkeiten des Simulators und die mit dem Simulator durchgeführten Untersuchungen werden dargestellt.

Kapitel 7 stellt eine Zusammenfassung dieser Arbeit zur Verfügung.

Kapitel 8 gibt einen Ausblick auf mögliche Fortführungen.

2 Gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen, um von realen CRRM-Szenarien abstrahieren zu können und um das in Kapitel 3 vorgestellte Modellierungskonzept zu begründen. Der Inhalt dieses Kapitels basiert auf einer Verallgemeinerung und Zusammenfassung der in Abschnitt 1.2 angegebenen Literatur. Falls eine Zuordnung zu Referenzen direkt möglich ist, wird diese angegeben.

In Abschnitt 2.1 werden die Ziele und Einflussfaktoren im Zusammenhang mit CRRM aufgeführt. Daran anschließend folgen Betrachtungen zu möglichen Gewinnen im Abschnitt 2.2 und zu Voraussetzungen, um diese mit CRRM erzielen zu können (Abschnitt 2.3). In Abschnitt 2.4 werden die grundlegenden Strukturen des CRRM beschrieben.

2.1 Ziele und Einflussfaktoren

Ziel des CRRM ist es die vorhandenen Funkressourcen optimal auszunutzen, um den Nutzer die geforderte Dienstqualität unter möglichst geringem Kostenaufwand zur Verfügung zu stellen. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Anforderungen und Eigenschaften des Nutzers sowie die Eigenschaften der Funkressourcen. Aus der Vielzahl von Eigenschaften und Anforderungen der Nutzer und Funkressourcen ergibt sich ein Multikriterien-Optimierungsproblem. Die (sich widersprechenden) Teilziele dieses Optimierungsproblems sind:

- zufriedene Nutzer
- minimaler Ressourcenaufwand (Energieaufwand, Infrastrukturkosten etc.)

Um diese Teilziele zu erreichen, müssen verschiedene Aspekte geeignet bewertet und zusammengefasst werden. Je nach Lösungsalgorithmus fließen dabei unterschiedliche Einflussfaktoren ein. Die Funkressourcen werden von Funkzugangssystemen zur Verfügung gestellt. Eigenschaften der Funkzugangssysteme, die für das CRRM relevant sein können, werden in Tabelle 2.1 dargestellt. Die Nutzer verwenden Nutzerendgeräte, um Dienste nachzufragen. Für das CRRM können die in Tabelle 2.2 aufgeführten Eigenschaften der Verbindungen eines Nutzerendgeräts relevant sein. Die Eigenschaften werden teilweise vom Nutzer oder vom Nutzerendgerät auf die Verbindung vererbt.

Tabelle 2.1 Für CRRM-relevante Eigenschaften der Funkzugangssysteme

Eigenschaft/Merkmal	Präzisierung
Gebotene Dienstqualität (aktuell, maximal, minimal)	Datenrate, Paketverzögerung (Delay), Verzögerungsschwankungen (Jitter), Übertragungsfehlerwahrscheinlichkeit, Sicherheit, etc.
Unterstützung von Qualitätsgarantien	Priorisierung von Verbindungen
Unterstützte Verbindungsarten	Paket-/leitungsvermittelt, Punkt-zu-Punkt, Broadcast, Multicast, unidirektional, bidirektional
Eigenschaften der Funkverbindung	Frequenz, Signaldämpfung (zur Basisstation, zum Nutzerendgerät), Kodierung, Multiplexvarianten (Code, Frequenz, Zeit, Raum)
Zelleigenschaften	Abdeckungsgebiete, Topologie der Umgebung, aktueller Zustand (z.B. Auslastung, Anzahl aktiver/inaktiver Verbindungen) Unterstützte Funkzugangstechnologien Handover-Unterstützung (Soft-, Hard-Handover, Handover-Fehler)
Kostenstruktur	Energieverbrauch, Nutzungskosten (Betreiber, Nutzer)
Administrative Eigenschaften	Betreiberzugehörigkeit, Nutzungserlaubnis (Roaming)
Zeitverbrauch	Zeitverbrauch für bestimmte Aktionen (Handover-Dauern, Messzeiten, Verbindungsaufbau etc.)

Tabelle 2.2 Für CRRM-relevante Eigenschaften der Verbindungen

Eigenschaft/Merkmal	Präzisierung
Nachgefragte Dienstqualität	maximal, minimal
Ressourcenverbrauch	Im Nutzerendgerät, Anteil an den belegten Ressourcen des Funkzugangssystems
Unterstützte Funkzugangstechnologien und Verbindungsarten	Grundsätzlich, gleichzeitig
Mobilitätsparameter	Geschwindigkeit, Position, Richtung
Kundentyp	Premiumkunde, „Best Effort“, „On Demand“, „Flatrate“
Zeitverbrauch	Zeitverbrauch für bestimmte Aktionen (Messzeiten, etc.)

Die in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 beschriebenen Einflussfaktoren unterliegen dabei einer zeitlichen Änderung und Dynamik, die im Wesentlichen von den im Bild 2.1 abgebildeten Faktoren beeinflusst wird:

- Mobilität der Nutzer
- Dienstanforderung der Nutzer
- Empfangssituation der Funkzugangssysteme an der Position der Nutzer

Durch die wetterabhängige Freiraumdämpfung und Hindernisse in der Umgebung (Abschattung, Reflexion, Streuung, Beugung) ist die Signalqualität der Funkzugangssysteme an der Position eines Nutzers Änderungen unterworfen. Es entsteht dadurch die Situation, dass an unterschiedlichen Positionen unterschiedliche Funkzugangssysteme empfangbar sind.

Dies führt dazu, dass den Nutzerendgeräten a, b und c (Bild 2.1) ortsabhängig unterschiedliche Funkzugangssysteme basierend auf unterschiedlichen Technologien zur Verfügung stehen. Der Einfluss der Umwelt (losgelöst von der Mobilität) erzeugt Änderungen mit meist geringerer Dynamik und auf einer längerfristigen Zeitachse - verglichen mit den anderen Einflussfaktoren. Die Nutzer bewegen sich entsprechend ihrer Mobilitätsparameter durch die Umwelt (z.B. von Position a zu Position c). Diese Bewegung erzeugt durch die Positionsänderung eine relativ starke Dynamik in den Empfangseigenschaften der Verbindung eines Nutzerendgeräts zum Funkzugangssystem. Dies kann bis zum Verbindungsabbruch führen. Zusätzlich dazu kann der Nutzer während der Bewegung andere Dienste anfordern bzw. andere Nutzer können neue Dienstverbindungen anfordern (z.B. der Wechsel von einer Webanwendung zu einem Sprachdienst und danach zu E-Mail). Diese Menge der Dienstansforderungen aller Nutzer ist ebenfalls starken Änderungen unterworfen. Außerdem beeinflussen die Dienstansforderungen der Nutzerendgeräte auch die Empfangssituationen anderer Nutzerendgeräte durch Interferenzstörungen je nach Position der Nutzerendgeräte.

Dies bedeutet, dass jede gefundene Lösung des Multikriterien-Optimierungsproblems eine teilweise sehr begrenzte Gültigkeitsdauer besitzt. Es muss also sichergestellt werden, dass die Lösung innerhalb eines entsprechend kurzen Zeitrahmens gefunden und umgesetzt werden kann. Es darf durch die Umsetzung kein zu hoher Aufwand entstehen. Ein wichtiger Aspekt in dieser Hinsicht ist die Vermeidung von kurzfristig gegenläufigen Entscheidungen (z.B. ständige Handover zu und weg von einer Zelle – auch Ping-Pong-Handover genannt).

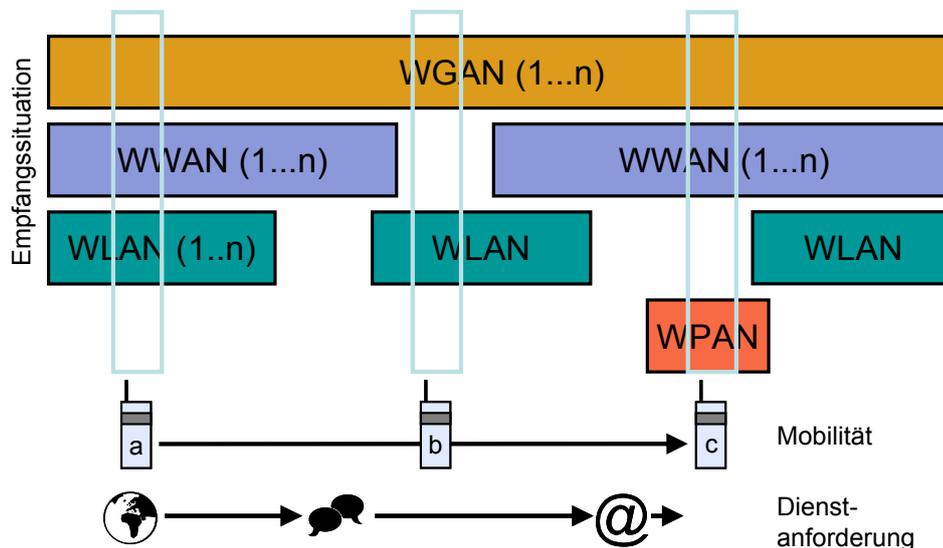


Bild 2.1 Dynamik des CRRM-Multikriterien-Optimierungsproblems

Hinweis: Die verschiedenen Funkzugangstechnologien können entsprechend der Größe ihrer Abdeckungsgebiete grob in vier Klassen unterteilt werden: WGAN, WWAN, WLAN, WPAN. Nähere Informationen dazu im Abschnitt 2.3.2 Seite 19.

2.2 Betrachtungen zu möglichen Gewinnen

Verschiedene theoretische und praktische Untersuchungen zeigen, dass durch die gemeinsame Nutzung der Ressourcen der Bündelungsgewinn (z.B. [TöHH2002]) und zusätzlich ein Servicezuweisungsgewinn [FuZa2005] genutzt werden kann. Außerdem entsteht durch die gemeinsame Verwaltung der Vorteil, dass die Reservekapazitäten für Lastspitzen in den einzelnen Systemen verringert werden können. Erreicht wird dies durch die Verteilung von Lastspitzen auf mehrere Funkzugangssysteme (z.B. [PiDJMT2004]).

Bündelungsgewinn

Ein Gewinn durch Bündelung (im Sinne des Begriffs Bündelungsgewinn) entsteht immer dann, wenn vorher getrennte Ressourcen gemeinsam verwaltet werden und die Ankunfts- und/oder Bedienzeitverteilungen der Dienstanforderungen stochastisch sind. Der stochastische Charakter der Verteilungen ermöglicht die Belegung von zufällig freien Ressourcen. Je mehr Ressourcen zur Verfügung stehen, umso wahrscheinlicher ist eine Ressource zufällig frei. Ein Gewinn im Sinne von höherer Ausfallsicherheit durch Redundanz entsteht auch unabhängig von einer stochastischen Verteilung des Dienstanforderungsprozesses. Der Gewinn durch Redundanz äußert sich oftmals besonders in der Vergrößerung des Abdeckungsgebietes durch Kombination der Abdeckungsgebiete mehrerer Funkzugangssysteme.

Ursprünglich definiert wurde der Bündelungsgewinn für $M/M/m/m$ -Verlustsysteme. Für diese Systeme kann der Bündelungsgewinn mit der Erlang-B-Formel quantitativ errechnet werden. Wenn die Zahl der gemeinsam verwalteten Ressourcen (hier Bediener bzw. Kanäle) steigt, sinkt die Blockierungswahrscheinlichkeit für neu ankommende Dienstanforderungen bei konstant gehaltener mittlerer Auslastung der Ressourcen. Dieser Effekt ist nichtlinear und schwächt sich ab für hohe Ressourcenzahlen.

Aber auch für Warte-Verlustsysteme und für reine Wartesysteme mit unbeschränkter Wartemöglichkeit (siehe z.B. Erlang-C-Formel) entsteht ein Gewinn durch die gemeinsame Verwaltung. Für Wartesysteme äußert sich dieser Gewinn durch kleinere Warte-wahrscheinlichkeiten und daraus folgend geringeren Wartezeiten. Für quantitative Ergebnisse zu M/M -Systemen siehe z.B. [Klei1975]

Servicezuweisungsgewinn

Ein Gewinn basierend auf Servicezuweisungen entsteht immer dann, wenn Ressourcen unterschiedliche Kapazitäten für bestimmte Dienstypen aufweisen. Die gemeinsame Verwaltung ermöglicht im einfachsten Fall die Wahl der Ressource mit der höchsten Kapazität für Verbindungen eines bestimmten Dienstyps; somit erhält man die größtmögliche Gesamtkapazität für die vorhandenen Ressourcen. Der Servicezuweisungsgewinn ist daher die Differenz der neuen größtmöglichen Gesamtkapazität zu der Summe der Einzelkapazitäten der Ressourcen für den gemischten Dienstanforderungsstrom.

Der mögliche Servicezuweisungsgewinn hängt ab von den Kapazitätsunterschieden der Ressourcen für unterschiedliche Diensttypen und dem Mischungsverhältnis der aktiven Verbindungen dieser Diensttypen. Für einzelne Ressourcen können Kapazitätsregionen definiert werden. Eine Kapazitätsregion definiert für unterschiedliche Mischungsverhältnisse der Diensttypen, wie viele Verbindungen mit unterschiedlichen Diensttypen von der Ressource maximal mit der erforderlichen minimalen Dienstqualität versorgt werden können. Das Bild 2.2 zeigt beispielhaft verschiedene Grundtypen für Kapazitätsregionen basierend auf zwei Diensttypen. Als Diensttypen wurden zur Veranschaulichung Sprachdienste (s) und Datendienste (d) gewählt. Die erste Kapazitätsregion aus dem Bildteil a) ist konkav. Für konkave Kapazitätsregionen gilt, dass die Gesamtkapazität der Ressource verringert wird, falls unterschiedliche Diensttypen gleichzeitig aktiv sind. Für die in Bildteil b) dargestellte konvexe Kapazitätsregion gilt hingegen, dass die Gesamtkapazität steigt, falls unterschiedliche Diensttypen gleichzeitig aktiv sind. Eine gemeinsame Verwaltung der Ressourcen sollte also für die Ressource aus a) das Mischungsverhältnis (d_i, s_i) möglichst vermeiden und für die Ressource aus b) das Mischungsverhältnis (d_i, s_i) möglichst anstreben. Die Ressource aus c) ist besser geeignet um Datendienste anzubieten, Ressource d) ist besser geeignet um Sprachdienste anzubieten. Eine gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen sollte daher möglichst Datenverbindungen in Ressource c) verschieben und Sprachverbindungen in Ressource d) verschieben, um eine maximale kombinierte Gesamtkapazität zu erreichen.

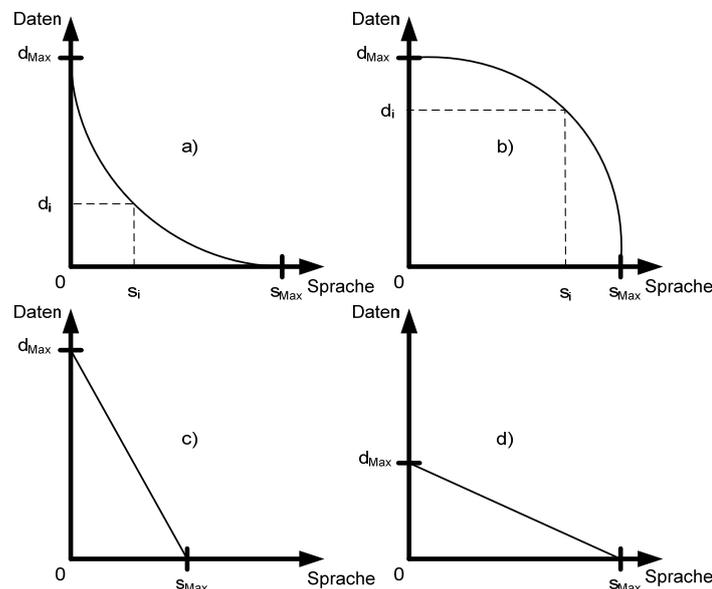


Bild 2.2 Unterschiedliche Kapazitätsregionen von Ressourcen

2.3 Infrastrukturelle Voraussetzungen

Aufbauend auf die in Abschnitt 2.1 identifizierten Einflussfaktoren kann verallgemeinert werden: Voraussetzung für die gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen verschiedener Funkzugangssysteme ist deren örtliche Verfügbarkeit und die technische Unterstützung der Nutzerendgeräte, die am Kommunikationsprozess mit dem System beteiligt sind. Es muss zum einen ein geeigneter Informationsaustausch über den aktuellen Zustand der Komponenten des Gesamtsystems definiert werden. Zum anderen müssen geeignete Protokolle für die Weiterleitung und Umsetzung von CRRM-Kommandos etabliert werden. Außerdem müssen die von den aktiven Diensten der Nutzerendgeräte gestellten Dienstqualitätsanforderungen von den jeweiligen Funkzugangssystemen unterstützt werden.

2.3.1 Nutzerendgeräte (UE)

Die Nutzerendgeräte müssen über die Möglichkeit verfügen eine Verbindung mit unterschiedlichen Funkzugangssystemen aufnehmen zu können. Im Idealfall sollten Verbindungen über verschiedene Funkzugangstechnologien unterstützt werden. Generell wird bei heutigen CRRM-Überlegungen häufig davon ausgegangen, dass ein Nutzerendgerät zwar mehrere Funkzugangstechnologien unterstützt diese aber nicht gleichzeitig nutzen kann. Nutzerendgeräte, die Verbindungen über mehr als eine Funkzugangstechnologie gleichzeitig unterstützen, sind aber schon heute verbreitet z.B. Bluetooth und UMTS. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden aufgrund der Systemkosten und des Energieverbrauchs nicht alle Nutzerendgeräte alle möglichen Funkzugangstechnologien unterstützen. Aus diesem Grund entsteht die Situation, dass einige Nutzerendgeräte manche örtlich verfügbaren Funkressourcen nicht nutzen können, andere hingegen schon und wenige sogar gleichzeitig. Das Problem der gleichzeitigen Nutzung verschiedener Funkzugangstechnologien betrifft auch das Ermitteln der verfügbaren Funkzugangssysteme und deren Empfangsqualität an der Position des Nutzerendgeräts. Wenn ein Nutzerendgerät nicht in der Lage ist, alle Frequenzbänder der von ihm unterstützten Technologien gleichzeitig abzuhören, muss es die bisherige Verbindung kurz unterbrechen, um Informationen zu sammeln. Entsprechende Messungen sind dann nur möglich, wenn dieses Verfahren unterstützt wird (z.B. existiert für UMTS der Compressed Mode [HoTo2001]).

Die Nutzerendgeräte verfügen über unterschiedliche Fähigkeiten und Eigenschaften. Auch die Signalqualität der Funkzugangssysteme an der Position des Nutzerendgerätes muss über Messungen ermittelt werden. Daher ist es notwendig, dass den CRRM-Komponenten diese Informationen bekannt sind. Es muss also ein geeigneter Informationssammel- und Informationsübertragungsmechanismus über entsprechende Protokolle implementiert werden.

2.3.2 Funkzugangstechnologien (RAT)

Um eine gemeinsame Verwaltung der Funkressourcen zu erreichen, müssen die einzelnen Funkzugangssysteme räumlich überlagert verfügbar sein. Momentan existieren auf verschiedenen Technologien basierende Funkzugangssysteme. Sie wurden jeweils für bestimmte Aufgabenstellungen entwickelt und besitzen daher unterschiedliche Reichweiten sowie unterschiedliche Dienstqualitätsangebote. Eine grobe Klassifizierung der einzelnen Technologien ist hinsichtlich der Größe ihrer zusammenhängenden Abdeckungsgebiete möglich. Wireless Global Area Networks (WGAN) sind satellitengestützte Netzwerke, die ein oder mehrere Kontinente abdecken. Wireless Wide Area Networks (WWAN) sind landgestützte infrastrukturbasierte Netzwerke, die typischerweise ganze Länder oder große Regionen abdecken. Wireless Local Area Networks (WLAN) decken Gebiete mit einem Radius von wenigen hundert Metern ab. Wireless Personal Area Networks (WPAN) sind nur in der Lage den Nahbereich von wenigen Metern um ein Nutzerendgerät herum abzudecken. Einige Autoren definieren noch die Klasse der Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN), die wegen der unscharfen Abgrenzung hier der Klasse der WWAN zugeordnet wird. Es kann grob von folgendem Zusammenhang ausgegangen werden: Je älter die Technologie und je größer ihr Abdeckungsgebiet umso kleiner ist die maximal zur Verfügung gestellte Dienstqualität hinsichtlich Performance (Datenraten, Delay, etc.). Ausnahmen sind hier andere Dienstqualitätsparameter wie zum Beispiel Sicherheit. Als Überblick über die aktuelle Situation sind in Tabelle 2.3 einige Funkzugangstechnologien mit ihren maximalen Bruttodatenraten in Downlink-Richtung angegeben.

Tabelle 2.3 Aktuelle Funkzugangstechnologien mit ihren maximalen Downlink-Bruttodatenraten

Klassifizierung	Technologie (max. Bruttodatenrate im Downlink)
WGAN	Inmarsat (492 kbit/s), Thuraya (60 - 144 kbit/s), Iridium (10 kbit/s), ASTRA2Connect (2 Mbit/s)
WWAN	UMTS-HSDPA (14,4 Mbit/s), UMTS-LTE (326 Mbit/s - 1 Gbit/s), GSM-GPRS (171,2 kbit/s), GSM-EGPRS (473,6 kbit/s - 1 Mbit/s), WiMAX (109 Mbit/s - 1 Gbit/s), DVB-H (15 Mbit/s)
WLAN	802.11b,n (11 - 600 Mbit/s), HIPERLAN2 (54 Mbit/s)
WPAN	Bluetooth 3 (2,2 - 480 Mbit/s), IrDA (16 Mbit/s), DECT (552 kbit/s), WirelessHD (25 Gbit/s), W-USB (480 Mbit/s)

Hinweis: Die technische Entwicklung in diesem Bereich schreitet sehr schnell voran. Die angegebenen Datenraten basieren daher auf Wikipedia-Informationen [Wiki2009] und sollen der Orientierung des Lesers dienen.

Die Technologien von WPAN bis WWAN besitzen eine zellulare Struktur (Raummultiplexing der Frequenzen), um die zur Verfügung stehenden Frequenzbänder besser nutzen zu können. Zusätzlich werden zur weiteren Optimierung des Zugriffs innerhalb des

zur Verfügung stehenden Frequenzbereichs weitere Hierarchieebenen geschaffen, indem unterschiedliche Zellgrößen erzeugt werden. Durch die unterschiedlichen Technologien und genutzten Frequenzbänder der Funkzugangssysteme wird eine räumliche Überlagerung ermöglicht. Ein Nutzerendgerät hat also an einer Position theoretisch die Wahl zwischen den dort vorhandenen Funkzugangstechnologien.

Es wurden auch Methoden erprobt, um den Abdeckungsbereich von infrastrukturbasierten Netzen über ad-hoc Netze zu erweitern [DFG-1140].

Neben der reinen Verfügbarkeit der Funkzugangssysteme muss ein geeigneter Informationsaustausch zwischen den Funkzugangssystemen gewährleistet werden. Dieser Informationsaustausch muss den CRRM-Einheiten eine geeignete Einschätzung der Situation in den unterschiedlichen Netzen ermöglichen. Weiterhin müssen Protokolle für die Umsetzung der CRRM-Entscheidungen definiert sein. Im 3GPP 25.891 Standard zur gemeinsamen Verwaltung von UMTS- und GSM-Netzen [TR 25.891] wird ein mögliches Modell eines solchen Informations- und Kommando-austausches beschrieben.

2.4 Generelle Eigenschaften von Funkressourcen

Jedes Funkzugangssystem besitzt seine lokalen Verwaltungseinheiten für die Verwaltung der zur Verfügung stehenden Ressourcen (Radio Resource Management - RRM). Je nach Funkzugangstechnologie können sie mehr oder weniger umfangreiche Aufgaben besitzen. Eine lokale RRM-Einheit kann je nach Funkzugangstechnologie bestimmte Zellen oder Hierarchieebenen (z.B. piko, mikro, makro Zellebenen) kontrollieren. Die Abgrenzung der Zuständigkeitsbereiche erfolgt durch Zeit-, Frequenz-, Code- oder Raummultiplexverfahren. Das CRRM wird von spezialisierten Einheiten durchgeführt, die mit den lokalen RRM-Einheiten in Verbindung stehen. Die Aufgabe der CRRM-Einheiten ist es eine übergeordnete Informations- und Kontrollebene zu etablieren, die Vorteile aus den gesammelten Informationen über den Zustand der getrennten RRM-Bereiche zieht. Dabei können auch weitere externe Informationsquellen Verwendung finden (z.B. Informationen über Nutzungshistorien, Wettereinflüsse, etc.). Es ist somit ein Aufsatz auf die bisherige Struktur von drahtlosen Netzen.

2.4.1 Grundlegende Struktur drahtloser Netze

Die logischen Strukturen drahtloser Kommunikationsnetze verschiedener Funkzugangstechnologien ähneln sich. Bild 2.3 zeigt diesen grundsätzlichen Aufbau drahtloser Kommunikationsnetze mit den logischen Elementen Nutzerendgerät (UE), Funkzugangnetz (RAN), und Core-Netzwerk. Das Nutzerendgerät ist dabei die Schnittstelle zum Nutzer. Das Funkzugangnetz stellt den drahtlosen Kontakt zwischen dem Core-Netzwerk des Betreibers und den Nutzerendgeräten der Nutzer des Kommunikationsnetzes her. Das Funkzugangnetz besteht dabei aus verschiedenen Funkzugangssystemen. Ein Funkzugangssystem (RAS) besitzt ein lokales RRM. Teilweise können Funkzugangssysteme

auch aus mehreren Ressourcen (z.B. Zellen) zusammengesetzt sein und Hierarchieebenen bilden. In solchen Fällen wird das RRM auf verschiedene Einheiten aufgeteilt. Dies ist für WWAN Technologien häufig der Fall z.B. für GSM und UMTS – (GSM: Base Transceiver Station + Base Station Controller; UMTS: NodeB + Radio Network Controller). Das Core-Netzwerk des Betreibers bietet Authentication, Authorization sowie Accounting (AAA) Funktionen und verwaltet Dienstqualitätseinstellungen (QoS-Broker). Eine wichtige Funktion des Core-Netzwerks ist die Bereitstellung der Schnittstellen zu anderen Netzwerken (Gateway).

Selbst im Bereich der ad-hoc Netze, die ohne eine zentrale Infrastruktur auskommen, müssen die Funktionen dieser logischen Elemente bereitgestellt werden. Hier übernehmen andere Nutzerendgeräte die Funktionen des Funkzugangsnetzes und des Core-Netzwerks.

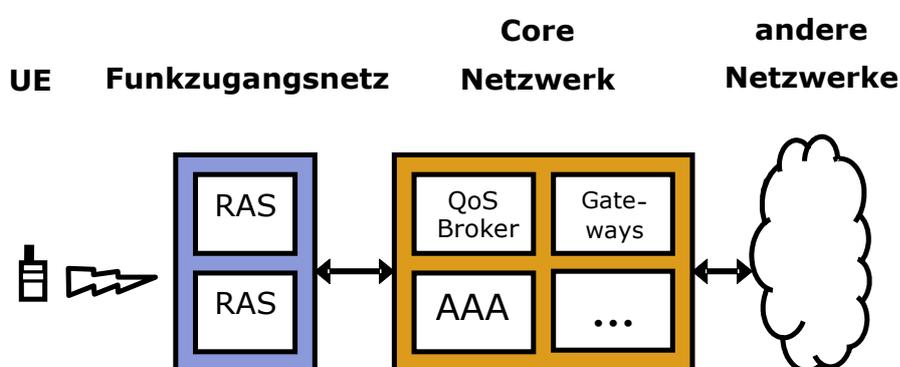


Bild 2.3 Allgemeine logische Struktur mobiler Kommunikationsnetze

Die Dienstqualität, die dem Nutzer geboten werden kann, wird beeinflusst durch die Kapazitäten des Core-Netzwerks und der anderen Netzwerke sowie der Eigenschaften des Funkzugangnetzes und der Nutzerendgeräte. Dabei ist der drahtlose Verbindungsteil oft der Flaschenhals der Verbindung. Drahtlose Verbindungen sind generell fehleranfälliger und nutzen vermehrt Vorwärts- und Rückwärtsfehlerkorrekturtechniken, um dies auszugleichen. Dabei unterscheiden sich die unterschiedlichen Funkzugangstechnologien hauptsächlich auf der Schicht 1 und 2 nach dem ISO/OSI Modell.

Für CRRM kann generell angenommen werden, dass die Core-Netzwerke die Dienstqualitätsmöglichkeiten der Funkzugangnetze unterstützen. Falls der Engpass der Verbindung im Core-Netzwerk oder in anderen Netzen liegt, müssen andere Verwaltungsmechanismen verwendet werden, um die Situation zu verbessern.

2.4.2 CRRM-Struktur- und Integrationsebenen

Einen entscheidenden Einfluss auf die CRRM-Architektur haben die Systemgrenzen über die die Optimierung durchgeführt wird und die Tiefe der angestrebten Integration. Eine Übersicht über die Systemgrenzen gibt Bild 2.4. Soll die Optimierung nur inner-

halb eines Funkzugangssystems durchgeführt werden, ist dies RRM und wird hier nicht betrachtet (z.B. Channel Borrowing [DaSJ1997]). Ab der Optimierung über mehrere Hierarchieebenen innerhalb einer Funkzugangstechnologie (RAT) spricht man vom CRRM. Hier wird dieser CRRM-Typ als Level A bezeichnet. Weitere CRRM-Typen sind die Optimierung über verschiedene Funkzugangstechnologien eines Netzbetreibers (Level B) und zwischen verschiedenen Netzbetreibern (Level C). Je nach CRRM-Typ müssen geeignete Informations- und Kommandoübertragungswege und Protokolle definiert werden. Besonders bei der Optimierung zwischen den Netzen unterschiedlicher Netzbetreiber ist eine Minimierung der benötigten Informationen wichtig. Es sollten nicht zu viele Betriebsinformationen des Netzes weitergegeben werden. Die im Abschnitt 1.2.5 betrachteten CRRM-Algorithmen wurden hauptsächlich für Level A und Level B Architekturen entwickelt. Es gibt aber auch Überlegungen für Level C Architekturen z.B. [DeSt2004].

Je weiter die Systemgrenzen gefasst werden, umso mehr Optimierungsmöglichkeiten existieren. Jedoch müssen auch mehr Informationen gesammelt werden und es entstehen längere Informationsübertragungswege und Informationsübertragungszeiten. Im gleichen Maße gilt dies für CRRM-Kommandos. Je weiter die Systemgrenzen gefasst werden, umso mehr CRRM-Entscheidungen müssen getroffen werden und umso länger und zeitintensiver werden die Übertragungswege der Kommandos.

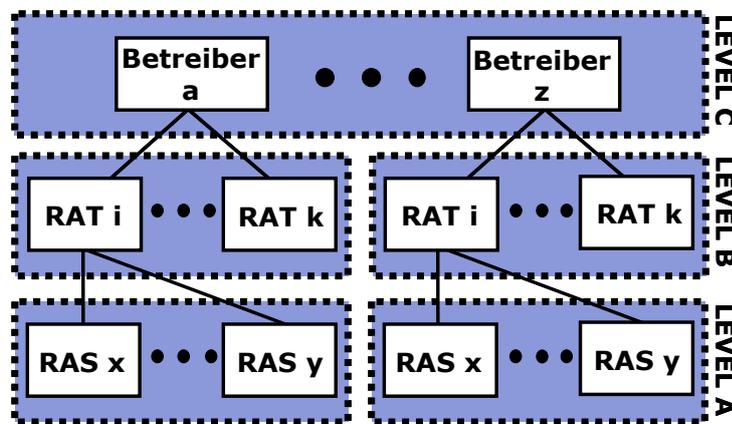


Bild 2.4 CRRM-Systemgrenzen

Neben den Systemgrenzen der Optimierung ist auch der Umfang der von der CRRM-Einheit gesteuerten RRM-Teilbereiche ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für CRRM-Architekturen. In [PeSAKB2005] wird eine Übersicht der möglichen Integrationsstufen vorgestellt, welche in Bild 2.5 dargestellt wird. Dabei wird zwischen einer geringen, mittleren und hohen Integration unterschieden. Für den Fall der geringen Integration übernehmen die CRRM-Einheiten nur die Wahl des besten Funkzugangssystems. Dies geschieht zu Beginn der Verbindung (Initial-RAT-Selection) oder während der Verbindung (Intersystem-Handover), falls andere Funkzugangssysteme aufgrund einer neuen Situation besser geeignet erscheinen. In der nächst höheren Integrationsstu-

fe übernehmen die CRRM-Einheiten zusätzlich die Aufgaben der Zugangs- (Admission Control) und Überlaststeuerung (Congestion Control) für die Funkzugangssysteme. Dies umfasst auch Handover innerhalb des Funkzugangssystems (Intrasystem-Handover) und die Anpassung der gebotenen Dienstqualität für Verbindungen. Die höchste Integrationsstufe umfasst zusätzlich die Steuerung des Ablaufs des Paketverkehrs (Scheduling). Dies bedeutet, dass dem lokalen RRM nur noch die Steuerung der Sendeleistungskontrolle und anderer sehr technologiespezifischer Prozesse verbleiben.

Je höher die Integrationsstufe ist, umso mehr Optimierungsmöglichkeiten existieren. Es müssen dazu aber auch immer mehr Informationen in einem immer kürzeren Zeitintervall verarbeitet werden. Dies gilt im gleichen Maße für die CRRM-Entscheidungen. Je höher die Integrationsstufe ist, umso mehr Kommandos müssen in immer kürzeren Zeitintervallen abgesetzt werden.

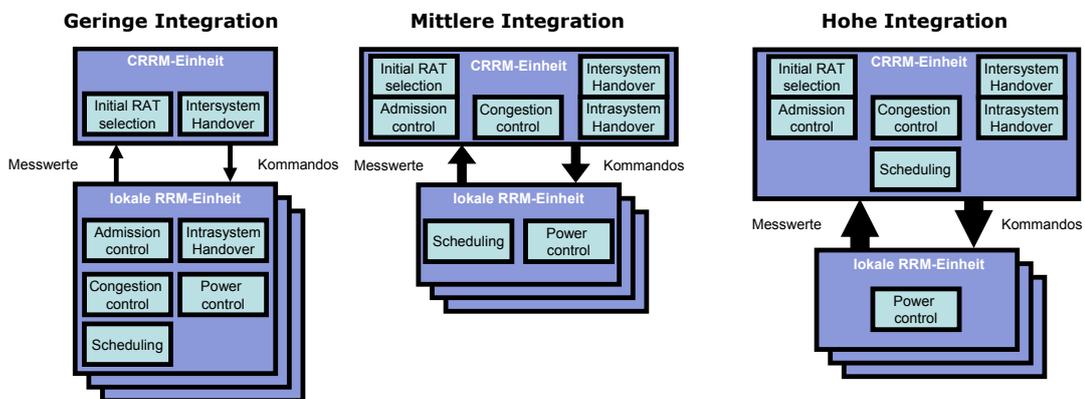


Bild 2.5 CRRM-Integrationsstufen [PeSAKB2005]

Ein Ausweiten der Systemgrenzen und eine Erhöhung der Integration sind hinsichtlich der Optimierungsmöglichkeiten wünschenswert. Dies erhöht jedoch auch die Komplexität des zu lösenden Problems und es existieren zusätzlich zuwiderlaufende Anforderungen und Eigenschaften (Zeitverbrauch steigt und Zeithorizont sinkt). Dies muss in Architekturentscheidungen berücksichtigt werden.

2.4.3 Kategorisierungsmöglichkeiten

Das Problem des CRRM ist verwandt mit Lastverteilungsproblemen wie sie in der Literatur für Rechnernetze, für Grid-Systeme oder für Multiprozessor-Systeme vorgestellt werden. Aus diesem Grund lässt sich das abstrakte Modell für Lastverteilungsalgorithmen aus [ScSt1997] auch für die Kategorisierung von CRRM-Architekturen und darauf arbeitenden Algorithmen verwenden. Für CRRM besonders relevante Kategorien sind in Tabelle 2.4 aufgeführt und beschrieben. Die aufgeführten Kategorien für die Struktur von Architekturen und für die Eigenschaften der Algorithmen wurden für die Beschreibung von CRRM angepasst.

Tabelle 2.4 Kategorien für CRRM-Architekturen und CRRM-Algorithmen

Kategorie	Beschreibung
Systemmodell	Beschreibt die Zieltopologie, die im Wesentlichen durch die in Bild 2.4 abgebildete Baumstruktur und zu definierenden Kommunikationswegen zwischen den Elementen gegeben ist.
Modell des Verbindungstransfers	Beschreibt die Systemgrenzen über die die Ressourcen gemeinsam verwaltet werden sollen. Weiterhin die Art des Transfers, d.h. ob/wie Verbindungen übergeben werden bzw. angepasst werden können.
Modell des Informationsaustauschs	Beschreibt den Informationsraum und Überblick über den die CRRM-Einheiten verfügen. Kennen die CRRM-Einheiten den kompletten Systemzustand einer anderen CRRM-Einheit bzw. eines Funkzugangssystems oder besitzen sie nur ein Teilwissen. Bekommen die Einheiten Informationen über alle existierenden Einheiten bzw. Funkzugangssysteme oder nur über eine Teilmenge. Außerdem wird die Organisationsstruktur des Austausches (dezentral, hierarchisch, zentral) und der Erfassung (periodisch, ereignisabhängig) beschrieben
Koordinationsmodell	Beschreibt Struktur und den Ablauf der Entscheidungsfindung. Geschieht dies verteilt, hierarchisch oder zentral. Arbeiten die einzelnen CRRM-Einheiten autonom, kooperativ oder im Wettbewerb. Beschreibt ob/wie Entscheidungen synchronisiert werden.
Zeithorizont	Beschreibt die mögliche Länge des Zeitraums ab dem Erfassen der Situation bis zur Umsetzung der Entscheidung. Die Länge dieses Zeitraums sollte kleiner sein als der Zeithorizont des zu beeinflussenden Prozesses.
Stabilitätskontrolle	Beschreibt ob/wie gegenläufige Entscheidungen vermieden werden und ob/wie stabil das resultierende Verhalten ist (welche Garantien existieren).
Adaptivität	Beschreibt ob/wie sich das Verhalten der CRRM-Einheiten für unterschiedliche Systemzustände verändert. Beschreibt weiterhin ob/wie die Resultate vergangener Entscheidungen in aktuellen Entscheidungen berücksichtigt werden.
Kostensensitivität	Beschreibt ob/wie die Relation zwischen möglichem Gewinn und entstehenden Kosten durch eine Aktion von den CRRM-Einheiten berücksichtigt werden.

2.4.4 CRRM-Regelkreis

Das Ziel der gemeinsamen Verwaltung von Funkressourcen bedingt eine Einflussnahme auf die Funkzugangssysteme, die von der jeweils aktuellen Situation abgeleitet wird. Diese Einflussnahme und zusätzlich die zeitlichen Änderungen im System machen eine kontinuierliche Überprüfung der aktuellen Situation nötig. Das CRRM ist daher ein Regelmechanismus dessen grundlegender Ablauf im Bild 2.6 dargestellt ist. Die einzelnen Phasen des CRRM-Regelkreises können dabei grob in zwei Aufgabengebiete unterteilt werden: Informationsmanagement (IM) und Durchführung (D). Zum Informationsmanagement gehören alle Maßnahmen, die dem Erfassen der aktuellen Situation dienen. Zur Durchführung gehören alle Maßnahmen die der Beeinflussung der aktuellen Situation dienen. Dem Informationsmanagement wird daher das Messen von Parametern in Funkzugangssystemen oder anderen Informationsquellen und das Verteilen und Speichern dieser Informationen zugeordnet. Der Durchführung wird daher das Bewerten und Entscheiden auf Basis der ermittelten Informationen und die Umsetzung der getroffenen Entscheidungen zugeordnet.

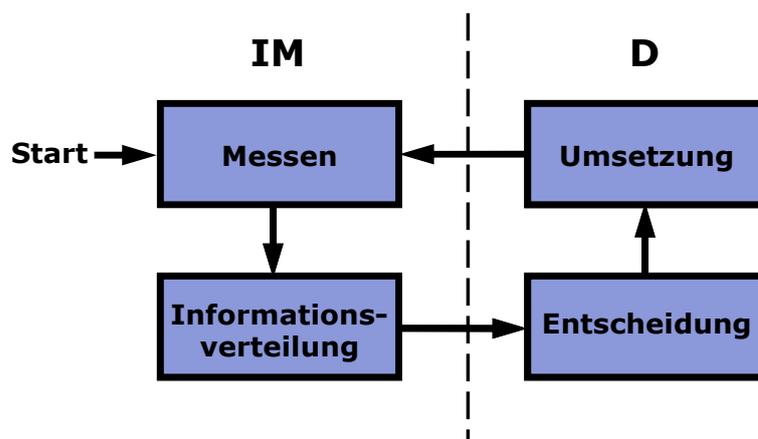


Bild 2.6 CRRM-Regelkreis

Messen

Die Bestimmung des Zustandes eines Systems verbraucht grundsätzlich Zeit. Durch die Dynamik der zeitlichen Änderungen (siehe Abschnitt 2.1) besitzen die ermittelten Systemzustände nur eine begrenzte Gültigkeitsdauer. Es existieren verschiedene Messpunkte, die sich im Nutzerendgerät oder netzseitig im Funkzugangssystem bzw. Core-Netzwerk befinden können. Jeder Messpunkt besitzt spezifische Vor- und Nachteile. Das Nutzerendgerät kann unter anderem Messungen zur Empfangsqualität durchführen, während netzseitig besser die Gesamtlast des Funkzugangssystems erfasst werden kann. Auf der Netzseite ist es auch einfacher externe Informationsquellen einzubinden (z.B. Verkehrsinformationen, Wetterinformationen, Informationen über Großereignisse). Um den Umfang der Messungen zu begrenzen ist es möglich, neben der direkten Messung,

bestimmte Werte aus anderen Informationen abzuleiten. Diese Methode kann z.B. angewendet werden um die verfügbaren Funkzugangssysteme an der Position des Nutzerendgeräts zu ermitteln. Ausgewertet wird die Information in welcher Zelle das Nutzerendgerät momentan eingebucht ist. Über einen Datenbankabgleich kann festgestellt werden, welche Funkzugangssysteme in welcher Qualität wahrscheinlich zur Verfügung stehen. Hierdurch wird die Messung und Übermittlung der Daten über die verfügbaren Funkzugangssysteme durch das Nutzerendgerät eingespart. Insgesamt muss zwischen Aufwand, Genauigkeit und Gültigkeitsdauer von Messung und Ableitung des Systemzustandes abgewogen werden.

Die in Abschnitt 1.2.5 vorgestellten Algorithmen benötigen pro Algorithmus einen Teil der folgenden Informationen, um eine Entscheidung zu treffen:

- Auslastung der Zellen des Funkzugangssystems
- Kundenklassen (Einnahmen durch bestimmte Verbindungen)
- geforderte/gebote Dienstqualitätsparameter
- Signaldämpfung an der Position des Nutzerendgerätes
- Geschwindigkeit des Nutzerendgerätes
- Energie/Ressourcenverbrauch der Verbindung

Informationsverteilung

Die einzelnen Messwerte oder abgeleiteten Informationen müssen für die Verarbeitung den CRRM-Einheiten zugänglich gemacht werden. Neben der Organisation der Übermittlung der Informationen wird auch die Speicherung der Informationen geregelt. Grundsätzlich muss auch hier ein Kompromiss zwischen Umfang und Aktualität der Werte sowie dem Beschaffungs- bzw. Verwaltungsaufwand und der Sicherheit der Informationen gefunden werden. Mögliche Optionen hierbei werden in Abschnitt 2.4.3 beschrieben.

Entscheidung

In dieser Phase kommen die Algorithmen aus dem Gebiet der Multikriterien-Optimierung zum Einsatz. Die Entscheidung erfolgt auf Basis der übermittelten Informationen. Ein Bestandteil der Entscheidung kann auch eine Vorhersage der Systemreaktion auf bestimmte Aktionen sein. Mögliche Optionen und Organisationsstrukturen hierbei werden in Abschnitt 2.4.3 beschrieben.

Die Einflussmöglichkeiten hängen stark von der gewählten Integrationsstufe des CRRM ab. In den im Abschnitt 1.2.5 vorgestellten Algorithmen wurde hauptsächlich auf die folgenden Einflussmöglichkeiten zurückgegriffen:

- Handover (Inter- und Intrasystem)
- Anpassung der gebotenen/geforderten Dienstqualität
- Veränderung der RRM-Eigenschaften (z.B: Veränderung der Aufteilung der Frequenzbereiche zwischen den Funkzugangssystemen)

Jede dieser Einflussmöglichkeiten besitzt je nach Funkzugangstechnologie einen spezifischen Aufwand hinsichtlich Zeitverbrauch und Kosten.

Umsetzung:

In dieser Phase wird die in der Entscheidungsphase geplante Einflussnahme umgesetzt. Grundsätzlich kann dabei zwischen nutzerendgeräte-initiierten, nutzerendgeräte-unterstützten und netzwerkinitiierten Einflussnahmen unterschieden werden. In [Meli2007] wird z.B. der Unterschied zwischen nutzerendgeräte-initiierten und netzwerkinitiierten Intersystem-Handovern für paketvermittelte Dienste zwischen UTRAN und WLAN untersucht.

3 Modellierung von CRRM-Szenarien

Dieses Kapitel beschreibt, wie die in Kapitel 2 beschriebenen Eigenschaften des CRRM geeignet abstrahiert werden können, um möglichst viele unterschiedliche CRRM-Szenarien modellieren zu können. Dabei wird darauf geachtet alle notwendigen Teilnehmer am CRRM und deren Beziehungen untereinander so zu beschreiben, dass der beschriebene CRRM-Regelkreislauf sowie die identifizierten Einflussfaktoren erhalten bleiben. Die Beziehungen der Modellkomponenten werden so definiert, dass dezentrale, hierarchische und zentrale Architekturen modelliert werden können.

Die Überlegungen zu den Grundlagen von CRRM aus Kapitel 2 und das in diesem Kapitel beschriebene Modellierungskonzept wurden in einer vorläufigen Version bereits in [PiDMC2007] veröffentlicht.

Zuerst wird im Abschnitt 3.1 das Modellierungskonzept anhand der Modellkomponenten, der möglichen Kommunikationsbeziehungen und der Kostendefinition sowie der Szenariodefinition erläutert. Im Abschnitt 3.2 wird dargestellt wie über das Modellierungskonzept CRRM-Szenarien erstellt werden können und darauffolgend in Abschnitt 3.3 wird erläutert was bei der Umsetzung des Modellierungskonzeptes zu beachten ist.

3.1 Modellierungskonzept

Das hier vorgestellte Modellierungskonzept bietet die Möglichkeit die in Abschnitt 2.4 identifizierten grundlegenden Eigenschaften des CRRM abstrahiert wiederzugeben. Ziel des Modells ist es, das für die CRRM-Entscheidung relevante Verhalten der Mobilfunksysteme abzubilden und die Kosten der durch das CRRM verursachten Aktivitäten zu ermitteln. Über das Modell sollen Szenarien erstellt werden können, die von zentralen oder dezentralen CRRM-Algorithmen behandelt werden. Dabei muss es möglich sein, das dynamische Verhalten der Mobilfunksysteme hinsichtlich Nutzermobilität und QoS-Anforderungen darzustellen. Basis des Modells sind folgende Annahmen: Es existiert eine Menge von Dienstverbindungen mit unterschiedlichen QoS-Anforderungen, die bestimmten Nutzerendgeräten (User Equipment) zugeordnet sind. An den einzelnen Positionen der Nutzerendgeräte existiert jeweils eine Menge empfangbarer Funkzugangssysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. gebotene QoS, Auslastung, Zellgröße, Kosten). Nicht alle Nutzerendgeräte können aufgrund technologischer oder administrativer Einschränkungen (z.B. fehlende RAT Unterstützung, keine Roamingverträge) mit allen verfügbaren Funkzugangssystemen eine Verbindung herstellen. Es wird angenommen, das auf entsprechende Funktionen und Protokolle in den Funkzugangssystemen zur Unterstützung von CRRM-Aktionen zurückgegriffen werden kann.

Das Modell gestattet die Modellierung verschiedener Funkzugangstechnologien und der gemeinsamen Verwaltung ihrer Ressourcen. Die Aktionen, die zur gemeinsamen Verwaltung der Ressourcen benötigt werden, können mit Kosten belegt werden.

Mit Hilfe dieses Modellierungskonzepts können Szenarien definiert werden, in denen eine Zuordnung der Dienstverbindungen zu unterschiedlichen Funkzugangssystemen gesucht werden kann. Beachtet werden dabei festgelegte Randbedingungen (z.B. geringe Kosten, QoS-Forderungen erfüllt) und die Dynamik des Systems (z.B. wenige Blockierungen und Abbrüche, keine Ping-Pong-Handover, wenig Messungen). Das Modell liefert damit eine Basis für die Bewertung verschiedener CRRM-Algorithmen.

Nachfolgend werden die Modellkomponenten (3.1.1), deren Kommunikationsbeziehungen (3.1.2) und die Definition der Kosten für CRRM-Aktionen (3.1.3) beschrieben. Im Abschnitt 3.1.4 wird die Definition unterschiedlicher Szenarien über das Modellierungskonzept erläutert.

3.1.1 Modellkomponenten

Die Komponenten des Modells wurden aus den in Abschnitt 2.3 und 2.4 vorgestellten Teilnehmern am CRRM abgeleitet und ermöglichen die Abbildung verschiedener CRRM-Szenarien. Im Modell enthaltene Komponenten sind die Umwelt (ENV), Nutzerendgerät (UE), CRRM-Informationsmanager (CRRM-IM), CRRM-Entscheider (CRRM-D) und Funkzugangssystem (RAS).

An den jeweiligen Komponenten können Messungen durchgeführt werden. Die Messungen werden dabei in Messungen erster und zweiter Ordnung unterteilt. Diese Ordnung wurde eingeführt, um den Typ der Messung besser zu beschreiben. Durch Informationsübertragung können Messwerte in unterschiedlichen Modellkomponenten vorhanden sein. Die Messwerte können aber in den meisten Fällen nur in einer bestimmten Komponente für einen Parameter direkt erhoben werden. Alle weiteren Modellkomponenten geben nur die Messwerte wieder, die an sie für diesen Parameter übermittelt wurden. Um in diesen Modellkomponenten aktuelle Messwerte für diesen Parameter zu erhalten, müssen in den anderen Komponenten Messungen gestartet und die Messwerte übermittelt werden. Messungen erster Ordnung sind daher Messungen, die Messwerte betreffen, die direkt in der Komponente ermittelt werden können. Messwerte von Messungen erster Ordnung sind daher meist aktueller und ihre Bestimmung weniger ressourcenaufwendig. Für Messungen zweiter Ordnung müssen erst Messungen in anderen Komponenten zur Ermittlung des aktuellen Wertes gestartet werden. Zusätzlich müssen die Messwerte noch an die Zielkomponenten übertragen werden.

Komponente ENV

Die Komponente Umwelt (ENV) (Bild 3.1) modelliert dabei das dynamische Verhalten des Systems hinsichtlich der Mobilität der Nutzerendgeräte. Über diese Komponente lassen sich Informationen wie Position und Geschwindigkeit der Nutzerendgeräte und

die positionsgebundene Erreichbarkeit der verschiedenen Funkzugangssysteme ermitteln. Eingabeparameter sind Mobilitätsparameter der Nutzerendgeräte (Mobilitätsmodell, maximale/minimale Geschwindigkeit) und die Empfangseigenschaften der unterschiedlichen Funkzugangssysteme (Zell-Layout mit Signalausbreitungsmodell). Daraus ermittelt die Komponente ENV aktuelle Mobilitätswerte der Nutzerendgeräte und die Empfangsqualität der Funkzugangssysteme an der Position der Nutzerendgeräte. Die Weiterleitung dieser Informationen wird über Messbefehle gesteuert, die einfache oder periodische Messungen starten bzw. stoppen. Messungen erster Ordnung an dieser Komponente, sind also Messungen über die Nutzermobilität und die Abdeckungsbereiche der Funkzugangssysteme. Messungen zweiter Ordnung sind in dieser Komponente nicht vorgesehen.

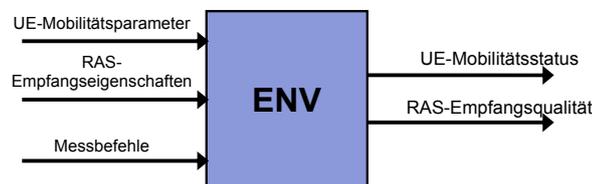


Bild 3.1 Komponente Umwelt (ENV)

Komponente RAS

Die Komponente Funkzugangssystem (RAS) (Bild 3.2) bearbeitet die Dienstanforderungen der UE-Objekte (Nutzerendgeräte). Ein Funkzugangssystem kann eine oder mehrere Zellen unterstützen. Ihr Verhalten wird dabei von Modellen der jeweiligen Funkzugangstechnologien bestimmt. Diese Modelle liefern Werte für den Ressourcenverbrauch (z.B. Last im Funkzugangssystem), die aktuell gebotene Dienstqualität (z.B. Delay, die Datenrate und die Bitfehlerrate) oder für andere Eigenschaften der Funkzugangssysteme. Die RAS-Komponente enthält RRM-Algorithmen und zusätzlich Authentication, Authorisation, Accounting (AAA) Dienste des Core Networks. Die RRM-Algorithmen beschreiben vom CRRM unabhängige Ressourcenverwaltungsfunktionen z.B. interne Handover in eine andere Zelle des Funkzugangssystems aufgrund von Mobilität oder die Blockierung von Verbindungen aufgrund von Überlastsituationen. Die AAA-Algorithmen überprüfen die Zugangsberechtigung zum Funkzugangssystem und welche Priorität den Diensten der Nutzerendgeräte zugeordnet wird. Die Eingabewerte sind neben den QoS-Anforderungen der aktiven Dienste der Nutzerendgeräte die technologischen Fähigkeiten der Nutzerendgeräte (unterstützte RAT usw.), die administrativen Einstellungen der Nutzerendgeräte (unterstützte Netzbetreiber, Kundentyp), die Mobilität der Nutzerendgeräte (Position, Geschwindigkeit, Richtung) und die Empfangsqualität des Funkzugangssystems an der Position der Nutzerendgeräte. Zusätzlich werden dieser Komponente Parameter für die einzelnen Zellen (max. Ressourcen, Kanaleigenschaften usw.) übergeben und evtl. CRRM-Kommandos oder CRRM-Informationen (z.B. Kommandos zum Start / Stopp von Messungen oder Informationen

über die Ergebnisse der Messungen). Ausgabewerte sind der aktuelle Ressourcenverbrauch in den Zellen des Funkzugangssystems, der Ressourcenverbrauch pro Dienstverbindung, die aktuell für die Nutzerendgeräte mögliche QoS, aktuelle Parameter der Funkzugangssysteme und Call Admission Control Informationen (Verbindungsblockierungen, Verbindungsabbrüche) sowie weitergeleitete CRRM-Kommandos bzw. Informationen. Messungen erster Ordnung an dieser Komponente sind Informationen zum Zustand der Verbindung (zum Nutzerendgerät) und Messungen zum Zustand des Funkzugangssystems oder der Zellen des Funkzugangssystems. Messungen zweiter Ordnung sind Messungen zur Mobilität und weiteren Eigenschaften des Nutzerendgerätes oder Informationen über andere Funkzugangssysteme.

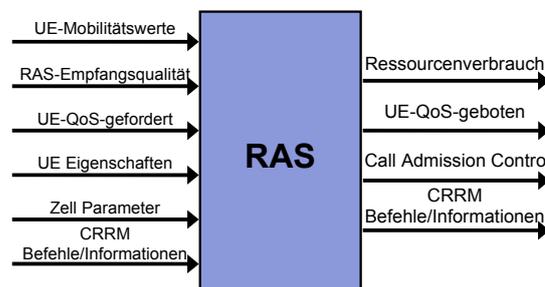


Bild 3.2 Komponente Funkzugangssystem (RAS)

Komponente UE

Die Komponente Nutzerendgeräte (UE) modelliert anhand eines Dienstprofils die Dynamik der Dienstanforderungen und legt die Mobilitätsparameter fest. Unterschiedliche Dienste (Real-Time, Non-Real-Time) mit entsprechenden Dienstqualitätsanforderungen werden zu verschiedenen Zeitpunkten erzeugt und beendet. Nutzerendgeräte mit gleichen Eigenschaften werden zu Klassen zusammengefügt. Anhand definierbarer Dienstqualitätsprofile entscheidet diese Komponente, ob die von einem Funkzugangssystem gebotene QoS den Anforderungen des Nutzers genügt. Die Nutzerendgeräte unterstützen eine unterschiedliche Auswahl an Funkzugangstechnologien und Netzbetreibern.

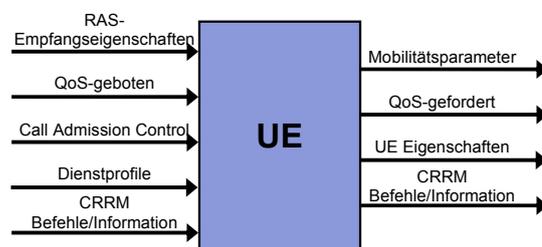


Bild 3.3 Komponente Nutzerendgerät (UE)

Da nicht jedes UE-Objekt alle Funkzugangstechnologien und Netzbetreiber unterstützt, sind die im Bild 3.7 dargestellten Kommunikationsverbindungen pro Nutzerendgerät

auf die unterstützten Funkzugangssysteme begrenzt. Die Komponente UE kann auch CRRM-Kommandos empfangen oder weiterleiten und dadurch z.B. Messungen über die Erreichbarkeit der unterstützten Funkzugangssysteme über die Komponente ENV durchführen lassen. Messungen erster Ordnung an dieser Komponente sind Messungen zur geforderten oder erhaltenen Dienstqualität, zum Status der Verbindung, zur Nutzerzufriedenheit oder weiteren Eigenschaften des Nutzerendgerätes. Messungen zweiter Ordnung sind Messungen hinsichtlich der verfügbaren Funkzugangssysteme (Empfangsqualität, Last und andere Informationen zum Zustand der Funkzugangssysteme).

Komponente CRRM-IM und CRRM-D

Die Komponenten CRRM-Informationenmanager (CRRM-IM) und CRRM-Entscheider (CRRM-D) beinhalten die zu untersuchenden Algorithmen für das CRRM. Die CRRM-IM-Komponente (Bild 3.4) steuert die Sammlung und Speicherung der benötigten Informationen. Die gesammelten Informationen werden an die CRRM-D-Komponente (Bild 3.5) weitergereicht.

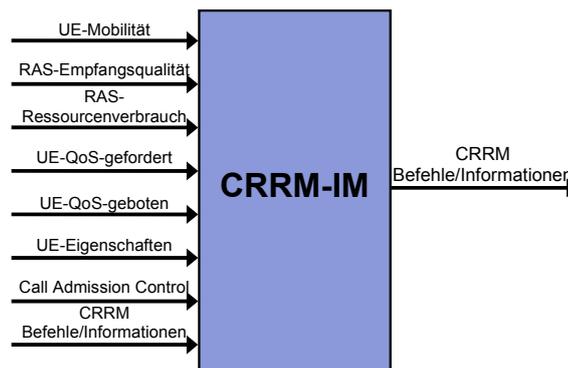


Bild 3.4 Komponente Informationmanager (CRRM-IM)



Bild 3.5 Komponente Entscheider (CRRM-D)

Die CRRM-D-Komponente bewertet diese Informationen und entscheidet über CRRM-Aktionen wie zum Beispiel Intersystem-Handover, Anpassung der gebotenen Dienstqualität oder Frequenzanpassungen. Die entsprechenden Kommandos werden dann zur Umsetzung an die UE- und RAS-Komponenten weitergeleitet. Die CRRM-D-Komponente kann auch durch Kommandos anderer CRRM-D-Komponenten beeinflusst werden. Die Trennung in Informationsmanager und Entscheiderkomponenten erfolgt aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Ähnlichkeit des CRRM zu Lastverteilungsalgorithmen und der dadurch möglichen Kategorisierung (siehe Abschnitt 2.4.3). Alle Messungen an diesen Komponenten sind Messungen zweiter Ordnung.

3.1.2 Kommunikationsbeziehungen

Die einzelnen Modellkomponenten tauschen Nachrichten aus, um sich über Statusänderungen zu informieren. Die jeweiligen Nachrichten besitzen eindeutige Typangaben. Mit jeder Nachricht werden bestimmte vordefinierte typabhängige Informationen übertragen. Der Aufbau einer Nachricht ist im Bild 3.6 beschrieben.



Bild 3.6 Nachrichtenaufbau

Komponenten registrieren sich bei anderen Komponenten um Nachrichten eines bestimmten Typs zu empfangen. Die Registrierung erfolgt über Nachrichten und kann zu beliebigen Zeitpunkten erfolgen. Die Registrierung kann auch bestimmte Bedingungen für die Nachrichtenübermittlung festlegen (Übermittlung erst ab bestimmten Ereignissen in der Komponente (z.B. lastabhängig) oder Übermittlung in einem bestimmten Zeitintervall (minimal, exakt, maximal)). Der Eingang einer Nachricht löst in der Empfängerkomponente eine vordefinierte Aktion aus. Aktionen einer Komponente können zum Versenden weiterer Nachrichten führen. Beispiel: Die Nachricht „initialisiere Verbindung“ von einem Nutzerendgerät an ein Funkzugangssystem gerichtet, führt im Funkzugangssystem zur Überprüfung der freien Ressourcen und zur entsprechenden Antwort „Verbindungsaufbau erfolgreich“ bzw. „Verbindungsaufbau nicht erfolgreich“.

Jede Komponente verfügt über eine interne Routingtabelle, über die sich der Pfad zum Ziel ermitteln lässt. Komponenten nehmen nur Nachrichten an, die für sie bestimmt sind. Nachrichten für andere Komponenten werden basierend auf der internen Routingtabelle weitergeleitet. Der Pfad zum Ziel folgt dabei real existierenden Kommunikationsverbindungen. Ein netzseitiges CRRM muss also die Funkschnittstelle benutzen, um Informationen von der Komponente UE zu erhalten. CRRM-Komponenten können ausschließlich über kostenbehaftete Kommunikation mit anderen Komponenten kommunizieren (siehe Abschnitt 3.1.3). Ihre Anbindung an andere Komponenten variiert für zentrale und dezentrale Szenarien. Bild 3.7 zeigt eine schematische Übersicht der Kommunikationsverbindungen der Komponenten.

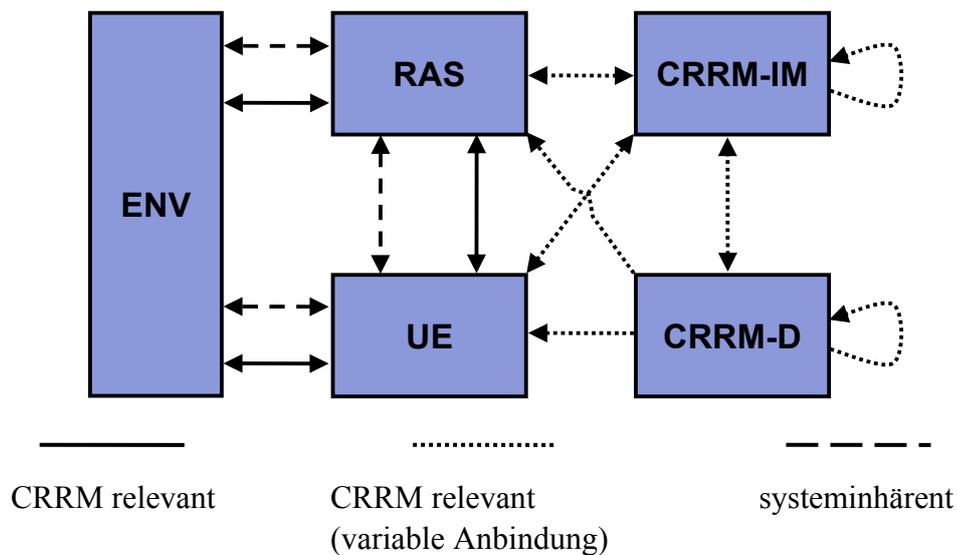


Bild 3.7 Kommunikationsverbindungen der Modellkomponenten

Es gibt neben den für CRRM benötigten Kommunikationsverbindungen auch systeminhärente Verbindungen. Diese systeminhärenten Kommunikationsverbindungen dienen der Übermittlung von Nachrichten, die für die Nachbildung des Verhaltens einer Komponente benötigt werden und nicht dem CRRM zugeordnet werden können. Im realen System wären die darüber übertragenen Informationen entweder real oder implizit in den Komponenten selbst vorhanden. Ein Beispiel für eine systeminhärente Nachricht ist die Übermittlung der Positionsdaten der Nutzerendgeräte an ein Funkzugangssystem. Das RAS-Modell aus Abschnitt 4.1.3 benötigt diese für die Berechnung der Last und der QoS-Parameter in einer Zelle. Jedoch in realen Funkzugangssystem ist die Position der Nutzerendgeräte in den meisten Fällen nicht bekannt, sondern fließt implizit in andere Systemgrößen ein (z.B. Sendeleistung). Die Positionsdaten können aber auch CRRM-relevante Größen sein. In dem Fall müssen diese Informationen aktiv von der Komponente UE oder RAS für das CRRM ermittelt werden und entsprechend mit Kosten verknüpft werden. Es ist daher notwendig, systeminhärente Informationen und CRRM-relevante Informationen im Modell zu trennen.

3.1.3 Kostendefinition

Für die über das Modell definierten Szenarien soll eine Kosten-/Nutzenanalyse durchgeführt werden können. Die CRRM-relevanten Nachrichten werden daher mit Kosten verknüpft. Es wurden zwei Typen von Kosten im Modell definiert: zeitliche und abstrakte Kosten. Diese Kosten werden kontextabhängig bestimmt.

Zeitliche Kosten

Zeitliche Kosten dienen der Modellierung von anfallenden Verarbeitungszeiten. Dies kann die Geschwindigkeit der Informationsübertragung bestimmter Kommunikations-

wege betreffen oder auch die Abarbeitungsdauer bestimmter aufwendiger Prozesse. Es kann z.B. länger dauern eine Information zwischen Netzbetreibern auszutauschen als diese innerhalb eines Nutzerendgerätes an eine lokale CRRM-Komponente zu übermitteln. Auch kann die Ermittlung der verfügbaren Zellen unterschiedlicher RAT länger benötigen als die Ermittlung der Zellen eines einzigen RAT.

Abstrakte Kosten

Abstrakte Kosten dienen der Modellierung eines Ressourcenverbrauchs. Diese Kosten können später in der Kosten-/Nutzenanalyse verwendet werden. Über diese Kostenart können z.B. der Energieverbrauch oder monetäre Betriebskosten erfasst werden.

Kontext für Kosten

Je nach Kontext können für eine Nachricht unterschiedliche abstrakte oder zeitliche Kosten entstehen. Als Kontext können in Frage kommen der Typ der Nachricht, der Typ der Modellkomponente, die Nutzerendgeräteklasse (vgl. 3.1.1), die Art der verwendeten Technologie und die Betreiberzugehörigkeit. Je nach Modellierungsziel können weitere Kontexte definiert werden. So ist z.B. modellierbar, dass der Energieverbrauch einer UMTS-Verbindung höher ist, als der einer Verbindung über GSM oder dass der Verbindungsaufbau im Netz eines Roaming-Partners teurer ist als im eigenen Netz.

3.1.4 Szenariodefinition

Über die Festlegung verschiedener Kommunikationsverbindungen (vgl. Bild 3.7) können die einzelnen Komponenten entsprechend der in Bild 2.4 vorgestellten CRRM-Level A, B und C gruppiert werden. Schematisch ist dies im Bild 3.8 dargestellt.

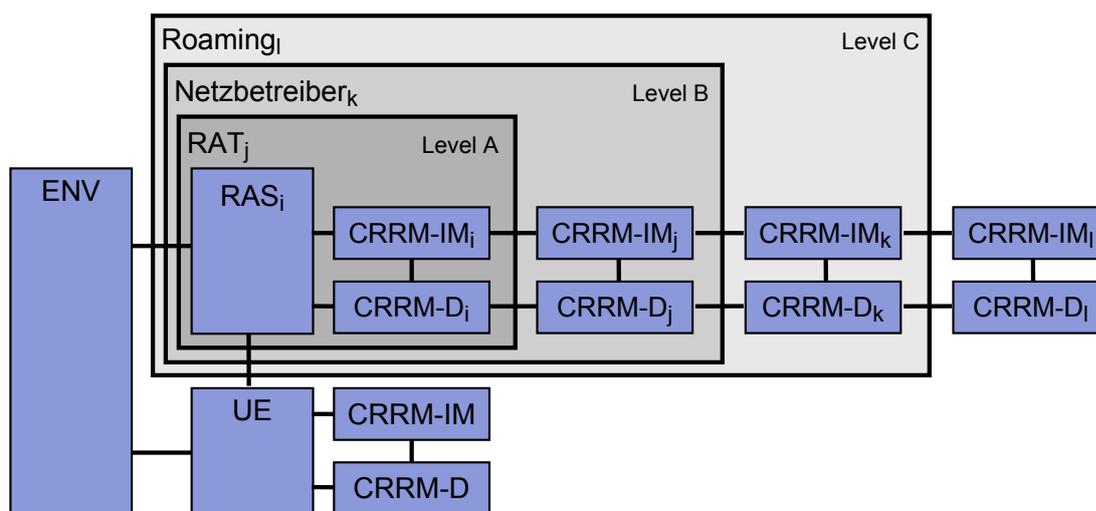


Bild 3.8 Modellierung der CRRM-Level

Neben den bereits beschriebenen Modellkomponenten RAS, UE, ENV, CRRM-IM und CRRM-D sind hier zusätzlich Funkzugangstechnologie (RAT), Netzbetreiber und Roaming aufgeführt. Die letztgenannten Komponenten dienen der Strukturierung des Szenarios und der Erzeugung des Kontextes für die Kostendefinition (vgl. 3.1.3). Die Komponente RAT fasst alle RAS einer Funkzugangstechnologie eines Netzbetreibers zusammen (Level A). Die Komponente Netzbetreiber fasst alle Funkzugangstechnologien eines Netzbetreibers zusammen (Level B). Die Komponente Roaming fasst alle Netzbetreiber zusammen (Level C), die untereinander interagieren können (z.B. Handover-Möglichkeiten von Verbindungen). Die einzelnen Indizes stehen für eine variable Anzahl dieser Komponenten. Ein Netzbetreiber kann zum Beispiel eine variable Anzahl von Funkzugangstechnologien (RAT) unterstützen. Es können auch mehrere Roamingzonen existieren denen unterschiedlich viele Netzbetreiber angehören. Es existiert jedoch nur eine Komponente ENV, die die Abdeckungsgebiete aller Funkzugangssysteme und die Mobilität der Nutzerengeräte abbildet. Ebenso existiert nur eine Komponente UE. Diese Komponente verwaltet alle Objekte der existierenden Nutzerendgeräteklassen mit deren möglichen Verbindungen zu einzelnen Funkzugangssystemen.

3.2 Beispielszenarien

Das im Abschnitt 3.1 vorgestellte Modellierungskonzept wird hier verwendet, um beispielhaft einzelne Szenarien zu modellieren. Dies soll die Anwendungsmöglichkeiten verdeutlichen, jedoch keine vollständig beschriebenen Szenarien liefern.

3.2.1 Netzseitiges CRRM

Beispiel: Hierarchisches Informationsmanagement und dezentrale Entscheidung

In dem durch Bild 3.9 repräsentierten Szenario existiert ein netzseitiges Level B CRRM (siehe Abschnitt 2.4.2), welches die Ressourcen zweier Funktechnologien eines Netzbetreibers verwaltet. Es besitzt durch die netzseitige Installation einen relativ leichten Zugriff auf die Informationen der einzelnen Funkzugangssysteme; jedoch ist der Zugriff auf Informationen der Nutzerendgeräte nur über die Funkschnittstelle möglich. Die Informationssammlung und Speicherung wird über einen zentralen Informationsmanager durchgeführt. Entscheidungen erfolgen dezentral in den einzelnen Funkzugangssystemen. Die lokalen CRRM-D erhalten zusätzlich aktuelle Informationen über das Funkzugangssystem über lokale Informationsmanager. Durch die zentrale Informationssammlung verfügen alle CRRM-D über eine gemeinsame Entscheidungsgrundlage, können aber trotzdem relativ zeitnah lokal in den einzelnen Funkzugangssystemen entscheiden. Die lokalen CRRM-D sind untereinander verbunden und können somit auch andere Funkzugangssysteme beeinflussen. Nachrichten, die zwischen den RAS und den zugeordneten CRRM-Komponenten ausgetauscht werden, sind mit geringen zeitlichen Kosten belegt. Nachrichten von und zu dem zentralen Informationsmanager benötigen mehr Zeit. Es kann untersucht werden, ob und in welchem Umfang die Alterung der

Informationen des zentralen Informationsmanagers das Ergebnis des CRRM beeinflussen. In dieser Hinsicht interessant wäre auch die Ermittlung eines optimalen Update-Intervalls für Messungen des Nutzerendgerätstatus und des Status der Funkzugangs-systeme.

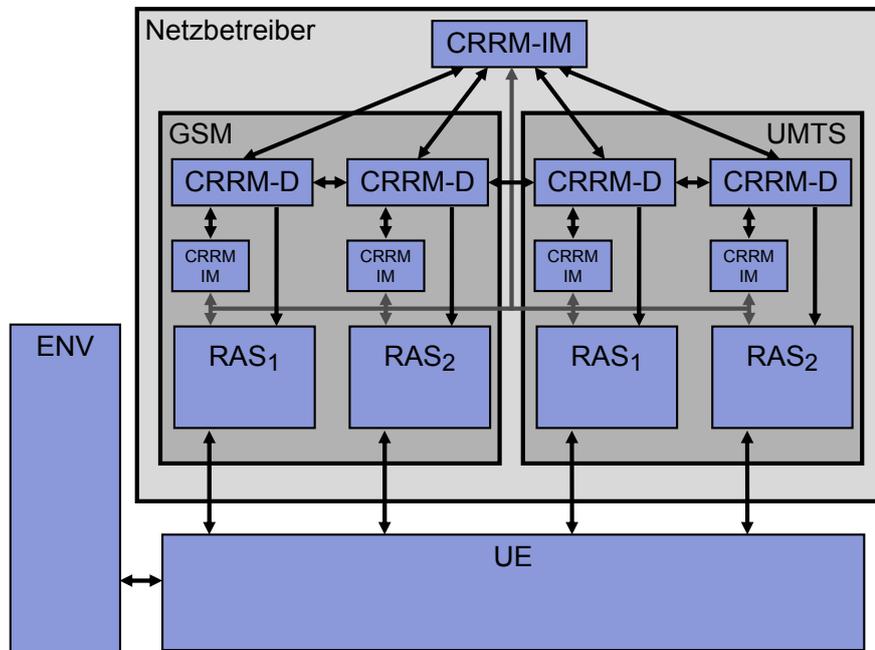


Bild 3.9 Beispiel: Hierarchisches Informationsmanagement und dezentrale Entscheidung

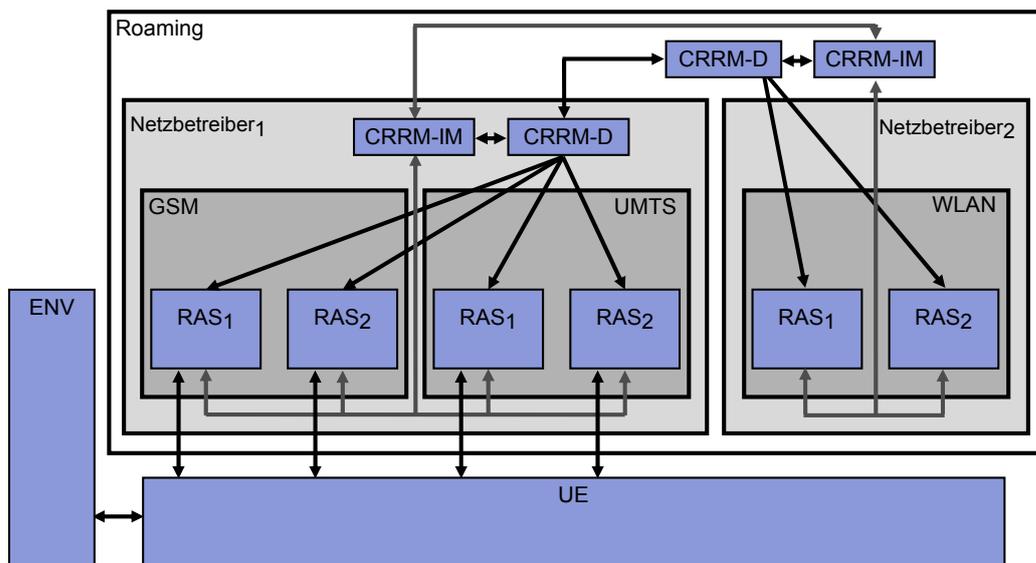


Bild 3.10 Beispiel: Roaming mit hierarchischen CRRM

Beispiel Roaming mit hierarchischen CRRM

In den im Bild 3.10 dargestellten Szenario werden die Ressourcen mehrerer Netzbetreiber gemeinsam verwaltet. Es handelt sich laut 2.4 also um CRRM des Levels C. Netzbetreiber-1 verwaltet die Ressourcen seines UMTS- und GSM-Netzes über zentrale Informationsmanagement- und Entscheidungskomponenten. Zusätzlich kann er über ein übergeordnetes CRRM auch auf die Ressourcen eines anderen Netzbetreibers zugreifen. Alle Aktivitäten bzw. Nachrichten (Verbindungsaufbau, Messen, Datenübertragung) innerhalb des Netzbetreibers-2 verursachen höhere abstrakte Kosten als innerhalb des Netzes von Netzbetreiber-1. Zusätzlich stehen nur eingeschränkte sowie nicht aktuelle Informationen im übergeordneten Informationsmanager bereit. Es muss also ein optimaler Arbeitspunkt für CRRM-Entscheidungen gefunden werden; hierbei spielen auch Rentabilitätsüberlegungen eine Rolle.

3.2.2 Endgeräteseitiges CRRM

Beispiel: Lokales Informationsmanagement und lokale Entscheidung

Das Szenario aus Bild 3.11 ermöglicht die Untersuchung von endgeräteseitigem Level B CRRM. Hierbei müssen alle Informationen über die Funkzugangssysteme, die nicht in der Umwelt gemessen werden können, über die Funkschnittstelle an die Komponente UE übertragen werden. Interessant ist ein solches Szenario als Vergleichsszenario für das in Bild 3.9 abgebildete Szenario. Kosten für eine netzseitige CRRM-Infrastruktur könnten so vermieden werden - bei eventuell ähnlichen Ergebnissen.

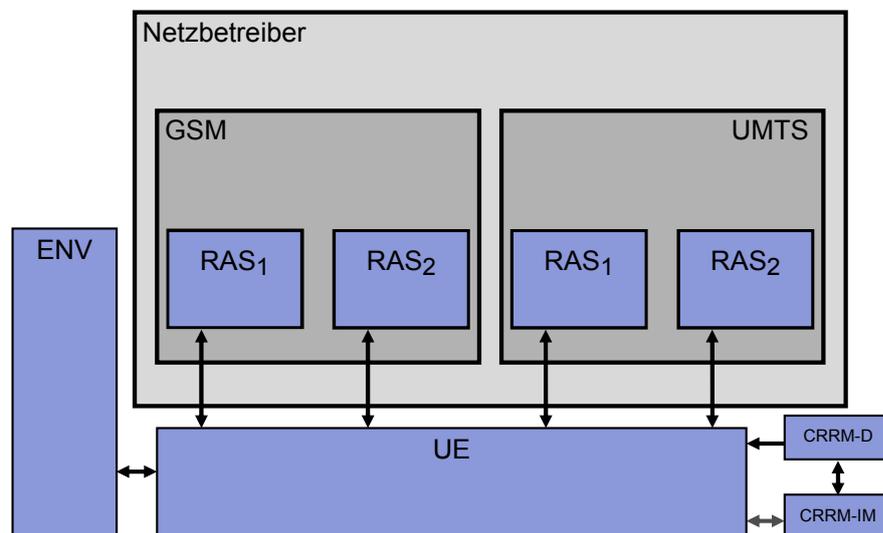


Bild 3.11 Beispiel: Lokales Informationsmanagement und lokale Entscheidung

Beispiel: Erweiterungen für Sensornetzwerke

Mit wenigen Änderungen lässt sich das Modellierungskonzept auch für die Beschreibung von Sensornetzwerkszenarien verwenden. Die Sensoren und ihre Eigenschaften

sowie Verhalten werden in der Komponente UE definiert. Die RAS-Komponenten stehen dabei für verschiedene Modi der Informationsübertragung hinsichtlich Frequenzbereich, Technologie etc. mit definierten Eigenschaften. Verbindungen über ein Funkzugangssystem können z.B. besonders energiesparend, dafür aber mit begrenzter Reichweite erfolgen oder ein Funkzugangssystem kann z.B. verschlüsselte Kommunikation ermöglichen, während andere Verbindungen öffentlich sind. Es kann auch zwischen Broadcast, Multicast oder Point to Point RAS-Medien unterschieden werden. Je nachdem, ob ein Sensor die Kommunikationsform unterstützt, kann er sich an einer RAS-Komponente anmelden. Die Zellen in einer RAS-Komponente werden dann pro Sensor erzeugt und geben an, welche Sensoren sich gegenseitig erreichen können. Die Umwelt beschreibt dabei wieder die Mobilität und gibt Bereiche mit gutem und schlechtem Empfang (z.B. Hindernisse) vor. Über die Definition von Kosten (ähnlich 3.1.3) kann der Energieverbrauch für bestimmte Funkverbindungen, Messungen oder für die Mobilität ermittelt werden. Jedem Sensor sind CRRM-IM und CRRM-D-Komponenten zugeordnet, die die entsprechenden Algorithmen für Informationsmanagement und Entscheidung beinhalten. Der Aufbau eines solchen Sensornetzwerkszenarios ähnelt Bild 3.11.

3.3 Umsetzung des Modellierungskonzepts

3.3.1 Anforderungen

Wie in Abschnitt 3.2 dargelegt lassen sich über das Modellierungskonzept umfangreiche CRRM-Szenarien abbilden. Berücksichtigung finden dabei die in Kapitel 2 identifizierten allgemeinen Randbedingungen und Eigenschaften von CRRM. Das Modellierungskonzept beschreibt dabei nur den Szenarioaufbau, die Kostendefinition und die Interaktion der Komponenten. Die Qualität der Untersuchungsergebnisse hängt dabei von der Qualität der Abbildung der Funktionsweise der einzelnen Modellkomponenten ab. Je genauer die einzelnen Funkzugangstechnologien, die Umwelt und das Nutzerendgeräte-Verhalten modelliert werden, umso genauer sind die Ergebnisse der Untersuchungen. Eine sehr detailgetreue Modellierung des Verhaltens der einzelnen Komponenten geht aber auch einher mit hohem Ressourcenverbrauch für die Analyse der einzelnen Szenarien.

Ziel der Entwicklung des Modellierungskonzeptes ist es, eine einfache Prototypentwicklung neuer CRRM-Verfahren und die schnelle vergleichende Untersuchung verschiedener CRRM-Ansätze zu ermöglichen. Daher widerspricht ein bis ins kleinste Detail modelliertes Komponentenverhalten dem Sinn des Modellierungskonzeptes. Eine Umsetzung sollte daher, wenn möglich, eine Abstraktionsebene für das Komponentenverhalten finden, die das qualitative Verhalten der Komponenten widerspiegelt ohne zu ressourcenhungrig zu sein. Folgende prinzipielle Eigenschaften der Modellkomponen-

ten sollten aber beachtet werden, um ein realitätsnahes CRRM-Szenario erstellen zu können.

Allgemeines Verhalten

Die gewählte Umsetzung sollte ein dynamisches Systemverhalten generieren, das fortlaufend Ereignisse und Situationen generiert, die ein CRRM-Algorithmus verarbeiten kann.

Da die Qualität eines CRRM-Verfahrens nicht nur anhand des Langfristverhaltens beurteilt werden kann, muss auch die Reaktion auf zeitlich beschränkte Änderungen des Systemzustandes beobachtbar sein.

Umwelt (ENV)

- Die Nutzerendgeräte sollten sich gemäß eines Mobilitätsmodells durch die Umwelt bewegen.
- Die einzelnen Funkzugangssysteme sollten abhängig von der Position eines Nutzerendgerätes in der Umwelt unterschiedliche Empfangseigenschaften besitzen.
- Die Nutzerendgeräte sollten in der Umwelt ermitteln können welche Funkzugangssysteme ihnen an der aktuellen Position zur Verfügung stehen.

Nutzerendgeräte (UE)

- Die Komponente UE sollte mehrere Nutzerendgeräteklassen gleichzeitig unterstützen.
- Die einzelnen Nutzerendgeräte sollten mindestens eine Funkzugangstechnologie und einen Netzbetreiber unterstützen.
- Jedes Nutzerendgerät sollte mindestens einen Dienstyp gleichzeitig anfordern können.
- Die einzelnen Dienstypen sollten jeweils eigene Anforderungsmodelle besitzen, die einen Anforderungsbeginn und ein Anforderungsende kennzeichnen.
- Die Nutzerendgeräte sollten Statusinformationen (z.B. empfangbare Funkzugangssysteme) ermitteln und weiterleiten können.

Funkzugangssysteme (RAS)

- Das RAS-Modell muss geeignet sein das qualitative Verhalten der Funkzugangstechnologien nachzuahmen.
- Es sollten Dienstqualitätsparameter für unterschiedliche Dienstypen ermittelbar sein.

- Das RAS-Modell sollte für hohe und niedrige Auslastungen des Übertragungskanals und des Funkzugangssystems (der Zelle) gelten.
- Eine Unterscheidung hinsichtlich Uplink- und Downlink-Verbindungen ist wünschenswert.
- Die Funkzugangssysteme sollten Statusinformationen (z.B. aktuell gebotene Dienstqualität oder Auslastung) ermitteln und weiterleiten können.

CRRM-IM und CRRM-D

- Die implementierten Algorithmen sollten möglichst einfach auf reale Systeme übertragbar sein.

3.3.2 Schlussfolgerungen

Wahl des Simulationskonzepts

Die unterschiedlichen Modellierungswelten besitzen jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Die in 3.3.1 formulierten Anforderungen lassen sich nur schwer mit Hilfe eines einzigen Modellierungsverfahrens umsetzen. Nach Analyse der in [LaKe2000] beschriebenen Eigenschaften der einzelnen Modellierungswelten erwies sich ein hybrides Modell bestehend aus analytischen und simulativen Teilmodellen als aussichtsreiche Lösung. Die diskrete ereignisorientierte Simulation eignet sich sehr gut, um dynamisch neue Situationen zu erzeugen, die von einem CRRM-Algorithmus behandelt werden müssen. Reales Systemverhalten lässt sich mit entsprechend hohem Ressourcenaufwand gut abbilden. Um diesen Ressourcenaufwand unter Beibehaltung einer adäquaten Abbildungsqualität zu beschränken, können analytische Modelle gewählt werden.

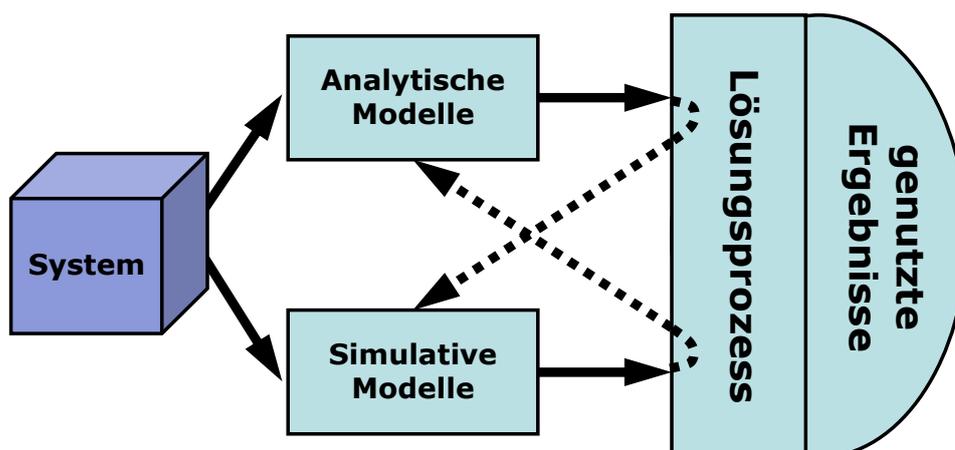


Bild 3.12 Hybrides Modell der Klasse II [ShSa1983]

Ein hybrides Simulationsmodell der Klasse II (entsprechend der Kategorisierung von Shanthikumar und Sargent in [ShSa1983]) ist gut geeignet, um analytische Modelle in

ereignisorientierte Simulationsmodelle zu integrieren und die in 3.3.1 gestellten Anforderungen zu erfüllen. Im Bild 3.12 ist der prinzipielle Aufbau eines solchen hybriden Simulationsmodells der Klasse II graphisch dargestellt. Analytische und simulative Modelle sind Teilmodelle des Systems, die zeitlich parallel arbeiten und über den Lösungsprozess interagieren. Die Beobachtung des Lösungsprozesses liefert die genutzten Ergebnisse.

Alle Teilsysteme des CRRM-Szenarios, die einen dynamischen Prozesscharakter haben, lassen sich vorzugweise über ein ereignisorientiertes Simulationsmodell beschreiben. Eher reaktive Teilsysteme können auch von analytischen Modellen beschrieben werden. Bei der Wahl der analytischen Teilmodelle sind jedoch einige Anforderungen zu beachten. Aufgrund des beschriebenen Aufbaus eines hybriden Simulationsmodells der Klasse II werden dem analytischen Modell fortlaufend neue Situationen (neue Eingabeparameter) präsentiert, die verarbeitet werden sollen (siehe Bild 3.13). Daher darf die Verarbeitungszeit dieser Modelle nicht zu groß sein – im Idealfall sollte sie wesentlich kleiner sein als die Verarbeitungszeit ähnlich genauer Simulationsmodelle. Da der Ablauf von Zeit im ereignisorientierten Modellteil realisiert wird, sollten die analytischen Modelle außerdem Ergebnisse liefern, die in den Zeitabschnitten bis zur nächsten Situation (neue Eingabeparameter für analytisches Modell) Gültigkeit besitzen. Das heißt, analytische Modelle, die mit relativ geringem Lösungsaufwand approximative Lösungen für die aktuelle Situation liefern, sind günstiger als sehr komplexe analytische Modelle, die mit hohem Lösungsaufwand relativ exakte Lösungen für den stationären Fall liefern.

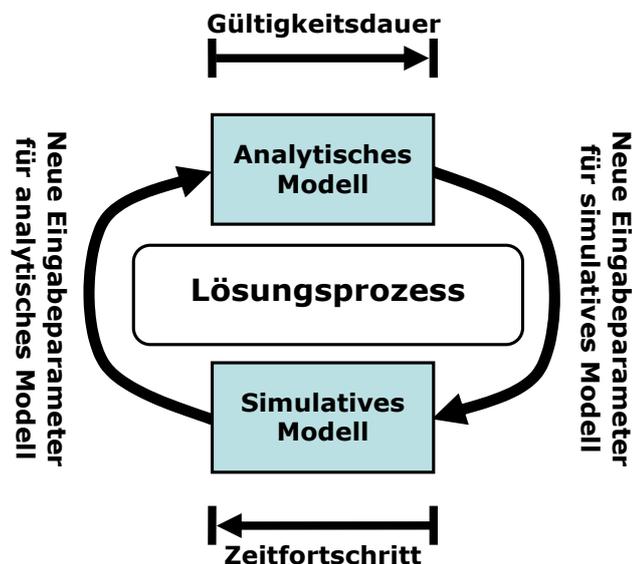


Bild 3.13 Lösungsprozess: Interaktion bei hybriden Modell der Klasse II

Falls transiente Phasen (Anlaufzeiten, Überschwingverhalten oder ähnliche Effekte) das Verhalten innerhalb des Gültigkeitszeitraumes stark beeinflussen, sollte das Ergebnis

des analytischen Modells diesen Umstand berücksichtigen. Wenn die verwendeten analytischen Modelle stationäre Ergebnisse für die aktuelle Situation liefern, entstehen an den Übergängen der Gültigkeitszeiträume im Allgemeinen Approximationsfehler. Der Gültigkeitszeitraum des Modells muss also groß genug sein, damit diese Approximationsfehler nicht zu bedeutend werden. In Bild 3.14 sind beispielhaft die Ergebnisse eines analytischen Modells für die neuen Eingabeparameter der Aktualisierungszeitpunkte t_1 bis t_6 angegeben (blaue durchgehende Linie). Zum Vergleich ist auch die sich aus den Eingabeparametern ergebende reale Systemreaktion (des zu modellierenden Systems) abgebildet (schwarze gestrichelte Linie). Für den Gültigkeitszeitraum bis t_1 ist der analytische Ergebniswert ab dem Zeitpunkt t_a eine gute Approximation des maximalen Parameterwertes. Falls der Zeitraum t_a bis t_1 wesentlich größer ist als t_0 bis t_a ist er auch eine gute Approximation des Mittelwertes für den Zeitraum t_0 bis t_1 . Dies ist z.B. im Zeitraum t_1 bis t_2 gegeben. Für den Zeitraum t_2 bis t_3 ist der Ergebniswert ab t_b eine gute Approximation für den minimalen Parameterwert. Für den Zeitraum t_3 bis t_4 ist der Ergebniswert ab t_c eine gute Approximation für den maximalen Parameterwert. Für den Zeitraum t_4 bis t_5 ist der Ergebniswert ab t_d eine gute Approximation für den Parametermittelwert. Durch die zunehmende Dämpfung der Schwingung ist der Ergebniswert umso aussagekräftiger je größer der Gültigkeitszeitraum ist. Für den Zeitraum t_5 bis t_6 ist der Ergebniswert nur für den Zeitpunkt t_e eine gute Approximation des Parametermittelwerts. Ist der Gültigkeitszeitraum kürzer oder länger als $t_e - t_5$ nimmt die Approximationsgüte ab. In den im Bild 3.14 abgebildeten Fällen sollten also die Gültigkeitszeiträume - nach der Übergabe neuer Eingabeparameter - nicht kleiner sein als jeweils durch die Zeitpunkte t_a bis t_e angegeben ist. Ein Systemverhalten, welches sehr stark von der Länge des Gültigkeitszeitraumes abhängt, wie in t_5 bis t_6 angegeben, ist nur dann gut durch analytische Modelle abbildbar, wenn die Länge des Gültigkeitszeitraumes vorher bekannt ist. Dies ist z.B. bei einer deterministischen Taktung der Fall.

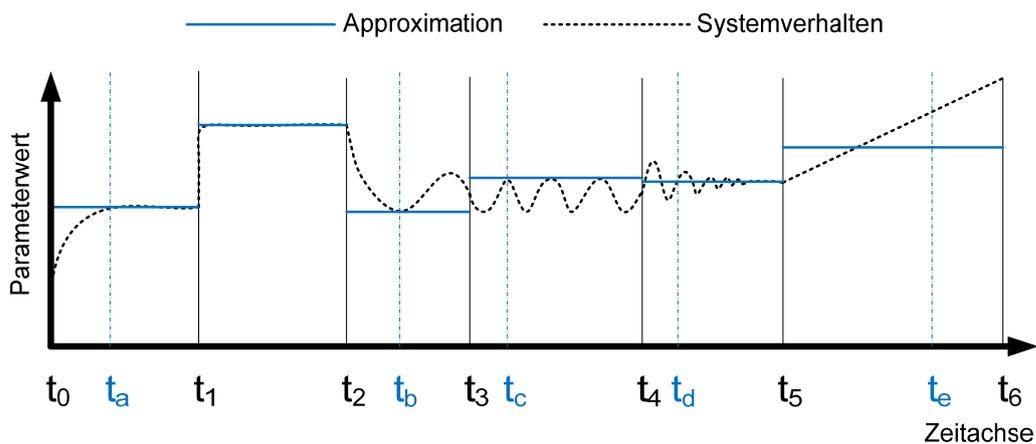


Bild 3.14 Modellapproximation und Gültigkeitszeiträume

Je nach Modellierungsziel sollte ein analytisches Modell nicht nur den Parametermittelwert für den Gültigkeitszeitraum angeben, sondern zusätzlich Informationen über obere und untere Schranken der Parameterwerte eventueller transienter Phasen im Gültigkeitszeitraum liefern. In den meisten Fällen werden keine analytischen Modelle zur Verfügung stehen, die transiente Phasen an den Übergängen der Gültigkeitszeiträume ausreichend berücksichtigen. Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse müssen diese Approximationsfehler an den Übergängen der Gültigkeitszeiträume berücksichtigt werden.

Für die Auswahl bzw. Entwicklung geeigneter analytischer Modelle für das hybride Simulationsmodell ist auch die Arbeit von Köllerstrom [Köll1974] bedeutend. Seine Ergebnisse lassen laut Fishman [Fish2001 S. 465-466] den Schluss zu, dass für hohe Auslastungen (im Besonderen Heavy-Traffic-Systeme) hauptsächlich Mittelwert und Varianz der Verteilung des Ankunfts- und Bedienprozesses das Systemverhalten beeinflussen und höhere Momente vernachlässigt werden können. Da CRRM-Algorithmen hauptsächlich gerade in Phasen erhöhter Auslastung zum Einsatz kommen, legt das Ergebnis von Köllerstrom den Schluss nahe, dass einfache Modelle (mit Ergebnissen für das erste und zweite Moment der Verteilung) für eine Approximation des Systemverhaltens ausreichend sind.

Wahl der Simulationsumgebung

Für die Implementierung des hybriden Simulationsmodells eignet sich die Simulationsumgebung OMNeT++ (Object-oriented Modular discrete event Network simulation Tool). Es ist eine auf C++ basierende quelloffene diskrete ereignisorientierte Simulationsumgebung [OMNeT].

OMNeT++ ist besonders gut geeignet, da sich der modulare Aufbau der Szenarien für diese Simulationsumgebung mit dem Aufbau des Modellierungskonzepts deckt. Die einzelnen in Abschnitt 3.1.1 definierten Modellkomponenten können daher direkt in OMNeT++ Module (Simple Modules) übersetzt werden. Die in Abschnitt 3.1.2 definierten Kommunikationsbeziehungen können als Pfade (Links) zwischen den Modulen abgebildet werden. Der Informationsaustausch erfolgt auf diesen Pfaden über Nachrichten (Messages), die wiederum entsprechend dem Modellierungskonzept definiert werden können. Die Szenariodefinition aus Abschnitt 3.1.4 kann mit Hilfe einer hierarchischen Moduldefinition (Compound Modules) abgebildet werden. Das Ziel einer kurzen Simulationszeit kann mit auf C++ basierendem Programmcode sehr gut erreicht werden.

Weitere Vorteile von OMNeT++:

- Der Simulator ist sehr klar und einfach strukturiert.
- Szenarien können einfach, über die Kombination von NED-Dateien zur Strukturbeschreibung und XML-Dateien für die Parameterdefinition definiert werden. (NED – NETwork Description language)

- Der Simulator unterstützt mehrere Zufallszahlenströme von frei definierbaren Zufallszahlengeneratoren.
- Der Standardzufallszahlengenerator Mersenne Twister besitzt gute Eigenschaften hinsichtlich seiner statistischen Güte und geringer Berechnungskomplexität [SaMa2007].
- Die automatisierte Simulationsauswertung wird durch eine automatische Zufallszahlengeneratorinitialisierung und gut strukturierte Ausgabedateien unterstützt.
- Es werden umfangreiche Statistikfunktionen für die Simulationsauswertung zur Verfügung gestellt.
- Die Simulationsumgebung ist unter einer Vielzahl von Betriebssystemplattformen lauffähig.
- Für die Verwendung im akademischen Bereich fallen keine Lizenzkosten an.
- Die Quelloffenheit ermöglicht es den Simulator zu erweitern, bzw. Fehler im Simulator einfach zu beheben.
- Die Dokumentation ist sehr gut und es existiert eine aktive hilfsbereite Nutzergemeinschaft.

Keine andere untersuchte Simulationsumgebung weist diese vorteilhaften Eigenschaften in Kombination auf. Daher wurde OMNeT++ 3.3 zur Umsetzung des Modellierungskonzeptes gewählt (siehe Kapitel 4).

4 Simulator für CRRM-Szenarien

Der HEKATE-Simulator setzt das in Kapitel 3 vorgestellte Modellierungskonzept unter Verwendung eines hybriden Simulationsmodells, gemäß der Überlegungen in Abschnitt 3.3, um. Der Schwerpunkt bei der Entwicklung lag auf der zukünftigen Untersuchung von Algorithmen für CRRM-Szenarien mit niedriger und mittlerer CRRM-Integrationsstufe.

Die einzelnen analytischen und simulativen Modellteile des Simulators werden im Folgenden beschrieben. Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen des Simulators. Es stellt jedoch keine Bedienungsanleitung für den Simulator dar, sondern soll die Funktionsweise des hybriden Simulationsmodells verdeutlichen. Die Bedienungsanleitung wird in einem separaten Dokument angeboten (siehe digitaler Datenträger im Anhang), welches fortlaufend weitergeführt wird. Die in diesem Kapitel beschriebene Umsetzung des Modellierungskonzeptes wurde in [PiMC2009] veröffentlicht.

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an der Beschreibung des Modellierungskonzeptes im Abschnitts 3.1: Es wird in den Abschnitten 4.1 bis 4.4 die Umsetzung der einzelnen Bestandteile des Modellierungskonzeptes beschrieben.

4.1 Umsetzung der Modellkomponenten

Die Umsetzung der Modellkomponenten wird über „Simple Modules“ der OMNeT++ Simulationsumgebung realisiert. Für jede Modellkomponente aus 3.1 existiert ein „Simple Module“. Falls in einem Szenario mehr als eine Modellkomponente dieses Typs auftritt, werden entsprechend mehr „Simple Modules“ definiert (siehe 4.4). Jedes „Simple Module“ eines Modellkomponententyps enthält den gleichen Programmcode, kann aber unterschiedlich parametrisiert werden.

4.1.1 Environment (ENV)

Die Komponente Umwelt (ENV) dient dazu die Dynamik nachzubilden, die aufgrund der Nutzermobilität entsteht. Da ein hybrides Simulationsmodell der Klasse II verwendet wird, müssen Aktualisierungszeitpunkte für die analytischen Modelle bestimmt werden, deren Ergebnis von der Mobilität der Nutzerendgeräte in der Umwelt abhängt. Wenn mit jeder Bewegung eines Nutzerendgerätes eine Aktualisierung dieser analytischen Modelle erfolgt, würde dies zu sehr hohem Rechenzeitverbrauch für die Berechnung der analytischen Modelle führen. Daher wurde eine spezielle Repräsentation der Umwelt gewählt, die den Gültigkeitszeitraum (siehe Bild 3.13) der analytischen Modelle verlängert, um den Rechenzeitverbrauch zu verringern. Eine Übersicht der Ein- und Ausgabeparameter der Komponente ENV ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Tabelle 4.1 Ein-/Ausgabeparameter der Komponente ENV

Eingangsparameter der Komponente	Ausgabeparameter der Komponente
<i>Von Komponente UE</i>	<i>An Komponente UE</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Mobilitätsparameter (Geschwindigkeitsbereich: Min, Max) • Lebenszeit (Beginn, Ende) • CRRM-Kommandos 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Informationen: Messwertreport (empfangbare Funkzugangssysteme, Empfangsqualität der Zellen an Position der Nutzerendgeräte)
<i>Von Komponente RAS</i>	<i>An Komponente RAS</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der Netzebenen zu Funkzugangssystemen und Nutzerendgeräten • Mittelpunkt und Radien der Zonen (guter, mittlerer Empfang) einer Zelle • CRRM-Kommandos 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionsaktualisierungsnachricht (Aktuelles Rasterelement, Abstand von Basisstation und Aktuelle Geschwindigkeit des Nutzerendgeräts, Empfangsqualität an Position des Nutzerendgeräts)
<i>Von CRRM</i>	<i>An CRRM</i>
-	-
<i>Eigene Parameter</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Ebenen und Rasterelementgröße der Ebenen 	

Repräsentation der Umwelt

Die Umwelt wird als Torus mit mehreren überlagerten Ebenen modelliert. Die Torusform erspart die aufwendige Behandlung von Fällen, die mit Randübertretungen zusammenhängen. Die Ebenen sind gerastert und unterscheiden sich hinsichtlich der Auflösung ihrer Rasterung. Als Grundbaustein der Rasterung wurde das Quadrat gewählt, um eine vollständige Parkettierung der Toruswelt zu gewährleisten. Weitere mögliche Grundformen mit der Fähigkeit zur vollständigen Parkettierung wären Dreieck, Raute und Hexagon. Das Hexagon hätte den Vorteil dass Zellstrukturen bei gleicher Auflösung besser abgebildet werden könnten. Durch die komplexeren Nachbarschaftsbeziehungen und die aufwändigere Schachtelung von überlagerten Ebenen unterschiedlicher Auflösung erschien diese Grundform jedoch als weniger geeignet.

Pro vorhandenen Netzwerktyp (WPAN, WLAN, WWAN, WGAN) existiert eine Ebene mit angepasster räumlicher Auflösung. Für jedes Rasterelement einer Ebene wird bestimmt, welche Funkzugangssysteme des entsprechenden Typs dort erreichbar sind und welche Empfangseigenschaften sie besitzen. Die Funkzugangssysteme besitzen dabei drei unterschiedliche Empfangsklassen:

- Guter Empfang
- Mittlerer Empfang
- Kein Empfang

Falls erforderlich, können auch mehr als drei Empfangsklassen definiert werden. Denkbar wäre z.B. eine spezielle Randzone, in der sich Störungen durch andere Zellen besonders bemerkbar machen. Die Eigenschaften dieser Klassen werden in der Komponente RAS genauer definiert. Die Verteilung der Empfangsklassen auf die Rasterelemente wird über Mittelpunkt und Radius der einzelnen Zellen des Funkzu-

gangssysteme definiert und entsprechend Bild 4.1 auf die Rasterelemente übertragen. Ein Rasterelement gehört dabei der besten Klasse an, die dieses Rasterelement überschneidet. Die Definition über Mittelpunkt und Radius dient einer einfachen Szenariodefinition. Eine direkte Zuweisung der Qualitätsklassen auf die Rasterelemente und mehr als drei Qualitätsklassen für komplexere Szenarien sind möglich, aber es ist aktuell keine Schnittstelle dafür definiert.

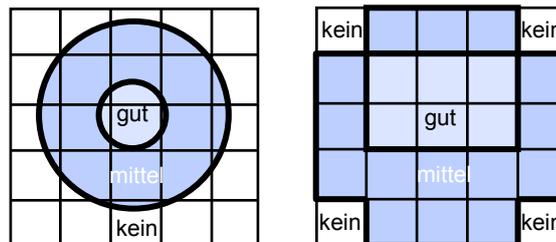


Bild 4.1 RAS-Empfangsklassen und deren Abbildung auf ENV-Rasterelemente

Der Aufbau der Umwelt wird im Bild 4.2 dargestellt. Die Kantenlängen der Rasterelemente untergeordneter Ebenen sind jeweils ganzzahlige Vielfache der Kantenlänge des übergeordneten Rasterelements. Dadurch ist es möglich, einem Rasterelement immer eindeutig die jeweiligen enthaltenen bzw. überdeckenden Rasterelemente der anderen überlagerten Ebenen der Toruswelt zuzuordnen. Dies grenzt den Suchraum für empfangbare Zellen der Funkzugangssysteme an der Position eines Nutzerendgerätes stark ein.

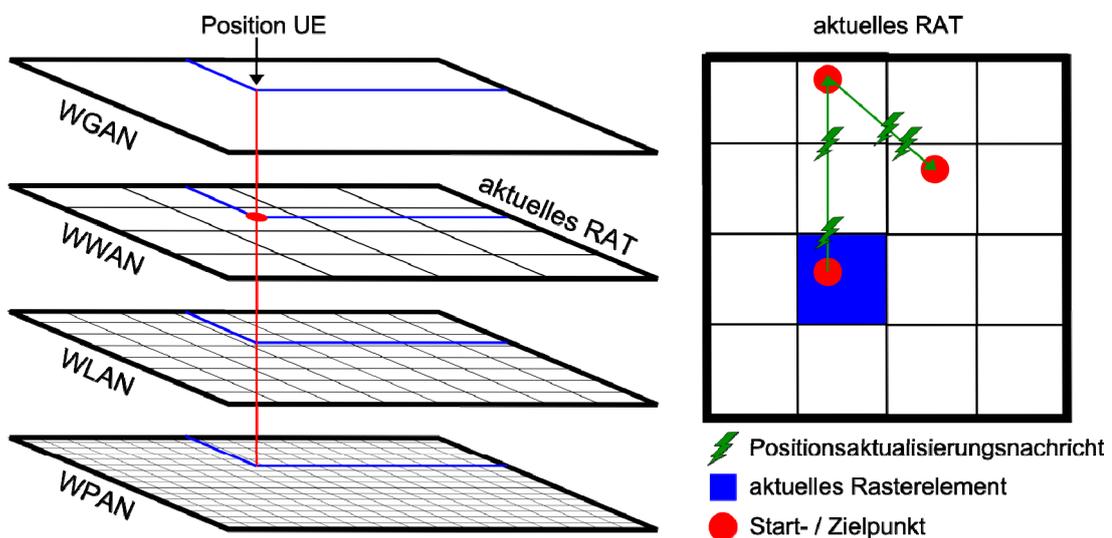


Bild 4.2 Ebenen und Rasterelemente der Umwelt

Die Kantenlänge der obersten Netzebene definiert die Größe der Toruswelt im Szenario. Falls unterschiedliche Empfangsqualitäten für die WGAN Netzebene nötig sein sollten, ist es problemlos möglich auch die WGAN Ebene mit einer Rasterung zu versehen.

Zusammenfassend sind folgende Informationen pro Rasterelement vorhanden:

- Elementdimensionen
- Elementnachbarn (N,O,S,W)
- überdeckende bzw. enthaltende Elemente über- / untergeordneter Netzebenen
- Empfangbare Funkzugangssysteme
- Empfangsqualität der Zellen der Funkzugangssysteme
- Abstand des Elementmittelpunktes zu den Basisstationen der Zellen

Repräsentation der Mobilität

Die Mobilität der Nutzerendgeräte wird über Rasterelementwechsel realisiert. Die Nutzerendgeräte bewegen sich von Rasterelement zu Rasterelement, aber nicht innerhalb der Rasterelemente. Gewählt werden dazu die Rasterelemente der Netzebene, die der Funkzugangstechnologie des Funkzugangssystems entsprechen, mit dem das Nutzerendgerät verbunden ist. Dies bedeutet, wenn das Nutzerendgerät z.B. eine Verbindung zu einem WWAN System unterhält, wird seine Mobilität entsprechend der Auflösung der Rasterelemente der WWAN-Ebene berechnet. Die Position der Nutzerendgeräte ist daher auch nur entsprechend der Rasterelementdimensionen der aktuellen Ebene bekannt. Falls die Mobile zu einer Ebene mit einer feineren Auflösung wechselt, muss ein im aktuellen Rasterelement enthaltenes Rasterelement der höher aufgelösten Ebene gewählt werden. Dies geschieht basierend auf Bewegungsrichtung und Aufenthaltsdauer des Nutzerendgerätes im aktuellen Element.

Immer wenn ein Nutzerendgerät eine Rasterelementgrenze überschreitet, wird eine Positionsaktualisierungsnachricht erzeugt (siehe Bild 4.2). Diese Nachricht wird an die RAS-Komponente versandt, die eine Verbindung zum Nutzerendgerät aufrecht erhält. Daraufhin wird das analytische Modell, welches das Verhalten dieser RAS-Komponente bestimmt, mit den aktualisierten Eingabeparametern neu ausgewertet.

Als Mobilitätsmodell wird das Random-Waypoint Modell [Boud2005] verwendet. Die Verweildauer und das Folgerasterelement werden über ein analytisches Modell durch die Geschwindigkeit und die Start-/Zielkoordinaten des Nutzerendgeräts bestimmt. Zur Verkürzung der transienten Phase werden die Startpunkte und Startgeschwindigkeiten der einzelnen Nutzerendgeräte gemäß dem Verfahren aus [BoVo2006] basierend auf dem Palm Calculus ermittelt.

Exkurs: Palm Calculus für Random-Waypoint Modell in einer Toruswelt

Die Gleichverteilung der Positionen der Nutzerendgeräte ist in einer Toruswelt gewährleistet, wenn die Zielpunkte der Nutzerendgeräte gleichverteilt gezogen werden. Die langfristige Verteilung der Geschwindigkeit ist jedoch vom in [Boud2005] beschriebenen Verhalten beeinflusst. Die Geschwindigkeiten und Zielpunkte der Nutzerendgeräte werden nach dem Random-Waypoint Modell folgendermaßen festgelegt: Erreicht das Nutzerendgerät seinen Zielpunkt (X,Y) wird in den Intervallen $[X_{Min}, X_{Max}]$ und $[Y_{Min}, Y_{Max}]$ gleichverteilt ein neuer Zielpunkt gezogen, wobei durch $X_{Max} - X_{Min}$ und $Y_{Max} - Y_{Min}$ jeweils die Kantenlänge der Toruswelt angegeben wird. Außerdem wird eine neue Geschwindigkeit v gleichverteilt im Intervall $[v_{Min}, v_{Max}]$ ($v_{Min} > 0$) gezogen. Die Beobachtungszeitpunkte der Simulation sind im Allgemeinen nicht identisch mit den Zeitpunkten der Ziehungen neuer Zielpunkte und Geschwindigkeiten. Dies bewirkt, dass im Allgemeinen die stationäre Verteilung der Geschwindigkeiten der Nutzerendgeräte zu diesen Beobachtungszeitpunkten ungleich der gewählten Geschwindigkeitsverteilung ist. Es werden im stationären Fall im Mittel mehr Nutzerendgeräte mit Geschwindigkeiten nahe an v_{Min} existieren als Nutzerendgeräte mit Geschwindigkeiten nahe an v_{Max} . Hervorgerufen wird dies durch die längere Zeitdauer, die Nutzerendgeräte mit kleineren Geschwindigkeiten benötigen, um ihren Zielort zu erreichen. Dadurch wird auch seltener eine neue Geschwindigkeit für diese langsamen Nutzerendgeräte gezogen. Über die Zeit ergibt dies eine größere mittlere Anzahl von langsamen Nutzerendgeräten.

Das im Folgenden erläuterte Verfahren nach [BoVo2006] stellt sicher, dass die Simulation bereits mit der stationären Geschwindigkeitsverteilung der existierenden Nutzerendgeräte gestartet wird und das System diese Geschwindigkeitsverteilung beibehält. Dabei kann der Ablauf grob in zwei Phasen eingeteilt werden. Initial werden in der ersten Phase für jedes Nutzerendgerät gleichverteilt auf dem Torus Start- und Zielpunkt und Geschwindigkeit bestimmt. Dann wird über die Palmerwartung der Zeitdauern bis zum Erreichen des Zielpunktes die Restdauer der aktuellen Bewegung des Nutzerendgeräts auf dem Start-Zielvektor bestimmt – so wie sie sich ergeben würde, wenn das Nutzerendgerät schon unendlich lange im System wäre und zufällig beobachtet werden würde (Bestimmung siehe Tabelle 4.2). Anhand des Start-Zielvektors und der bestimmten Restdauer wird dann die initiale Position des Nutzerendgeräts festgelegt. Falls andere Mobilitätsmodelle gewählt werden, müssen entsprechend Anpassungen an die Berechnung aus Tabelle 4.2 vorgenommen werden.

Die Phase zwei des Verfahrens besteht aus dem Ziehen neuer Geschwindigkeiten während der Lebenszeit der Nutzerendgeräte. Die Vorschriften für diese Phase haben sich jedoch als nicht zielführend für Nutzerendgeräte mit endlicher Lebenszeit erwiesen. Eine ausführliche Untersuchung dieses Problems ist im Abschnitt 5.1.2 auf Seite 121 zu finden. Die Ziehung neuer Geschwindigkeiten der Nutzerendgeräte wurde daher heuristisch auf ein Intervall $\pm 5\%$ um die aktuelle Geschwindigkeit des Nutzerendgeräts begrenzt. Langsame Nutzerendgeräte bleiben dadurch hinreichend lange langsam und schnelle Nutzerendgeräte bleiben hinreichend lange schnell innerhalb der in den Szenarien

rien gewählten Lebenszeiten. Dadurch konnte das Mobilitätsmodell für relativ kurze Lebenszeiten bis 1000 s ausreichend stabilisiert werden. Dies führte zu einer Verkürzung der transienten Phase und zu einer annähernden Gleichverteilung der beobachteten Geschwindigkeiten.

Tabelle 4.2 Berechnung der initialen Position und Geschwindigkeit eines Nutzerendgeräts

Eingabe	$(X, Y)_{\text{Start}}; (X, Y)_{\text{Ziel}}; v_{\text{Min}}; v_{\text{Max}}$
Berechnung	$d = \text{Abstand } (X, Y)_{\text{Start}} \text{ zu } (X, Y)_{\text{Ziel}}$ $v = \text{i.i.d. Zufallszahl in } [v_{\text{Min}}, v_{\text{Max}}]$ $t_{\text{Min}} = d / v_{\text{Max}}$ $t_{\text{Max}} = d / v_{\text{Min}}$ $u = \text{i.i.d. Zufallszahl in } [0, 1)$ Wenn $(u \leq (2 * t_{\text{Min}} / (t_{\text{Min}} + t_{\text{Max}})))$ Dann $t_{\text{Rest}} = u * (t_{\text{Min}} + t_{\text{Max}}) / 2$ Sonst $t_{\text{Rest}} = t_{\text{Max}} - \text{sqrt}((1 - u) * (t_{\text{Max}}^2 - t_{\text{Min}}^2))$ $d_{\text{Rest}} = \min(d, t_{\text{Rest}} * v)$ $\alpha = \text{Cos}^{-1}((X_{\text{Ziel}} - X_{\text{Start}}) / d)$ $X_{\text{Start-Neu}} = X_{\text{Ziel}} + d_{\text{Rest}} * \text{Cos}(\alpha)$ $Y_{\text{Start-Neu}} = Y_{\text{Ziel}} + d_{\text{Rest}} * \text{Sin}(\alpha)$ (Torusform beachten!)
Ausgabe	$(X, Y)_{\text{Start-Neu}}; (X, Y)_{\text{Ziel}}; v$

Ablaufdiagramm für Komponentenverhalten

Im Ablaufdiagramm in Bild 4.3 sind die wichtigsten Abläufe in der Komponente Umwelt, bezogen auf ein Nutzerendgerät, dargestellt. Das Ablaufdiagramm ist an die Symbolik eines UML 2 Aktivitätsdiagramms angelehnt. Zur Verdeutlichung wurden an die einzelnen Übergänge zusätzlich die auslösenden Ereignisse oder Nachrichten angegeben (siehe Anhang für eine Erläuterung der verwendeten Symbolik). Wenn ein neues Nutzerendgerät erzeugt wurde, wird seine Mobilität entsprechend der Mobilitätsparameter initiiert. Außerdem werden die aktuell empfangbaren Funkzugangssysteme ermittelt. In der Initiierungsphase vergeht keine Zeit für die Ermittlung der Funkzugangssysteme; jede weitere Messung benötigt die im Messintervall definierte Zeitdauer. Nach der Messung wird der Messwertreport erzeugt – mit den an der Position der Mobilien empfangbaren Zellen der Funkzugangssysteme geordnet nach Empfangsklasse. Falls die Messung als periodisch gekennzeichnet ist, wird die Messung erneut gestartet. Nachdem die Mobilität initiiert wurde, wird das Nutzerendgerät nach dem oben beschriebenen Random-Waypoint Modell über den Torus bewegt und bei Überschreiten der Rasterelementengrenzen werden entsprechende Positionsaktualisierungsnachrichten abgesetzt und eine neue Bewegungsphase beginnt. Die Netzebene wird dabei durch die „Wechsle Ebene“ Nachricht gewählt (siehe MOBILE_CHANGE_LAYER Nachricht im Abschnitt 4.2). Initial wird für alle Nutzerendgeräte die oberste Netzebene verwendet.

Zeitbehaftete Zustände sind die Zustände „Messung“ und „Bewegung“. Das Nutzerendgerät kann gleichzeitig beide Aktivitäten durchführen. Wenn die Nutzerendgeräte aus der Komponente UE gelöscht wurden, werden sie ebenfalls aus der Komponente ENV entfernt. Zugehörige Messungen und Bewegungen werden verworfen.

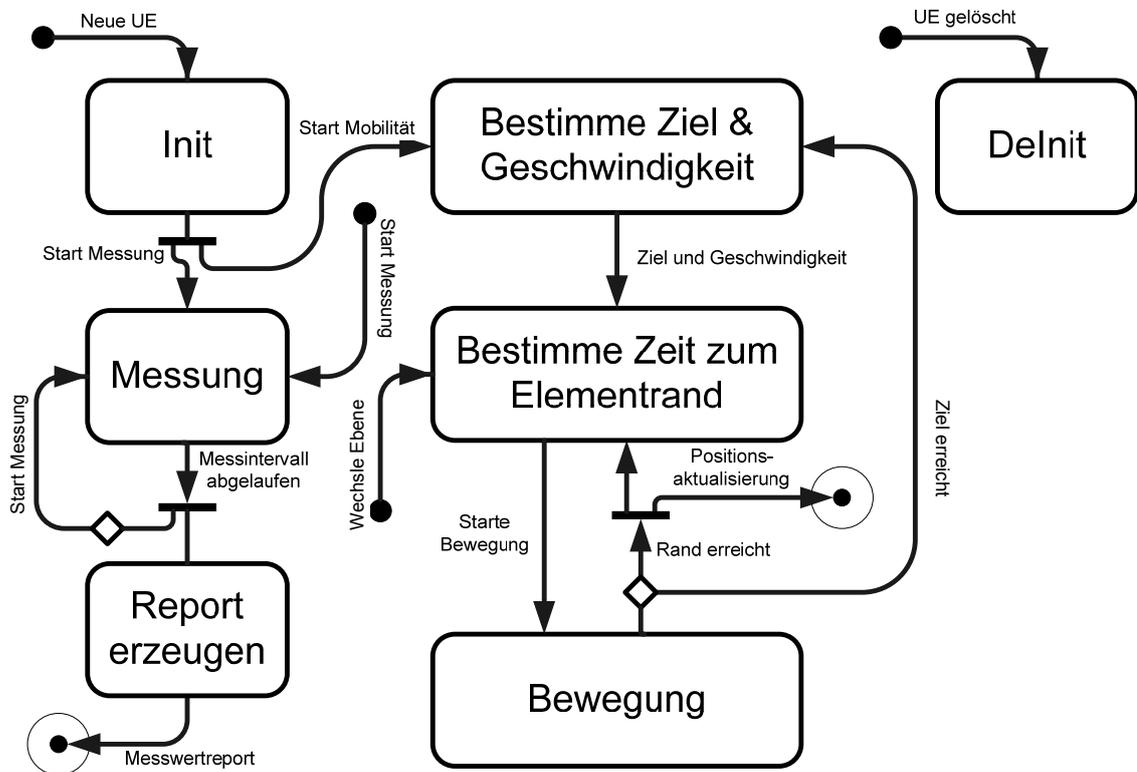


Bild 4.3 ENV Ablaufdiagramm für ein Nutzerendgerät

4.1.2 User Equipment (UE)

Die UE-Komponente simuliert die Dynamik, die durch das Nutzerverhalten hinsichtlich der unterschiedlichen Dienstanforderungen, entsteht. Eine UE-Komponente simuliert dabei mehrere Nutzerendgeräte und deren Dienste. Die Konzeption sieht vor, dass jedem Nutzerendgerät nur eine Dienstverbindung zugeordnet wird. Jedes Nutzerendgerät gehört dabei einer bestimmten Klasse an. Pro Klasse wird festgelegt, welche Funkzugangstechnologien die einzelnen Nutzerendgeräte unterstützen und welche Merkmale die Dienste besitzen. Für die einzelnen Klassen werden entsprechend einer definierten Zwischenankunftszeitverteilung neue Nutzerendgeräte erzeugt. Mit Beginn der Lebenszeit eines Nutzerendgerätes versucht es, eine Verbindung entsprechend seiner Klassenparameter zu einem Funkzugangssystem aufzubauen. Mit dem Ende der Lebenszeit wird das Nutzerendgerät wieder aus der UE-Komponente entfernt. Ursache für das Lebenszeitende kann ein erfüllter Verbindungswunsch oder ein Verbindungsfehler sein. Eine Übersicht der Ein- und Ausgabeparameter der Komponente UE ist in Tabelle 4.3 zu finden.

Tabelle 4.3 Ein-/Ausgabeparameter der Komponente UE

Eingangsparameter der Komponente	Ausgabeparameter der Komponente
<i>Von Komponente ENV</i>	<i>An Komponente ENV</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Informationen: Messwertreport (empfangbare Funkzugangssysteme, Empfangsqualität der Zellen an Position der Nutzerendgeräte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilitätsparameter (Geschwindigkeitsbereich: Min, Max) • Lebenszeit (Beginn, Ende) • CRRM-Kommandos
<i>Von Komponente RAS</i>	<i>An Komponente RAS</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungsende • Verbindungsfehler • Verbindungseigenschaften (gebotene QoS), • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Startzeitpunkte der ON-OFF Phasen der Dienste • Verbindungsinitialisierung • Verbindungsende • Dienstqualitätsanforderungen • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Von CRRM</i>	<i>An CRRM</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Eigene Parameter</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Mobilitätsparameter • Dienstparameter • Geräteparameter 	

Dienstqualitätsanforderungsprofil

Die Dienstqualitätsanforderungen der Nutzer werden über ein Dienstqualitätsprofil mit je einem Anforderungsprofil pro Dienstqualitätsparameter und Nutzerklasse modelliert. Dieses Profil basiert auf einer vereinfachten Version der in [QuMB1998] beschriebenen Möglichkeit Dienstqualitätsprofile zu definieren. Für einen Parameterwert D (z.B. Datenrate in kbit/s) wird ein Anforderungsprofil P über die minimal und maximal erforderlichen Parameterwerte D_{Min} und D_{Max} definiert. Aus diesen Werten ergeben sich drei Qualitätsbereiche: Intolerabel wegen Untererfüllung, Einhaltung des Toleranzbereichs und Übererfüllung. Im Qualitätsbereich „Intolerabel wegen Untererfüllung“ wird die gebotene Dienstqualität vom Nutzer abgelehnt. In den anderen beiden Qualitätsbereichen ist der Nutzer mit der Dienstqualität zufrieden. Der Grad der Zufriedenheit wird über das Erfüllungsintervall $(P_{Min}, P_{Max}]$ angegeben. P_{Min} steht für „Der Nutzer ist unzufrieden“. P_{Max} steht für „Der Nutzer ist zufrieden“. Der Qualitätsbereich „Übererfüllung“ wird vom Nutzer nicht beanstandet, ist aber für den Netzbetreiber nicht vorteilhaft, da Ressourcen verschwendet werden. Die Definition der Qualitätsbereiche und des Erfüllungsintervalls wird in Bild 4.4 beschrieben.

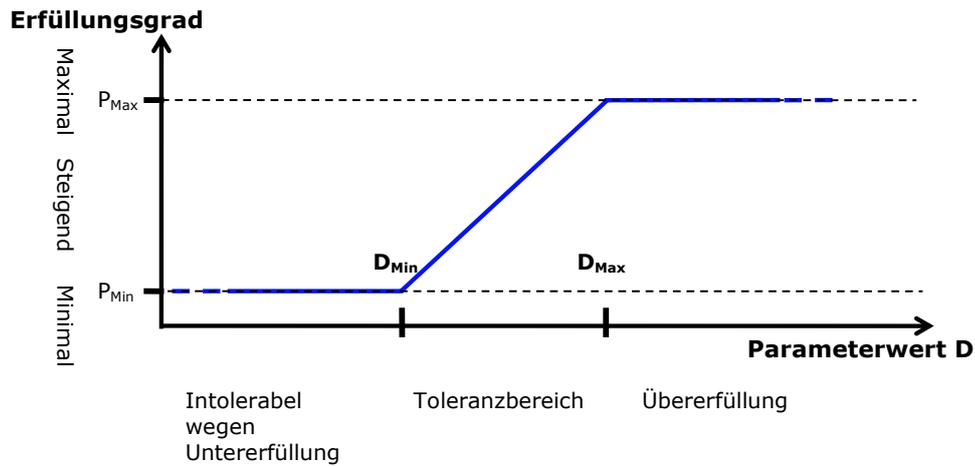


Bild 4.4 Anforderungsprofil (P) für einen Dienstqualitätsparameter

Für den Simulator wurde eine für die einzelnen Erfüllungsbereiche lineare Funktion gewählt, um den Grad der Erfüllung zu beschreiben. Formel (4.1) beschreibt den Grad der Erfüllung P_i für den Dienstqualitätsparameter i mit der momentan gebotenen Dienstqualität D_i in Abhängigkeit von $D_{i,Min}$ und $D_{i,Max}$.

$$P_i = \begin{cases} P_{Min} & D_i < D_{i,Min} \\ P_{Min} + (P_{Max} - P_{Min}) \cdot \left(1 - \frac{D_{i,Max} - D_i}{D_{i,Max} - D_{i,Min}} \right) & D_{i,Min} \leq D_i < D_{i,Max} \\ P_{Max} & D_i \geq D_{i,Max} \end{cases} \quad (4.1)$$

Folgende Werte sind für P_{Min} und P_{Max} für alle i festgelegt: $P_{Min} = 0$; $P_{Max} = 1$. Über Formel (4.2) werden die Erfüllungsgrade der einzelnen Dienstqualitätsparameter P_i zusammengefasst.

$$QoS = \prod_i P_i \quad (4.2)$$

Dieses Produkt der einzelnen P_i stellt die aggregierte erreichte Dienstqualitätserfüllung QoS des Dienstes dar. Falls die erreichte Dienstqualitätserfüllung einen Wert größer ε annimmt, ist die gebotene Dienstqualität ausreichend für den Nutzer. Für $QoS < \varepsilon$ wird die Verbindung abgebrochen. Die Erfüllung der Dienstqualität wird zu Beginn und am Ende jeder ON-Phase (Erläuterung siehe nächsten Absatz) bestimmt. Die Komponente RAS unterstützt folgende Dienstqualitätsparameter: Datenrate, Übertragungsdauer (Delay), RLC-Paketfehlerwahrscheinlichkeit (Siehe Abschnitt 4.1.3). Weitere Parameter sind je nach verwendetem Modell der Funkzugangstechnologie möglich.

Diensttypen

Die Kommunikationsverbindung der Nutzerendgeräte wird nicht auf Paketebene simuliert, sondern es wird auf der Flussebene unterschieden zwischen einzelnen ON/OFF Phasen (ON = Ressourcenbelegung, OFF = keine Ressourcenbelegung) innerhalb des Verbindungszeitraumes eines Dienstes. Die Länge der ON-Phase von Real-Time Diensten ist gleich der Länge des Verbindungszeitraumes, da diese Dienste ununterbrochen Daten übertragen müssen (z.B. Audio- oder Video-Informationen), um eine ausreichende Dienstqualität zu bieten. Die gewünschte Dauer der Verbindung ist ein Parameter des Dienstes. Die Dauer entspricht der Verweilzeit der Nutzerendgeräte im System. Non-Real-Time Dienste besitzen definierte ON- und OFF-Phasen. Die jeweilige Länge der ON-Phase entspricht dabei der Zeit, um die für diese Phase definierte Datenmenge zu übertragen. Die Länge der OFF-Phase entspricht der Ruhe- bzw. Lese- oder Suchzeit des Nutzers. Im Bild 4.5 ist die unterschiedliche Definition von Real-Time und Non-Real-Time Diensten graphisch veranschaulicht. Zusätzlich kann zwischen leitungsvermittelten Diensten mit exklusiver Ressourcenbelegung und paketvermittelten Diensten mit häufig gemeinsamer Ressourcennutzung unterschieden werden. Die meisten der oft genutzten Dienste sind asymmetrisch hinsichtlich ihrer Ressourcenanforderungen in Up- und Downlink-Richtung. Daher wurde in den Simulator eine Unterscheidung hinsichtlich der Link-Richtung integriert. Ein Dienst kann in seiner ON-Phase eine Verbindung in Uplink-Richtung, in Downlink-Richtung oder in beide Richtungen gleichzeitig aufrecht erhalten.

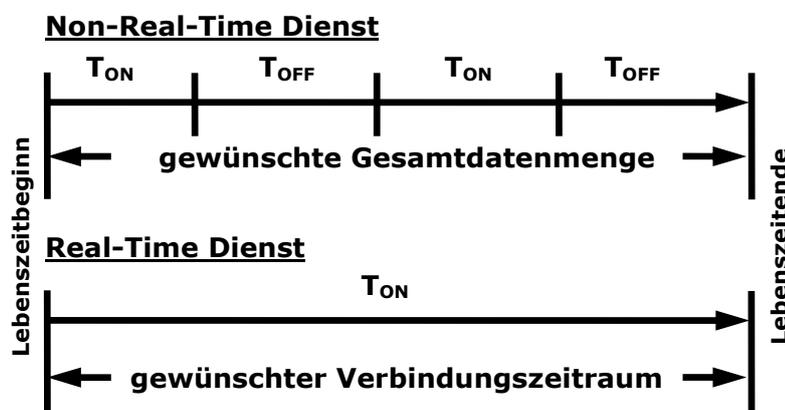


Bild 4.5 Phasen der Real-Time und Non-Real-Time Dienste

Analytische Modelle des Dienstverhaltens

In den Simulator integriert wurden das Modell eines Sprachdiensts als leitungsvermittelter Real-Time Dienst und das Modell eines Web-Seiten-Anforderungsdienstes als paketvermittelter Non-Real-Time Dienst. Für beide Diensttypen kann die Verteilung der

Zwischenankunftszeit neuer Verbindungen A_{UE} über die Wahl des Verteilungstyps, des Mittelwertes $E[A_{UE}]$ und des Variationskoeffizienten $VK[A_{UE}]$ definiert werden.

Für die leitungsvermittelten Sprachdienste kann die Verteilung der Verweilzeit (Gesprächsdauer) ebenfalls über die Wahl des Verteilungstyps, des Mittelwertes und Variationskoeffizienten definiert werden. Sie halten während der ON-Phase gleichzeitig eine Uplink- und Downlink-Verbindung aufrecht. Die einzelnen Sprecher werden nicht gesondert modelliert, aber Sprechpausen werden über einen Aktivitätsparameter berücksichtigt. Dieser Parameter gibt an, wie stark der Nutzer im Mittel seine exklusive Verbindung tatsächlich ausnutzt. Ist der Aktivitätsparameter gleich eins, spricht der Nutzer ununterbrochen. Ist der Aktivitätsparameter gleich null, spricht der Nutzer nie während seiner ON-Phase.

Der paketvermittelte Web-Seiten-Anforderungsdienst basiert auf dem bekannten Modell von Choi and Limb [ChLi1999]. Dieses Modell unterscheidet zwischen einer Seitenanforderungs- und Ladephase sowie der Lesephase des Nutzers. Die Datenübertragung ist also in zwei Abschnitte geteilt. Phase eins ist die Übertragung der Anforderungsobjekte im Uplink und Phase zwei ist die Übertragung der Inhaltsobjekte im Downlink. Das Anforderungsobjekt besitzt dabei eine laut Tabelle 4.4 definierten Umfang $S_{Anforderung}$. Die Datenmenge S_{Inhalt} des pro Anforderung zu übertragenden Inhaltsobjekts im Downlink setzt sich zusammen aus einem Hauptobjekt S_{Haupt} und N_{Neben} vielen Nebenobjekten S_{Neben} wie in Formel (4.3) dargestellt.

$$S_{Inhalt} = S_{Haupt} + \sum_{k=1}^{N_{Neben}} S_{Neben,k} \quad (4.3)$$

Die Übertragung des Anforderungsobjektes $S_{Anforderung}$ stellt eine ON-Phase in Uplink-Richtung dar. Die Übertragung des Inhaltsobjektes S_{Inhalt} ist eine anschließende ON-Phase in Downlinkrichtung. Die Dauer der Phasen und damit der Datenübertragung wird von der Dienstqualität der Verbindung bestimmt. Der Nutzer selbst verbraucht keine Zeit zwischen Anforderung und Inhaltsübertragung, daher besitzt die entsprechende OFF-Phase die Dauer null. Die Lesephase (bzw. OFF-Phase) schließt sich immer an eine Inhaltsübertragungsphase an und besitzt eine Weibull verteilte Zeitdauer. In dieser Zeit belegt der Dienst keine Ressourcen im Funkzugangssystem. Die Verbindung zum Funkzugangssystem wird jedoch aufrecht erhalten. Die gewünschte Gesamtdatenmenge S_{Gesamt} bestimmt die Anzahl der ON-Phasen C_{ON} innerhalb der Lebenszeit des Dienstes, wobei die letzte ON-Phase ($j = C_{ON}$) nicht mehr Daten übertragen kann, als noch von der Gesamtdatenmenge zu übertragen ist.

$$S_{Gesamt} = \sum_{j=1}^{C_{ON}} S_{Inhalt,j} \quad (4.4)$$

Die Gesamtdatenmenge S_{Gesamt} ist ein Parameter des Dienstes. Der Modellteil nach Choi und Limb wird entsprechend Tabelle 4.4 parametrisiert. Für die im Simulator untersuchten Szenarien erscheint dieses Modell immer noch aussagekräftig, da von mobilen Nutzern aufgerufene Webseiten meistens speziell an die Bedürfnisse mobiler Nutzer angepasst sind und die Übertragung eher kleinerer Datenmengen erfordern. In jedem Fall muss vor Verwendung des Simulators überprüft werden ob dieses Modell auch auf das untersuchte Szenario passt. Für den Fall, dass neue Modelle benötigt werden, sollte darauf geachtet werden, dass diese auch auf einem ON/OFF-Phasenwechsel basieren. In diesem Fall ist eine Integration in den Simulator sehr einfach möglich.

Tabelle 4.4 Parameter des Modells nach Choi und Limb

Variable	Verteilungstyp	Mittelwert	Standardabweichung	Richtung
$S_{Anforderung}$	Log-Normal	360 Byte	106.5 Byte	Uplink
S_{Haupt}	Log-Normal	10 kByte	25 kByte	Downlink
S_{Neben}	Log-Normal	7,7 kByte	126 kByte	Downlink
N_{Neben}	Gamma	5,5	11,4	Downlink
$t_{Lesen}(T_{OFF})$	Weibull	39.5 s	92.6 s	-

Ablaufdiagramm für Komponentenverhalten

Das in Bild 4.6 dargestellte abstrahierte Komponentenverhalten (Siehe Anhang für Symbolik) verdeutlicht den Ankunftsprozess und das Verhalten der Nutzerendgeräte. Neue Kommunikationswünsche unterschiedlicher Klassen werden gemäß eines über Zwischenankunftszeit und Variationskoeffizienten definierten Ankunftsprozesses der Klasse erzeugt. Es ist auch möglich die Anzahl der Nutzerendgeräte konstant zu halten. In dem Fall wird nur für jedes gelöschte Nutzerendgerät ein Neues erzeugt. Die einzelnen Nutzerendgeräte können nur einen Dienst anfordern und haben die Globalzustände „Verbunden“ bzw. „Nicht Verbunden“. Im Zustand „Nicht Verbunden“ versucht das Nutzerendgerät eine Verbindung zu einem Funkzugangssystem aufzubauen. Im Zustand „Verbunden“ wird der dem Dienstyp entsprechende Phasenwechsel durchgeführt. Wechsel zwischen den Globalzuständen können durch Verbindungsfehler oder den Start einer neuen ON-Phase nach erfolgreichem Verbindungsaufbau eintreten. In der Initialisierungsphase werden entsprechend der Dienstklasse die Geräteeigenschaften und die Dienstanforderungen festgelegt. Außerdem wird in der Komponente ENV die Mobilität initialisiert sowie die verfügbaren Funkzugangssysteme bestimmt. Mit diesen Informationen ermittelt das lokale CRRM-Modul die geeigneten Funkzugangssysteme. Falls kein geeignetes Funkzugangssystem gefunden wurde, wird der Kommunikationswunsch abgelehnt und das Nutzerendgerät aus dem System entfernt. Andernfalls wird versucht eine Verbindung zu geeigneten Funkzugangssystemen aufzubauen. Kann ein gewähltes Funkzugangssystem die Verbindung nicht tragen, wird die Verbindung blockiert und die Dienstanforderung an die lokale CRRM-Komponente zurückverwiesen. Ist der Verbindungsaufbau erfolgreich, geht der Dienst des Nutzerendgeräts in seine ON-Phase über. Er verlässt die ON-Phase, wenn die OFF-Phase beginnt, die Verbindung abbricht oder die Dienstanforderung komplett erfüllt ist und damit das Lebenszeitende erreicht

ist. Im Falle eines Verbindungsabbruchs wird die Dienstanforderung wieder an die lokale CRRM-Komponente verwiesen. Wenn die Dienstanforderung erfüllt wurde, wird die Verbindung zum Funkzugangssystem abgebaut und das Nutzerendgerät aus dem System entfernt. Falls während der Lebenszeit des Nutzerendgerätes CRRM-Nachrichten eintreffen, werden diese entweder an die Zielkomponenten weitergeleitet oder die entsprechenden Informationen bzw. Kommandos vom Nutzerendgerät verarbeitet. Es kann sein, dass im Zuge der Umsetzung die Verbindung des Nutzerendgerätes zum Funkzugangssystem beendet wird.

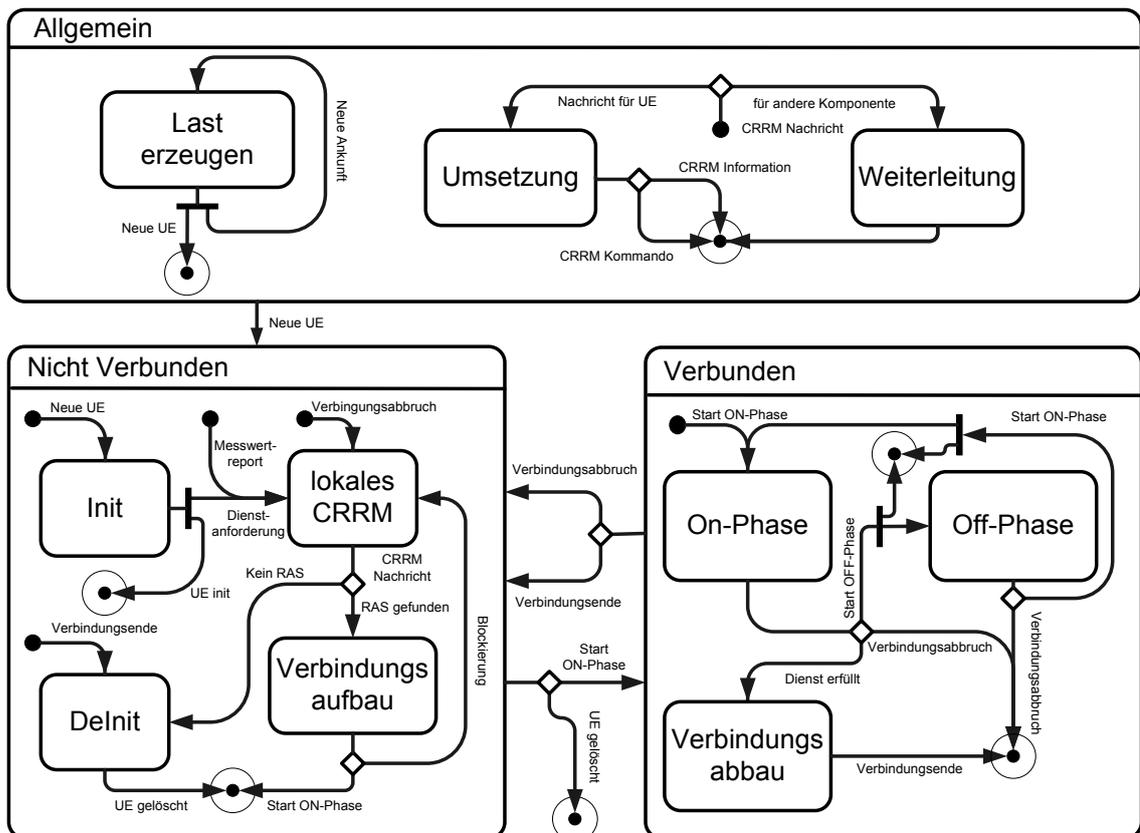


Bild 4.6 UE Ablaufdiagramm

Zeitbehaftete Zustände sind:

- „lokales CRRM“ – hier wird auf die Reaktion des lokalen CRRM gewartet.
- „Verbindungsaufbau“ und „Verbindungsabbau“ – hier wird auf die Reaktion der RAS-Komponente gewartet.
- „ON-Phase“ und „OFF-Phase“ – hier vergeht die für die Phasen definierte Zeit.
- „Last erzeugen“ – hier vergeht die Zeit bis zur Ankunft eines neuen Nutzerendgerätes (gehört nicht zum eigentlichen Verhalten des Nutzerendgerätes).

Dabei sind die Zustände „lokales CRRM“, „Verbindungsaufbau“ und „Verbindungsabbau“ eine Zusammenfassung von Abläufen und Kommunikationsvorgängen. In den

Zuständen „Umsetzung“ und „Weiterleitung“ vergeht keine Zeit. Die von den Zuständen ausgehenden Nachrichten können aber zeitbehaftet sein.

4.1.3 Radio Access System (RAS)

Der Einsatzzweck des Simulators ist eine Untersuchung verschiedener Algorithmen für CRRM. Das Ziel besteht daher darin, die grundsätzlichen Effekte und Verhaltensweisen von CRRM-Algorithmen in heterogenen Netzen zu ermitteln. Hierfür sind Submodelle für verschiedene Funkzugangstechnologien bereit zu stellen. Aus den gegebenen Eingangsparametern der Simulatorumgebung sollen die in Tabelle 4.5 angegebenen Ausgangsparameter ermittelt werden, um das in Abschnitt 3.1.1 auf Seite 31 beschriebene Verhalten darstellen zu können. Das RAS-Modell soll daher so konstruiert sein, dass es einfach an verschiedene Funkzugangstechnologien angepasst werden kann. Um diesen einfachen Austausch der RAS-Modelle für verschiedene Funkzugangstechnologien zu gewährleisten und zusätzlich eine geringe Simulationslaufzeit zu erreichen, wurde wiederum ein hybrides Modell gewählt.

Tabelle 4.5 Ein-/Ausgabeparameter der Komponente RAS

Eingangsparameter der Komponente	Ausgabeparameter der Komponente
<i>Von Komponente ENV</i>	<i>An Komponente ENV</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Positionsaktualisierungsnachricht (Aktuelles Rasterelement, Abstand von Basisstation und Aktuelle Geschwindigkeit des Nutzerendgeräts, Empfangsqualität an Position des Nutzerendgeräts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der Netzebenen zu Funkzugangssystemen und Nutzerendgeräten, • Mittelpunkt und Radien der Zonen (guter, mittlerer Empfang) einer Zelle
<i>Von Komponente UE</i>	<i>An Komponente UE</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Startzeitpunkte der ON-OFF Phasen der Dienste • Verbindungsinitialisierung • Verbindungsende • Dienstqualitätsanforderungen • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungsende • Verbindungsfehler • Verbindungseigenschaften (gebotene QoS) • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Von CRRM</i>	<i>An CRRM</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Eigene Parameter</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Zellparameter • Kanalparameter 	

Die Bereitstellung der grundlegenden Funktionen des Funkzugangssystems wird über ein Simulationsmodell realisiert. Der Ressourcenaufwand im Funkzugangssystem und die gebotene Dienstqualität werden von analytischen Modellen ermittelt. Das Simulationsmodell definiert die Schnittstelle und ermittelt die benötigten Parameter für die analytischen Modelle. Dies hat den Vorteil, dass das RAS-Modell gut an die Anforderungen der analytischen Modelle angepasst werden kann und nach außen trotzdem

gleichbleibende Schnittstellen für die anderen Komponenten bereit stellt. Die analytischen Modelle geben das qualitative Verhalten der Funkzugangstechnologien wieder und stellen die für die CRRM-Algorithmen benötigten Informationen bereit. Durch den gewählten Aufbau wird eine aufwändige Simulation unterschiedlicher Funkzugangstechnologie-Funktionen und Protokolle vermieden.

Simulatives Modell

Das Simulationsmodell bestimmt die Aktualisierungszeitpunkte und definiert dadurch den Gültigkeitszeitraum der analytischen Modelle (siehe Bild 3.12 bis Bild 3.14). Zur Bestimmung dieser Zeitpunkte wird der in Bild 4.7 beschriebene zeitliche Ablauf der ON/OFF Phasenwechsel der Dienste zugrunde gelegt. Alle Ereignisse, die ein mit dem Funkzugangssystem verbundenes Nutzerendgerät betreffen, werden vom Simulationsmodell behandelt. So werden z.B. Handover in andere Zellen durchgeführt oder Messungen gestartet bzw. gestoppt. Je nach Zustand des Dienstes des Nutzerendgerätes ergibt sich daraus ein Aktualisierungszeitpunkt für ein analytisches Modell. Da die Dienste im verwendeten RAS-Modell nur in Ihrer ON-Phase tatsächlich Ressourcen belegen, muss das analytische RAS-Modell auch nur für Ereignisse in der ON-Phase eines Dienstes aktualisiert werden. Die ON-Phase eines Dienstes wird im RAS-Modell in zwei Teile unterteilt. Der erste Teil ist die Phase der Ressourcenzuweisung – Initialisierungsphase T_I . Der zweite Teil ist die Phase der aktiven Ressourcennutzung T_A .

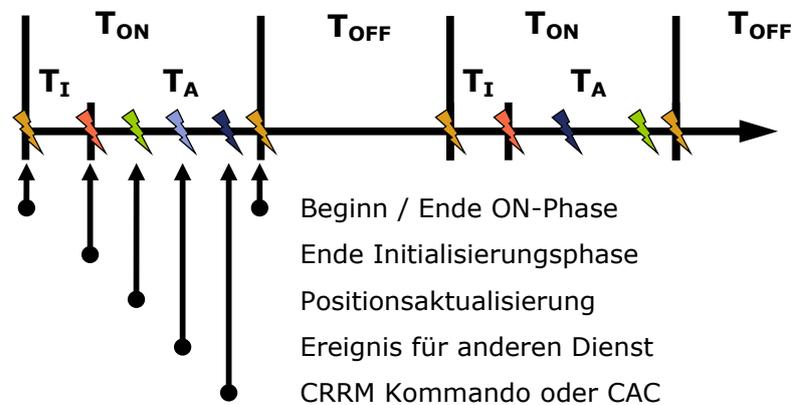


Bild 4.7 Modellaktualisierungszeitpunkte und Phasenaufteilung

Aktualisierungszeitpunkte der analytischen Modelle sind dann gegeben, wenn der Dienst eines Nutzerendgerätes, das mit dem Funkzugangssystem verbunden ist, seine ON-Phase startet oder beendet. Dazu muss zuerst ermittelt werden, wie lange eine Ressourcenzuweisung (Initialisierungsphase) bis zum Beginn einer aktiven Datenübertragung für diesen Dienst dauert. Durch den Beginn der aktiven Ressourcennutzung ergibt sich ein weiterer Aktualisierungszeitpunkt. Falls die Position des Nutzerendgerätes verändert wird, muss dies entsprechend berücksichtigt werden. Dabei können sich die Nutzerendgeräte entweder innerhalb der Zelle bewegen oder diese betreten bzw. verlassen.

Zusätzlich muss das Modellergebnis aktualisiert werden, wenn sich durch CRRM-Kommandos neue Eingabeparameter ergeben oder falls eines der genannten Ereignisse für einen anderen aktiven Dienst eintritt, der mit einer Zelle der RAS-Komponente verbunden ist.

Analytische Modelle, die für den Simulator geeignet sind, müssen der folgenden Schnittstellendefinition genügen, um die Funktion des Simulators zu gewährleisten. Sie müssen mindestens folgende Ausgabeparameter besitzen:

- Ressourcenverbrauch der einzelnen aktiven Dienstverbindungen
- Die gebotene Dienstqualität für die einzelnen aktiven Dienstverbindungen
- Länge der Ressourcen-Zugriffsphase
- Länge der Phase des aktiven Datentransfers (für Non-Real-Time Dienste)

Als Dienstqualitätsparameter werden unterstützt: Mittlere Datenrate, mittlere Übertragungsdauer (Delay) pro IP-Paket und die RLC-Paketfehlerwahrscheinlichkeit. Die Schwankung der Übertragungsdauer eines IP-Pakets hängt stark von der RLC-Paketfehlerwahrscheinlichkeit ab. Daher wird dieser Parameter als Dienstqualitätsparameter mit ausgegeben.

Zur Berechnung der Ausgabeparameter stehen den Modellen dabei folgende Eingabeparameter pro Nutzerendgerät und Zelle eines Funkzugangssystems zur Verfügung:

- Eigenschaften des Kanals an der Position der Nutzerendgeräte
- Eigenschaften der Zelle
- Eigenschaften des Dienstes
- Eigenschaften der Nutzerendgeräte

Die Parameter für die Eigenschaften des Kanals können dabei für jede Empfangsklasse (siehe 4.1.1) separat definiert werden. Neben den statischen Parametern der Zellen, die zu Beginn der Simulation festgelegt werden, sind auch zustandsabhängige Parameter im Simulationsmodell der RAS-Komponente definiert. Solche Parameter sind z.B. Zähler, die die Anzahl der aktiven Dienste in der Zelle erfassen. Die Eigenschaften der Dienste und die administrativen sowie technologischen Eigenschaften der Nutzerendgeräte werden in der Komponente UE festgelegt. Dies umfasst z.B. Parameter wie die Priorität des Dienstes oder die unterstützten Funkzugangstechnologien. Bild 4.8 verdeutlicht die Modellschnittstelle für die analytischen RAS-Modelle mit einigen Parameterbeispielen.

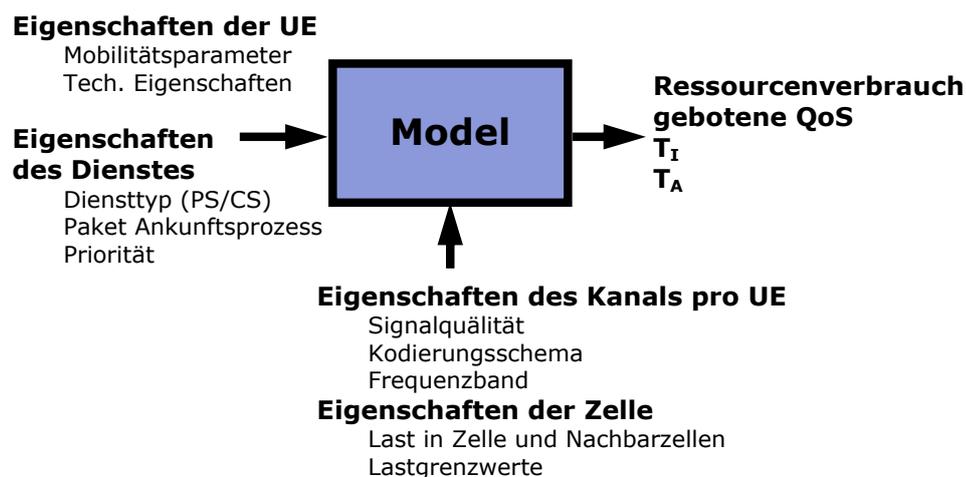


Bild 4.8 Schnittstellen für analytisches Modell in der RAS-Komponente

Es wird nicht unterschieden, ob eine Verbindung vom Netz oder von dem Nutzerendgerät selbst initiiert wird. Im Simulationsmodell werden alle Verbindungen von den Nutzerendgeräten initiiert. Falls der Aufwand für das Suchen des Nutzerendgerätes im Netz eines Betreibers für einen netzseitig initiierten Verbindungsaufbau auch untersucht werden soll, muss das Simulationsmodell dafür erweitert werden.

Die Call-Admission-Control wird über Grenzwerte realisiert. Der Ressourcenverbrauch in der Zelle wird durch die analytischen Modellteile berechnet und für die einzelnen Dienste vorhergesagt. Falls durch die Verbindung des Dienstes ein bestimmter Ressourcenverbrauch überschritten würde, wird die Verbindung blockiert bzw. abgebrochen.

Ein Funkzugangssystem kann je nach RAT aus einer oder mehreren Zellen bestehen. Die Handover zwischen den Zellen innerhalb eines Funkzugangssystems werden als zeitloser Zellwechsel durchgeführt. Dies geschieht aufgrund der Annahme, dass durch lokales RRM eine unterbrechungsfreie Verbindung gewährleistet werden kann.

Ablaufdiagramm für Komponentenverhalten

Aus den beschriebenen Eigenschaften des Simulationsmodells ergibt sich das in Bild 4.9 dargestellte Ablaufdiagramm. Die Komponente RAS erhält Nachrichten über neue Ereignisse wie Positionsaktualisierungen, Verbindungsanfragen von Diensten der Nutzerendgeräte oder über Phasenwechsel eines mit dem Funkzugangssystem verbundenen Dienstes (Siehe Bild 4.7). Die Parameteränderungen, die sich daraus ergeben, werden über die in der RAS-Komponente vorhandenen Modelle vorhergesagt und anschließend wird überprüft, ob genügend Ressourcen für diesen Dienst zur Verfügung stehen. Je nach Ergebnis und aktuellen Zustand (bestehende Verbindung, ON-/OFF-/Initialisierungs-/Aktivitäts-Phase) des Dienstes des Nutzerendgerätes wird die Anfrage entsprechend beantwortet. Das Modell wird anhand des sich daraus ergebenden Systemzustandes aktualisiert. Diese Abfolge wird auch eingehalten, falls CRRM-Kommandos den Systemzustand des Funkzugangssystems verändern. CRRM-

Nachrichten können auch zu weiteren CRRM-Nachrichten führen. Dies ist z.B. in Situationen der Fall, in denen Messungen gestartet oder gestoppt werden. Die möglichen Reaktionen auf an die RAS-Komponente gerichtete Nachrichten sind in Abschnitt 4.2 aufgeführt.

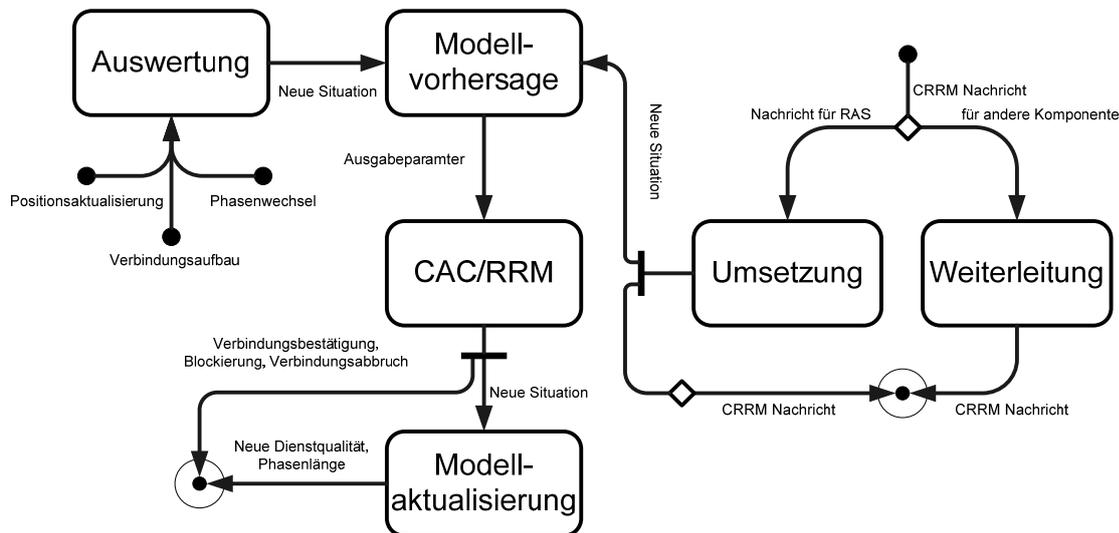


Bild 4.9 RAS Ablaufdiagramm

Analytische RAS-Modelle

Um verschiedene Aspekte von CRRM-Algorithmen untersuchen zu können, wurde bei der Auswahl der analytischen Modelle darauf geachtet, dass sie flexibel verschiedene Diensttypen und Technologievarianten abbilden können. Als Beispiele für die momentan weit verbreiteten CDMA und TDMA Technologien wurden analytische Modelle für auf UMTS und GSM (EGPRS) basierende Funkzugangssysteme verwendet. Beide Technologien unterstützen packet- und leitungsvermittelte Verbindungen. UMTS realisiert gemeinsam und exklusiv nutzbare Kanäle für Paketdatenverkehr, während GSM mit EGPRS hierfür nur von allen Nutzerendgeräten gemeinsam nutzbare Kanäle anbietet. Durch die unterschiedlichen Basistechnologien (CDMA, TDMA) und die unterschiedlichen Dienstqualitätsangebote können gut CRRM-Szenarien konstruiert werden, die unterschiedliche Aspekte der CRRM-Algorithmen beleuchten. Für die Betrachtung von analytischen Modellen für CRRM ist außerdem ein sehr einfaches RAT Modell integriert, welches auf der Vergabe von Bandwidth-Units (BWU) basiert [PeCa2009].

Einschränkungen

Existierende analytische Modelle, die Long-Range-Dependent und Self-Similar Eigenschaften von IP-Datenverkehr berücksichtigen und entsprechendes Systemverhalten nachbilden können, sind zu komplex und nicht flexibel genug, um sie im Simulator un-

ter den gegebenen Modellrandbedingungen mit vertretbarer Simulationslaufzeit einsetzen zu können. In der Literatur gibt es auch Hinweise, dass diese Eigenschaften nur unter bestimmten Randbedingungen Einfluss auf das letztendliche Systemverhalten haben [Gunt2007 S. 193-197]. Da die Gültigkeitszeiträume bedingt durch das hybride Simulationsmodell zusätzlich beschränkt sind, ist ein Vernachlässigen dieser Eigenschaften gerechtfertigt. Im Zusammenhang mit IP-Datenverkehr werden auch häufig Batch Markovian Arrival Process (BMAP) Modelle verwendet, die in der Lage sind, Gruppenankünfte von Paketen relativ gut abzubilden. Diese Modelle werden für überlagerte Prozesse jedoch schnell sehr komplex und berechnungsintensiv. Aus den Überlegungen in Abschnitt 3.3.2 ergibt sich, dass einfache analytische Modelle mit geringer Berechnungskomplexität verwendet werden sollten. Sie müssen das qualitative Systemverhalten eines Funkzugangssystems basierend auf seiner Funkzugangstechnologie wiedergeben können. Diese einfachen Modelle liefern in den meisten Fällen keine genauen Ergebnisse für bestimmte Situationen, sondern nur Approximationen des Systemverhaltens. Zusätzlich existieren keine analytischen Modelle, die das komplette Verhalten einer Funkzugangstechnologie beschreiben. Es existieren aber Teilmodelle für Funktionen und Eigenschaften einzelner Elemente der Funkzugangstechnologien. Einige dieser Teilmodelle können miteinander kombiniert werden, da ihre Ein-/Ausgabe Parameter kompatibel sind. Durch diese Kombination ist es möglich, das Verhalten des Funkzugangssystems für unterschiedliche relativ realitätsnahe Einflussgrößen zu beschreiben. Mögliche Fehlerquellen liegen in der Tatsache, dass diese Modelle initial nicht für eine solche Kombination entwickelt wurden. Approximationsfehler könnten durch die Kombination verstärkt oder abgeschwächt werden. Die verwendeten Modelle liefern stationäre Lösungen für bestimmte Eingabeparameter. Das transiente Verhalten des Systems an den Aktualisierungszeitpunkten wird außer acht gelassen. Diese Probleme mussten in Kauf genommen werden, da zu Beginn der Simulatorumsetzung keine Modelle bekannt waren, die besser für den Einsatzzweck geeignet gewesen wären. Das Zusammenspiel der Teilmodelle wird im Kapitel 5 genauer untersucht. Im Weiteren werden die einzelnen Teilmodelle und ihre Kombination beschrieben.

Teilmodelle

Wie aus Bild 4.8 ersichtlich müssen aus den zur Verfügung gestellten Eingabeparametern die Zugriffsinitialisierungszeiten T_I , die Zeit für die aktive Datenübertragung T_A und der Ressourcenverbrauch sowie die gebotene Dienstqualität pro Nutzerendgerät ermittelt werden. Dies geschieht für das UMTS/GSM-Modell und für das BWU Modell auf unterschiedliche Art.

UMTS- / GSM (EGPRS)-Modell

Da UMTS und GSM leitungsvermittelte (CS) sowie paketvermittelte (PS) Verbindungen unterstützen, müssen beide Verbindungstypen modelliert werden.

Leitungsvermittelte Verbindungen sind nicht der Schwerpunkt der Modellierungsbemühungen dieser Arbeit. In GSM- und UMTS-Systemen werden darüber hauptsächlich Sprachverbindungen aufgebaut. Die in GSM und UMTS möglichen High Speed Circuit Switched Data (HSCSD) Datenverbindungen werden hier vernachlässigt. Ziel der Modellierung ist es, den möglichen Einfluss der Sprachverbindungen auf paketvermittelte Verbindungen zu berücksichtigen. Dazu muss ihr Ressourcenverbrauch ermittelt werden. Es wird angenommen, dass eine leitungsvermittelte Verbindung nur aufgebaut wird, falls die geforderten Ressourcen zur Verfügung stehen. Wenn die geforderten Ressourcen tatsächlich zur Verfügung stehen, wird angenommen, dass auch die geforderte Dienstqualität geboten wird. In GSM wird dazu ein freier TDMA Kanal benötigt. In UMTS berechnet sich der Ressourcenverbrauch analog zu der Berechnung für paketvermittelte Verbindungen. Die Dauer der aktiven Phase T_A entspricht der durch den Dienst vorgegebenen Dauer des Verbindungswunsches T_{ON} . Die Dauer der Zugriffsphase T_I ist ein Parameter der RAS-Komponente.

Das Verhalten von paketvermittelten Verbindungen soll den Einfluss des Kanal- und Zellzustandes sowie die Eigenschaften der aktiven Dienste berücksichtigen. Hierzu wird pro Empfangsqualitätsklasse definiert, welche Eigenschaften und Parameter die vom Funkzugangssystem zur Verfügung gestellten Kanäle haben. Für den aktiven Dienst wird der für ihn am besten geeignete Kanal ausgewählt. Die EGPRS- und UMTS-Funkzugangstechnologien unterstützen dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Kanaltypen. Zur Vereinfachung des Simulators beschränkt sich das Modell auf einen Kanaltyp, der sowohl von UMTS als auch von EGPRS unterstützt wird und durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet ist: Die SDU-Pakete (IP-Pakete + Overhead) werden über eine Punkt zu Punkt Verbindung fehlerfrei in der Reihenfolge der Absendung vom Sender beim Empfänger an höhere Schichten weitergereicht. Stichworte in der Fachliteratur sind hier Acknowledged Mode, In-Sequence Delivery und Point-to-Point Connection. Kanäle mit diesen Kanaleigenschaften werden hauptsächlich für Webbrowsing- und E-Maildienste verwendet [HoTo2001].

Wenn später Kanaltypen mit weiteren Eigenschaften gewünscht werden, können analytische Modelle für diese Kanäle leicht in den Simulator integriert werden. Dazu muss lediglich pro Empfangsqualitätsklasse definiert werden, welche Eingangsparameter die Modelle besitzen und welche Dienstypen diese Kanäle verwenden sollen. Die Kanalmodelle müssen jedoch in jedem Fall Ergebnisse für T_I und T_A liefern und der anteilige Ressourcenverbrauch der Dienste an den Zellressourcen muss sich ermitteln lassen.

Bestimmung der mittleren Zeit bis zum Zugriff auf den Kanal - $E[T_I]$:

Für die Berechnung von T_I wird die mittlere Wartezeit bis zur Kanalbenutzung – $E[T_I]$ zu Grunde gelegt. Für GSM und UMTS ist der grundsätzliche Ablauf ähnlich, daher wird das Modell aus [ChDa2003] mit jeweils unterschiedlichen Parametern verwendet. $E[T_I]$ wird für die Up- und Downlink-Richtung unterschiedlich berechnet. In Downlink-Richtung existiert eine One-To-Many-Situation und daher bestimmt das Funkzugangs-

system die Zeit für eine erfolgreiche Ressourcenzuweisung. Im Modell wird diese Zeit mit der mittleren Zeit für ein TBF Setup (TBF - Temporary Block Flow Identifier) $E[T_{BFdown}]$ approximiert. Es wird angenommen, dass dieser Identifier über die ganze Phase des Datentransfers T_A zugewiesen bleibt. Dieser Wert ist spezifisch für den verwendeten Kanaltyp und ist daher ein Parameter des RAS-Modells. Es gilt also im Downlink $E[T_{Id}] = E[T_{BFdown}]$.

Da in Uplinkrichtung eine Many-To-One Situation existiert wird ein Slotted Aloha Contention Verfahren verwendet. Es wird darüber das Nutzerendgerät bestimmt, welches Senderechte im Random Access Kanal erhält, um eine Verbindung aufzubauen. Daher besteht die mittlere Zeit für den Verbindungsaufbau $E[T_{lu}]$ in Uplinkrichtung aus der vom Funkzugangssystem abhängigen mittleren Zeit für das TBF Setup ($E[T_{BFup}]$) und der mittleren Wartezeit $E[T_C]$, die durch den Wettbewerb um Zugriffsrechte entsteht (siehe Formel (4.5)).

$$E[T_{lu}] = E[T_C] + E[T_{BFup}] \quad (4.5)$$

Dabei ist $E[T_{BFup}]$ ein Parameter des Kanals und damit der RAS-Komponente. Die Wartezeit bis zum erfolgreichen Zugriff $E[T_C]$ ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Zugriff $P[C]$ (C steht hier für erfolgreichen Wettbewerb) und der Zeit zwischen zwei Wettbewerbsphasen T_p . Die Wettbewerbsphasen werden vom Kanal vorgegeben, daher ist T_p ein Parameter des RAS-Modells.

$$E[T_C] = \left(1 + \frac{1 - P[C]}{P[C]}\right) \cdot T_p \quad (4.6)$$

Die Erfolgswahrscheinlichkeit für den Zugriff $P[C]$ ergibt sich aus der mittleren Anzahl von erfolgreichen Nutzerendgeräten $E[S|i]$ unter der Bedingung, dass i Nutzerendgeräte um den Random Access Kanal konkurrieren.

$$P[C] = \frac{E[S|i]}{i} \quad (4.7)$$

Der Wert für $E[S|i]$ ergibt sich aus der Anzahl der Slotted Aloha Contention Slots H und der Erfolgswahrscheinlichkeit $P[S|i]$. H entspricht der Anzahl von Nutzerendgeräten, die maximal gleichzeitig im Wettbewerb stehen können, ohne sich gegenseitig zu stören. $P[S|i]$ ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Nutzerendgerät erfolgreich einen Slotted Aloha Contention Slot verwenden kann unter der Bedingung das i Nutzerendgeräte insgesamt um den Random Access Kanal konkurrieren.

$$E[S|i] = H \cdot P[S|i] \quad (4.8)$$

H ist ein vordefinierter Parameter des Kanals. Der Wert für $P[S|i]$ ergibt sich aus dem Wert für die Wahrscheinlichkeit $P[n|i]$ das n Wettbewerber um das Senderecht in einem bestimmten Slot Aloha Contention Slot konkurrieren, wenn i Nutzerendgeräte insgesamt um den Zugriff auf den Random Access Kanal konkurrieren. Zusätzlich wird die Erfolgswahrscheinlichkeit $P[S|n]$ für den Zugriff auf den Slot berücksichtigt, wenn diese n Wettbewerber um den Slot konkurrieren.

$$P[S|i] = \sum_{n=0}^i P[S|n] \cdot P[n|i] \quad (4.9)$$

Der Wert für $P[n|i]$ ergibt sich aus der Anzahl der Slots H und der Anzahl der Wettbewerber um den Slot, wenn i Nutzerendgeräte insgesamt um Zugang im Random Access Kanal konkurrieren.

$$P[n|i] = \binom{i}{n} \left(\frac{1}{H}\right)^n \left(1 - \frac{1}{H}\right)^{i-n} \quad (4.10)$$

Die Werte für $P[S|n]$ sind systemspezifische Tabellenwerte. In Tabelle 4.6 sind die Werte für ein GPRS System abgebildet. Laut [ChDa2003] ist die maximale Zahl der Nutzerendgeräte, die um einen Slot konkurrieren können, auf fünf beschränkt. Für UMTS werden im Modell die gleichen Werte angenommen.

Tabelle 4.6 Werte für $P[S|n]$ aus [ChDa2003]

Anzahl der Wettbewerber n	Wahrscheinlichkeit das Senderecht über Slot zu erhalten $P[S n]$ wenn n Wettbewerber existieren.
1	1,00
2	0,67
3	0,48
4	0,40
5	0,35

Die benötigten Eingabeparameter für die Berechnung von $E[T_i]$ sind in Tabelle 4.7 aufgeführt.

Tabelle 4.7 Abhängigkeiten der Berechnung von $E[T_i]$ für eine Dienstverbindung

Parameter	Beschreibung	Hinweise
$E[T_{BFdown}]$	Mittlere Zeit für die Zuweisung eines Temporary Block Flow Identifiers im Downlink	Parameter des Kanals. Wird pro Kodierungsschema im RAS-Modell vorgegeben
$E[T_{BFup}]$	Mittlere Zeit für die Zuweisung eines Temporary Block Flow Identifiers im Uplink	Parameter des Kanals. Wird pro Kodierungsschema im RAS-Modell vorgegeben
i	Anzahl der um das Senderecht konkurrierenden Nutzerendgeräte	Parameter der Zelle. Ist von der aktuellen Situation abhängig
H	Anzahl der Slots die für den Wettbewerb um Zugangsrechte genutzt werden können	Parameter des Kanals. Wird pro Kodierungsschema im RAS-Modell vorgegeben
$P[S n]$	Erfolgswahrscheinlichkeit für den Zugriff auf einen Slot, wenn n Wettbewerber um den Slot konkurrieren	Parameter des Kanals. Wird pro Kodierungsschema im RAS-Modell vorgegeben
T_p	Zeitraum bis zur nächsten Wettbewerbsphase	Parameter des Kanals. Wird pro Kodierungsschema im RAS-Modell vorgegeben

Bestimmung der mittleren Dauer der Phase der aktiven Datenübertragung - $E[T_A]$:

Für die Berechnung von $E[T_A]$ wird die mittlere Datenrate $E[R]$ und die zu übertragende Datenmenge $DATA_{ON,i}$ berücksichtigt (beides vom Dienst vorgegeben). Neben der Datenrate sind auch die Übertragungsdauer (Delay) eines SDU-Pakets und die Paketfehlerwahrscheinlichkeit auf der RLC-Schicht (Radio Link Control – Schicht 2) Dienstqualitätsparameter die von der RAS-Komponente für eine Verbindung ermittelt werden sollen. Die Ermittlung dieser Dienstqualitätsparameter erfolgt in Abhängigkeit der gegebenen Empfangsqualitätsklasse an der Position des Nutzerendgerätes, der Eigenschaften des Dienstes und der Einflüsse der anderen Nutzerendgeräte in der Zelle des Funkzugangssystems.

Ziel der Modellierungsbemühungen war es, die Eigenschaften der unterschiedlichen Funkzugangstechnologien abzubilden, die sich hauptsächlich in Schicht 1 und Schicht 2 unterscheiden. Dabei werden Segmentierungsoverhead und sonstige Protokolleinflüsse anderer Schichten nicht berücksichtigt. Falls der Einfluss von TCP berücksichtigt werden soll, (z.B.: Slow Start Phase etc.) muss das RAS-Modell entsprechend erweitert werden.

Für die Berechnung der Dienstqualitätsparameter wird dabei der im Bild 4.10 dargestellte Modellaufbau zugrunde gelegt. Jeder Kanal ist dabei gleich aufgebaut und die Übertragung folgt der Selective Repeat Automatic Repeat Request Strategie (SR-ARQ). Die SR-ARQ-Strategie ist ein Rückwärts-Fehlerkorrekturverfahren, dass fehlerhaft übertragene RLC-Schicht Pakete (PDU) gezielt neu beim Sender anfordert. EGPRS und UMTS verwenden hauptsächlich diese Fehlerkorrekturstrategie für den betrachteten Kanaltyp (Kanaltyp: Acknowledged Mode, In-Sequence Delivery). Neuere Implementierungen dieser Funkzugangstechnologien verwenden außerdem zusätzlich Verfahren zur Vorwärtsfehlerkorrektur. Zusätzliche Vorwärtsfehlerkorrekturinformation kann

verwendet werden, um eine Neuübertragung des als fehlerhaft erkannten Pakets zu vermeiden. Dabei kann das PDU-Paket selbst redundante Information enthalten, die ausreicht, erkannte Fehler bis zu einem gewissen Ausmaß zu beheben oder diese Information kann in nachfolgenden PDU-Paketen enthalten sein. Diese Kombination aus Vor- und Rückwärtsfehlerkorrekturverfahren wird auch Hybrid-ARQ genannt. Diese Hybrid-ARQ-Verfahren können über geringere PDU-Fehlerwahrscheinlichkeiten und kleinere ARQ-Round-Trip-Time-Parameter für das verwendete SR-ARQ-Modell annähernd berücksichtigt werden. Falls dies für angestrebte Untersuchungen nicht ausreichend genau sein sollte, muss ein neues analytisches Kanalmodell verwendet werden.

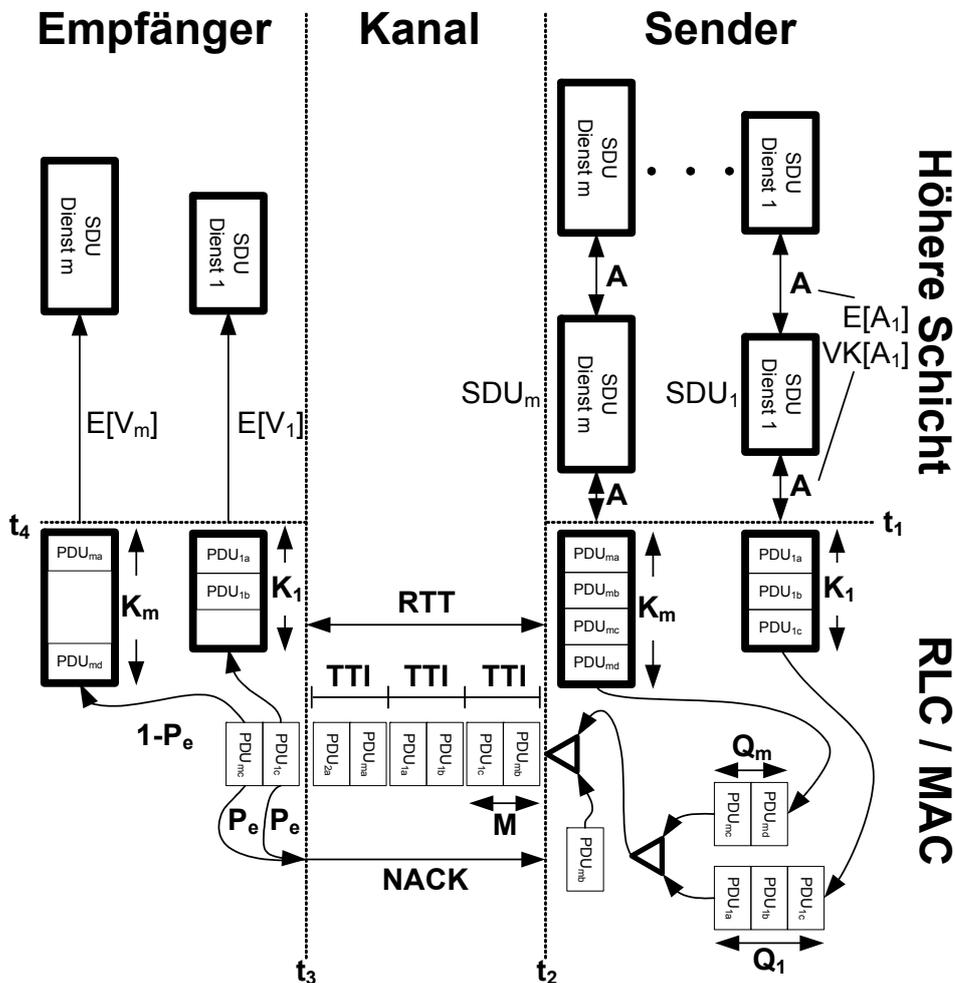


Bild 4.10 UMTS- und GSM-Kanalmodell mit Kenngrößen

Im Bild 4.10 ist das Kanalmodell zu sehen, auf dem die Ermittlung der Dienstqualitätsparameter (PDU-Fehlerwahrscheinlichkeit - P_e , SDU-Übertragungsdauer - $E[V]$ und Datenrate - $E[R]$) beruht. Im Sender möchte der Dienst i SDU-Pakete mit einer bestimmten Größe (Θ_i) und einem definierten mittleren Zwischenankunftsabstand $E[A_i]$ sowie Variationskoeffizienten $VK[A_i]$ verschicken. Ein SDU-Paket kann mit einem IP-Paket gleichgesetzt werden, wenn der Overhead höherer Schichten vernachlässigt wird.

Diese SDU-Pakete werden an die RLC/MAC-Schicht zur Übertragung weitergereicht. Hier werden sie in K_i viele PDU-Pakete zerlegt, von denen M viele je Transmission Time Intervall (TTI) übertragen werden können. Je nach Geschwindigkeit der PDU-Paketankunft und Übertragung warten pro Dienst Q_i viele dieser PDU-Pakete auf Übertragung. Es wird angenommen, dass dieser Warteraum nicht begrenzt ist. Über ein Schedulingverfahren werden die PDU-Pakete entsprechend ihrer Priorität aus den Warteschlangen entnommen und übertragen. Wenn ein Fehler bei der Übertragung auftritt, wird das betreffende PDU-Paket erneut angefordert (über NACK Nachricht). Die Fehlerwahrscheinlichkeit P_e ist ein Parameter des Kanalmodells. Wiederholungsübertragungen von fehlerhaften PDU-Paketen haben eine höhere Priorität als Neuübertragungen.

Die Zeitdauer, die vergeht bis der Sender eine erneute Übertragung eines fehlerhaften PDU-Paketes vornimmt, wird ARQ-Round-Trip-Time (RTT) genannt. Dieser Wert wird von RLC-Poll-Timern und Fenstergrößen beeinflusst, die in dem Modell nur aggregiert durch den RTT Wert berücksichtigt werden. Erst wenn alle PDU-Pakete einer SDU übertragen wurden, wird das SDU-Paket an die höhere Schicht weitergereicht. Im Fall von EGPRS wird angenommen, dass alle Nutzerendgeräte die gleiche Multislotfähigkeit besitzen und sie alle angebotenen PDCH gleichzeitig verwenden. Das führt zur Annahme dass alle PDCH kombiniert als ein Bediener dargestellt werden. Die Multislotfähigkeit der Nutzerendgeräte wird also berücksichtigt, indem der Parameter M angepasst wird. Im Fall von UMTS wird neben dem Fall der gemeinsamen Kanalverwendung (Shared Channel) mehrerer Dienste auch ein exklusiver Kanal pro Dienst angeboten (Dedicated Channel). Hier werden über den Kanal nur die PDU eines einzigen Dienstes übertragen.

Die Fehlerwahrscheinlichkeit P_e eines Paketes der RLC-Schicht wird im Simulator in den Eigenschaften eines bestimmten Kodierungsschemas für unterschiedliche Empfangsqualitätsklassen als vorgegebene Parameterwerte mitgeliefert. Die Fehlerwahrscheinlichkeit $P_{e,i}$ für den Dienst i ergibt sich also aus dem gewählten Kodierungsschema und der Empfangsqualitätsklasse an der Position des Nutzerendgerätes.

Die Datenrate $E[R_i]$ eines Dienstes i errechnet sich aus der mittleren Zwischenankunftszeit $E[A_i]$ und der Größe Θ_i der zu übertragenden SDU-Pakete dieses Dienstes (siehe Formel (4.11)).

$$E[R_i] = \frac{1}{E[A_i]} \cdot \Theta_i \quad (4.11)$$

Die maximalen Datenraten, die über einen Kanal übertragen werden können, sind beschränkt durch die Auslastung des Kanals ρ_{ch} , wobei gilt $\rho_{ch} < 100\%$. Die Auslastung ergibt sich aus der Anzahl i der Nutzer des Kanals und der jeweiligen mittleren Bedienzeit $E[B_i]$ für deren SDU-Pakete.

$$\rho_{ch} = \sum_i \frac{E[B_i]}{E[A_i]} < 1 \quad (4.12)$$

Im Fall eines gemeinsamen Kanals (Shared Channel) teilen sich mehrere Dienste die insgesamt zur Verfügung gestellte Kanalkapazität. Für den Fall eines exklusiv zugewiesenen Kanals (Dedicated Channel) ist die Nutzerzahl genau eins. Die mittlere Zeitdauer $E[T_A]$ berechnet sich dann für den Dienst i abhängig von der in einer ON-Phase zu übertragenden Datenmenge $DATA_{ON,i}$. In Tabelle 4.8 werden die benötigten Eingabeparameter zur Berechnung von $E[T_{A,i}]$ zusammengefasst.

$$E[T_{A,i}] = \frac{DATA_{ON,i}}{E[R_i]} \quad (4.13)$$

Tabelle 4.8 Abhängigkeiten der Berechnung von $E[T_A]$ des Dienstes i

Parameter	Beschreibung	Hinweise
$E[A_i]$	Mittlere Zwischenankunftszeit neuer SDU-Pakete des Dienstes i	Parameter des Dienstes aus Komponente UE
θ_i	Mittlere Größe der SDU-Pakete in Byte des Dienstes i	Parameter des Dienstes aus Komponente UE
$E[B_i]$	Mittlere Bedienzeit (Übertragungsdauer) eines SDU-Paketes des Dienstes i	Berechnet über Kanalmodell in der Komponente RAS
$DATA_{ON,i}$	Menge der Daten die in der aktuellen ON-Phase übertragen werden sollen	Parameter des Dienstes aus Komponente UE ($S_{Anforderung}$ bzw. S_{Inhalt})

Zur Berechnung von $E[B_i]$ wurde wie in Bild 4.10 dargestellt ein SR-ARQ (Selective Repeat Automatic Repeat Request) Modell gewählt. Das in [LuBNC2005] vorgestellte Modell kann durch die in Tabelle 4.9 aufgeführten Eingabeparameter gut an unterschiedliche Kanal-Kodierungsschemata der UMTS- und GSM/EGPRS-Funkzugangstechnologien angepasst werden. Dabei besitzt es im Vergleich zu anderen Modellen (z.B. [GrPM2005]) relativ geringe Speicher- und Rechenzeitanforderungen. Ein weiterer Vorteil dieses Modells ist die Möglichkeit der Berechnung der Varianz $V[B_i]$ der Bedienzeit der SDU. Diese wird später zur Berechnung der mittleren Übertragungsdauer (Delay) der SDU benötigt. Dieses Modell berechnet die Bedienzeit in Abhängigkeit der Zahl (K) der zu übertragenden PDU, daher wird zur Notation des Modellergebnisses $E[B(K)]$ und $V[B(K)]$ gewählt. Eine genauere Betrachtung der Modellergebnisse für $E[B(K)]$ und $V[B(K)]$ wird in Abschnitt 5.2 durchgeführt. Zur Bestimmung von $E[B_i]$ des Dienstes i muss $E[B(K),i]$ auf eine SDU normiert werden (siehe Formel (4.20)).

Tabelle 4.9 Eingabeparameter für SR-ARQ-Modell zur Berechnung von $E[B(K)_i]$ und $V[B(K)_i]$

Parameter	Beschreibung	Hinweise
K_i	Anzahl der PDU die übertragen werden sollen	Wird aus der Anzahl der zu übertragenden SDU-Pakete ermittelt N_i . Berücksichtigt wird dabei die SDU-Paketgröße θ_i (Parameter des Ankunftsprozesses def. in UE für den Dienst i) und die RLC-Blockkapazität des Kodierungsschemas Ψ_i
T_{RT}	Zeit (in TTI) die bis zur Retransmission einer PDU vergeht	Parameter des Kodierungsschemas. Hängt von dem Transmission Time Interval (TTI) und der ARQ-Round-Trip-Time (RTT) ab. $T_{RT} = \left\lceil \frac{RTT}{TTI} \right\rceil$
MT	Anzahl der PDU die innerhalb der Zeitdauer T übertragen werden können	$M = M * T_{RT}$
M	Anzahl der PDU die in einem Zeitslot (Dauer TTI) übertragen werden können	Parameter des Kodierungsschemas und wird von der Anzahl der PDCH beeinflusst
$P_{e,i}$	Fehlerwahrscheinlichkeit für die Übertragung von PDU-Paketen	Parameter des Kodierungsschemas in Verbindung mit Empfangsqualität des Dienstes i

Die Parameterwerte hängen vom gewählten Kodierungsschema ab (in EGPRS z.B. MCS-1 bis MCS-9) und $P_{e,i}$ und K_i zusätzlich von den Eigenschaften des Dienstes und der Position des Nutzerendgerätes. Generell lässt sich folgender Zusammenhang feststellen. Aus einer guten Empfangsqualität folgt eine hohe Kapazität der RLC-PDU und aus einer mittleren Empfangsqualität folgt eine geringere Kapazität der RLC-PDU. Auch können in UMTS in den meisten Fällen mehr PDU pro TTI-Dauer oder PDU mit größerer Kapazität übertragen werden. UMTS bietet auch variablere TTI. Werte für die Kanalparameter können den 3GPP Standards entnommen werden.

Zur Berechnung der mittleren Bedienzeit einer SDU muss die Anzahl der zu übertragenden SDU berücksichtigt werden. Je mehr SDU zur Verfügung stehen, umso besser können Kanalleerlaufzeiten vermieden und Parallelisierungseffekte ausgenutzt werden. Kanalleerlaufzeiten können am Ende der Übertragung aller PDU einer SDU entstehen, falls Übertragungsfehler auftreten. Diese Übertragungsfehler führen zu einer Neuansforderung und Neuübertragung der fehlerhaften PDU. Die SDU kann aber erst an die höhere Schicht weitergereicht werden, wenn diese fehlerhafte PDU erfolgreich neu übertragen wurde. Falls es sich um die letzte zu übertragende PDU handelt, ist der Kanal bis zur Neuübertragung leer. Die Neuübertragung beginnt nach Ablauf der RTT und wird nur zur Übertragung einer einzigen PDU genutzt. Falls weitere SDU in der Sende-einrichtung auf Übertragung warten, werden deren PDU bereits übertragen und die Kanal-kapazität wird genutzt. Analog dazu kann dadurch die Kanalkapazität weiterer Kanäle genutzt werden, falls die Übertragung aller PDU einer SDU bereits mit weniger Kanälen vollständig erfolgt. Wenn alle PDU einer SDU im Extremfall in nur einem RLC-Rahmen übertragen werden können, kann zu ihrer Übertragung auch nur ein Kanal genutzt werden. Wenn mehrere SDU zur Verfügung stehen, können weitere Kanäle genutzt werden. Für die notwendige Bestimmung der vorhandenen SDU wird eine Heuris-

tik verwendet. Anhand der geschätzten Auslastung des Kanals ρ_{ch-est} (Siehe Formel (4.14)) wird über die stationäre Lösung eines M/M/1-Modells bestimmt, wie viel SDU in der Übertragungseinrichtung warten (Siehe Formel (4.15)). Über das Verhältnis der anteiligen Auslastungen der Dienste wird geschätzt, wie viel davon dem Dienst i zugeordnet werden können (Siehe Formel (4.16)). Im Folgenden wird Formel (4.14) bis (4.16) als M/M/1-Heuristik bezeichnet.

$$\rho_{ch-est} = \begin{cases} \frac{E[B(K)_i]}{E[A_i]} + \rho_{AVG} & \text{falls } \textit{neu} \\ \rho_{AVG} & \text{falls } \textit{bestehend} \end{cases} \quad (4.14)$$

Für neue Verbindungen wird $E[B(K)_i]$ auf Basis der Formel (4.18) ohne M/M/1-Schätzung ermittelt. In diesem Fall entspricht K der Anzahl der PDU einer SDU – ohne wartende SDUs. ρ_{AVG} ist der gleitende Mittelwert der letzten n Auslastungen des Kanals. Die Berücksichtigung des gleitenden Mittelwertes vermindert Sprünge an den Übergängen der Gültigkeitsperioden. ρ_{ch-est} ist auf Werte kleiner eins beschränkt. Damit kann die Anzahl der wartenden SDU $E[Q_{ges}]$ geschätzt werden.

$$E[Q_{ges}] = \frac{\rho_{ch-est}^2}{1 - \rho_{ch-est}} \quad (4.15)$$

Aus dem Wert für $E[Q_{ges}]$ wird die Anzahl der SDU $E[N_i]$ des Dienstes i in der Übertragungseinrichtung über die nachfolgende Formel geschätzt.

$$E[N_i] = \frac{\left(\frac{E[B(K)_i]}{E[A_i]} \right)}{\rho_{ch-est}} * E[Q_{ges}] + 1 \quad (4.16)$$

Der Wert für $E[N_i]$ ist mindestens eins, da mindestens ein Paket übertragen werden muss, um die Übertragungsdauer eines Paketes zu ermitteln. Es muss auch beachtet werden, dass ρ_{ch-est} aus dem gleitenden Mittelwert berechnet wird. Die obere Grenze für die Anzahl der SDU in der Übertragungseinrichtung ist daher $E[Q_{ges}] + 1$. Über die Anzahl der SDU in der Übertragungseinrichtung $E[N_i]$ und der Kapazität der RLC-PDU Ψ_S kann nun die Anzahl der zu übertragenden RLC-PDU K_i bestimmt werden. Zu beachten ist, dass der Wert Ψ_S die Netto-Kapazität der RLC-PDU angibt und vom aktuellen Kodierungsschema abhängt, welches vom Dienst i genutzt wird.

$$K_i = \left\lceil \frac{E[N_i] * \Theta_i}{\Psi_s} \right\rceil \quad (4.17)$$

Das in [LuBNC2005] beschriebene Modell ermittelt die Bedienzeit für die Übertragung der K_i RLC-PDU in TTI-Einheiten laut Formel (4.18); die Formel (4.19) liefert die zugehörige Varianz. Der Parameter T_{RT} ist dabei die Zeit bis zur Retransmission einer fehlerhaften PDU in TTI-Einheiten; die Fehlerwahrscheinlichkeit für PDU ist durch P_e gegeben. M gibt die Anzahl der übertragbaren PDU pro TTI an.

$$E[B(K)_i] = \begin{cases} \left[1 - \frac{\ln(K_i + 1)}{\ln(P_{e,i})} \right] \cdot T_{RT} & , K_i \leq MT \\ \frac{K_i}{M(1 - P_{e,i})} - \frac{T_{RT}}{1 - P_{e,i}} + \left[1 - \frac{\ln(MT + 1)}{\ln(P_{e,i})} \right] \cdot T_{RT} & , K_i > MT \end{cases} \quad (4.18)$$

$$V[B(K)_i] = \begin{cases} g(K_i) & , K_i \leq MT \\ (K_i - MT) \frac{2P_{e,i}}{(1 - P_{e,i})^3} + g(MT) & , K_i > MT \end{cases} \quad (4.19)$$

$$g(X) = - \sum_{m=1}^X \frac{\binom{X}{m} (-1)^m P_{e,i}^m}{1 - P_{e,i}^m} - 2 \sum_{m=1}^X \frac{\binom{X}{m} (-1)^m P_{e,i}^m}{(1 - P_{e,i}^m)^2} + \left[\sum_{m=1}^X \frac{\binom{X}{m} (-1)^m P_{e,i}^m}{1 - P_{e,i}^m} \right]^2$$

Zur weiteren Verwendung müssen die Ergebnisse der Formel (4.18) mit Formel (4.20) auf eine SDU normiert sowie in Sekunden umgerechnet werden. TTI ist dabei die Dauer eines Transmission Time Interval in ms. Außerdem muss der Variationskoeffizient $VK[B_i]$ laut (4.21) bestimmt werden.

$$E[B_i] = \frac{E[B(K)_i] * TTI}{1000 * E[N_i]} \quad (4.20)$$

$$VK[B_i] = \sqrt{\frac{V[B(K)_i]}{(E[B(K)_i])^2}} \quad (4.21)$$

Letztendlich stehen die dargestellten Parameter $E[B_i]$ und $VK[B_i]$ als Ausgabe des analytischen Modells des Bedienprozesses des Übertragungskanals zur Verfügung. Sie sind Eingabewerte für die weitere Berechnung der Dienstqualitätsparameter des Dienstes i . Die Ausgabeparameter des Modells des SR-ARQ-Übertragungskanals in Tabelle 4.10 sind daher gleichzeitig auch Eingabeparameter des Modells zur Berechnung der SDU-Übertragungsdauer. (Siehe Tabelle 4.11). Der Variationskoeffizient $VK[B_i]$ kann auch als approximatives Maß für die vorhandene Schwankung in der Dauer der Übertragung verwendet werden (siehe Abschnitt 5.1).

Tabelle 4.10 Ausgabeparameter des SR-ARQ-Modells der SDU-Übertragung

Parameter	Beschreibung	Hinweise
$E[B_i]$	Mittlere Bedienzeit einer SDU eines Dienstes i auf dem Übertragungskanal	Benötigt zur Berechnung von $E[V]$ und ρ_{ch}
$VK[B_i]$	Variationskoeffizient von B_i	Benötigt zur Berechnung von $E[V]$

Zusammenfassung der vereinfachenden Annahmen durch das Kanalmodell und M/M/1-Heuristik (Formeln (4.11) bis (4.21)):

- verwendet wird eine Approximation der exakten Lösung aus [LuBNC2005].
- Der ARQ-Rückkanal wird als fehlerfrei angenommen.
- Es wird angenommen, dass Fehler unkorreliert auftreten. Die Autoren des verwendeten Modells argumentieren für EGPRS, dass dies größere SDU-Delays erzeugt als im Fall von korrelierten Fehlern (Burst-Fehler). Der SDU-Delay wird daher überschätzt.
- Der Warteraum für PDU-Pakete, die auf Übertragung warten, wird als unendlich angenommen.
- Die PDU-Pakete werden so lange wiederholt bis sie erfolgreich übertragen wurden. In realen Systemen wird die Übertragung nach Erreichen einer maximalen Wiederholungszahl abgebrochen.
- Die mittlere Bedienzeit $E[B_i]$ eines SDU-Paketes wird durch die Heuristik überschätzt. Die Aufteilung der wartenden PDU auf die einzelnen Dienste (4.16) führt zu berechneten Kanalleerlaufzeiten, die im realen System mit PDU anderer Dienste gefüllt werden könnten.

- Für die Berechnung des Variationskoeffizienten $VK[B_i]$ wird die Varianz $V[B(K)_i]$ auf Basis der Gesamtanzahl der PDU K_i berechnet und nicht für die PDU genau einer SDU.

Bestimmung der mittleren Übertragungsdauer eines SDU-Pakets - $E[V_i]$:

Die Berechnung der mittleren Übertragungsdauer $E[V_i]$ eines SDU-Pakets eines Dienstes i ist zweistufig. Die erste Stufe berechnet die reine mittlere Transportverzögerung $E[B_i]$ über den Kanal. Die Berechnung dieses Parameters erfolgt wie oben beschrieben. Die zweite Stufe berücksichtigt die mittlere Verzögerung $E[S_i]$, die sich aus der gemeinsamen Verwendung des Transportkanals (Scheduling) für Datenströme mehrerer aktiver Dienste ergibt. Die Summe dieser beiden Verzögerungen ergibt die Gesamtübertragungsdauer $E[V_i]$.

$$E[V_i] = E[B_i] + E[S_i] \quad (4.22)$$

Der gesamte Übertragungsvorgang wird als elementare Bedienstation vom Typ $G/G/1/\infty/\infty/PS$ abstrahiert. Ein SDU-Paket entspricht einem Auftrag, wobei die einzelnen Aufträge unterschiedlichen Klassen zugeordnet sind. Jede Klasse kann unterschiedliche Parameter (Mittelwert und Variationskoeffizient) für Zwischenankunfts- und Bedienzeitverteilungen besitzen. Die einzelnen klassenbezogenen Werte sind einem aktiven Dienst i zugeordnet. Der eigentliche Bedienvorgang (SR-ARQ-Verfahren) ist dabei transparent für die SDU-Pakete. Sie „sehen“ nur die Zeit die zwischen den Referenzpunkten t_4 und t_1 im Bild 4.10 vergeht. Die SDU-Pakete verschiedener Dienste, bei Verwendung eines gemeinsamen Kanals, werden daher „quasi parallel“ (gesteuert von einem Scheduling-Verfahren) in der RLC-Schicht übertragen. Je mehr SDU-Pakete gleicher Priorität übertragen werden, umso länger dauert diese Übertragung pro Paket im Mittel. Dieses Verhalten kann von einem Processor Sharing Modell approximiert werden. Die Tabelle 4.11 und Tabelle 4.12 geben die benötigten Ein- und Ausgabeparameter zur Beschreibung des gesamten Übertragungsvorgangs an.

Tabelle 4.11 Eingabeparameter G/G/1/∞/∞/PS

Parameter	Beschreibung	Hinweise
$E[A_i]$	Mittlere Zwischenankunftszeit	Von UE-Komponente definiert Ein SDU-Paket entspricht einem Auftrag
$VK[A_i]$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit	Von UE-Komponente definiert. Hinweis: $c_x^2 = VK[X]^2$
$E[B_i]$	Mittlere Bedienzeit	Aus Modell für Bedienzeit eines SDU-Paketes $\mu_i = 1/E[B_i]$
$VK[B_i]$	Variationskoeffizient der Bedienzeit	Aus Modell für Bedienzeit eines SDU-Paketes Hinweis: $c_x^2 = VK[X]^2$
z_i	Prioritätsklasse	Größere Werte für z_i haben höhere Priorität. (Im Simulator momentan nur Berücksichtigung einer Prioritätsklasse implementiert.)
F	Anzahl der Klassen	Aktueller Wert der Zelle. Entspricht Anzahl der aktiven Dienstverbindungen auf einem Kanal

Tabelle 4.12 Ausgabeparameter G/G/1/∞/∞/PS

Parameter	Beschreibung	Hinweise
$E[V_i]$	Übertragungsdauer einer SDU auf Schicht 2	Dies ist der Wert, der als Dienstqualitätsparameter (Delay) verwendet wird

Es existieren keine exakten lauffzeitfreundlichen analytischen Lösungen für die Verweilzeit (hier Gesamtübertragungsdauer oder auch Delay) eines Auftrages in einem G/G/1/∞/∞/PS-Bediensystem unter Beachtung von Klassenprioritäten und unterschiedlichen Klasseneigenschaften. Daher wird die mittlere Schedulingverzögerung $E[S_i]$ einer SDU des Diensts i über folgenden Zusammenhang approximiert:

$$E[S_i] \approx \frac{2}{c_{B_i}^2 + 1} \cdot E[W_i] \quad (4.23)$$

Diese Approximation basiert auf der mittleren Wartezeit $E[W_i]$ einer SDU des Dienstes i für den Fall einer First-Come-First-Serve (FCFS) Bedienstrategie und dem Variationskoeffizienten der Bedienzeit c_{B_i} , vgl. [BrBr2006]. Die Autoren geben an, dass diese Approximation für relativ viele Verteilungen funktioniert. Eine Möglichkeit der exakten Bestimmung der Verweilzeit für den Spezialfall M/G/1/PS wird beschrieben in [WaWh2000]. Dieses Verfahren benötigt jedoch Zusatzwissen über den aktuellen Kanalzustand. Eine Möglichkeit der Approximation von oberen und unteren Grenzen für beliebige Momente der Verweilzeit in einem M/G/1/PS-System wird in [ChBB2006] beschrieben. Da der Simulator ein möglichst breites Feld von Zwischenankunfts- und Bedienzeitverteilungen für den SDU-Paketstrom abdecken soll, fiel die Wahl auf [BrBr2006].

Zur Bestimmung der FCFS-Wartezeit $E[W_i]$ wird die Krämer/Langenbach-Belz (KLB) Approximationsformel verwendet unter Berücksichtigung unterschiedlicher Klassen und deren Prioritäten. Quelle [BoGMT1998].

$$E[W_i] = \frac{\bar{W}_0}{(1 - \sigma_i)(1 - \sigma_{i+1})} \quad (4.24)$$

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^F 1_{\{z_k \geq z_i\}} \rho_k \quad \rho_k = \frac{E[B_k]}{E[A_k]} \quad (4.25)$$

Der Parameter ρ_k beschreibt die Auslastung des Kanals, die vom jeweiligen Dienst verursacht wird. Die Variable σ_i beschreibt für den Dienst i die Auslastung des Bediensystems, die durch alle Klassen höherer oder gleicher Priorität z_k ($k =$ Klassenindex) verursacht wird. Wobei F die Anzahl der Klassen darstellt. Die Notation $1_{\{z_k \geq z_i\}}$ ist die Umsetzung der Randbedingung, dass nur höhere oder gleiche Klassenprioritäten berücksichtigt werden. Jeder ankommende Auftrag einer Klasse muss also die Warte-/Bedienzeit aller anderen Aufträge seiner Prioritätsklasse in der Warteschlange vor ihm und von Aufträgen mit höherer Priorität berücksichtigen. Der Simulator verwendet eine Modellvariante in der alle Klassen die gleiche Priorität besitzen. D.h. für alle Klassen ist σ_i die Summe über alle Teilauslastungen, die von den einzelnen Klassen verursacht wird. Dies entspricht der Gesamtauslastung des Bediensystems. Der Parameter σ_{i+1} nimmt in diesem Fall den Wert 0 an.

$$\bar{W}_0 \approx \sum_{k=1}^F \rho_k \cdot \frac{c_{A_k}^2 + c_{B_k}^2}{2\mu_k} \cdot G_{KLB}$$

$$G_{KLB} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{2}{3} \cdot \frac{1 - \rho_k}{\rho_k} \cdot \frac{(1 - c_{A_k}^2)^2}{c_{A_k}^2 + c_{B_k}^2}\right) & , \quad 0 \leq c_A \leq 1 \\ \exp\left(- (1 - \rho_k) \cdot \frac{c_{A_k}^2 - 1}{c_{A_k}^2 + 4c_{B_k}^2}\right) & , \quad c_A > 1 \end{cases} \quad (4.26)$$

\bar{W}_0 steht für die mittlere erwartete Wartezeit des Auftrags zum Zeitpunkt der Ankunft – als Mittelwert über alle Klassen. Die Wartezeit der einzelnen Klassen k aus F wird über (4.24) und (4.23) zur Schedulingverzögerung approximiert.

Zusammenfassung der vereinfachenden Annahmen zur Bestimmung der mittleren Übertragungsdauer $E[V]$ (Formeln (4.22) bis (4.26):

- Approximation der realen Schedulingstrategien durch Processor Sharing
- Keine Berücksichtigung von Gruppenankünften der SDU-Pakete
- Approximation der Schedulingverzögerung durch FCFS-Wartezeiten.

- Approximation von $E[W]$ (FCFS-Wartezeit) durch KLB-Formel
- Realsystem besitzt begrenzte Puffer
 - Auftretende Verluste bzw. Ratenanpassungen durch TCP werden daher nicht berücksichtigt.
 - Die Kanalauslastung sollte daher je nach Szenario durch das Simulations-Submodell auf Werte unter 90% begrenzt werden.
- Das verwendete Modell ist ein Modell für stationäres Verhalten. Es wird für die Beschreibung des Verhaltens in einer dynamischen Umgebung eingesetzt.

Die Vorteile des Modells zur Bestimmung von $E[T_A]$ und $E[V]$:

- Es kann für hohe und niedrige Auslastungen eingesetzt werden.
- Es ist möglich, unterschiedliche Diensteigenschaften und unterschiedliche Empfangseigenschaften an der Position des Nutzerendgerätes über unterschiedliche Kodierungsschemata zu berücksichtigen.
- Es ist möglich, die gegenseitige Beeinflussung der Dienste, bei Nutzung eines gemeinsamen Kanals, zu berücksichtigen.
- Das Modell besitzt hinsichtlich Speicher- und Rechenzeitbedarf eine geringe Komplexität.

Berechnung des Ressourcenverbrauchs in der Zelle η

Die Werte für die Last bzw. Ressourcenverbrauch η_k werden pro Zelle k errechnet. Verwendet wird ein Modell basierend auf dem Vorschlag aus [PiDJMT2004]. Die Last ist die Summe der einzelnen Teillasten (Ressourcenverbrauch) α_i pro aktivem Dienst i , der momentan im Funkzugangssystem über diese Zelle bedient wird. Es wird angenommen, dass pro Nutzerendgerät nur ein Dienst gleichzeitig aktiv sein kann. Diese Teillasten geben den anteiligen Ressourcenverbrauch der einzelnen Dienste an. Ein Wert von $\eta_k=1$ bedeutet, dass alle Ressourcen der Zelle k vergeben sind. Für jede Zelle kann über eine Lastgrenze eine Handover-Reserve definiert werden. Wenn η_k über diese Grenze steigt, werden neue Verbindungen abgewiesen und nur noch Handover-Verbindungen innerhalb des Funkzugangssystems akzeptiert.

$$\eta_k = \sum_i \alpha_i \tag{4.27}$$

Der Ressourcenverbrauch α_i pro Dienst i wird für die einzelnen Funkzugangstechnologien über unterschiedliche Modelle ermittelt.

GSM/EGPRS Ressourcenverbrauch:Tabelle 4.13 Eingabeparameter zur Berechnung von α_i im GSM/EGPRS Teilmodell

Parameter	Beschreibung	Hinweise
U_i	Anzahl belegter Verkehrskanäle für den Dienst i	Ist entweder gleich 1 für CS-Dienste oder geschätzt durch Heuristik für PS-Dienste
$C_{CH,k}$	Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Verkehrskanäle der Zelle k	Hängt von Ω_k ab
Y_k	Anzahl der für EGPRS zur Verfügung stehenden Verkehrskanäle der Zelle k	Dies ist ein Parameter der RAS-Komponente und wird pro Zelle definiert. $Y_k \leq C_k$ Y_k ist im Simulator maximal acht
σ_0	Gesamtauslastung des Kanals	Aus Modell für Übertragungsdauer eines SDU-Paketes. Formel (4.25)
ρ_i	Auslastung des Kanals welche von Dienst i verursacht wird	Aus Modell für Übertragungsdauer eines SDU-Paketes. Formel (4.25)
Ω_k	Anzahl der, der Zelle zur Verfügung stehenden, GSM-Frequenzbänder	Dies ist ein Parameter der RAS-Komponente und wird pro Zelle definiert

Im RAS-Modell für GSM/EGPRS ist die Grundlage für die Berechnung des Ressourcenverbrauchs die Anzahl der verbrauchten Verkehrskanäle U_i im Verhältnis zur Gesamtanzahl der in der Zelle k zur Verfügung stehenden Kanäle $C_{CH,k}$.

$$\alpha_i = \frac{U_i}{C_{CH,k}} \quad (4.28)$$

Hierbei wird zwischen leitungsvermittelten und paketvermittelten Diensten unterschieden. Im Fall eines leitungsvermittelten Dienstes wird pro Verbindung (Sprachdienst) ein Verkehrskanal belegt. Daher ist U_i hier immer eins. Im Fall eines paketvermittelten Dienstes muss berücksichtigt werden, dass EGPRS keine exklusiven Kanäle zur Verfügung stellt. Alle Teilnehmer nutzen die Y_k Kanäle, welche EGPRS zugewiesen wurden, gemeinsam. Daher kann nur ein virtueller Verkehrskanalverbrauch geschätzt werden. Berücksichtigt wird dabei der Anteil des Dienstes ρ_i an der Gesamtauslastung des Kanals σ_0 (siehe Formel (4.25)). Die Y_k Kanäle werden dem EGPRS-Subsystem dynamisch zugeordnet und stehen bis zur Freigabe nicht mehr für leitungsvermittelte Verbindungen zur Verfügung. Leitungsvermittelte Dienste haben in den meisten GSM-Netzen Priorität vor paketvermittelten Diensten. Daher werden im Simulator EGPRS-Kanäle freigegeben, wenn die Kapazität für leitungsvermittelte Verbindungen nicht ausreicht. Falls hierdurch die Kanalauslastung σ_0 größer bzw. gleich eins werden sollte, werden paketvermittelte Verbindungen blockiert bzw. abgebrochen. Die minimale Zahl der Kanäle, die für EGPRS verwendet werden, kann pro Zelle im Parameterfile festgelegt werden. Dadurch kann eine Mindestkapazität der Zelle für paketvermittelte Dienste sichergestellt werden.

$$U_i = \frac{\rho_i}{\sigma_0} Y_k \quad (4.29)$$

Um den Aufwand für Signalisierung zu berücksichtigen, wird die Anzahl der vorhandenen Verkehrskanäle C_k über folgende Formel ermittelt:

$$C_k = 8 \cdot \Omega_k - 1 - \left\lfloor \frac{\Omega_k - 1}{2} \right\rfloor \quad (4.30)$$

wobei Ω_k für die Anzahl der Zelle zur Verfügung stehenden, GSM-Frequenzbänder steht [Spel2004].

Es ist zusätzlich zu beachten, dass aufgrund der Größe des Temporary Block Flow Identifier Feldes maximal 32 Verbindungen gleichzeitig pro Linkrichtung im EGPRS-Modus je Zelle aufrecht erhalten werden können.

Vereinfachende Annahmen:

- Eventuelle Interferenzstörungen am Zellrand werden vernachlässigt.
 - Dies kann jedoch im Kanalmodell für die Zellrandbereiche durch eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit berücksichtigt werden oder durch Definition eines Kodierungsschemas mit kleinerer Kanalkapazität.
- Die anteilige Auslastung der Kanäle im paketvermittelten Fall ist nur eine Schätzung.

UMTS-Ressourcenverbrauch:

Tabelle 4.14 Eingabeparameter zur Berechnung von α_i im UMTS-Teilmodell

Parameter	Beschreibung	Hinweise
α_i	Aktivitätsfaktor (des Dienstes i)	Von UE-Komponente definiert
R_i	Datenrate (des Dienstes i)	Von UE-Komponente definiert. Verwendet wird $E[R_i]$
$(E_b/N_0)_i$	Benötigte Abgrenzung der Signalenergie vom Hintergrundrauschen (des Dienstes i)	Von UE-Komponente definiert
$W_{CR,k}$	Chiprate der (Zelle k)	Dies ist ein Parameter der RAS-Komponente und wird pro Zelle definiert
δ_k	Verhältnis der Signalstärke der Signale der Zelle zur Interferenzstörung, an der Basisstation (der Zelle k)	Schätzung durch Heuristik
$\delta_{i,k}$	Verhältnis der Signalstärke, der Verbindung des Dienstes i , zur Signalstärke der Interferenzstörung am Nutzerendgerät	Schätzung durch Heuristik
$\varphi_{i,k}$	Orthogonalität des Codes der Signalkodierung der Verbindung des Dienstes i	Schätzung durch Heuristik

Im RAS-Modell für UMTS ist die Grundlage der Berechnung des Ressourcenverbrauchs zum einen der sogenannte „Noise Rise“ im Uplink und Downlink (Siehe [HoTo2001]) und zum anderen die Verfügbarkeit von orthogonalen Spreading Codes. Der „Noise Rise“ gibt an, wie groß der Anteil der verwertbaren Informationen an der gesamten Energie des empfangenen Signals der Verbindung des Dienstes ist. Über die in [HoTo2001] dargestellten Umrechnungen erhält man die Formeln, die angeben, welche Teillast von der Verbindung des Dienstes erzeugt wird.

Downlink:

$$\alpha_i = a_i \cdot \frac{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i}{W_{CR,k}} \cdot \left[(1 - \varphi_{i,k}) + \delta_{i,k} \right] \quad (4.31)$$

$$R_i$$

Uplink:

$$\alpha_i = (1 + \delta_k) \cdot \frac{1}{1 + \frac{W_{CR,k}}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i \cdot R_i \cdot a_i}} \quad (4.32)$$

Der Parameter a_i ist der Aktivitätsfaktor des Dienstes. Er gibt an, zu welchem Anteil die Verbindung tatsächlich die zur Verfügung gestellte Ressource auslastet. Laut [HoTo2001] beträgt dieser Anteil bei Sprachverbindungen 67% und bei Datenverbindungen 100%. Die Datenrate R_i des Dienstes i kann für diesen Dienst nur bei einem garantierten SNR-Wert (Abgrenzung der Signalenergie vom Hintergrundrauschen) $(E_b/N_0)_i$ erreicht werden. Der Parameter $W_{CR,k}$ ist die WCDMA Chiprate in der Zelle k , die in UMTS bei 3,84 Mcps liegt. Zusätzlich zu diesen allgemeinen Parametern des Dienstes und der Zelle müssen noch die Störeinflüsse auf die Verbindung berücksichtigt werden. Im Uplink gibt δ_k das Verhältnis der Signalstärke der Signale (an der Position der Basisstation der Zelle, die erreicht werden soll) zu der Signalstärke der Interferenzstörungen der Nachbarzellen an. Im Downlink gibt $\delta_{i,k}$ das Verhältnis der Signalstärke, der Verbindung des Dienstes zur Zelle, zu der Signalstärke der Interferenzstörungen der Nachbarzellen (an der Position des Nutzerendgerätes) an. Der Parameter $\varphi_{i,k}$ beschreibt die Orthogonalität des Codes der Kodierung der Verbindung des Dienstes zu den anderen vergebenen Codes.

Zur Bestimmung der Parameterwerte der Störeinflüsse kann auf die Last in der Zelle und in den Nachbarzellen, die Distanz des Nutzerendgerätes zur Basisstation, die Ge-

schwindigkeit des Nutzerendgerätes und die aktuelle Empfangsqualitätsklasse der Verbindung zurückgegriffen werden.

Es wurde eine Heuristik implementiert, die auf der Interpretation der Untersuchungen in [HoTo2001] beruht. Diese Heuristik dient dazu den Einfluss der Störeinflüsse auf den Ressourcenverbrauch abhängig von der aktuellen Situation zu erfassen. Es ist zu beachten, dass diese Heuristik nicht in allen Szenarien gleich gut funktionieren kann. Besonders die Wertebereiche und der Einfluss der Position in Kombination mit der Geschwindigkeit der Nutzerendgeräte muss gegebenenfalls an das Szenario und besonders an die gegebenen Zellgrößen angepasst werden.

Tabelle 4.15 Eingabeparameter der Heuristik zur Berechnung der Störeinflüsse im UMTS-Teilmodell

Parameter	Beschreibung	Hinweise
v_i	Geschwindigkeit des Nutzerendgerätes i	Von ENV-Komponente ermittelt
d_i	Abstand des Nutzerendgerätes i von Basisstation der Zelle k	Von ENV-Komponente ermittelt. Wird über Mittelpunkt des aktuellen Rasterelementes berechnet
r_k	Größe der Zelle k (Radius)	Von RAS-Komponente pro Zelle definiert
v_{\max}	Maximale Geschwindigkeit für Nutzerendgeräte die vom Modell berücksichtigt wird	Ein Parameter der RAS-Komponente
Z	Anzahl der Nachbarzellen	Von ENV-Komponente ermittelt
η_n	Last der Nachbarzelle n	Wird in RAS-Komponente ermittelt
$E_{i,k}$	Empfangsqualitätsklasse der Zelle k im Rasterelement an der Position des Nutzerendgerätes i	Von ENV-Komponente definiert. $f(E_{i,k})$ wird in RAS-Komponente definiert

Der Parameterwert für δ_k wird in Abhängigkeit der Uplink-Auslastungen der zur Zelle k benachbarter Zellen geschätzt, wobei Z die Anzahl der Zellen wiedergibt. Auf der Grundlage, dass hoch ausgelastete Nachbarzellen eher stören als niedrig ausgelastete Zellen. Als benachbart gelten Zellen der gleichen Funkzugangstechnologie und Rasterelementebene, die mindestens ein gemeinsames Rasterelement in der Komponente Umwelt besitzen und sich daher teilweise überdecken. Falls $Z = 0$ ist δ_k ebenfalls null.

$$\delta_k = \frac{\sum_{n=1}^Z \eta_n}{Z} \quad (4.33)$$

Der Parameter $\delta_{i,k}$ wird in Abhängigkeit des Abstands d_i des Nutzerendgeräts von der Basisstation und des gesamten Zellradius r_k der Zelle geschätzt. Darüber wird abgebildet, dass die Interferenz durch andere Zellen am Zellrand stärkeren Einfluss besitzt.

$$\delta_{i,k} = \min\left(\frac{d_i}{r_k} \cdot 2,0 ; 2,0\right) \quad (4.34)$$

Der Parameter $\varphi_{i,k}$ wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Position der Nutzerendgeräte ermittelt. Je höher die Geschwindigkeit v_i , umso geringer die Orthogonalität der Codes. Die Geschwindigkeit v_{max} liegt bei 250 km/h. Mit größerem Abstand d_i von der Basisstation sinkt die Orthogonalität der Codes zusätzlich durch Signallaufzeiteffekte.

$$\varphi_{i,k} = \max\left(\left(\frac{\left(\left(1 - \frac{d_i}{r_k}\right) + \left(1 - \frac{v_i}{v_{max}}\right)\right)^{\frac{1}{3}}}{2}\right) \cdot 1,0 ; 0,4\right) \quad (4.35)$$

Zusätzlich zu diesen Einflüssen wird die Empfangsqualitätsklasse $E_{i,k}$ der Zelle k an der Position des Nutzerendgerätes i berücksichtigt, indem der Wert für den Parameter $(E_b/N_0)_i$ über einen Faktor $f(E_{i,k})$ angepasst wird.

$$\left(\frac{\hat{E}_b}{\tilde{N}_0}\right)_i = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i \cdot f(E_{i,k}) \quad (4.36)$$

Dieser angepasste Wert $(\hat{E}_b/\tilde{N}_0)_i$ zusammen mit den geschätzten Störgrößen wird für die Berechnung von α_i verwendet.

Die Werte für α_i basieren auf der Polkapazität, die eine unendliche Sendeleistung der Sender voraussetzt. Da dies in realen Funkzugangssystemen nicht gegeben ist, wird der Ressourcenverbrauch η_k normiert.

$$\eta_k = \frac{\eta'_k}{\eta_{max}} \quad (4.37)$$

wobei η_{max} der maximale Wert ist, den η_k unter der gegebenen begrenzten Sendeleistung der Zelle k einnehmen kann. η'_k ist die Summe über alle α_i der Zelle.

Zusammenfassung der vereinfachenden Annahmen:

- Die angegebene Heuristik zur Berücksichtigung der Störeinflüsse ist sehr grob.
- Signalausbreitungsmodelle, die die Signalausbreitung für bestimmte Umgebungseigenschaften ermitteln, werden nicht verwendet.
- Die Winkel der Signale bezogen auf den Empfänger an der Basisstation werden vernachlässigt.
- Gewinne durch Softhandover-Effekte werden nicht betrachtet.
- Die veränderte Last in den benachbarten Zellen wird nur zu den Aktualisierungszeitpunkten der Zelle berücksichtigt.

Die betrachtete UMTS-Variante basiert auf WCDMA. In WCDMA sind zur Unterscheidung der Signale der einzelnen Kanäle orthogonale Codes notwendig. Diese Codes werden aus einem Codebaum ermittelt. Jede Ebene des Baumes erzeugt Codes mit einem bestimmten Spreading-Faktor (SF), die zueinander orthogonal sind. Die Ebene mit SF=8 erzeugt also acht zueinander orthogonale Codes, siehe Bild 4.11. Ein belegter Code in einer Baumebene macht alle Codes in ihm untergeordneten Baumebenen (weg von der Wurzel) und auch die Codes auf dem Pfad hin zur Wurzel unbrauchbar. Wenn also der Code C_{41} (SF=4) vergeben wird, können die Codes C_{11} , C_{21} , C_{81} , C_{82} nicht mehr vergeben werden.

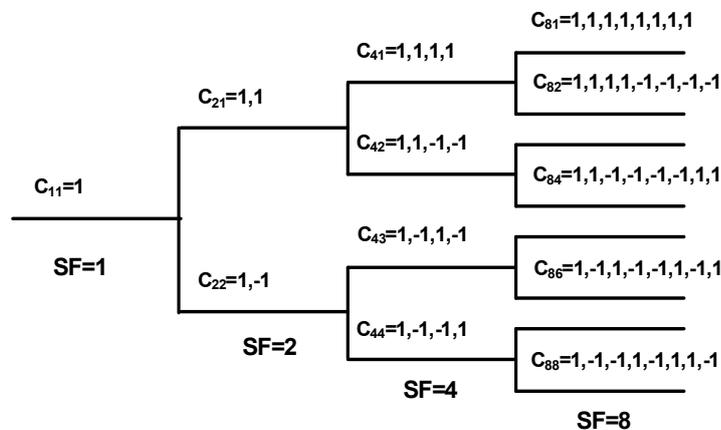


Bild 4.11 Beispiel eines orthogonalen Codebaums

Tabelle 4.16 Parameter zur Bestimmung der Verfügbarkeit von orthogonalen Spreading Codes

Parameter	Beschreibung	Hinweise
SF	Benötigter Spreading-Faktor des Dienstes.	In UE-Komponente definiert.
C_{SF}	Anzahl verwendeter Spreading Codes mit dem Faktor SF in der Zelle k.	Von RAS-Komponente ermittelt.

Im vorgestellten Modell geht die Auslastung des Codebaums nicht mit in die Lastberechnung für η_k ein. Beim Aufbau einer neuen Verbindung wird jedoch die Verfügbarkeit der Codes berücksichtigt. Dem Dienst wird ein Spreading-Faktor SF zugeordnet, den der Dienst zur Kodierung seines Kanals verwendet. Die Verfügbarkeit eines Codes mit dem entsprechenden Spreading-Faktor wird über eine rekursive Funktion $C(SF)$ ermittelt, die die Baumstruktur des orthogonalen Codebaums ausnutzt.

$$C(SF) = \left\lceil \frac{C(SF * 2)}{2} \right\rceil + C_{SF} \quad (4.38)$$

Die Abbruchbedingung ist das Erreichen der Ebene ohne vergebenen orthogonalen Code, wobei $C(SF)$ der Anzahl der benötigten orthogonalen Codes einer Spreading-Faktor-Ebene entspricht. C_{SF} gibt an, wie viele Codes für Kanäle mit diesem Spreading-Faktor reserviert wurden. Die Rekursion ermittelt, wie viele orthogonale Codes dieser Ebene durch Codes mit höherem Spreading-Faktor (im Baum untergeordnet) unbrauchbar werden. Wenn $C(SF=1) > 1$, dann ist der Codebaum überlastet, das heißt auf einer Ebene im Codebaum wurden mehr orthogonale Codes als möglich vergeben. Als Beispiel ist folgende Situation gegeben: Es wurden 2 Verbindungen mit Spreading-Faktor 4 vergeben und 3 Verbindungen mit Spreading-Faktor 8. Die Anfrage

$$C(4) = \lceil \lceil \lceil \lceil 0/2 \rceil + 3 \rceil / 2 \rceil + 2$$

würde das Ergebnis 4 liefern. Die Anfrage

$$C(1) = \lceil \lceil \lceil \lceil \lceil \lceil \lceil \lceil 0/2 \rceil + 3 \rceil / 2 \rceil + 2 \rceil / 2 \rceil + 0 \rceil / 2 \rceil + 0$$

hätte das Ergebnis 1. Es könnte z.B. noch ein Code mit dem Spreading-Faktor 8 belegt werden. Falls aber noch ein Code mit SF=4 vergeben würde, wäre das Ergebnis der Anfrage

$$C(1) = \lceil 0/2 \rceil + 3 \rceil / 2 \rceil + 3 \rceil / 2 \rceil + 0 \rceil / 2 \rceil + 0$$

mit 1,25 größer als 1 und damit ist eine neue Verbindung mit einem Spreading-Faktor von 4 nicht möglich.

Falls der Aufwand für Signalisierung in der Zelle berücksichtigt werden soll, muss beachtet werden, dass die Signalisierungskanäle eigene Codes benötigen. Diese Codes müssen dann bei der Auslastung des Codebaumes berücksichtigt werden. Außerdem müsste über die Bestimmung des Ressourcenverbrauchs von zusätzlichen niederratigen Signalisierungskanälen ein bestimmter Anteil der Zellressourcen η_k reserviert werden. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Szenarien wurde dies jedoch vernachlässigt.

Bandwidth-Units - Modell

Dieses Modell ist ein sehr einfaches Modell, das den Erfordernissen der Untersuchung bzw. Validierung von Markovmodellen zur Beschreibung von CRRM-Systemen genüge

tut. Es kann leicht auf spezielle Vorgaben der zu untersuchenden Markovmodelle angepasst werden.

Die Dauer der aktiven Phase T_A entspricht für Real-Time Verbindungen der durch den Dienst vorgegebenen Dauer des Verbindungswunsches T_{ON} . Für Non-Real-Time Verbindungen wird T_A anhand der belegten Bandwidth-Units BWU_i und der zu übertragenden Datenmenge $DATA_{ON,i}$ ermittelt.

$$E[T_{A,i}] = \frac{DATA_{ON,i}}{BWU_i} \quad (4.39)$$

Die Dauer der Zugriffsphase T_I ist ein Parameter der RAS-Komponente.

Jede Zelle besitzt eine bestimmte Menge an BWU_k , die an Dienste vergeben werden, die eine Verbindung zu dieser Zelle aufbauen. Die BWU_i , die ein Dienst beansprucht, bestimmen seinen Ressourcenverbrauch und damit den Teil der Last der durch diesen Dienst verursacht wird.

$$\alpha_i = \frac{BWU_i}{BWU_k} \quad (4.40)$$

Wenn der Wert für BWU_i über entsprechende Funktionen in Abhängigkeit von anderen Systemgrößen ermittelt wird, sind neben linearen auch konvexe oder konkave Kapazitätsregionen definierbar.

Zusammenhang und Einflussgrößen der analytischen Modellteile der RAS-Komponente

Die Übersichtsgrafik aus Bild 4.12 stellt zusammenfassend den Zusammenhang der einzelnen Ergebnisse der analytischen Modellteile der RAS-Komponente für die UMTS- und GSM/EGPRS- Funkzugangstechnologien dar. Das Bild zeigt welche Eingabeparameter für die Berechnung eines Wertes benötigt werden und dadurch welche Folgeänderungen die Änderung eines Parameters verursacht. Die Eingabeparameter werden durch den simulativen Modellteil von HEKATE bereitgestellt. Dies geschieht durch die Übermittlung von Nachrichten, die entsprechende Ereignisse repräsentieren (z.B. Positionsänderung), an die RAS-Komponente. Die Eingabeparameter, die ursächlich den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Dynamikfaktoren zuordenbar sind, werden über die blau unterlegten Bereiche mit gestrichelter Umrandung gruppiert. Betrachtete Dienstqualitätsparameter werden violett mit gepunkteter Umrandung hervorgehoben und die Eingabewerte für die simulativen Modellteile werden orange mit geschlossener Umrandung dargestellt. Der Parameter UE steht für die Anzahl der Nutzerendgeräte. Es ist zu sehen, dass vielfältige Abhängigkeiten bestehen. Änderungen der Parameter in den Komponenten ENV, UE und RAS können die resultierenden Dienstqualitätspara-

meter (Ausgabewerte der RAS-Komponente) beeinflussen. Die Parameteränderung kann entweder allein durch die definierten Abläufe in diesen Komponenten entstehen oder zusätzlich durch die CRRM-Komponenten beeinflusst werden.

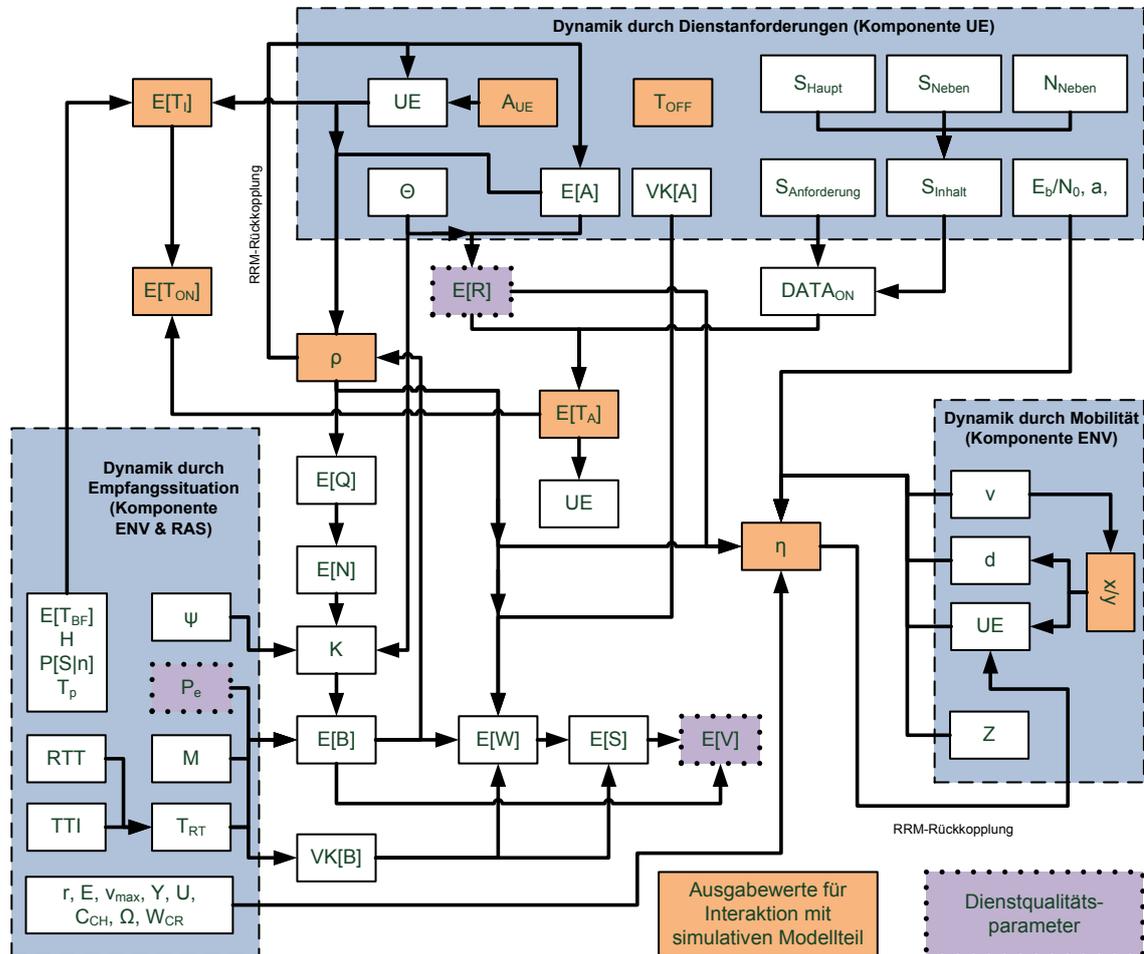


Bild 4.12 Übersichtsgrafik über Zusammenhang der analytischen Modellteile der RAS-Komponente

Die Auslastung eines Kanals ρ und der Ressourcenverbrauch der Zelle η beeinflussen direkt das simulative RAS-Modell, indem die zugehörigen Ergebniswerte an den lokalen RRM-Algorithmus übergeben werden. Sobald die Ergebniswerte bestimmte Grenzwerte überschreiten, werden Datenratenanpassungen, Blockierungen oder Verbindungsabbrüche durch den RRM-Algorithmus über entsprechende Ereignisse ausgelöst. Die Ergebnisse für $E[T_A]$, $E[T_i]$ und $E[T_{ON}]$ werden direkt als Endzeitpunkte für die entsprechenden Phasen übernommen. Falls sich die Endzeitpunkte durch neue Parameter ändern, werden die zugehörigen Ereignisse neu datiert. Die Ergebniswerte für Auslastung, Ressourcenverbrauch und für die Dienstqualitätsparameter können an die CRRM-Komponenten zur weiteren Verarbeitung versendet werden.

4.1.4 CRRM-IM

Die Komponente CRRM-IM bietet die Möglichkeit eigene Informationssammel- und Datenverwaltungsalgorithmen zu implementieren. Eine Übersicht der Ein- / und Ausgabeparameter der Komponente UE ist in Tabelle 4.17 zu finden.

Tabelle 4.17 Ein- /Ausgabeparameter der CRRM-IM-Komponente

Eingangsparameter der Komponente	Ausgabeparameter der Komponente
<i>Von Komponente RAS</i>	<i>An Komponente RAS</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Von Komponente UE</i>	<i>An Komponente UE</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Von CRRM</i>	<i>An CRRM</i>
<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • CRRM-Kommandos • CRRM-Informationen
<i>Eigene Parameter</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Algorithmusspezifisch (Lastgrenzwerte, Messintervalle und andere) 	

Zum Informationsaustausch werden die in 4.2 definierten variablen Kommunikationsbeziehungen genutzt. Die Komponenten legen fest, welche Nachrichtentypen von welchen Komponenten an sie versendet werden sollen. Dazu registrieren sie sich zur Laufzeit bei diesen Komponenten. Suchparameter zum Auffinden der Komponenten können entweder der Name der Komponente, der Typ der Komponente oder direkt die ID-Nummer der Komponente sein. Die Strukturinformation des Szenarios (siehe Abschnitt 4.4) kann auch ausgenutzt werden.

Hinweis: Die Definition der Ziele der variablen Kommunikationsbeziehungen erfolgt aktuell fest im Programmcode, abhängig vom Algorithmus, in der Initialisierungsphase der Komponente. Eine Schnittstelle für die Definition über ein Parameterfile ist noch nicht definiert, dies wäre aber grundsätzlich möglich.

Über die Szenariodateien können die Algorithmen parametrisiert werden. Pro CRRM-IM-Komponente in der Szenariostruktur kann festgelegt werden, welcher Algorithmus dort eingesetzt werden soll und welche Parameterwerte an den Algorithmus übergeben werden sollen.

Simulatives Modell

Die Komponente CRRM-IM kann Messungen in den Komponenten UE und RAS veranlassen. Außerdem ist es möglich Informationen anderer CRRM-IM-Komponenten an diese Komponente weiterleiten zu lassen. Das Starten und Stoppen der Messungen geschieht über CRRM-Kommando-Nachrichten an die Komponenten in denen Messungen durchgeführt werden sollen.

Auslöser für die Übermittlung der Informationen bzw. Messwerte sind Ereignisse, die über ihren Nachrichtentyp definiert sind. An die Übermittlung können weitere Bedingungen geknüpft sein:

- minimale Last
- minimale Lastdifferenz
- minimale Zeitdifferenz

Für den Fall, dass diese Zusatzbedingungen definiert sind, wird nicht bei jedem Auftreten des Ereignisses die Information an die CRRM-IM-Komponente übermittelt. Die Information bzw. der Messwert wird erst dann übermittelt, wenn eine minimale Last in der Komponente erreicht ist oder eine minimale Lastdifferenz bzw. eine minimale Zeitdifferenz seit der letzten Informationsübermittlung vorhanden ist. Nicht alle Bedingungen sind für alle Komponenten relevant - so werden bei der Komponente UE die Bedingungen, die mit Lastwerten verknüpft sind, nicht ausgewertet.

Die Informationen werden in zwei Typen unterteilt:

- Informationen über Nutzerendgeräte und deren Dienst
- Informationen über Funkzugangssysteme und deren Zellen

Informationen, die normalerweise nicht direkt in einer Komponente vorhanden sind, müssen über Messungen ermittelt werden. Dazu gehören alle Messwerte zweiter Ordnung (siehe 3.1.1). Wenn Messungen notwendig sind, kann bei der Registrierung angegeben werden ob die Messung einmalig oder periodisch in einem definierten Intervall durchgeführt werden soll. Die Messung kann von der CRRM-IM-Komponente auch wieder gestoppt werden.

Die CRRM-IM-Komponente ist für die Speicherung der erhaltenen Informationen verantwortlich. Die Verwaltung der Informationen ist vom Algorithmus abhängig. Wenn bestimmte zu definierende Bedingungen erfüllt sind, kann eine Nachricht an die CRRM-D-Komponente abgesetzt werden. Diese Nachricht enthält die Informationen über die aktuelle Situation, die der Algorithmus in der CRRM-D-Komponente benötigt, um eine Entscheidung zu fällen.

Ablaufdiagramm für Komponentenverhalten

Nach der Registrierung über CRRM-Kommandos werden CRRM-Informationen an die Komponente weitergeleitet. Abhängig vom IM-Algorithmus lösen sie dann unterschiedliche Reaktionen aus. Sie können zum Absetzen weiterer CRRM-Kommandos führen oder zur Speicherung der Informationen. Es ist auch möglich, dass die CRRM-Informationen mit in der Komponente vorhandenen Informationen verknüpft und weitergeleitet werden.

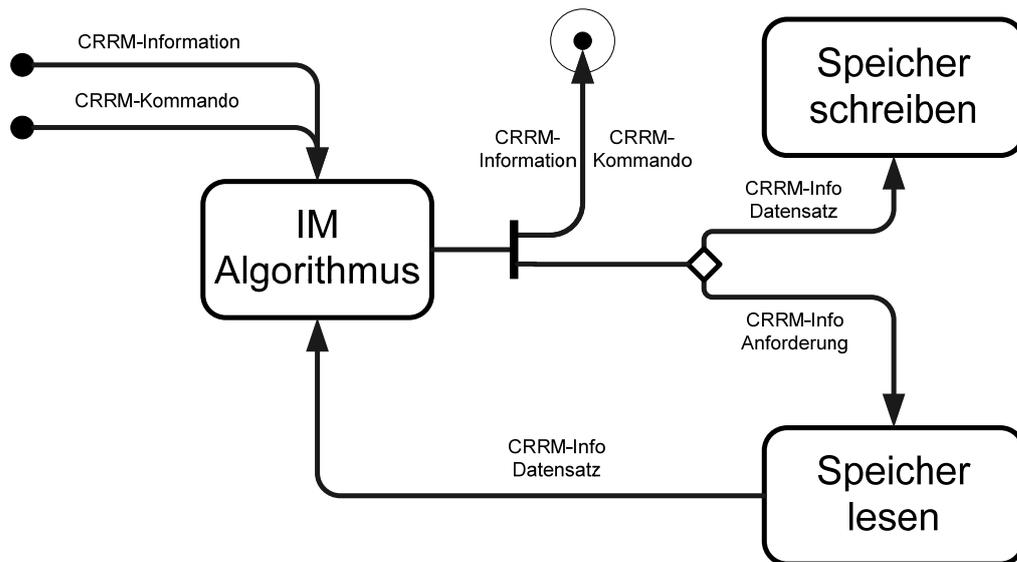


Bild 4.13 CRRM-IM Ablaufdiagramm

4.1.5 CRRM-D

Die Komponente CRRM-D bietet die Möglichkeit eigene Entscheidungsalgorithmen zu implementieren. Die Entscheidungen basieren auf Informationen, die von der Komponente CRRM-IM übermittelt werden. Eine Übersicht der Ein-/ und Ausgabeparameter der Komponente UE ist in Tabelle 4.18 zu finden

Tabelle 4.18 Ein- / Ausgabeparameter der CRRM-D-Komponente

Eingangsparameter der Komponente	Ausgabeparameter der Komponente
	An Komponente RAS
	• CRRM-Kommandos
	An Komponente UE
	• CRRM-Kommandos
Von CRRM	An CRRM
• CRRM-Informationen • CRRM-Kommandos	• CRRM-Kommandos
Eigene Parameter	
• Algorithmusspezifisch (Lastgrenzwerte und andere)	

Zum Informationsaustausch werden die in 4.2 definierten variablen Kommunikationsbeziehungen genutzt. Die Komponenten legen fest, welche Nachrichtentypen von welchen Komponenten an sie versendet werden sollen. Dazu registrieren sie sich zur Laufzeit bei diesen Komponenten. Suchparameter zum Auffinden der Komponenten können entweder der Name der Komponente, der Typ der Komponente oder direkt die ID-

Nummer der Komponente sein. Die Strukturinformation des Szenarios (siehe Abschnitt 4.4) kann ausgenutzt werden.

Hinweis: Die Definition der Ziele der variablen Kommunikationsbeziehungen erfolgt fest im Programmcode, abhängig vom Algorithmus, in der Initialisierungsphase der Komponente. Eine Schnittstelle für die Definition über ein Parameterfile ist noch nicht definiert, dies wäre aber grundsätzlich möglich.

Über die Szenariodateien können die Algorithmen parametrisiert werden. Pro CRRM-D-Komponente in der Szenariostruktur kann festgelegt werden, welcher Algorithmus dort eingesetzt werden soll und welche Parameterwerte an den Algorithmus übergeben werden sollen.

Ablaufdiagramm für Komponentenverhalten

Nach der Registrierung über CRRM-Kommandos werden CRRM-Informationen an die Komponente weitergeleitet. Das Verhalten der Komponente ist vom implementierten Algorithmus abhängig. Grundsätzlich sollte die Komponente auf übermittelte CRRM-Informationen zur aktuellen Situation mit CRRM-Kommandos für die RAS- oder UE-Komponente reagieren.

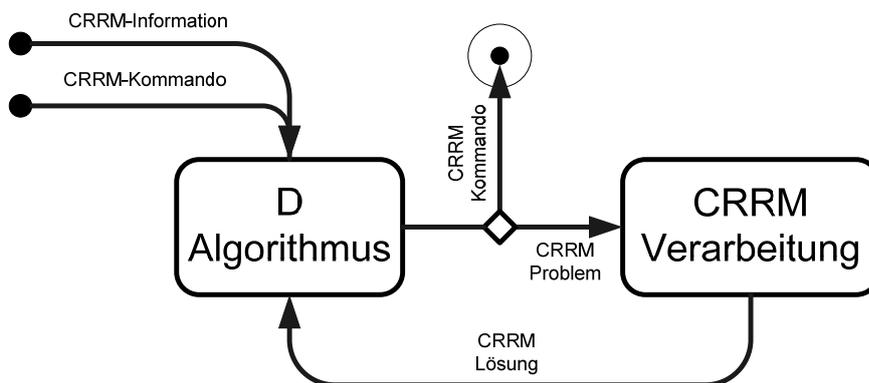


Bild 4.14 CRRM-D Ablaufdiagramm

4.2 Umsetzung der Kommunikationsbeziehungen

Der Simulator setzt das in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Verhalten um. Der Informationsaustausch zwischen den Modellkomponenten erfolgt über OMNeT++ Nachrichtenobjekte (cMessage), die unterschiedliche Nachrichtentypen (Messagetype) aufnehmen und transportieren. Jeder Nachricht ist eine Sender und Empfänger ID zugeordnet sowie weitere Informationen abhängig vom Nachrichtentyp. Die möglichen Transportwege (Siehe Bild 3.7) der Nachrichten sind szenarioabhängig und werden über OMNeT++ Connections definiert (Siehe Abschnitt 4.4). Der Weg zu der Zielkomponente wird dabei über den Dijkstra-Algorithmus festgelegt. In der Szenariodefinition muss daher darauf geachtet werden, dass die kürzesten Wege zum Ziel auch real (in der Architektur)

möglichen Verbindungswegen entsprechen. Jede Komponente auf dem Weg zur Zielkomponente kann dabei der Nachricht Kosten zufügen (Siehe Abschnitt 4.3).

Hinweis: Die in der OMNeT++ Klasse `cTopology` vorhandene Implementierung des Dijkstra-Algorithmus wurde verändert, um über mehrere Ebenen hinweg kürzeste Wege zwischen Komponenten innerhalb anderer Komponenten zu finden. Es wurde auch ein Link-Modul eingefügt, welches als Verbindung zu Komponenten anderer Ebenen dient und darüber hinaus keine eigene Funktionalität besitzt.

Die Nachrichten können grob in zwei Klassen eingeteilt werden. CRRM-relevante Nachrichten und systeminhärente Nachrichten. CRRM-relevante Nachrichten besitzen variable Kommunikationsbeziehungen. Die Modellkomponenten registrieren sich zur Laufzeit bei anderen Komponenten für den Empfang dieser Nachrichtentypen. Dieser Registrierungsprozess ermöglicht auch die Übermittlung von Bedingungen für den Nachrichtenversand. In den Komponenten RAS und UE werden die Übermittlungsbedingungen für jede Zelle bzw. Nutzerendgerät separat verwaltet. Sobald ein Ereignis eines bestimmten Typs auftritt, werden die Übermittlungsbedingungen für die registrierten Empfänger überprüft. Die Komponenten prüfen nach der Erzeugung einer Nachricht, welche Komponenten sich für diesen Nachrichtentyp registriert haben und ob die jeweils für diese Komponente definierten Bedingungen erfüllt sind. Falls dies für Komponenten zutrifft wird die Nachricht an diese adressiert und über den kürzesten Weg versendet. Wenn die definierten Bedingungen für keine Zielkomponente zutreffen, wird die Nachricht verworfen. Die möglichen Bedingungen hängen von den Erzeugerkomponenten der Nachrichten ab. Die Tabelle 4.19 zeigt die für die jeweilige Komponente definierbaren Bedingungen. Falls keine Bedingungen definiert sind, wird die Nachricht sofort versendet.

Tabelle 4.19 Definierbare Bedingungen für den Nachrichtenversand pro Modellkomponente

Modellkomponente	Unterstützte Bedingungen
RAS	Mindestlast in der betreffenden Zelle erreicht. Lastdifferenz seit letzter Nachricht dieses Typs über Grenzwert. Zeitraum seit letzter Nachricht von diesem Typ größer als Grenzwert.
CRRM-D	Mindestlast in einer Zelle erreicht. Lastdifferenz seit letzter Nachricht dieses Typs über Grenzwert. Zeitraum seit letzter Nachricht von diesem Typ größer als Grenzwert.
CRRM-IM	Mindestlast in einer Zelle erreicht. Lastdifferenz seit letzter Nachricht dieses Typs über Grenzwert. Zeitraum seit letzter Nachricht von diesem Typ größer als Grenzwert.
UE	Zeitraum seit letzter Nachricht von diesem Typ größer als Grenzwert.
ENV	Zeitraum seit letzter Nachricht von diesem Typ größer als Grenzwert.

Die möglichen Nachrichtentypen und deren Auftreten während des Simulationsablaufs sind in der Bedienungsanleitung (siehe digitaler Datenträger im Anhang) aufgeführt. Es existiert momentan noch keine Szenarioparameter-XML-Schnittstelle für den Registrie-

rungsprozess von CRRM-relevanten Nachrichten. Die Umsetzung des Registrierungsprozesses im Simulatorcode ist auf eine solche Erweiterung jedoch bereits vorbereitet.

Für systeminhärente Nachrichten sind feste Kommunikationsbeziehungen zwischen den Modellkomponenten definiert, da sie zwingend für den Ablauf der Simulation benötigt werden. Nachrichten dieses Typs regeln den Verbindungsaufbau und Abbau sowie die Steuerung der zugehörigen T_{ON} , T_{OFF} - Phasen. Das Starten und Stoppen von Messungen in der Umwelt ist auch über feste Kommunikationsbeziehungen realisiert. Die spätere Verteilung der Messergebnisse ist jedoch über variable Kommunikationsbeziehungen realisiert.

Tabelle 4.20 Matrix der systeminhärenten Kommunikationsbeziehungen

	UE	RAS	ENV
UE	MOBILE_INIT; START_SERVICE_DEMAND; STOP_SERVICE_DEMAND	INITIALIZE_CONNECTION; SEND_DATA; CLOSE_CONNECTION_M	MOBILE_INIT; MOBILE_DEINIT; START_MEASUREMENT; STOP_MEASUREMENT
RAS	CRRM_COMMAND_MEASURE_M; CRRM_COMMAND_CONNECT; CRRM_COMMAND_ADAPT; CLOSE_CONNECTION_RAS; INITRESPONSE_CONNECTION	ACCESSING_END	MOBILE_CHANGE_LAYER
ENV	MEASUREMENT_READY	LOCATION_UPDATE	MEASUREMENT_PERIODIC; MEASUREMENT_ONCE; LOCATION_UPDATE

Tabelle 4.20 zeigt eine Matrix mit den systeminhärenten Kommunikationsbeziehungen. Angegeben sind die Nachrichtentypen, die zwischen den Komponenten ausgetauscht werden. Die CRRM-Nachrichten CRRM_COMMAND_MEASURE_M, CRRM_COMMAND_CONNECT und CRRM_COMMAND_ADAPT sind Weiterleitungen bzw. die Umsetzung von Nachrichten / Kommandos die von CRRM-Komponenten an die RAS-Komponente gesendet wurden. Die Übermittlung dieser Nachrichten von der RAS-Komponente zur UE-Komponente ist notwendig für den korrekten Ablauf und daher sind diese Nachrichten als systeminhärent klassifiziert. Bild 4.15 bis Bild 4.21 zeigt den Ablauf unterschiedlicher systeminhärenter Kommunikationsabläufe als Message Sequence Chart (MSC) auf Basis der in Tabelle 4.20 dargestellten Nachrichtentypen. Um Abläufe verständlicher darstellen zu können, wurden die MSC zusätzlich um Selbst-Nachrichten, Nachrichten-Suspendierung und Nachrichten-Löschung ergänzt. Der normale Lebenszyklus eines Nutzerendgerätes wird in Bild 4.15 wiedergegeben. Gemäß der definierten Zwischenankunftszeit neuer Nutzerendgeräte einer Klasse werden MOBILE_INIT-Nachrichten erzeugt, die zur Erzeugung eines neuen Nutzerendgeräteobjekts dieser Klasse führen. Es wird angenommen, dass sich diese Nutzerendgeräte bereits seit längerem im angeschalteten (aber inaktiven) Zustand befinden und somit Informationen über die Umwelt besitzen. Daher verbraucht der Nachrichtenaustausch bis zur ersten MEASUREMENT_READY-Nachricht keine Zeit. Erst ab dieser Nach-

richt beginnt der normale Zeitablauf mit der Anfrage an das lokale CRRM, um mögliche Funkzugangssysteme für die gewünschte Verbindung zu ermitteln. Das lokale CRRM übermittelt als Antwort ein Funkzugangssystem zu dem das Nutzerendgerät eine Verbindung aufbaut. Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau beginnt der Wechsel der ON-/OFF-Phasen. Paketvermittelte Verbindungen sind durch einen Wechsel von ON/OFF Phasen gekennzeichnet. Leitungsvermittelte Verbindungen besitzen nur eine ON-Phase.

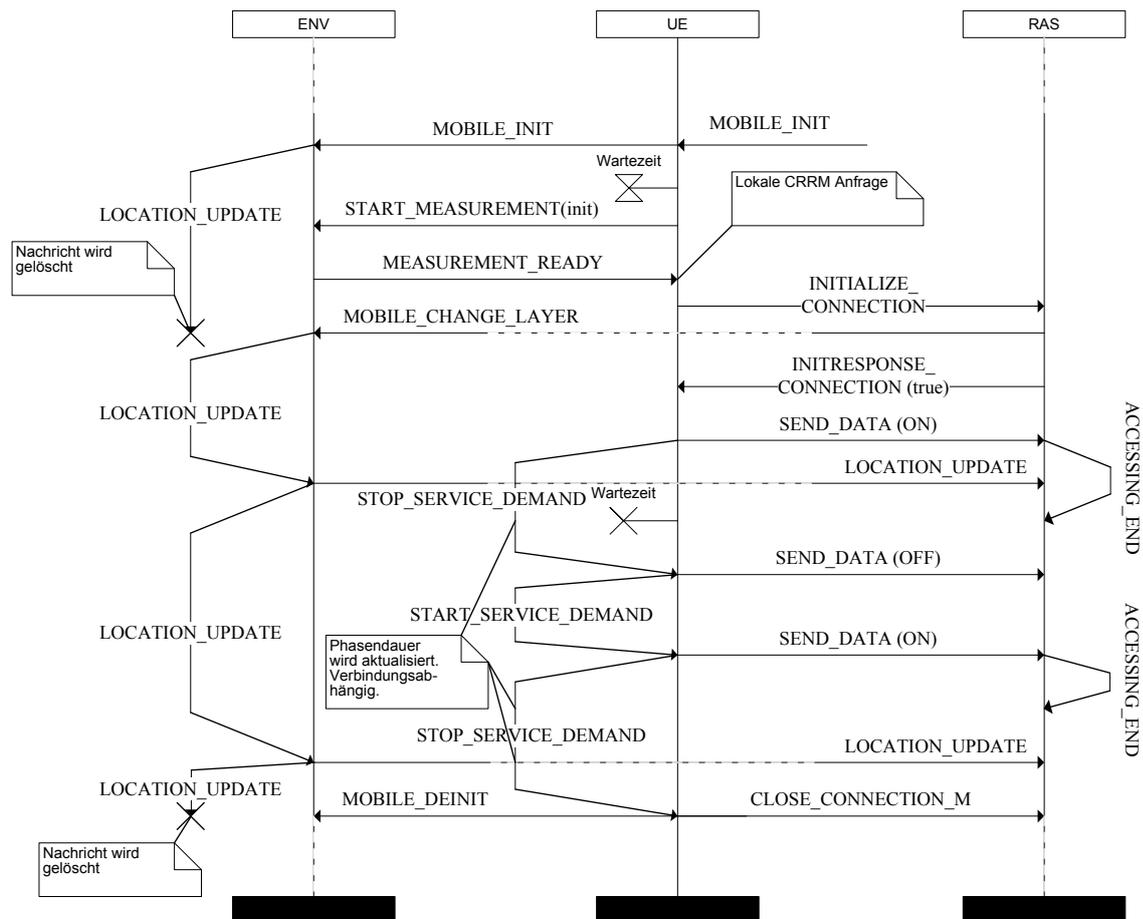


Bild 4.15 Ablauf des normalen Lebenszyklus einer paketvermittelten Verbindung

Der Nutzer akzeptiert nur eine begrenzte Wartezeit bis zum Beginn der T_A -Phase. Für den Fall, dass diese Wartezeit überschritten wird, beendet der Nutzer den Verbindungsversuch und das Nutzerendgerät wird aus der Umwelt gelöscht (MOBILE_DEINIT-Nachricht; vgl. Bild 4.18). Bevor die tatsächliche Datenübertragung beginnt, muss im Funkzugangssystem noch die T_I -Phase abgewartet werden (vgl. Abschnitt 4.1.3). Realisiert wird dies über eine ACCESSING_END-Nachricht. Mit erfolgreichem Aufbau der Datenübertragung wird die Dauer der ON-Phase basierend auf den Dienstleistungsparametern der Verbindung ermittelt. Parallel zum Wechsel der ON-/OFF-Phasen werden entsprechend der Verweildauern in den Rasterelementen LOCATION_UPDATE-Nachrichten an die RAS-Komponente gesendet (vgl. Abschnitt 4.1.1). Tritt eine LO-

CATION_UPDATE-Nachricht in der T_A-Phase auf, wird die Dauer der ON-Phase des Dienstes entsprechend der aktuellen Dienstqualität aktualisiert. Wenn der Verbindungswunsch des Nutzerendgerätes erfüllt wurde, wird die Verbindung zum Funkzugangssystem beendet (CLOSE_CONNECTION_M-Nachricht) und das Nutzerendgerät aus dem System entfernt (MOBILE_DEINIT-Nachricht).

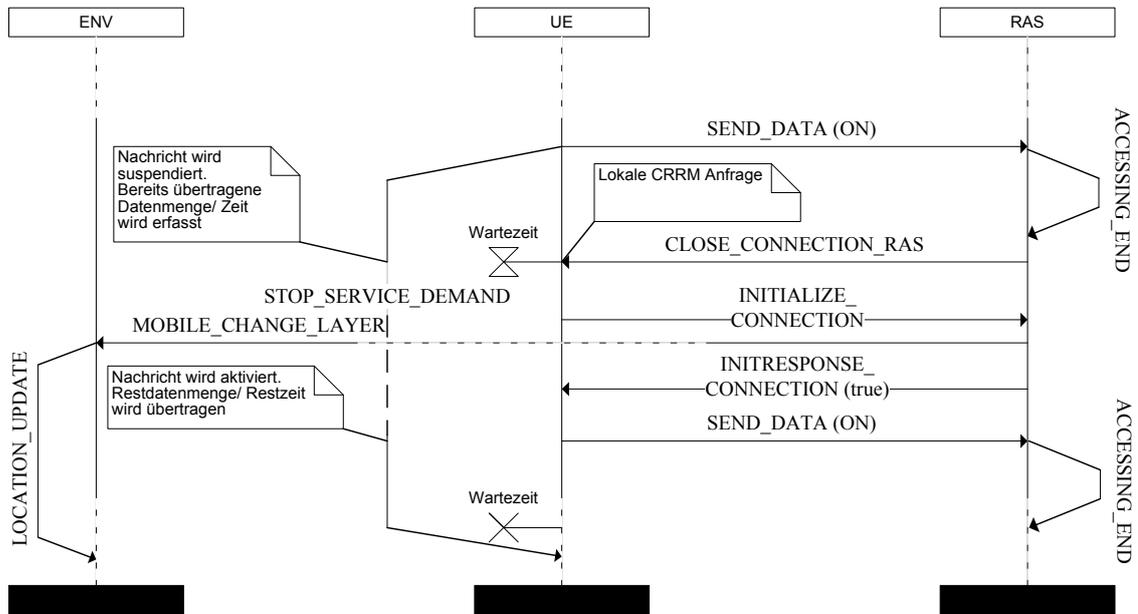


Bild 4.16 Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und erfolgreiche Wiederaufnahme

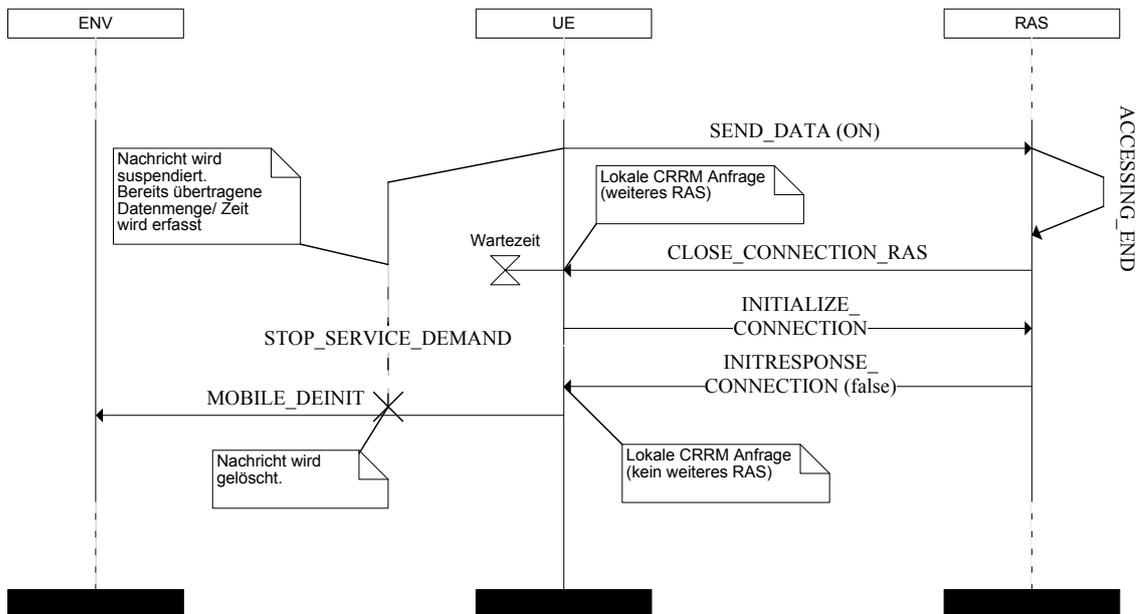


Bild 4.17 Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und erfolglose Wiederaufnahme

Bild 4.16 zeigt den Ablauf für den Fall das die Verbindung netzseitig unterbrochen wird. Ursachen hierfür könnten Überlastsituationen, mangelnde Netzabdeckung oder CRRM-Eingriffe sein. Die Dauer der ON-Phase wird um die Zeit verlängert, die benötigt wird, um die Datenübertragung neu zu etablieren. Auch hier wird wieder die maximale Wartezeittoleranz des Nutzers berücksichtigt.

Der Ablauf für den Fall, dass keine Verbindung erfolgreich etabliert werden kann, ist in Bild 4.17 zu sehen. Das Bild 4.18 zeigt den Ablauf für den Fall, dass die maximal tolerierte Wartezeit des Nutzers überschritten wird. In beiden Fällen wird das Nutzerendgerät aus dem System entfernt. Es ist auch möglich, dass für ein Nutzerendgerät überhaupt keine Verbindung etabliert werden kann. Dies ist der Fall, wenn sich keine Funkzugangssysteme im Empfangsbereich befinden oder alle verfügbaren Funkzugangssysteme die Verbindung ablehnen (Ablauf siehe Bild 4.19).

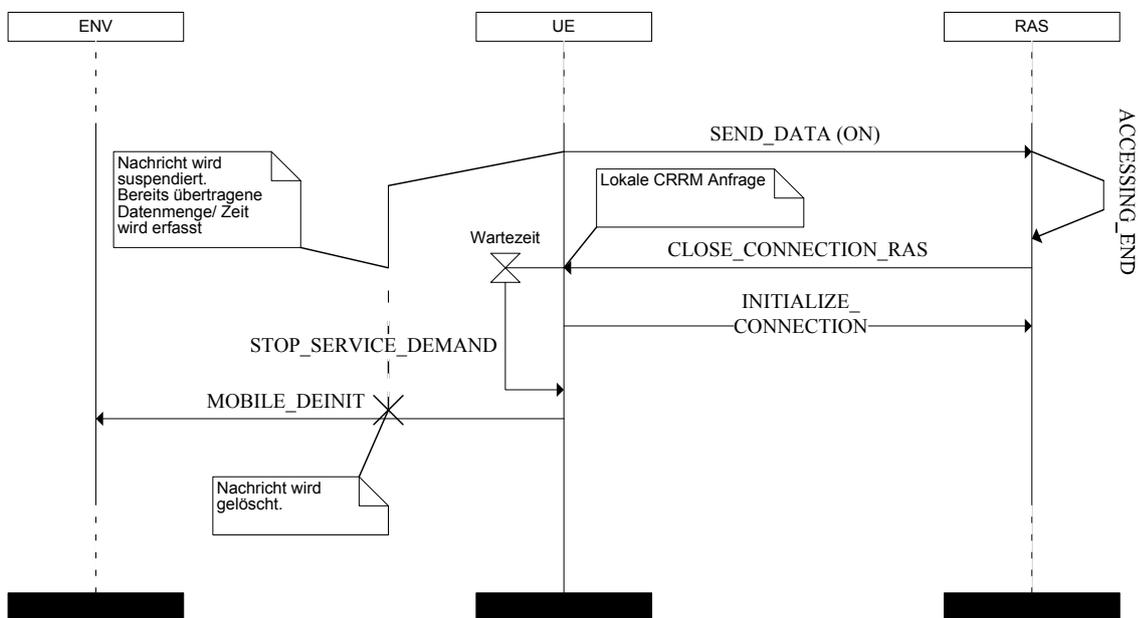


Bild 4.18 Ablauf eines netzseitigen Verbindungsabbruchs und Überschreitung der maximalen Nutzerwartezeit

Die CRRM-D-Komponenten können Handover zu einem bestimmten Funkzugangssystem erzwingen. Dazu wird eine `CRRM_COMMAND_CONNECT`-Nachricht für ein Nutzerendgerät an die UE-Komponente gesendet. Dies ist entweder netzseitig möglich über das Funkzugangssystem (vgl. Bild 4.20) oder direkt für lokale CRRM-D-Komponenten. Das Nutzerendgerät versucht eine Verbindung zu diesem Funkzugangssystem herzustellen. Gelingt dies nicht, wird das Nutzerendgerät aus dem System entfernt, falls das lokale/netzseitige CRRM innerhalb der tolerierten Wartezeit keine alternativen Funkzugangssysteme zur Verfügung stellen kann (dies kann auch das bisherige Funkzugangssystem sein). Eine direkte netzseitige Übergabe einer Verbindung von RAS-Komponente zu RAS-Komponente wurde nicht implementiert, da nur der Verbindungsaufbau von der UE-Komponente in Richtung RAS-Komponente realisiert wurde.

Eine garantierte RAS-zu-RAS Übergabe kann einfach nachgebildet werden indem das Ziel-RAS über CRRM-Nachrichten darauf vorbereitet wird, die Verbindung und den aktiven Dienst des Nutzerendgerätes mit reduzierter T₁-Phasendauer zu akzeptieren.

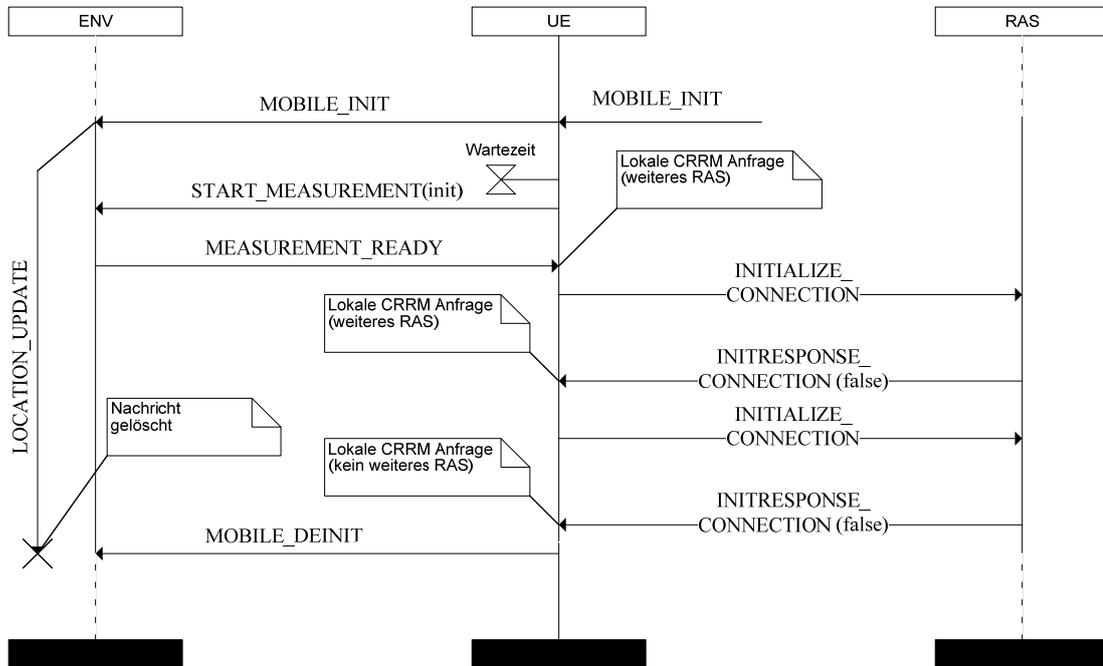


Bild 4.19 Ablauf eines erfolglosen Verbindungsaufbaus mit mehrmaliger Blockierung

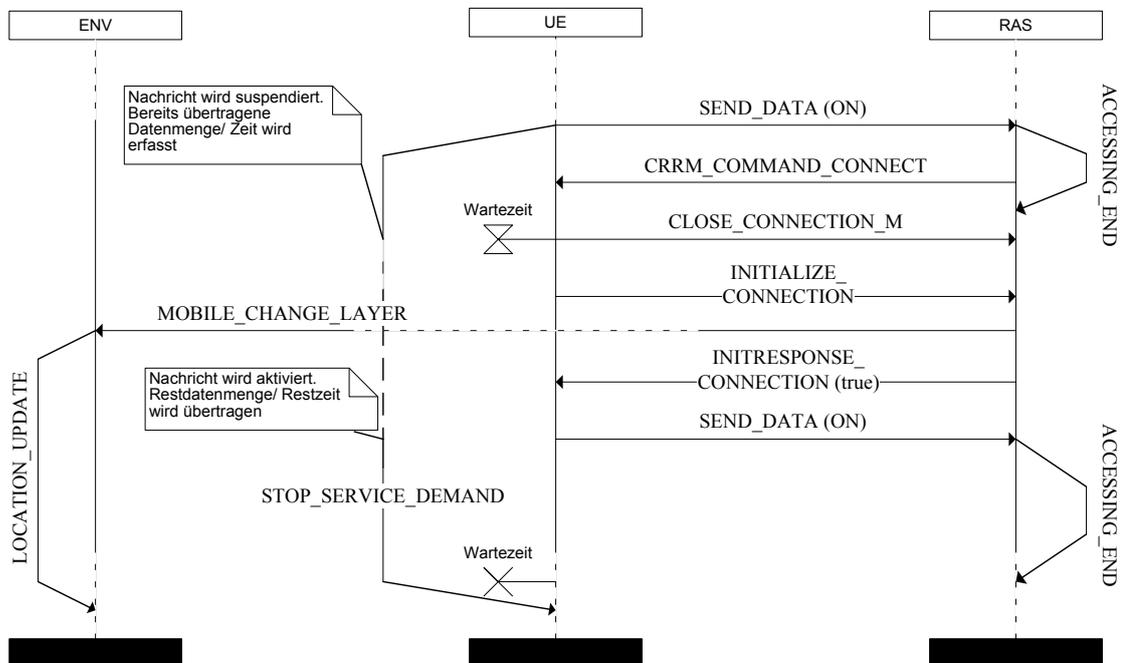


Bild 4.20 Ablauf eines netzseitig initiierten Intersystem-Handovers

Um weitere Informationen über die Umwelt zu sammeln, kann es notwendig sein, Messungen in der Komponente ENV zu starten. Dazu wird von einer lokalen oder netzseitigen CRRM-IM-Komponente eine CRRM_COMMAND_MEASURE-Nachricht gesendet. Für den Fall einer netzseitigen CRRM-IM-Komponente kann die Messung in der Komponente ENV für einzelne Nutzerendgeräte oder für alle Nutzerendgeräte in einer Zelle oder in einem Funkzugangssystem gestartet werden. Die Komponente RAS leitet die entsprechenden CRRM_COMMAND_MEASURE_M-Nachrichten an die UE-Komponente weiter. Die lokalen CRRM-IM-Komponenten senden direkt CRRM_COMMAND_MEASURE_M-Nachrichten an die Komponente UE. Es ist möglich periodische Messwertübermittlungen zu starten, die wieder gestoppt werden müssen (vgl. Bild 4.21). Alternativ können einzelne Messwertübermittlungen angefordert werden. Die Dauer der Messung hängt von der mit der Nachricht definierten Periodendauer und von der minimalen Messwertbestimmungszeit ab, wobei letztere ein Parameter des Nutzerendgerätes ist.

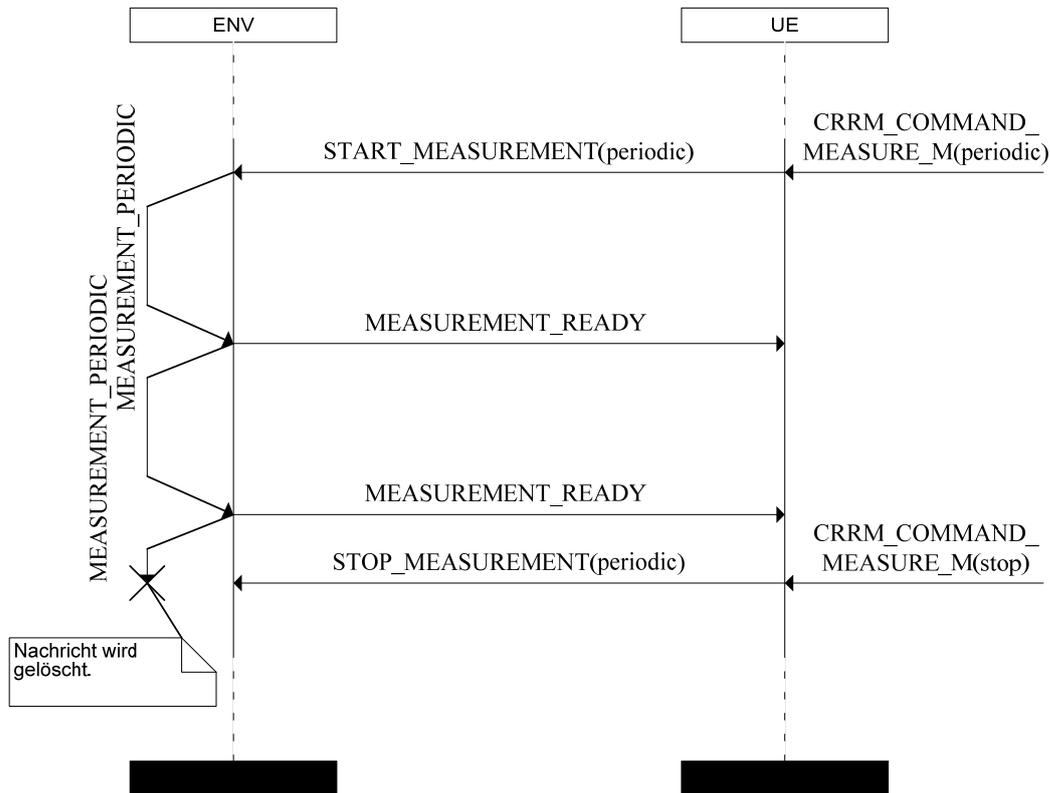


Bild 4.21 Ablauf Start/Stop periodischer Messungen in der Umwelt

4.3 Umsetzung der Kostendefinition

Es besteht die Möglichkeit jede Nachricht, die zwischen den Modellkomponenten ausgetauscht wird, mit Kosten zu versehen. Folgende Kostenarten sind definierbar:

- zeitliche Kosten
- abstrakte Kosten

Jedes Mal, wenn eine Nachricht gesendet oder weitergeleitet wird, werden entsprechende Kosten kontextabhängig berücksichtigt. Die definierten zeitlichen Kosten führen zu einer verzögerten Versendung der Nachrichten. Die definierten abstrakten Kosten werden bei jedem Auftreten der Nachricht für diese Komponente aufsummiert und bei Simulationsende als CRRM-Kosten ausgegeben.

Die Definition der Kosten erfolgt dabei pro Nachrichtentyp, pro definierter Nutzerendgeräte-Klasse und für jede Modell-Komponente separat. Den Kontext für die Kostenermittlung der Nachricht bilden daher die Nutzerendgeräte-Klasse, die der Nachricht zugeordnet ist, und die Modellkomponente des Auftretens (bzw. der Weiterleitung). Für den Fall, dass die Nachricht keiner Nutzerendgeräte-Klasse zugeordnet werden kann, basiert die Kostenermittlung nur auf der Modellkomponente des Auftretens (bzw. der Weiterleitung) der Nachricht. Dabei können den Nachrichtentypen jeweils vier Kostenklassen zugeordnet werden (Costless, Low, Medium, High). Die Werte für diese vier Kostenklassen können pro Komponente bzw. pro Nutzerendgeräte-Klasse definiert werden. Der Grund für die Beschränkung auf vier Kostenklassen ist eine einfachere Szenariodefinition durch die Vorgabe von Komplexitätsklassen. Falls erforderlich, können weitere Kostenklassen definiert werden oder eine freie Festsetzung der Kosten pro Nachricht erfolgen. Die Kostendefinition wird über die XML-Parameterfiles vorgenommen. Im folgenden Beispiel werden für die Nutzerendgeräte-Klasse 0 für die Nachricht vom Typ 902 keine abstrakten Kosten und zeitliche Kosten der Klasse „Medium“ definiert.

```
<MessageCosts>
  <UEClass id = "0">
    <Message id = "902">
      <Costs>COSTLESS</Costs>
      <TimeDemand>MEDIUM</TimeDemand>
    </Message>
    ...
  </UEClass>
  ...
</MessageCosts>
```

Hinweis: Systeminhärente Nachrichten sollten nur mit abstrakten, aber nicht mit zeitlichen Kosten belegt werden, da zeitliche Verzögerungen dieser Nachrichten zu Reihenfolgeproblemen im Simulator führen können. Die Zuordnung von Nummern zu Nach-

richtentypen ist in der Bedienungsanleitung auf dem digitalen Datenträger im Anhang zu finden.

4.4 Umsetzung der Szenariodefinition

Die Definition der einzelnen CRRM-Szenarien basiert auf der Beschreibung in Abschnitt 3.1.4. Dabei werden die einzelnen in Bild 3.8 auf Seite 36 abgebildeten Modellkomponenten direkt in OMNeT++ Module übersetzt. Die Komponenten, die zur Strukturierung des Szenarios dienen, werden als „Compound“-Module definiert. Diese Module können folgende Basistypen besitzen: CRRM_A, CRRM_B und CRRM_C. Dies geschieht in Anlehnung an die Strukturdefinition aus Abschnitt 2.4. Alle weiteren Komponenten sind „Simple“-Module. Die Kommunikationspfade für den Nachrichtenaustausch zwischen den Modellkomponenten werden über OMNeT++ „Connections“ definiert. Die OMNeT++ „Connections“ besitzen nur die Funktion der Festlegung der Kommunikationspfade zwischen den „Compound“- und „Simple“-Modulen. Die OMNeT++ Funktion der Nachrichtenverzögerung in Verbindung mit Connections wird nicht verwendet. Für jedes „Simple“-Modul und damit für jede Modellkomponente können eigene Parameter definiert werden.

Als Beispiel wird in Bild 4.22 die Simulatorrepräsentation des Szenarios aus Bild 3.9 abgebildet. Es existiert ein Netzbetreiber (ein CRRM_B-Modul in dem CRRM_C-Modul) für den zwei Funkzugangstechnologien definiert wurden (im CRRM_B-Modul existieren zwei CRRM_A-Module). Für die beiden Funkzugangstechnologien existiert ein CRRM-IM-Modul, welches mit beiden Funkzugangstechnologien bidirektional verbunden ist. Jedes CRRM_A-Modul der Funkzugangstechnologien enthält die zwei RAS-Module und die CRRM-IM, CRRM-D sowie die ENV- und UE-Module. Zusätzlich zu den in Bild 3.9 abgebildeten Komponenten (bzw. Modulen) existieren noch folgende Module: CRRM_D_local, CRRM_IM_local und Link auf Ebene CRRM_A sowie MOBILE_DATA und ENVIRONMENT_DATA auf Ebene CRRM_C. Die lokalen CRRM-Module sind notwendig, da im Prinzip ein einfaches lokales CRRM immer aktiviert ist. Das Nutzerendgerät muss ein initiales Funkzugangssystem basierend auf den bevorzugten Funkzugangstechnologien, Netzbetreibern etc. für den Verbindungsaufbau auswählen. Für die Szenariobeschreibung ist diese lokale Funktion trivial und wird vorausgesetzt. Im Simulator muss dies jedoch beachtet und umgesetzt werden. Das Modul Link fungiert als zentraler Konnektor von/zu übergeordneten „Compound“-Modulen und dient der einfacheren gekapselten Szenarioerstellung der einzelnen CRRM-Ebenen über die Sprache NED von OMNeT++. Es besitzt keine Funktion, die über die Weiterleitung der Nachrichten hinaus geht. Es wäre jedoch möglich, hier weitere Funktionalität hinsichtlich der Kostenbelegung von Kommunikation zwischen CRRM-Ebenen zu implementieren. Die Module MOBILE_DATA und ENVIRONMENT_DATA realisieren zentral die Logik der Abläufe, die mit der Umwelt und den Nutzerendgeräten zusammenhängen. Die Module ENV bzw. UE fungieren dabei als kontexterhaltende

Kommunikations-Relays für die Nachrichten der Umwelt bzw. der Nutzerendgeräte an andere Module.

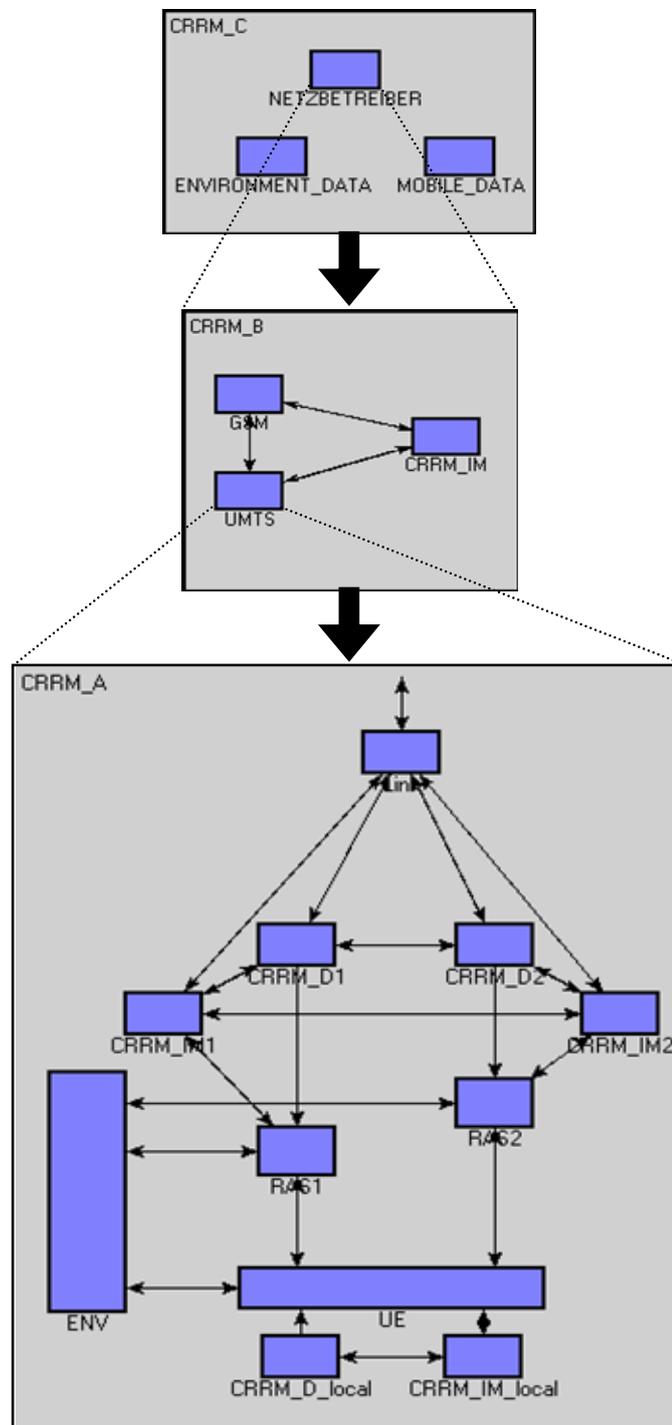


Bild 4.22 Beispiel: Hierarchisches Informationsmanagement und dezentrale Entscheidung (OMNeT++ Ausgabe der CRRM-Level)

4.5 Allgemeine Eigenschaften des Simulators

4.5.1 Dynamik der Zustandsänderungen

Die Dynamik der Zustandsänderungen im Simulator wird über den ereignisorientierten Teil von HEKATE zeitgetreu realisiert. Jede Nachricht (cMessage), die zwischen den Modellkomponenten ausgetauscht wird, bewirkt eine Zustandsänderung. Jede Nachricht steht für ein Ereignis, welches zeitgetreu an die Modellkomponenten übermittelt wird. Ein Ereignis kann sich auf eine Modellkomponente, eine Zelle oder ein Nutzerendgerät beziehen. Dabei werden pro Zustandsänderung entweder simulative Modellteile angesprochen oder neue Parameter an analytische Modellteile übergeben.

Simulative Modellteile sind für den Informationstransfer sowie die Verwaltung der CRRM-Informationen, für die Interaktionssteuerung der Modellkomponenten, für die Realisierung der Mobilität und für die Realisierung des Dienstanforderungsprozesses definiert. Die Realisierungen der Mobilität und des Dienstanforderungsprozesses greifen jedoch auch teilweise auf analytische Modelle zurück, um die Modellkomplexität zu beschränken. Im Mobilitätsmodell wird die Verweilzeit in einem Rasterelement analytisch ermittelt (aus Richtung, Position und Geschwindigkeit) und für die Realisierung des Dienstanforderungsprozesses wird ein analytisches Anforderungsmodell verwendet (siehe Seite 56). Die Interaktionssteuerung und die Informationsverwaltung sind rein simulative Modelle. Die Interaktionssteuerung definiert die grundsätzlichen Abläufe im Simulator. Sie legt fest wie Nachrichten eines bestimmten Typs behandelt werden und welche Reaktionen für bestimmte Systemzustände vorgesehen sind. Übersichtsartig wird dies in folgenden Bildern dargestellt: Bild 4.3, Bild 4.6, Bild 4.9, Bild 4.13, Bild 4.14, Bild 4.15 bis Bild 4.21.

Analytische Modellteile bewirken das abweichende Verhalten der RAS-Modelle für unterschiedliche Funkzugangstechnologien. Das grundsätzliche Interaktionsverhalten (z.B. Verbindungsaufbau, Verbindungsabbau, Überlastkontrolle) wird durch die Interaktionssteuerung (simulatives Modell) festgelegt und ist für alle RAS-Modelle gleich. Die analytischen Modellteile der RAS-Modelle bewirken jedoch ein abweichendes Verhalten, da sie für gleiche Werte der Eingabeparamter pro Funkzugangstechnologiemodell unterschiedliche Ausgabewerte liefern (vgl. Bild 4.8 auf Seite 63). Übersichtsartig zusammengefasst wird der Zusammenhang der Eingabe- und Ausgabeparamter der analytischen RAS-Modellteile für das UMTS- und GSM/EGPRS-Modell in Bild 4.12 auf Seite 89.

Der Zustand der Modellkomponenten wird durch Informationen in Objekten repräsentiert. Für die Informationen zu Nutzerendgeräten existieren Nutzerendgeräte-Objekte (Klassenname: MobileBase) pro Nutzerendgerät. Diese Objekte enthalten die in Tabelle 4.21 aufgeführten Informationen. Nicht alle Informationen in diesen Objekten sind für jede Modellkomponente verfügbar. Es existieren Zugriffsschnittstellen für die UE-Komponente (Klassenname: MobileUE), für die RAS-Komponente (Klassenname: Mo-

mobileRAS) und die ENV-Komponente (Klassenname: MobileENV) mit jeweils unterschiedlichen Sichten auf ein Nutzerendgeräte-Objekt. Alle Informationen über ein Nutzerendgerät können dadurch zentral verwaltet werden, aber auf Informationen, die in einer Modellkomponente nicht zur Verfügung stehen oder die nicht von ihr beeinflusst werden können, kann nicht zugegriffen werden.

Für die Informationen zu einzelnen Zellen existieren Zell-Objekte (Klassenname: RASStationCoverage). Diese Objekte enthalten die in Tabelle 4.22 aufgeführten Informationen. Pro Rasterelement-Objekt (Klassenname: Element) existieren die in Tabelle 4.23 aufgeführten Informationen.

Der aktuelle Zustand der ENV-Komponente wird repräsentiert durch die Informationen in den MobileENV-Objekten und den Informationen pro Rasterelement-Objekt. Der aktuelle Zustand der RAS-Komponente wird repräsentiert durch die Informationen in den MobileRAS- und RASStationCoverage-Objekten. Der aktuelle Zustand der UE-Komponente wird durch die Informationen der MobileUE-Objekte repräsentiert. Die Zustandskodierungen der Komponenten CRRM-IM und CRRM-D sind weitestgehend abhängig von den verwendeten Algorithmen.

Tabelle 4.21 Informationen pro Nutzerendgeräte-Objekt (MobileBase)

Kategorie	Informationen
Allgemein	Index, Serviceklasse, diverse Zustandsvariablen
Dienst	Phasenparameter (ON, OFF), aktuelle Phase, geforderte, gebotene Dienstqualität, Priorität, diverse Zustandsvariablen
Verbindung	Verbindungsstatus (RAS, Zelle, Zugriffs-/ Datenübertragungsphase etc.), belegte Ressourcen
Mobilitätsparameter	Aktuelle Position, Position nach dem Ende der Verweilzeit in Rasterelement, Ziel, Geschwindigkeit (maximal, minimal, aktuell)
Geräteparameter	Unterstützte Betreiber und Funkzugangstechnologien, benötigte Messzeiten
Messungen	Messwertreport, Typ/ Status/ Alter der Messung
Kostendefinition	Registrierte Empfänger für Nachrichtentypen und definierte Kosten

Tabelle 4.22 Informationen pro Zell-Objekt (RASStationCoverage)

Kategorie	Informationen
Allgemein	Index, Betreiber, zugehörige RAS-Komponente, diverse Zustandsvariablen
Abdeckungsbereiche	Zellmittelpunkt und Radien
Nutzerendgeräte	Zähler, Informationen zu Verbundenen Nutzerendgeräten
Ressourcen	Funkzugangstechnologie, Kanalparameter der Kodierungsschemata pro Empfangsklasse, aktueller Ressourcenverbrauch, Lastgrenzwerte, Verwendeter RRM-Algorithmus
Nachbarzellen	Index, Informationen zu Nachbarzellen
Messungen	Typ der von den Nutzerendgeräten durchzuführenden Messung
Kostendefinition	Registrierte Empfänger für Nachrichtentypen und definierte Kosten

Tabelle 4.23 Informationen pro Rasterelement-Objekt ()

Kategorie	Informationen
Position	Index, Nachbarelemente, Elementdimensionen
Ebene	Netzebenenindex, Element der höheren Netzebene, Elemente der unteren Netzebene (Netzebenen sind nach Auflösung sortiert)
RAS	Empfangbare Zellen der RAS mit Empfangsklasse, Abstand zur Basisstation

4.5.2 Allgemeiner Aufbau von HEKATE-Szenarien

Szenarien für HEKATE sind in einen Strukturteil und einen Anwendungsteil getrennt.

Der Strukturteil wird über die in OMNeT++ vorhandene Sprache NED definiert. In diesem Teil wird vorgegeben welche Modellkomponenten existieren und welche Kommunikationspfade zwischen den Modellkomponenten existieren. Der Modellstrukturteil realisiert daher eine Variante des in Bild 3.8 auf Seite 36 angegebenen Schemas und legt fest welche CRRM-Level betrachtet werden.

Der Anwendungsteil wird über XML-Dateien definiert und gibt Parameter für die Anwendungsszenarien vor. Er definiert für die Komponente UE welche Klassen von Nutzerendgeräten existieren und ihre Eigenschaften. Für die Komponente ENV definiert er die Eigenschaften der Umwelt. Für die Komponente RAS definiert er die Anzahl, Position und Eigenschaften der Zellen und ihrer Ressourcen (Kanäle). Der Anwendungsteil definiert auch die Parameter der betrachteten CRRM Informationsmanagement- und Entscheidungsalgorithmen.

Die Verbindung zwischen dem Strukturteil und dem Anwendungsteil wird über eine Szenariodefinitionsdatei hergestellt. Sie definiert welche Parameter des Anwendungsteils welcher Komponente zugeordnet werden. In dieser Datei wird festgelegt welche Funkzugangstechnologien (inklusive der Parametereinstellungen) welcher RAS-Komponente zugeordnet werden. Außerdem wird festgelegt welche Algorithmen in den CRRM-Komponenten zum Einsatz kommen.

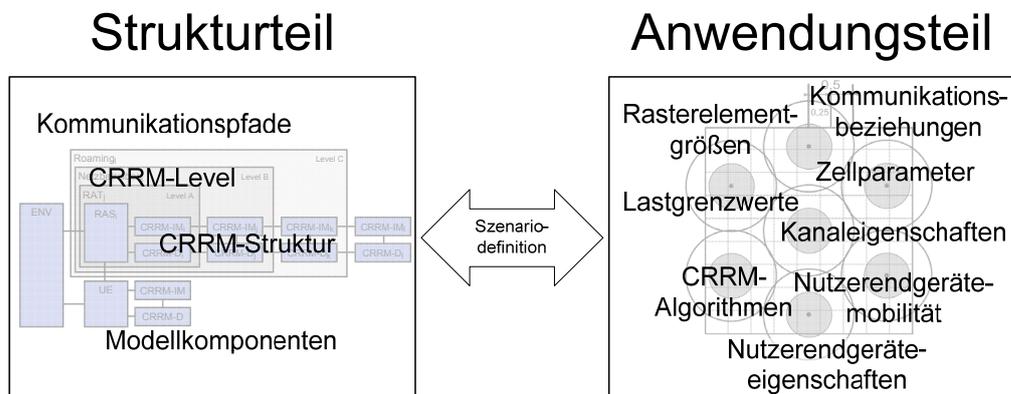


Bild 4.23 Aufbau von Szenarien in HEKATE

Durch die Trennung in Strukturteil und Anwendungsteil sowie die Verknüpfung der beiden Teile durch die Szenariodefinitionsdatei können einfach Szenariovarianten untersucht werden. Für die Untersuchung der Eignung von CRRM-Ansätzen kann die Modellstruktur oder das Anwendungsszenario separat geändert werden. Bild 4.23 zeigt eine schematische Darstellung der Trennung in Struktur- und Anwendungsteil. Es wird anhand einiger Beispiele verdeutlicht, welche Szenarioparamter in den zwei Teilbereichen festgelegt werden.

5 Untersuchung und Überprüfung des Simulators

In diesem Kapitel wird das Verhalten der Teilmodelle des hybriden Simulationsmodells aus Kapitel 4 untersucht und die Ergebnisse des Simulators werden mit öffentlich zugänglichen Simulationsstudien verglichen.

Der Abschnitt 5.1 dient der Darstellung bestimmter Aspekte des Modellverhaltens. Das Verhalten des analytischen G/G/1/PS-Kanalmodells wird in Abschnitt 5.1.1 untersucht und in Abschnitt 5.2 mit den Ergebnissen von Simulationsstudien verglichen. Die für den Einsatz im hybriden Simulationsmodell entwickelte Repräsentation der Umwelt und weitere simulative Teilmodelle werden in Abschnitt 5.1.2 untersucht. Außerdem wird in Abschnitt 5.2 das Verhalten des HEKATE Simulators mit einer öffentlich zugänglichen Simulationsstudie des IST Everest Projekts verglichen.

5.1 Untersuchung des Modellverhaltens

5.1.1 Verhalten der analytischen Modelle der RAS-Komponente

Um das Verhalten der einzelnen Teilmodelle aus Abschnitt 4.1.3 und die Kombination dieser Teilmodelle besser verstehen zu können, wurde in der Arbeit [Rein2008] ein Visualisierungswerkzeug entwickelt. Das auf Java basierende Visualisierungswerkzeug ermöglicht die Analyse, der im Simulator verwendeten analytischen Modelle, unter Berücksichtigung der Szenarioparameter (XML-Parameterdateien des Simulators). Dadurch ist es möglich, das Verhalten des Simulators für Szenarien vorher abzuschätzen und evtl. entsprechende Parameteranpassungen vorzunehmen. Im Nachfolgenden werden die Modellergebnisse für bestimmte Kanalparameter beschrieben und der Einfluss der M/M/1-Heuristik, zur Bestimmung der Anzahl der PDU-Pakete in der Übertragungseinrichtung, untersucht. Außerdem wird ein Vergleich der Ergebnisse des Visualisierungswerkzeugs und des Simulators durchgeführt.

In Tabelle 5.1 wird beispielhaft ein Kanalparameterset für einen EGPRS-Kanal (MCS 4) definiert. Zum Vergleich wird zusätzlich ein Parameterset für einen UMTS Dedicated Channel (DCH) mit 384 kbit/s definiert. Für die Werte der Fehlerwahrscheinlichkeit wird zusätzlich zwischen guter und mittlerer Empfangsqualität unterschieden.

Tabelle 5.1 Eingabeparameter für Kanalmodell eines EGPRS- und UMTS-Kanals

Parameter	Beschreibung	EGPRS MCS 4	UMTS DCH
		17,6 kbit/s	384 kbit/s
		Wert	Wert
RTT_k	ARQ-Round-Trip-Time	80 ms	110 ms
TTI_k	Transmission Time Interval	20 ms	10 ms
Ψ_k	Nettokapazität der RLC-PDU	352 bit	320 bit
M_k	Anzahl der PDU die pro PDCH in einem TTI übertragen werden können	1	12
Y_k	Anzahl der Kanäle (PDCH) die gleichzeitig belegt werden können	max. 7	1
T_{p_k}	Zeitdauer bis zur nächsten Wettbewerbsphase	235,365 ms (Dauer eines Multiframe)	
H_k	Anzahl der Wettbewerbsslots	4	
TBF_{up_k}	Zeitdauer zum Aufbau eines Temporary Block Flow	250 ms	250 ms
$P_{e,k}$	Fehlerwahrscheinlichkeit für die Übertragung einer PDU	Gut: 5% Mittel: 15%	Gut: 5% Mittel: 15%
Θ_i	Größe der zu übertragenden SDU inkl. Overhead	1460 byte	1460 byte
$E[A_i]$	Mittlerer Zwischenankunftsabstand der SDU	1,217 s	0,0456 s
$VK[A_i]$	Variationskoeffizient des Zwischenankunftsabstands	1,0	1,0

In den folgenden Betrachtungen wird vorerst nur auf die Kanalparameter des EGPRS-Kanals zurückgegriffen. Aus den Parameterwerten ergibt sich eine maximale Kanalkapazität pro PDCH bei gutem Empfang von 16,72 kbit/s und bei mittlerem Empfang von 14,96 kbit/s. Daraus ergibt sich bei sieben vorhandenen PDCH eine Zellkapazität von 117,04 kbit/s bei gutem Empfang und von 104,72 kbit/s bei mittlerer Empfangsqualität. Das analytische Modell ermittelt unter Berücksichtigung des SR-ARQ-Schemas eine maximale Kanalkapazität von 105,6 kbit/s bei guten Empfangsbedingungen (dies entspricht 11 aktiven Dienstverbindungen); bei mittleren Empfangsbedingungen beträgt die maximale Kanalkapazität noch 96 kbit/s (10 aktive Dienste).

Im Bild 5.1 ist der Verlauf der Auslastung im gemeinsam genutzten EGPRS-Kanal einer Zelle für die Empfangsqualitätsklasse „gut“ und „mittel“ zu sehen. Der Anstieg der Auslastungstrajektorie fällt für größere Auslastungen. Dies ist auf die dann gegebene verbesserte Ausnutzung der parallelen Übertragung über sieben PDCH zurückzuführen. Für die Empfangsqualitätsklasse „gut“ (vgl. Tabelle 5.1) wird bei 12 aktiven Diensten eine theoretische Auslastung von über 99 % erreicht. Im Simulator sind Auslastung nahe 100 % nicht zu realisieren, da aufgrund der Heuristik (4.14) neue Verbindungen eine Gesamtauslastung von über 100 % ergeben und daher blockiert würden. Zudem ist es sinnvoll die Auslastung des Kanals in Simulator auf unter 90 % zu begrenzen, da in realen Funkzugangssystemen bei hohen Kanalauslastungen vermehrt Blockierungen

bzw. Ratenanpassungen auftreten. Die Ergebnisse des hier verwendeten Modells wären daher nicht mehr aussagekräftig. Angegebene Auslastungen von über 100 % sind nicht vom Modell abgedeckt und dienen nur der erleichterten Fehlersuche bei der Erstellung von Szenarien.

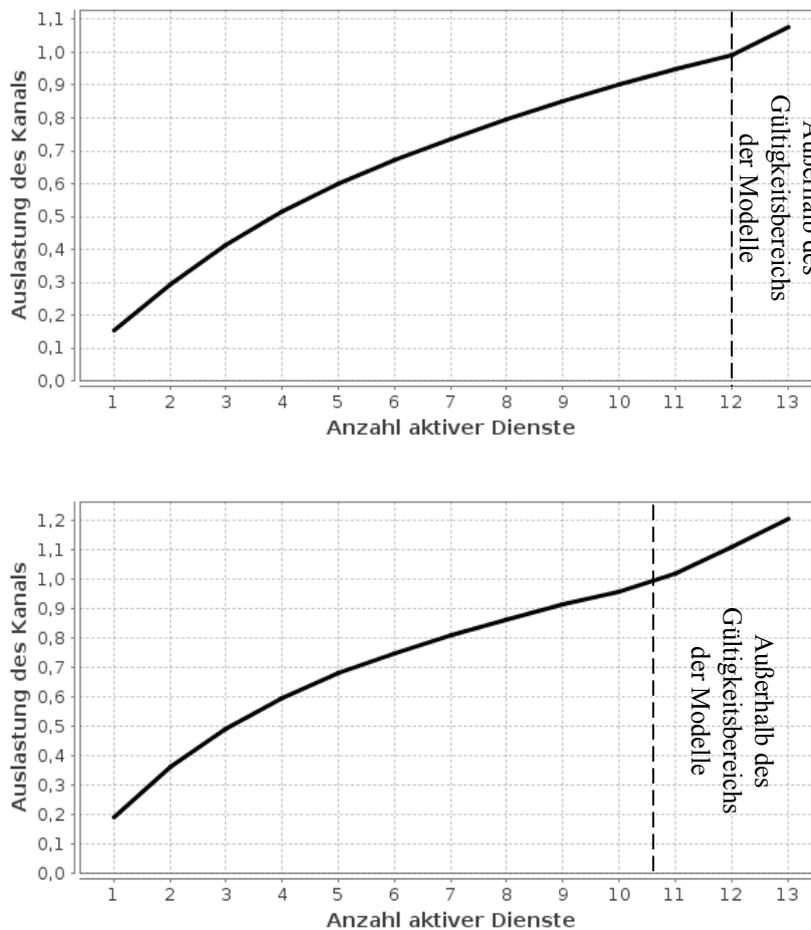


Bild 5.1 Auslastung unter unterschiedlichen Empfangsqualitätsklassen – oben: gute Empfangsqualität unten: mittlere Empfangsqualität

Die mittlere Übertragungsdauer (Delay) eines SDU-Paketes $E[V]$ setzt sich aus der mittleren Bedienzeit $E[B]$ und der mittleren Scheduling-Verzögerung $E[S]$ zusammen. Im Bild 5.2 sind die Ergebniswerte des analytischen Modells für $E[B]$ und $E[S]$ für eine steigende Zahl von aktiven Diensten in der Zelle abgetragen. Im Bild 5.3 ist der Verlauf von $E[V]$ abgebildet, als Ergebniswerte des Simulators und des Visualisierungswerkzeug. Für das analytisch arbeitende Visualisierungswerkzeug und den Simulator wurden die gleichen Szenariodefinitionsdateien verwendet. Es wurde eine Zelle mit durchgehend „gutem“ Empfang und den entsprechenden Kanaleigenschaften simuliert. Das Szenario wurde für den Simulator so gestaltet, dass im Mittel die angegebene Zahl von Nutzerendgeräten mit aktiven Diensten in der Zelle vorhanden war. Dazu musste eine möglichst große ON-Phase und eine möglichst kleine OFF-Phase definiert werden.

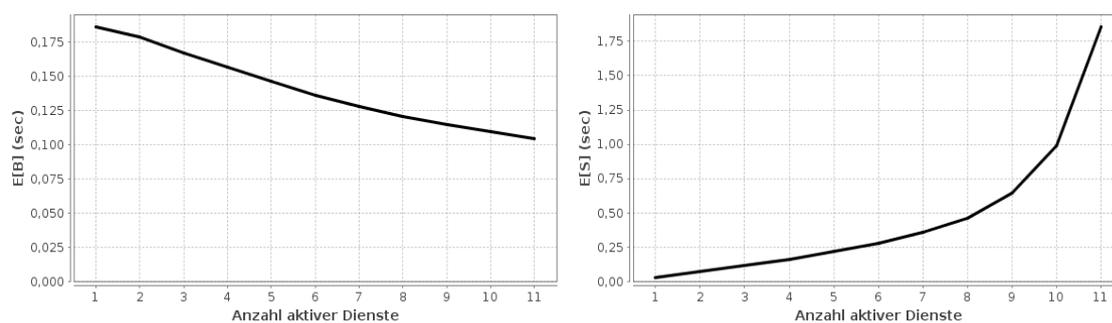


Bild 5.2 Werte für $E[B]$ und $E[S]$ abhängig von der Anzahl aktiver Dienste.

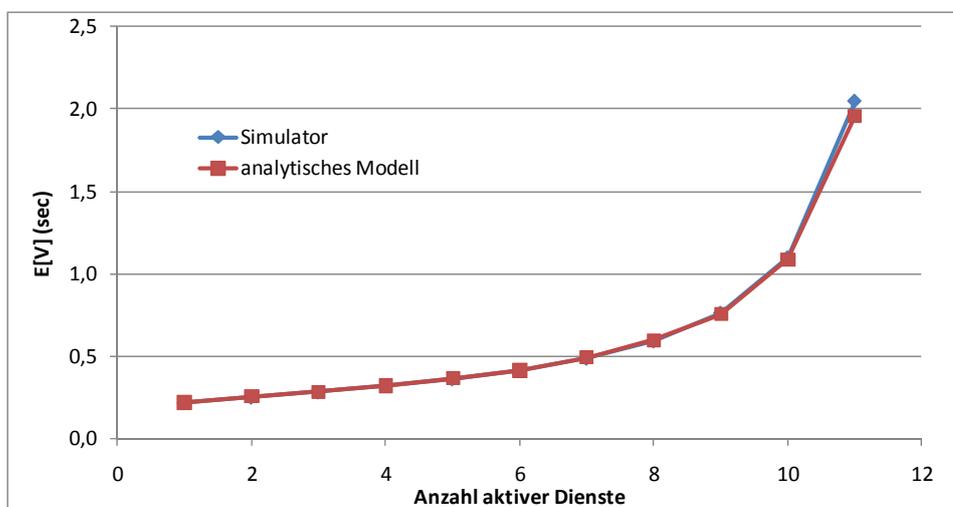


Bild 5.3 Werte des Simulators und des Visualisierungswerkzeugs für $E[V]$ (einer SDU) abhängig von der Anzahl aktiver Nutzer

Die Werte weisen eine gute Übereinstimmung auf. Abweichungen ergeben sich aus der Implementierung der Heuristik (4.14) und dem ON-/OFF-Phasenwechsel. Die OFF-Phase kann im Simulator aufgrund der Implementierung nicht auf 0 s gesetzt werden. Die Heuristik verwendet gleitende Durchschnittswerte, welche im Visualisierungswerkzeug nur nachempfunden wurden. Besonders für sehr hohe Auslastungen, wie im Fall von 11 aktiven Nutzerendgeräten gegeben, bewirkt dies eine Abweichung in den Ergebniswerten.

Hinweis: Falls bei hier nicht betrachteten Funkzugangstechnologien die Kennlinien des Kanalverhaltens hinsichtlich der Übertragungsdauer einer SDU bekannt sind, kann durch heuristische Wahl der Fehlerwahrscheinlichkeit $P_{e,k}$ und des Variationskoeffizienten der Zwischenankunftszeit neuer Pakete $VK[A_i]$ oder anderer Eingangsparameter, ein anderes Kanalverhalten erreicht werden. Im Bild 5.4 ist ein verändertes Kanalverhalten für $E[V]$ abgebildet; erreicht wurde dies durch folgende abweichende Werte $P_{e,k} = 1\%$ $VK[A_i] = 0,5$.

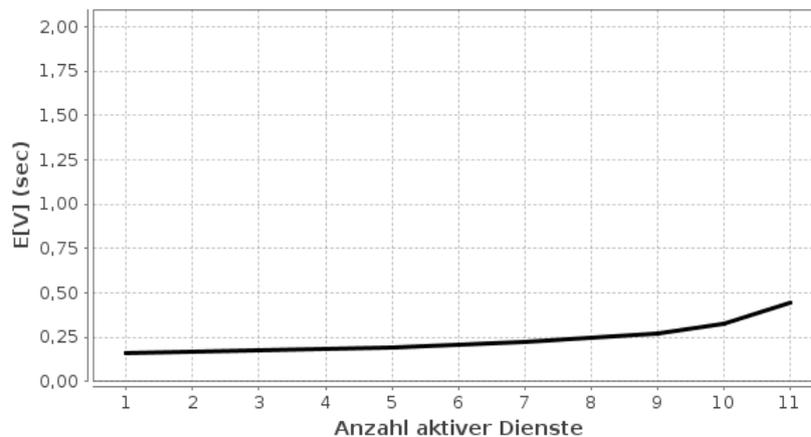


Bild 5.4 Mittlere Übertragungsdauer $E[V]$ einer SDU unter veränderten Kanalannahmen

Einfluss der M/M/1-Heuristik und der Parameter des Kanalmodells

Die Verwendung des M/M/1-Modells ist notwendig, um die Verringerung der Bedienzeit pro SDU-Paket durch die parallele Übertragung von wartenden SDU- bzw. PDU-Paketen zu berücksichtigen (vgl. Beschreibung auf Seite 74). Kleinere SDU-Pakete können schlechter parallel übertragen werden. Die SDU-Paketgröße Θ_i wurde daher für die Diagramme aus Bild 5.5 bis Bild 5.7 auf 500 Byte verkleinert, um den Effekt zu verdeutlichen. Bild 5.5 zeigt den Verlauf der mittleren Bedienzeit $E[B]$ und Bild 5.6 den Verlauf des $VK[B]$ für ein SDU-Paket in Abhängigkeit der Anzahl paralleler PDCH. Es befinden sich fünf Nutzerendgeräte mit aktiven Diensten in der Zelle. Die mittlere Bedienzeit eines 500 Byte großen SDU-Paketes kann ohne M/M/1-Heuristik nur bis zu einer PDCH-Zahl von drei von der Parallelisierung profitieren. Die wartenden SDU-Pakete werden ohne M/M/1-Heuristik nicht berücksichtigt (linker Graph). Erst die Berücksichtigung der wartenden Pakete ermöglicht eine weitere Reduzierung der mittleren Bedienzeit durch die Verringerung von Leerlaufzeiten des Kanals (siehe rechter Graph). Der Variationskoeffizient der Bedienzeit $VK[B]$ steigt mit steigender Anzahl paralleler PDCH. Wiederholungsübertragungen fehlerhafter PDU haben hier durch die kürzere Bedienzeit (im fehlerfreien Fall) größeren Einfluss (linker Graph). Mit M/M/1-Heuristik wird dieser Effekt durch die geringere Bedienzeit verstärkt (rechter Graph). Für eine PDCH-Zahl von 6 und höher bleibt $E[B]$ relativ konstant und daher auch $VK[B]$. Der Einfluss der M/M/1-Heuristik wird auch am Bild 5.7 deutlich. Durch die Berücksichtigung der wartenden PDU und die dadurch verbesserte parallele Übertragung verringert sich der Anstieg der Auslastungstrajektorie für höhere Auslastungen. Dies ist bedingt durch die geringere mittlere Bedienzeit pro SDU-Paket. Gleichzeitig vergrößert sich jedoch auch der Variationskoeffizient der Bedienzeit.

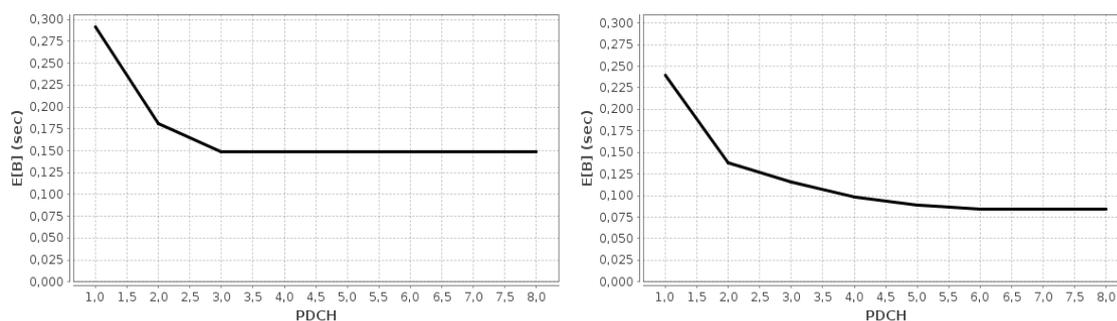


Bild 5.5 Auswirkung der M/M/1-Heuristik auf $E[B]$ (links ohne, rechts mit aktiver Heuristik)

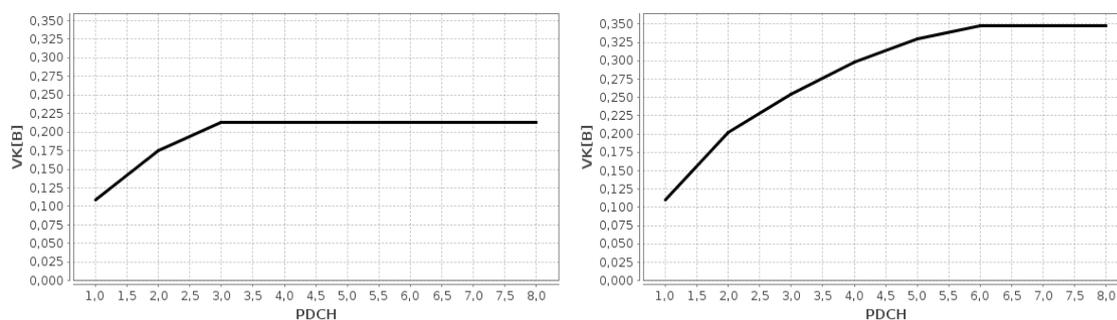


Bild 5.6 Auswirkung der M/M/1-Heuristik auf $VK[B]$ (links ohne, rechts mit aktiver Heuristik)

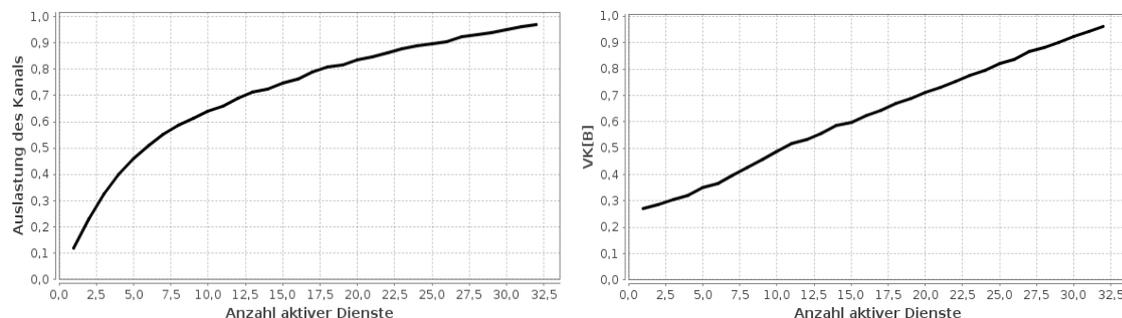


Bild 5.7 Einfluss der Kanalauslastung auf den $VK[B]$ mit M/M/1-Heuristik

Bei steigenden Werten für den Parameter M ist das gleiche Kanalverhalten zu beobachten wie im Bild 5.5 bis Bild 5.7 für steigende PDCH-Werte. Die weitere Untersuchung der Einflüsse der Eingangsparameter wird auf der Grundlage der Kanalparameter aus Tabelle 5.1 durchgeführt mit aktiver M/M/1-Heuristik unter der Annahme eines aktiven Nutzerendgeräts.

Der Einfluss der RLC-PDU-Paketfehlerwahrscheinlichkeit P_e auf das Kanalverhalten wird in Bild 5.8 bis zu einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 50 % dargestellt. Es ist zu sehen, dass $E[B]$ relativ moderat steigt. Dieses Verhalten ist durch die dämpfende Wirkung der steigenden Kanalauslastung bei höheren Fehlerwahrscheinlichkeiten zu erklären. Der Variationskoeffizient steigt hingegen sehr stark für steigende Fehlerwahr-

scheinlichkeiten. Für eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 0 % ist der Variationskoeffizient gleich null und das Kanalverhalten ist deterministisch.

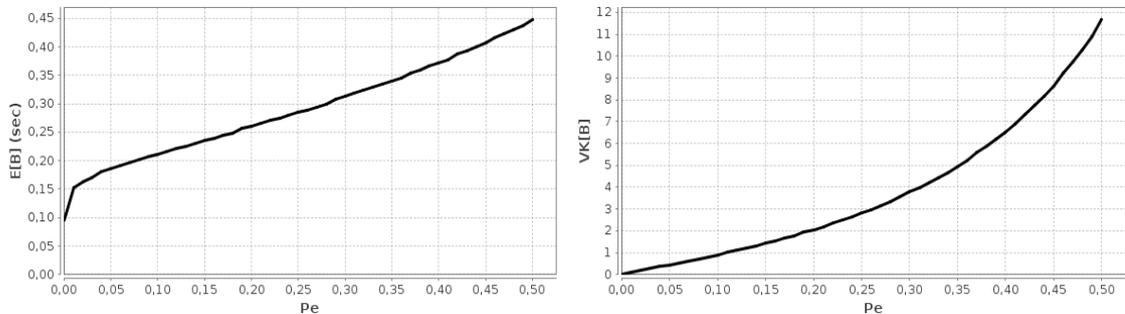


Bild 5.8 Einfluss der RLC-PDU-Paketfehlerwahrscheinlichkeit ($P_{e,k}$)

Der Einfluss der SDU-Paketgröße Θ_i eines Dienstes i auf das Kanalverhalten wird in Bild 5.9 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bis zu einer gewissen SDU-Paketgröße (rund 1200 Byte) die zunehmend bessere Ausnutzung der parallelen Übertragung über 7 PDCH das Ansteigen der mittleren Bedienzeit dämpft. Erst danach steigt die mittlere Bedienzeit linear mit der Paketgröße. Der Variationskoeffizient der Bedienzeit steigt bis zu der Paketgröße von rund 1200 Byte relativ stark. Auch hier spielt die zunehmende Parallelität der Übertragung eine Rolle; denn bis zu dieser Paketgröße steigt der Abstand zwischen den Werten der kleinsten und größten Bedienzeit, die noch signifikante Wahrscheinlichkeiten besitzen. Danach verringert sich der Anstieg von $VK[B]$, da diese Schwankung im Vergleich zur Gesamtbedienzeit durch die zunehmende SDU-Paketgröße an Bedeutung verliert.

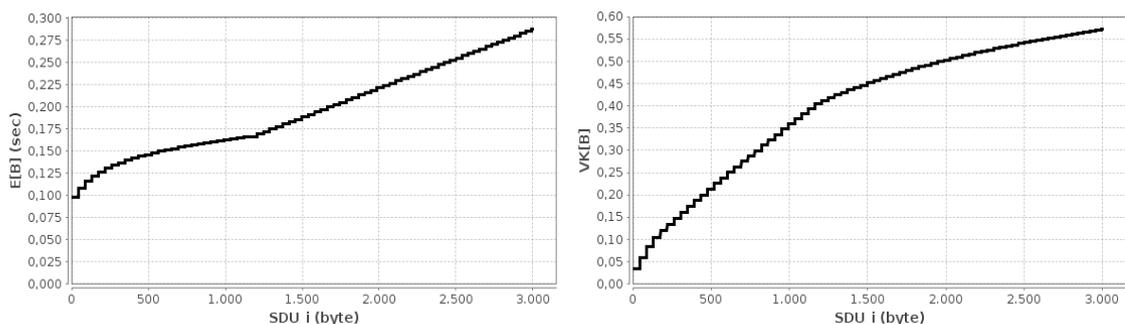


Bild 5.9 Einfluss der SDU-Paketgröße (Θ_i)

Der Einfluss der PDU-Paketgröße Ψ_k auf das Verhalten des Kanals k wird in Bild 5.10 dargestellt. Es ist zu sehen, dass $E[B]$ mit zunehmender PDU-Nettokapazität abnimmt. Der untere Grenzwert ist die Dauer eines TTI plus des entsprechenden mittleren RTT Wiederholungsanteils. Für kleine PDU-Nettokapazitäten ist die Kanalauslastung größer und dadurch auch $VK[B]$. Für größere Werte für Ψ sinkt auch die mittlere Anzahl von Wiederholungsübertragungen, wodurch $VK[B]$ zusätzlich sinkt.

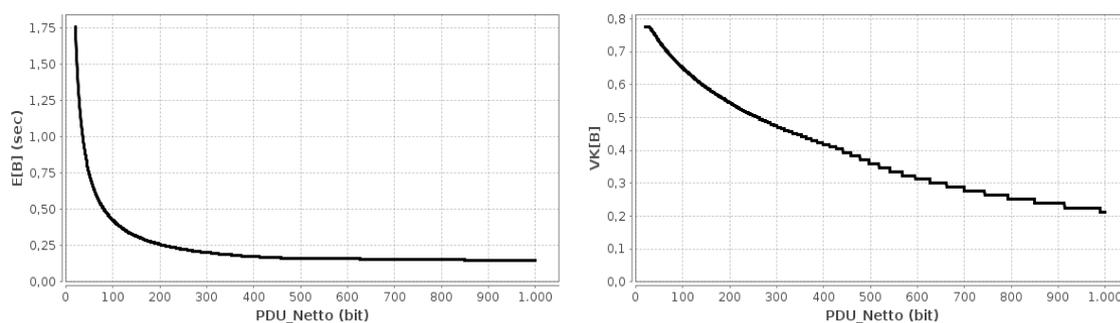


Bild 5.10 Einfluss der Nettokapazität der RLC-PDU-Pakete (Ψ_k)

Der Einfluss des Transmission Time Intervalls TTI auf das Kanalverhalten wird in Bild 5.11 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Bedienzeit mit steigender Dauer des TTI steigt. Die Sprünge im Verlauf sind durch die Beziehung der Parameter K und MT und durch die vorgenommenen Aufrundungen zu erklären (siehe Formel (4.18) und (4.19) auf Seite 75). Die Senkung des TTI bewirkt nur bis zu einer gewissen Grenze eine Senkung von $E[B]$ durch den Einfluss der Wiederholungsübertragungen und der zunehmend dominanten ARQ-Round-Trip-Time RTT . Auch $VK[B]$ steigt mit steigendem TTI durch die längere Dauer der Wiederholungsübertragungen.

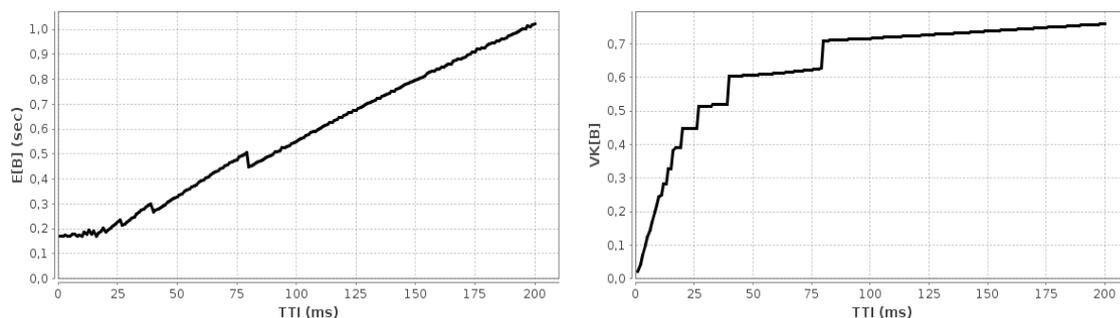


Bild 5.11 Einfluss des Transmission Time Interval (TTI_k)

Der Einfluss der ARQ-Round Trip Time RTT auf das Kanalverhalten wird in Bild 5.12 dargestellt. Es ist zu sehen, dass $E[B]$ mit wachsender RTT steigt. Die steigende Kanalauslastung bewirkt eine Dämpfung des Anstiegs von $E[B]$ durch die verbesserte parallele Übertragung. Auch $VK[B]$ sinkt mit steigender RTT , da vermehrt fast alle fehlerhaften PDU in einer Wiederholungsübertragung und damit einer RTT übertragen werden können.

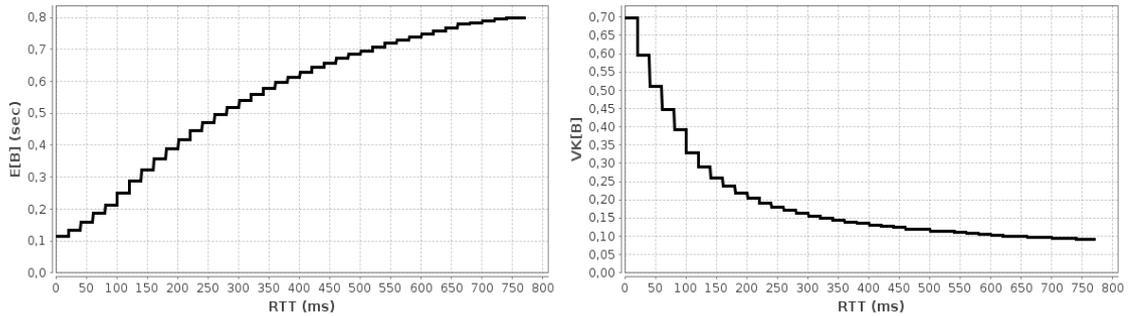


Bild 5.12 Einfluss der ARQ-Round Trip Time (RTT_k)

Der Einfluss der Parameter T_p und H auf die mittlere Zeit $E[T_{lup}]$ bis zum erfolgreichen Aufbau des Kanals wird in Bild 5.13 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei zwei Nutzerendgeräten im Wettbewerb, die Erhöhung der Zahl der Wettbewerbslots H nur bis zu einer gewissen Grenze die Zeit $E[T_{lup}]$ signifikant senkt. Die Zeitdauer zwischen zwei Wettbewerbsphasen hat linearen Einfluss auf die Zeit $E[T_{lup}]$.

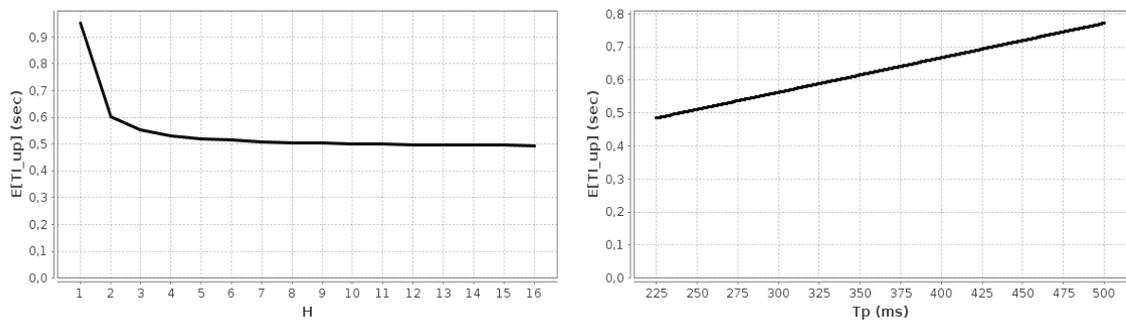


Bild 5.13 Einfluss der Parameter T_{p_k} und H_k auf die Zeit $E[T_l]$

Abschließend wird das Modellverhalten für die Parametereinstellungen des EGPRS- und UMTS-Kanals verglichen (Parameter siehe Tabelle 5.1). Im EGPRS-System sind sieben Nutzerendgeräte aktiv, um einen vergleichbaren Auslastungsgrad des Kanals zu erreichen. Bild 5.15 zeigt den Verlauf der Auslastungstrajektorie für unterschiedliche RLC-Paketfehlerwahrscheinlichkeiten P_e . Es ist zu sehen, dass der mittlere Auslastungsgrad des Kanals in beiden Funkzugangssystemen ähnlich hoch ist. Daher kann die Auslastung des Kanals als Hauptursache für das in Bild 5.14 gezeigte unterschiedliche Kanalverhalten ausgeschlossen werden. Bezüglich der mittleren Übertragungsdauer ist insgesamt der EGPRS-Kanal weniger sensitiv gegenüber der Änderung der RLC-Paketfehlerwahrscheinlichkeit als der UMTS Dedicated Channel. Er benötigt aber trotzdem grundsätzlich höhere Übertragungsdauern für SDU-Pakete. Auf kleinere Fehlerwahrscheinlichkeiten reagiert der EGPRS-Kanal zunächst sensitiver. Mit steigender Fehlerwahrscheinlichkeit dämpft jedoch die zunehmend mögliche parallele Übertragung den Anstieg der Übertragungsdauer.

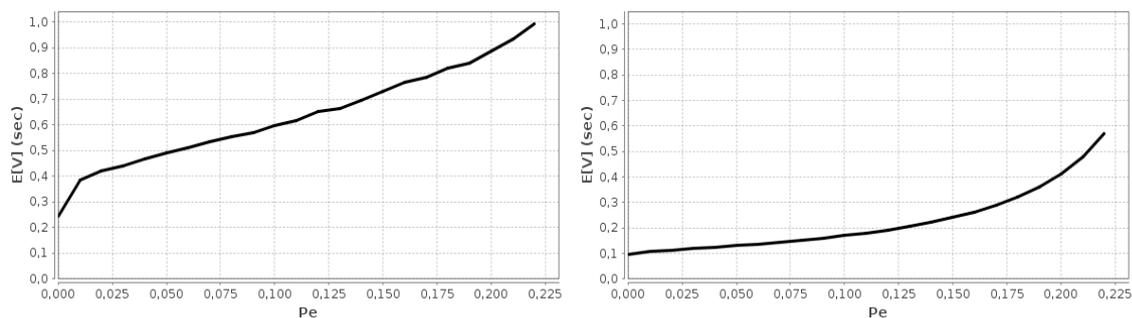


Bild 5.14 Vergleich der mittleren Übertragungsdauer im EGPRS- (links) und UMTS-Kanal (rechts)

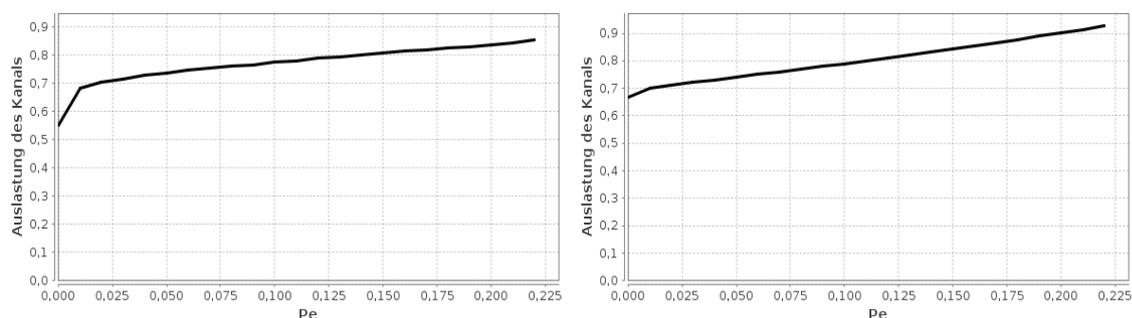


Bild 5.15 Vergleich der mittleren Auslastung im EGPRS- (links) und UMTS-Kanal (rechts)

Die Untersuchung des Kanalverhaltens hat gezeigt, dass das Kanalmodell ein nachvollziehbares Kanalverhalten abbildet. Die Bedienzeit der SDU-Pakete wird durch die Verwendung der M/M/1-Heuristik abhängig von der Kanalauslastung. Die Untersuchungen zeigen, dass der errechnete Variationskoeffizient der Bedienzeit als Approximation für die Stärke der Schwankung der SDU-Übertragungsdauer gesehen werden kann. Damit ist er ein Maß für den „Jitter“ der Verbindung. Falls die Variationskoeffizienten $VK[A_i]$ und $VK[B_i]$ einen Einfluss auf die Schätzung der mittleren Anzahl der wartenden SDU-Pakete im Übertragungskanal haben sollen, muss statt der M/M/1-Heuristik eine G/G/1-Heuristik verwendet werden. Dies würde den Einfluss der Kanalauslastung für niedrige Variationskoeffizienten verringern und für hohe Variationskoeffizienten vergrößern. Es ist auch denkbar, direkt die über das G/G/1-Modell errechnete Wartezeit zu verwenden und über Little's Theorem die mittlere Anzahl der wartenden SDU-Pakete zu errechnen. Inwieweit dabei die Anwendung des gleitenden Durchschnitts und die Aufteilung der wartenden SDU-Pakete auf die einzelnen aktiven Dienste erfolgen kann (ähnlich zur M/M/1-Heuristik), muss noch untersucht werden.

Ein Vergleich mit realen Messergebnissen für die RLC-Schicht war im Zuge dieser Arbeit nicht möglich. Referenzen (z.B. [Stuc2003, RoRC2008]) zeigen aber ein tendenziell ähnliches Kanalverhalten.

5.1.2 Verhalten des Simulationsmodells

Einfluss der Rasterung des Umweltmodells

Die Rasterung der Umwelt ist notwendig, um die Gültigkeitszeiträume der analytischen Modelle zu bestimmen. Eine gröbere Rasterung verlängert die Gültigkeitszeiträume und reduziert somit den Berechnungsaufwand – unter Verlust von Abbildungsgenauigkeit.

Auch für die Modellierung der Umwelt und der Mobilität der Nutzerendgeräte wurde dieses Prinzip verwendet. Die Mobilität der Nutzerendgeräte ist nur auf Elementebene bekannt. Die Verweilzeit in den Rasterelementen wird über ein analytisches Modell berechnet. Damit einher geht die Abbildung der Szenarien auf das Modell der Umwelt. Die Abdeckungsgebiete der Funkzugangssysteme (bzw. der Zellen der Funkzugangssysteme) werden auf die Rasterelemente abgebildet (Siehe Bild 4.1).

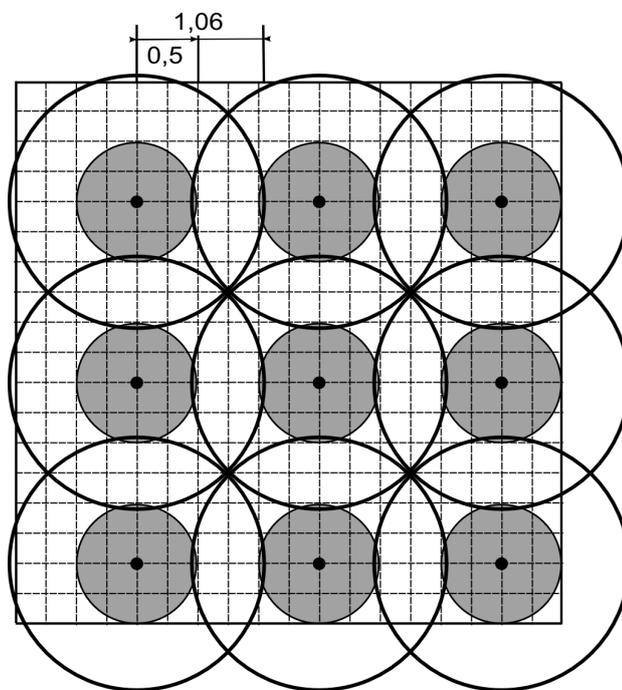


Bild 5.16 Szenario mit neun Zellen und 4500 m Torusumfang

Durch diese Abbildung ändert sich der Aufbau der Szenarien für unterschiedliche Rasterelementdimensionen bei gleicher Szenariodefinition. Das in Bild 5.16 abgebildete Szenario besitzt im Extremfall nur ein Rasterelement (bei einer Rasterelementdimension von 4500 m). Dadurch ist die Anzahl, der an der Position der Nutzerendgeräte empfangbaren Zellen, in diesem Fall immer konstant neun Zellen. Mit der Verkleinerung der Rasterelementdimensionen wird auch die Abbildung der Abdeckungsgebiete der Zellen immer feiner. Bei der abgebildeten Rasterelementkantenlänge von 250 m sind nur noch direkt benachbarte Zellen überlagert. Im Bereich nahe der Basisstation ist nur die Zelle der Basisstation empfangbar. Die Anzahl der in dieser Szenarioabbildung an

einer Position empfangbaren Zellen schwankt zwischen einer und bis zu vier Zellen. Durch diese Abbildungsunterschiede entstehen daher unterschiedliche Kapazitäten an den Positionen der Nutzerendgeräte. Dadurch verändern sich auch die ermittelten Leistungsmaße des Mobilfunksystems. Bild 5.17 zeigt das Verhältnis der Ergebnisse der Leistungsmaße für unterschiedliche Kantenlängen der Rasterelemente. Basis der Relation ist das Ergebnis für eine Kantenlänge der Rasterelemente von zwei Metern. In Tabelle 5.2 ist die Anzahl der vorhandenen Rasterelemente pro Szenario abgebildet.

Tabelle 5.2 *Verhältnis der Kantenlänge zur Anzahl der Rasterelemente*

Kantenlänge der Rasterelemente in m	Anzahl der Rasterelemente
1500	9
500	81
250	324
100	2.025
50	8.100
25	32.400
10	202.500
5	810.000
2	5.062.500

Es ist zu sehen, dass sich die Ergebnisse stabilisieren je feiner die Auflösung der Umwelt wird. In diesem Szenario sind die Ergebnisse, für 5 m und 2 m Kantenlänge der Elemente, annähernd gleich. Auch die Ergebnisse des Szenarios mit 100 m Elementkantenlänge sind noch annähernd im Bereich der Ergebnisse für 2 m Elementkantenlänge. Ab einer Rasterelementgröße von 100 m bewirkt eine weitere Verfeinerung der Rasterung der Umwelt in diesem Szenario daher keine große Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit, verursacht aber eine relativ starke Steigerung im Speicher und Zeitbedarf der Simulation. Die Steigerung wird durch die steigende Zahl der Rasterelemente verursacht (siehe Tabelle 5.2), die neben größeren Speicherbedarf auch zu häufigeren Positionsaktualisierungsnachrichten führt.

Neben der Stabilisierung der Ergebnisse ist zu sehen, dass bestimmte Leistungsmaße mehr von der Auflösung der Rasterelemente der Umwelt beeinflusst werden als andere. Die Ergebnisse für die Auslastung und mittlere Lebenszeit sind relativ unempfindlich gegenüber der Auflösung der Umwelt, da die Blockierungswahrscheinlichkeit mit maximal 2,2 % im Szenario relativ gering ist. Die mittlere Zahl der Handover und Blockierungen werden hingegen stark beeinflusst. Dies ist bedingt durch die größeren Abdeckungsbereiche der Zellen bei gröberer Auflösung.

Bei der Bewertung der Leistung von CRRM-Algorithmen, über den hier vorgestellten Simulator, ist daher darauf zu achten, dass die Auflösung der Umwelt Einfluss auf die Leistungsmaße der Mobilfunksysteme hat. Für den Vergleich zweier Algorithmen sollte daher die Auflösung der einzelnen Rasterelementebenen in den Untersuchungen mög-

lichst konstant gehalten werden. Besonders wenn Zellen variabler Größe zum Einsatz kommen, ist die tatsächliche Abbildung dieser Zellen im Szenario zu überprüfen.

Hinweis: Ähnliche Effekte existieren auch in anderen Simulatoren für Mobilfunksysteme. Häufig werden die Modelle der Signalausbreitung für eine gröbere Rasterung berechnet, um Rechenzeit zu sparen. Welchen Einfluss eine solche Rasterung hat, sollte vorher untersucht werden.

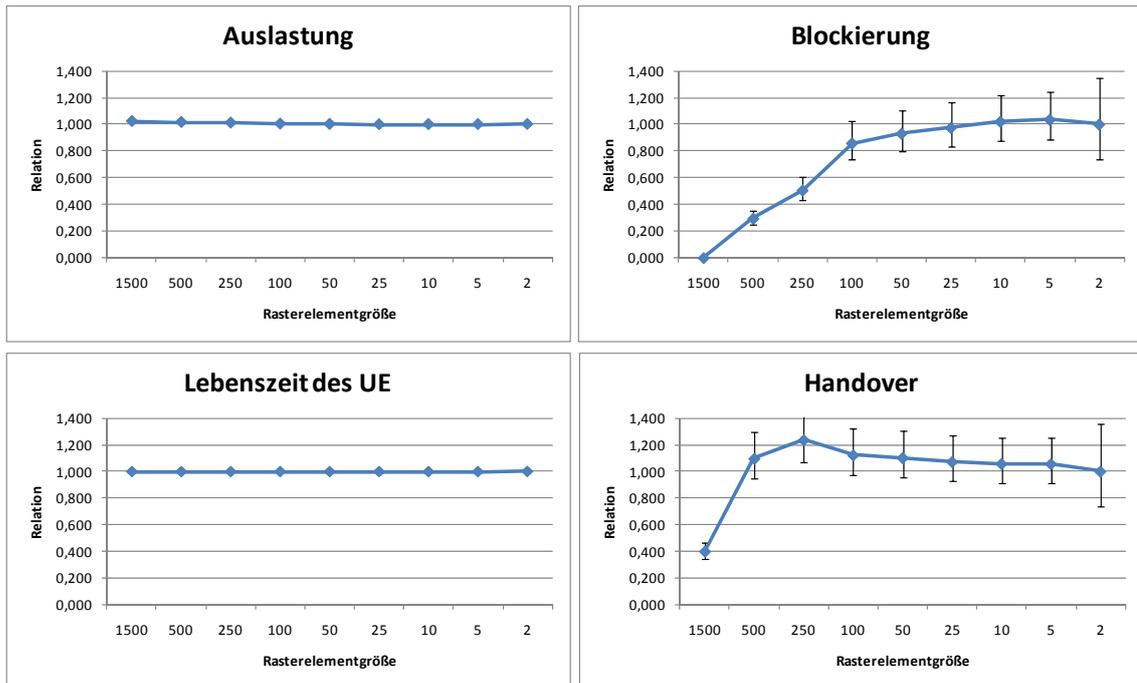


Bild 5.17 Einfluss der unterschiedlichen Rasterelementauflösungen

Test der Verteilungsannahmen im Mobilitätsmodell

Wie in Abschnitt 4.1.1 Seite 51 beschrieben, kann über die Verwendung des in [Boud2005] beschriebenen Verfahrens auf Basis des Palm Calculus eine Vorhersage über die endgültige Geschwindigkeitsverteilung getroffen werden und somit die transiente Phase bis zum Erreichen dieser Geschwindigkeitsverteilung verkürzt werden. Die Schätzung dieser Verteilung über den Palm Calculus basiert auf der Annahme unendlicher Lebenszeiten der Nutzerendgeräte. Die Vorhersage der Zeitdauer T_V bis zur nächsten Aktualisierung (also des Zeitpunkts des Ziehens neuer Geschwindigkeiten für die Nutzerendgeräte) im Mobilitäts-Modell für Random-Waypoint basiert für diese Annahme ausschließlich auf der zurückzulegenden Distanz zwischen Startpunkt M_0 und Zielpunkt M_1 und der Geschwindigkeit des Nutzerendgerätes v .

$$T_V = \frac{\|M_1 - M_0\|}{v} \quad (5.1)$$

Aus dieser Beobachtung ergibt sich folgender Zusammenhang für die Geschwindigkeitsverteilung $f_{V(t)}(v)$, die ein zufälliger Beobachter sieht, und der Geschwindigkeitsverteilung $f_{V_0}^o(v)$, nach der die Nutzerendgeräte zu den Aktualisierungszeitpunkten neue Werte für v ziehen.

$$f_{V(t)}(v) = \frac{C}{v} * f_{V_0}^o(v) \quad (5.2)$$

Der Parameter C ist eine szenarioabhängige Konstante. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass bei endlicher Lebenszeit der Nutzerendgeräte für die Vorhersage von T_V zusätzlich die Restlebensdauer L beachtet werden muss.

$$T_V = \begin{cases} \frac{\|M_1 - M_0\|}{v} & \text{falls } \frac{\|M_1 - M_0\|}{v} < L \\ L & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

Aus dieser Beobachtung wurde eine Formel für die Vorhersage von $f_{V_0}^o(v)$ entwickelt, die die entstehende zu beobachtende Geschwindigkeitsverteilung über den Zusammenhang (5.2) wiedergibt.

$$f_{V_0}^o(v) = \frac{E[L]}{\left(\frac{E[\|M_1 - M_0\|]}{v} \right)} + 1 \quad (5.4)$$

Der Parameter $E[L]$ ist dabei der Erwartungswert für die Verweildauer eines Nutzerendgeräts in der Umwelt. Dies entspricht der mittleren Lebensdauer der Dienstverbindung des Nutzerendgeräts. $E[\|M_1 - M_0\|]$ ist der Erwartungswert des Abstandes zweier zufälliger Punkte in der Umwelt. Die im Bild 5.18 abgebildeten Histogramme zeigen die beobachtete Geschwindigkeitsverteilung $f_{V(t)}(v)$ (resultierend aus 400 Beobachtungszeitpunkten; $v_{\min}=1$; $v_{\max}=100$) und die geschätzte Geschwindigkeitsverteilung $f_{V(t)}(v)$ über $f_{V_0}^o(v)$. Es ist zu erkennen, dass die beobachtete Geschwindigkeitsverteilung gut vorhergesagt wird. Über den Vergleich der Ergebnisse der Formeln (5.4) und (5.2) und der beobachteten Geschwindigkeitsverteilung lässt sich daher ermitteln, ab wann sich das Random-Waypoint Mobilitätsmodell mit endlichen Lebenszeiten der Nutzerendgeräte im eingeschwungenen Zustand befindet.

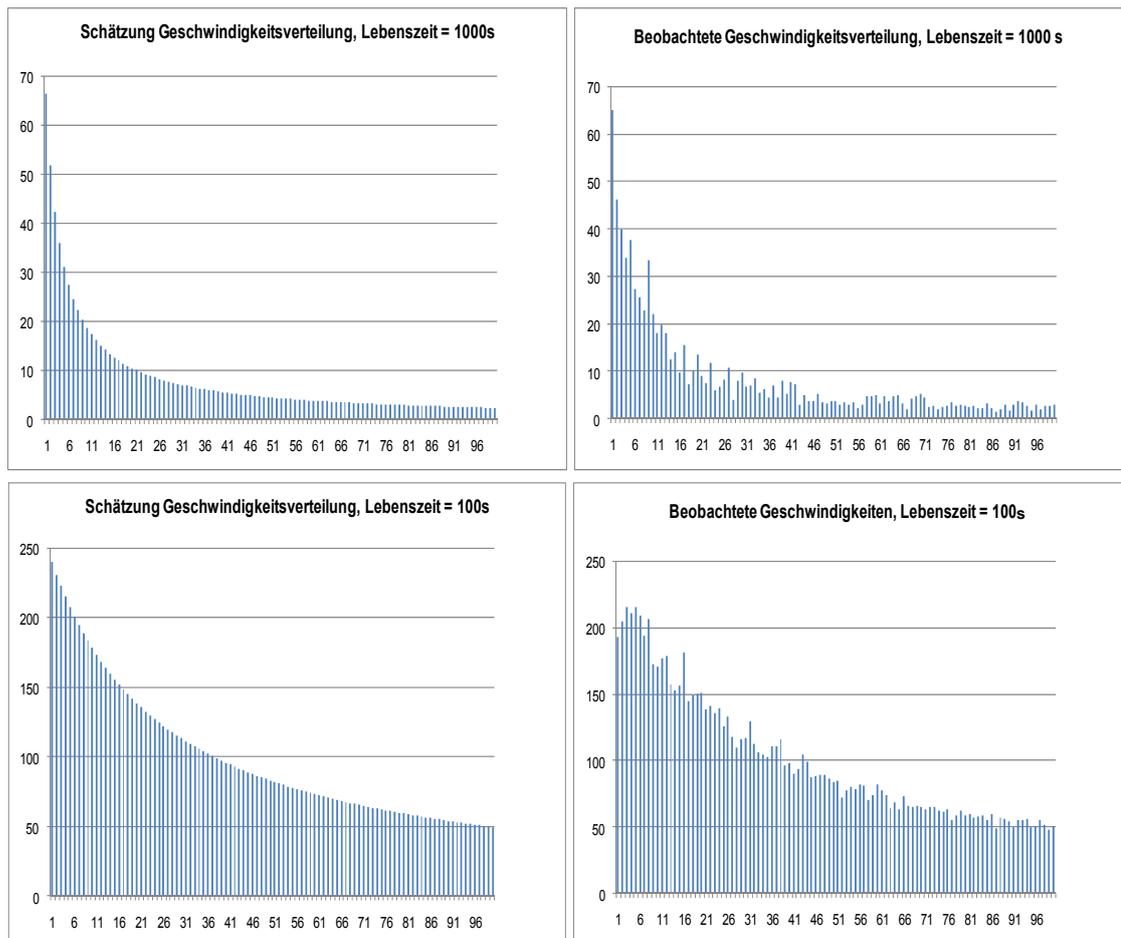


Bild 5.18 Geschätzte und beobachtete Geschwindigkeitsverteilungen für unterschiedliche Lebensdauern

Die Arbeit [Boud2005] liefert auch Ergebnisse für die Verteilung der Nutzerendgeräte in der Umwelt. Eine Fortführung dieser Überlegungen für endliche Lebenszeiten der Nutzerendgeräte wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt, da sie für torusförmige Welten nicht relevant sind. Wenn eine Umweltform mit Rändern im Simulator eingesetzt wird, muss eine Möglichkeit der Berücksichtigung der endlichen Lebenszeiten gefunden werden.

Die Formel (5.4) sollte als Basis für die Abkürzung der transienten Phase genutzt werden. Die Untersuchungen ergaben jedoch, dass sich der aus dem Palm Calculus ermittelte Zusammenhang (5.2) für Szenarien mit endlichen Lebensdauern für Nutzerendgeräte nicht verwenden lässt, um die transiente Phase abzukürzen. Das Bild 5.19 zeigt die Ergebnisse für $E[L] = 100$ s und $v_{\min}=1$; $v_{\max}=100$. Die resultierende mittlere Geschwindigkeit basierend auf Formel (5.4) (grün/mittig) war geringer als die mittlere Geschwindigkeit, die sich ohne das Palm Calculus Verfahren ergab (rot/oben). Die transiente Phase war noch vorhanden. Die mittlere Geschwindigkeit, die das original Palm Calculus Verfahren vorhersagt (blau/unten), entspricht der mittleren Geschwindigkeit, die sich für unendliche Lebensdauern der Nutzerendgeräte einstellen würde.

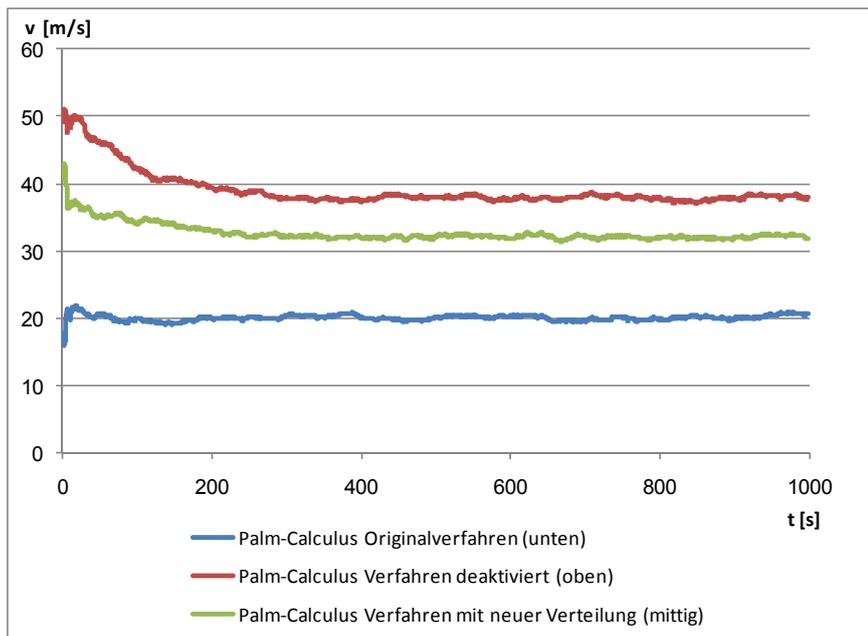


Bild 5.19 Mittlere Geschwindigkeiten bei Test des Palm Calculus Verfahrens

Umfangreiche Untersuchungen zeigten, dass eine Beschränkung des Intervalls für die Ziehung von Folgegeschwindigkeiten auch zu einer sehr kurzen transienten Phase und zu einer annähernden Gleichverteilung der Geschwindigkeiten (auch langfristig) führt (siehe Bild 5.20). Das Intervall wurde in den Untersuchungen auf $\pm 5\%$ der aktuellen Geschwindigkeit beschränkt, wobei die Geschwindigkeit initial gleichverteilt gezogen wurde.

Je größer die mittlere Lebensdauer $E[L]$ gewählt wird, umso kleiner sollte das Intervall für Folgegeschwindigkeiten gewählt werden. Es ist zu beachten, dass die Gleichverteilung nicht für den Fall $E[L] \gg E[|M_1 - M_0|] / v$ erreicht wird!

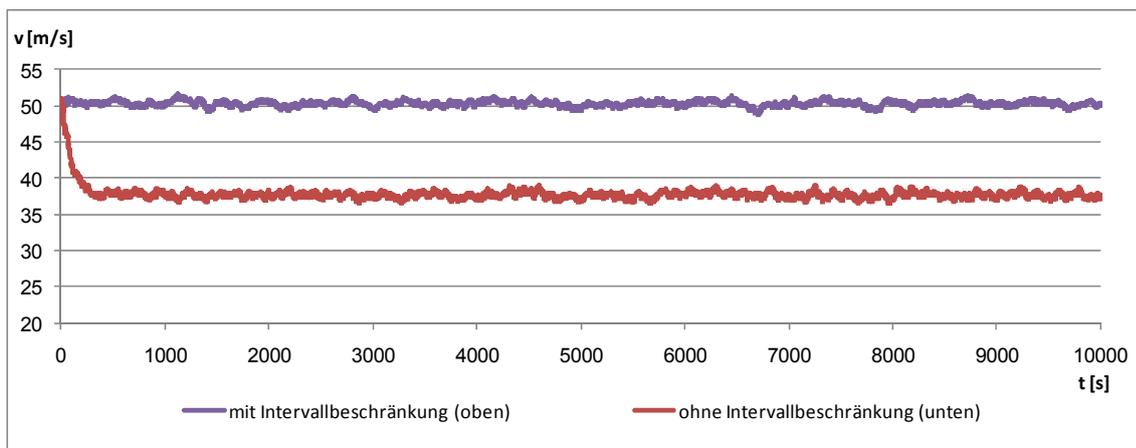


Bild 5.20 Mittlere Geschwindigkeiten und Langfristverhalten bei Test der Intervallbeschränkung

Neben der Gleichverteilung der Geschwindigkeiten der Nutzerendgeräte soll das im Simulator verwendete Mobilitätsmodell auch der Gleichverteilungsannahme für die Position der Nutzerendgeräte genügen. Dies wurde unter Verwendung des χ^2 -Tests überprüft.

$$\chi_0^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(b_j - e_j)^2}{e_j} \quad (5.5)$$

Hier ist k als die Anzahl der Intervallabschnitte definiert, b_j ist die Anzahl der tatsächlichen Werte im Intervallabschnitt, e_j ist die Anzahl der Werte die im Intervallabschnitt liegen müssten, um der Verteilung zu genügen. Für die Untersuchung wurde e_j für die Gleichverteilungsannahme ermittelt. Basis der Aufteilung in einzelne Intervalle war der Aufenthalt der Nutzerendgeräte in einem Rasterelement. Die Intervalle wurden so aufgeteilt, dass in einem Intervallabschnitt mindestens sieben Werte (d.h. Nutzerendgeräte) vorhanden waren. Daher können mehrere Rasterelemente einem einzigen Intervallabschnitt angehören, falls nicht genügend Nutzerendgeräte in der Umwelt sind. Bild 5.21 zeigt das Ergebnis der Auswertung von 50 Simulationsläufen für einen Torusumfang von 4500 m sowie einer Rasterelementkantenlänge von 250 m. Die ermittelten χ^2 -Werte der Simulation (rot/mittig) sind nach Ende der transienten Phase immer kleiner als die χ^2 -Werte für $(k-1)$ -Freiheitsgrade und $\alpha = 1\%$ (blau/oben). Die Hypothese der Gleichverteilung der Nutzerendgeräte in der Umwelt wird daher nicht abgelehnt.

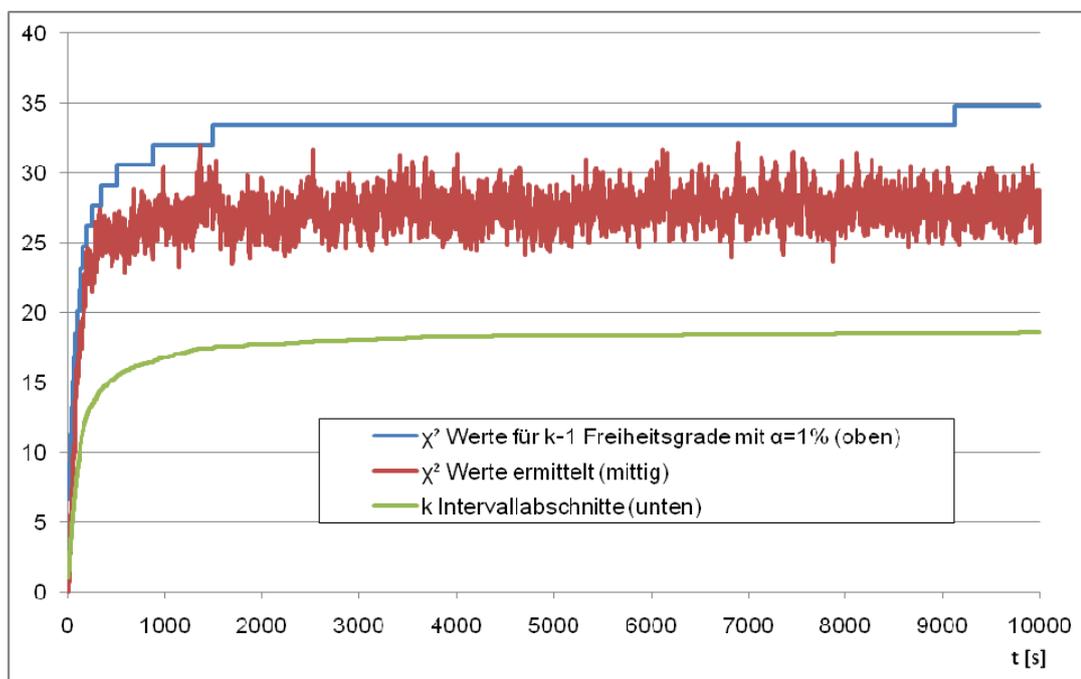


Bild 5.21 χ^2 -Testergebnisse für Mobilitätsmodell

Untersuchung der Modellgültigkeitsdauern im Downlink

Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben interagiert das Simulationsmodell mit den analytischen Modellen des Funkzugangssystems. Der Zeitraum zwischen den einzelnen Aktualisierungszeitpunkten wurde als Gültigkeitsdauer des analytischen Modellergebnisses bezeichnet. Im Folgenden wird die mittlere Dauer dieses Gültigkeitszeitraumes $E[G]$ unter dem Einfluss bestimmter Szenarioparameter untersucht. Grundlage für die Erstellung der Szenarien für die Untersuchungen waren die EGPRS-Kanalparameter aus Tabelle 5.1 und der Zellaufbau aus Bild 5.16. Die Gültigkeitsdauern wurden in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Nutzerendgeräte v , der Anzahl der Nutzerendgeräte im Gesamtsystem UE , der Datenraten der Nutzerendgeräte R , der Rasterelementkantenlänge REK und der Zwischenankunftszeit A erfasst. Die Tabelle 5.3 zeigt die wichtigsten Parametereinstellungen der einzelnen Szenarien für die nachfolgenden Bilder. Die Bilder Bild 5.24 bis Bild 5.27 zeigen Histogramme für $E[G]$ mit einer Intervalllänge von 0,5 s. Die Histogrammwerte sind Mittelwerte für die 9 Zellen gewonnen aus 70 Wiederholungen. Die Konfidenzintervalle entsprechen der Darstellungsgenauigkeit der abgebildeten Diagramme.

In den gewählten Szenarien wird die Verteilung von G wesentlich von der Weibull-Verteilung der OFF-Phasendauer beeinflusst. Bild 5.22 zeigt die simulativ ermittelte Wahrscheinlichkeitsdichte der Verteilung der OFF-Phasendauern und Bild 5.23 zeigt die zugehörige komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion. Unter den gegebenen Szenarioeinstellungen treten sehr kurze OFF-Phasen sehr häufig auf. Dies führt zu einer hohen Zahl sehr kurzer Gültigkeitsdauern. Trotzdem ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer OFF-Phasendauer größer als 60s noch 17 %. Der Mittelwert der OFF-Phasendauer beträgt 39,5 s. Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen in [Färb2007] überein. Die häufigen kurzen OFF-Phasen führen zu einer signifikanten Häufung, die durch die Zeitdauer bis zum Aufbau einer neuen Downlink-Datenübertragungsphase verursacht wird. Diese Zeitdauer besteht aus der Uplink-Phase und der T_I -Phase der Downlink-Verbindung. Es ist zu beachten, dass das Verhalten in den Bildern (von Bild 5.24 bis Bild 5.27) zusätzlich durch die konstant gehaltene Nutzerendgerätszahl beeinflusst wird. Nach dem Ende der Lebenszeit eines Nutzerendgerätes wird direkt ein neues Nutzerendgerät erzeugt, was mit einer OFF-Phase der Länge null vergleichbar ist. Weitere Effekte werden in den folgenden Bildern beschrieben und erläutert.

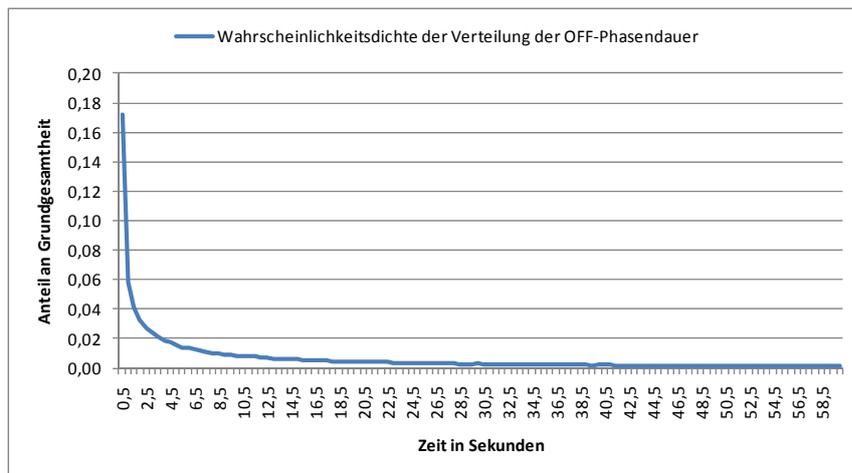


Bild 5.22 Wahrscheinlichkeitsdichte der OFF-Phasendauer

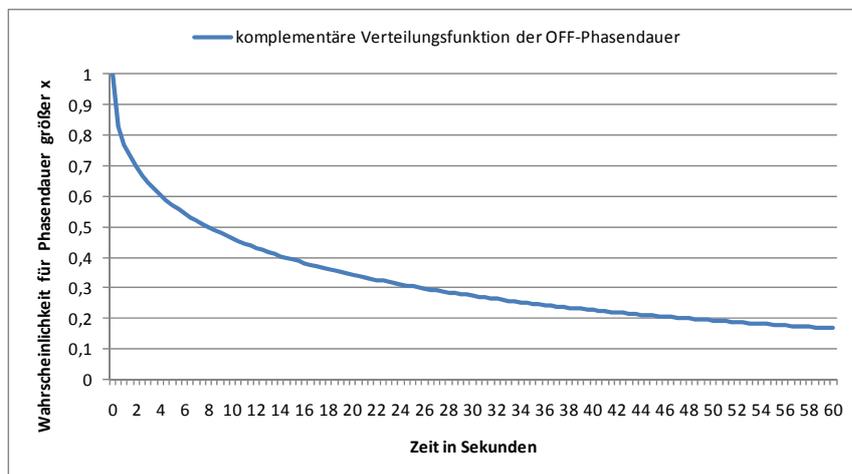
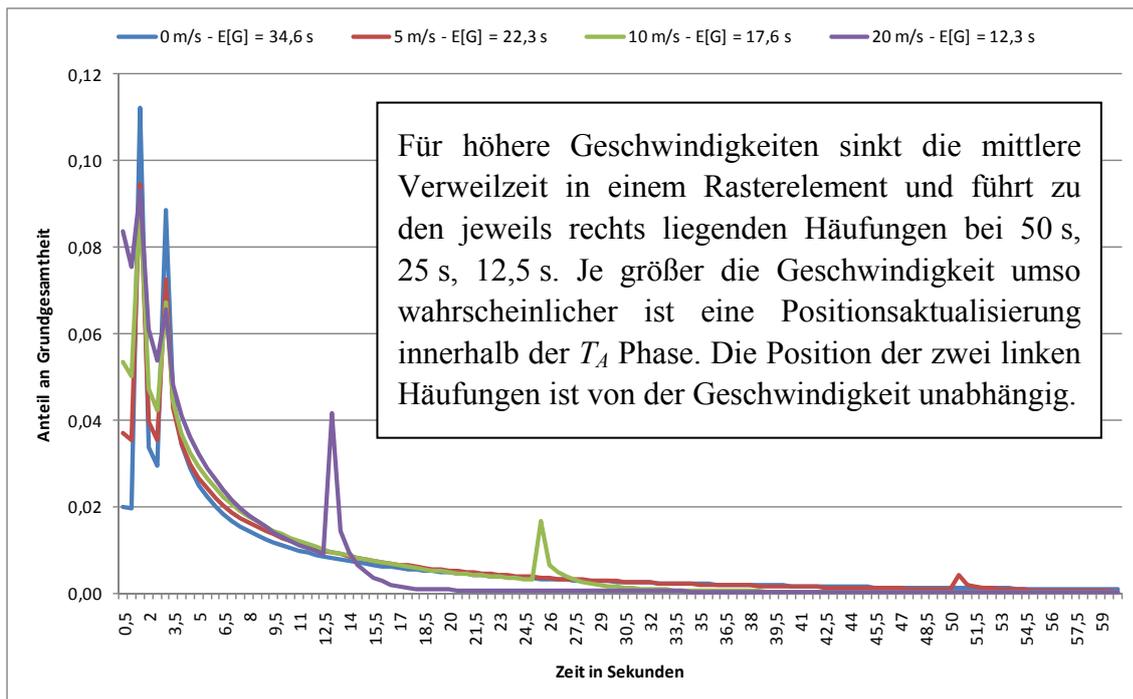
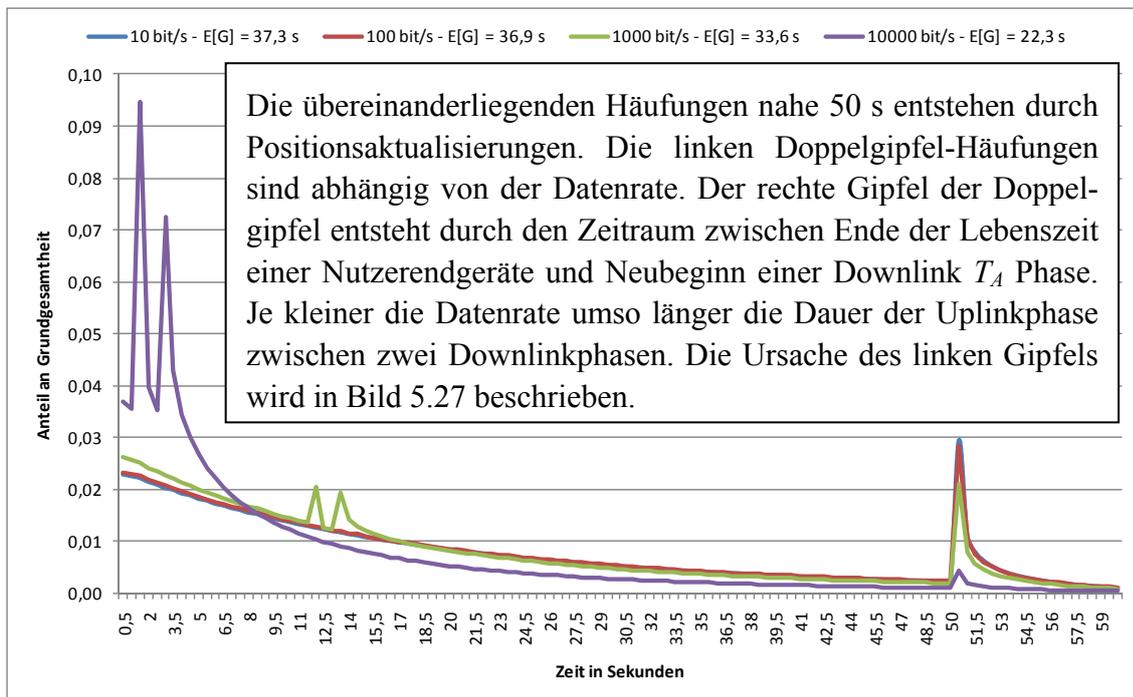
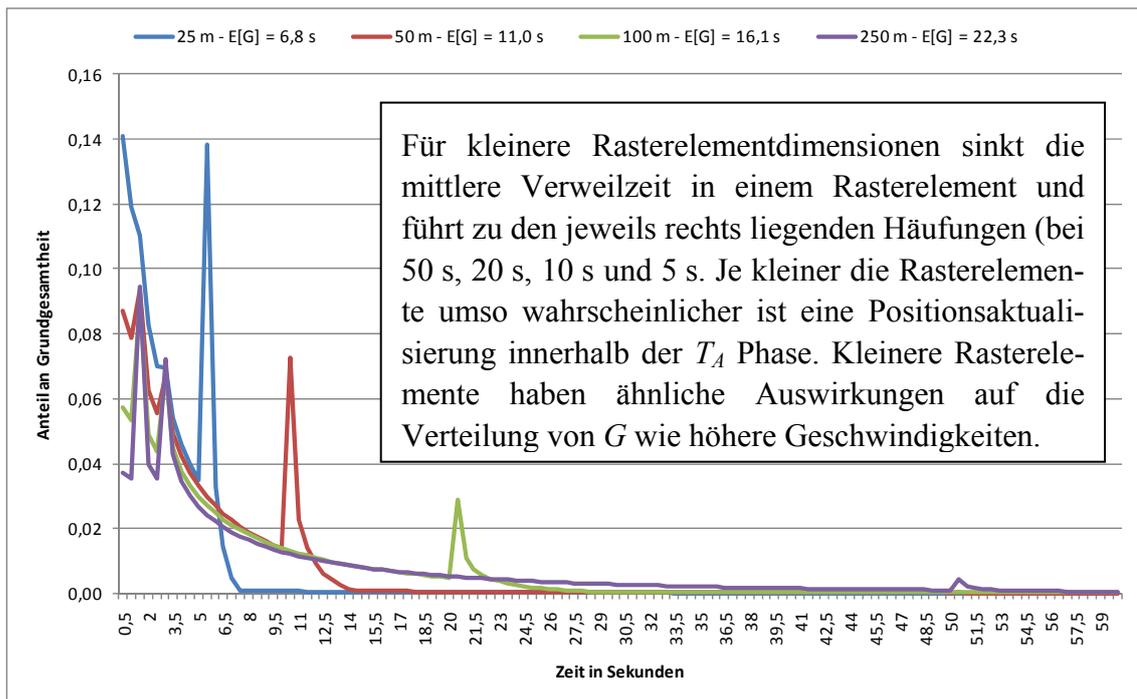
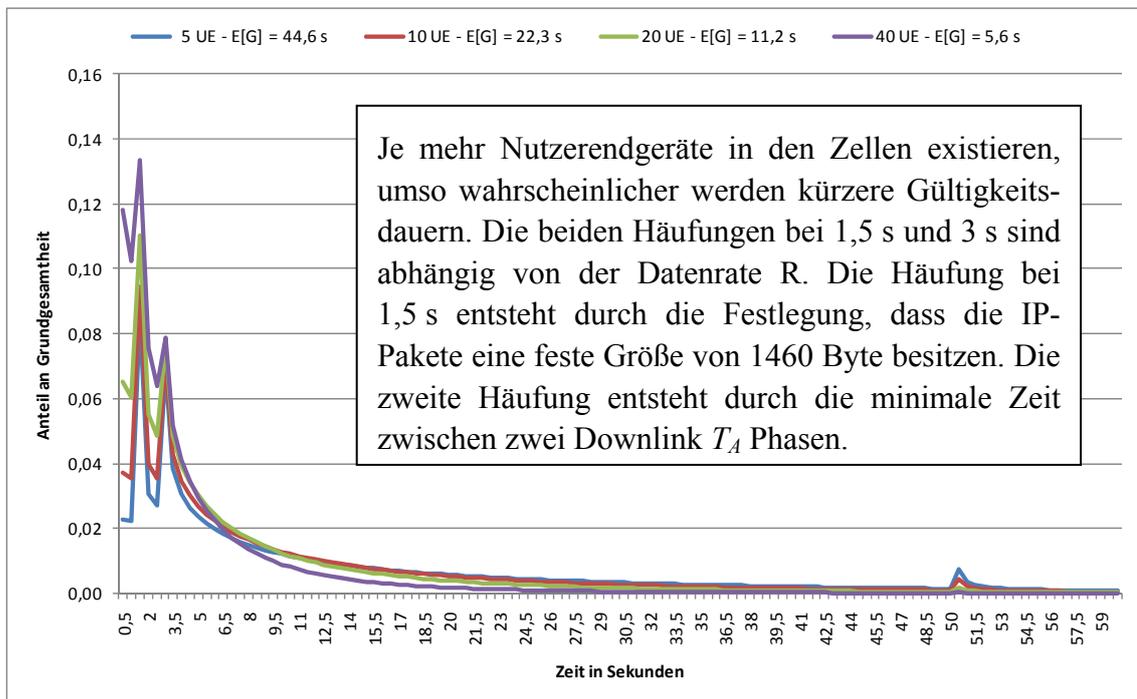


Bild 5.23 Komplementäre Verteilungsfunktion der OFF-Phasendauer

Tabelle 5.3 Szenarienparameter für Untersuchung der mittleren Gültigkeitsdauern

Parameter	UE	v in m/s	R in bit/s	REK in m	E[A] in s
Bild 5.24	10	0; 5; 10; 20	10000	250	//
Bild 5.25	10	5	10; 100; 1000; 10000	250	//
Bild 5.26	10	5	10000	25; 50; 100; 250	//
Bild 5.27	5; 10; 20; 40	5	10000	250	//
Bild 5.28	//	5	10000	250	0,811; 10; 10 + OFF-Phase konstant

Bild 5.24 Einfluss der Geschwindigkeit der UE auf die Verteilung von G Bild 5.25 Einfluss der Datenrate auf die Verteilung von G

Bild 5.26 Einfluss der Rasterelementauflösung auf die Verteilung von G Bild 5.27 Einfluss der Anzahl der UE auf die Verteilung von G

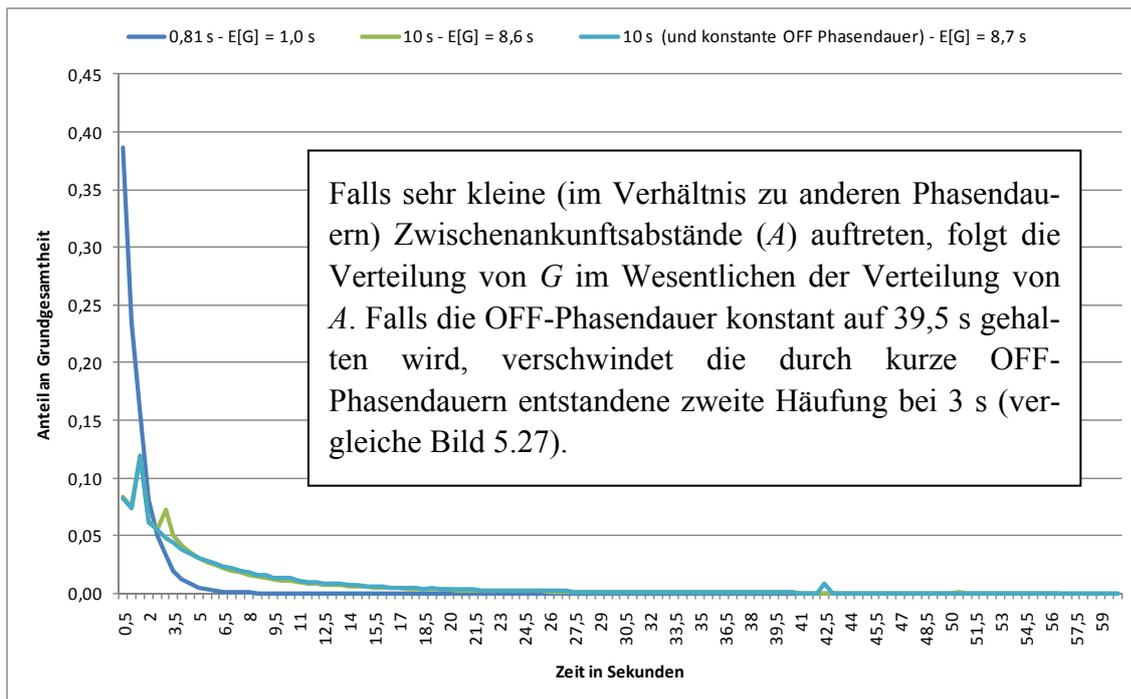


Bild 5.28 Einfluss der Zwischenankunftszeit A auf die Verteilung von G

5.2 Vergleichende Untersuchungen

5.2.1 Überprüfung des SR-ARQ-Modells für $E[B(K)]$ und $V[B(K)]$

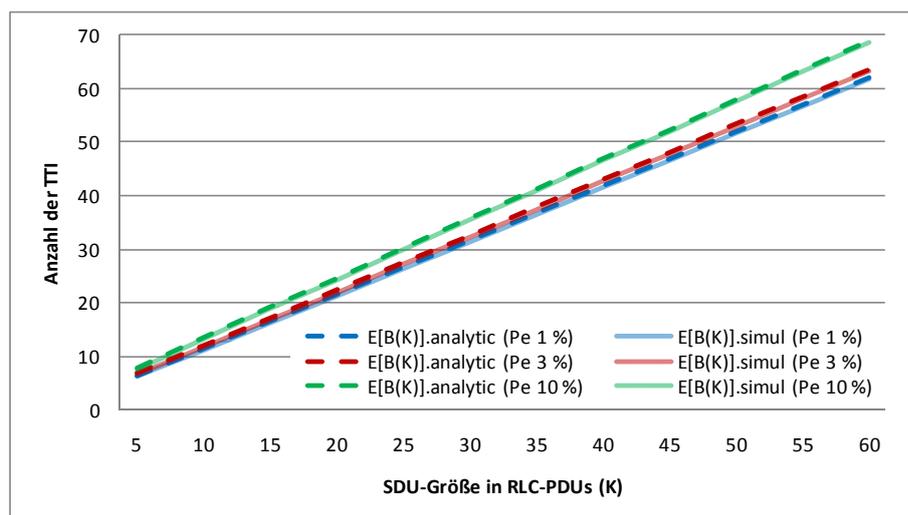
Die Berechnung der mittleren Übertragungsdauer $E[B(K)]$ einer SDU auf dem Funkkanal basiert auf einem analytischen Modell für das SR-ARQ-Protokoll aus [LuBNC2005] - siehe Abschnitt 4.1.3 Formel (4.18) und (4.19) auf Seite 75ff. Die in der Bachelorarbeit von Grabe und Wohlfahrt [GrWo2007] durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die berechneten Mittelwerte des analytischen Modells gut mit den dort ermittelten Simulationsergebnissen übereinstimmen (Siehe Bild 5.29, Bild 5.30). Die Simulationen ergaben weiterhin, dass die vom Modell berechnete Varianz der Bedienzeit $V[B(K)]$ die in der Simulation ermittelte Varianz für SDUs bestehend aus wenigen RLC-PDUs unterschätzt und für SDUs bestehend aus vielen RLC-PDUs überschätzt. Tabelle 5.4 zeigt die Varianz der Bedienzeit basierend auf TTI als Ergebnis des analytischen Modells ($V[B(K)]$) und als Ergebnis der Simulation (s^2) für unterschiedliche SDU-Größen (Anzahl der RLC-PDU pro SDU)

Tabelle 5.4 Varianz der SDU-Bedienzeit analytisch und simulativ.

Anzahl RLC-PDUs	Pe = 5 %		Pe = 20 %	
	V[B(K)] in TTI	s ² in TTI	V[B(K)] in TTI	s ² in TTI
3	0,49	3,35	2,66	13,23
5	0,80	4,17	4,13	13,99
10	1,52	5,07	6,84	15,62
20	2,72	7,79	12,16	15,96
40	5,05	13,91	27,78	24,48
60	7,38	8,38	43,41	18,37
80	9,72	5,67	59,03	14,44
100	12,05	5,29	74,66	20,09
120	14,38	5,60	90,28	20,12
140	16,72	4,86	105,91	18,24

Bild 5.29 und Bild 5.30 zeigen für das MCS 1 und MCS 9 von EGPRS die Anzahl der benötigten Transmission Time Intervalle auf der RLC-Ebene, um ein SDU-Paket der höheren Schicht zu übertragen. Mit höherer Kapazität der Kodierungsschemata (MCS 9) zeigte sich eine größere Abweichung der Ergebnisse der Simulation und des analytischen Modells für kleine SDU-Größen. Für größere SDU-Größen und kleine Fehlerwahrscheinlichkeiten P_e existiert hier ebenfalls eine kleinere Abweichung.

Das verwendete Simulationsmodell beschränkte sich auf einen einfachen Nachbau des SR-ARQ-Protokolls für den RLC-Layer von Funkzugangssystemen ohne auf Besonderheiten des Funkkanals (besondere Fehlermodelle, systeminterne Verzögerungen) einzugehen. Als Parameterwerte wurden die Angaben für unterschiedliche EGPRS-Kodierungsschemata verwendet.

Bild 5.29 Ergebnisse für $E[B(K)]$ bei MCS 1 und $P_e=1\%$, 3% , 10%

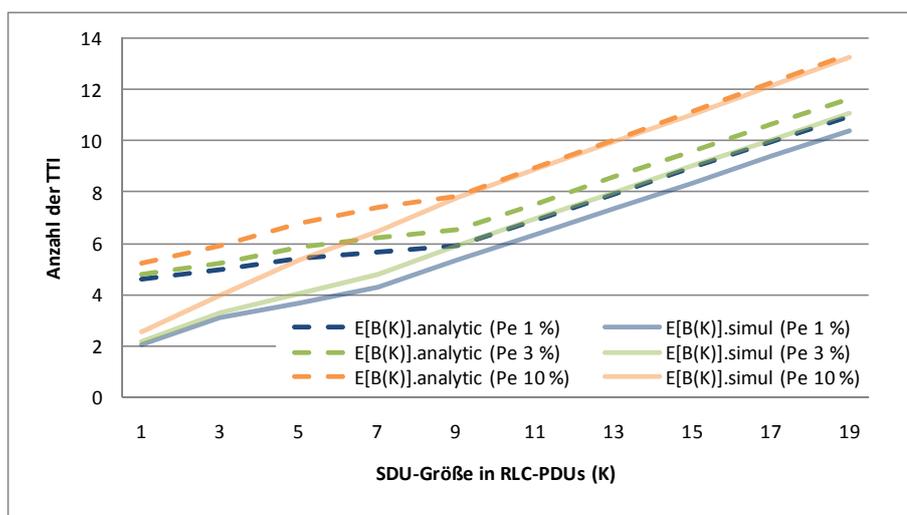


Bild 5.30 Ergebnisse für $E[B(K)]$ für MCS 9 und $P_e=1\%$, 3% , 10%

5.2.2 Überprüfung der Processor Sharing Approximation für $E[V]$

Der Einfluss der Verteilung des Ankunfts- und Bedienprozesses auf die mittlere Verweilzeit der SDU-Pakete $E[V]$ im Übertragungssystem bis zur Ankunft beim Empfänger wird durch die Formeln (4.22) bis (4.26) auf Seite 77ff. approximiert – der Index i entfällt, da nur ein Dienstyp betrachtet wurde. In der Arbeit von Nils Kurowsky [Kuro2010] wurde die Güte dieser Approximation untersucht. Betrachtet wurde ein G/G/1-System mit FCFS- und PS- Bedienstrategie. Die Vergleichsergebnisse für die analytisch gewonnenen Ergebnisse wurden per diskreter ereignisorientierter Simulation ermittelt. Die 95%-Konfidenzintervalle der Ergebnisse liegen innerhalb der Darstellungsgenauigkeit der Diagramme.

Hinweis: Basis war die OMNeT++ Simulationsumgebung. Verwendet wurde eine Instanz des Mersenne Twister Generators aus der Zufallszahlen für die Zwischenankunftszeit- und Bedienzeitverteilung gezogen wurden. Die transiente Phase wurde ermittelt und abgeschnitten. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus der Übertragung von 400 mal 200000 Paketen pro Szenario. Als Stützwerte für den Verlauf wurden jeweils Ergebnisse für 10 %, 20 %, 50 %, 80 % und 90 % Auslastung ermittelt.

Ausführlich untersucht wurden die möglichen Kombinationen für Zwischenankunfts- und Bedienzeitverteilungen aus der Erlang-4 ($VK[X] = 0,5$) Verteilung, einer hyperexponentiellen Verteilung mit zwei Phasen ($VK[X] = 2$) und der negativ exponentiellen Verteilung ($VK[X] = 1$). Zusätzlich wurde das Verhalten für die Gamma-Verteilung mit jeweils $VK[X] = 0,5$ bzw. $VK[X] = 2$ untersucht. Ziel war es den Einfluss von stark oder weniger stark variablen SDU-Ankünften bzw. SDU-Bedienzeiten und von unterschiedlichen Verteilungen auf die Approximationsgüte zu ermitteln.

Bild 5.31 zeigt die relative Abweichung des Approximationsergebnisses vom simulativ ermittelten Ergebnis und dem analytisch ermittelten Ergebnis für $E[S]$ (siehe Formel

(4.23)). Bildteil a) zeigt das Ergebnis unter Verwendung der KLB-Approximation für $E[W]$ (Formel (4.24) bis (4.26)) und Bildteil b) zeigt das Ergebnis für simulativ ermittelte Werte für $E[W]$ als Approximationsbasis für Formel (4.23). Es ist zu sehen, dass sich die Güte der Approximation mit zunehmender Auslastung des Übertragungskanal verbessert. Durch den Vergleich von Bildteil a) und b) ist zu erkennen, dass der Hauptteil des Approximationsfehlers von der KLB-Approximation der FCFS-Wartezeiten stammt. Die Güte der aktuell im HEKATE-Simulator verwendeten Approximation für $E[V]$ kann also durch Verbesserung der Approximation für $E[W]$ sehr verbessert werden. Die Ergebnisse für die Gamma-Verteilung ähneln sehr den Ergebnissen der H_2 und E_4 Verteilung mit gleichen Variationskoeffizienten. Dies lässt den vorläufigen Schluss zu, dass der Variationskoeffizient der Verteilungen einen größeren Einfluss besitzt als der Typ der Verteilung. Dies muss jedoch noch für weitere Verteilungen untersucht werden.

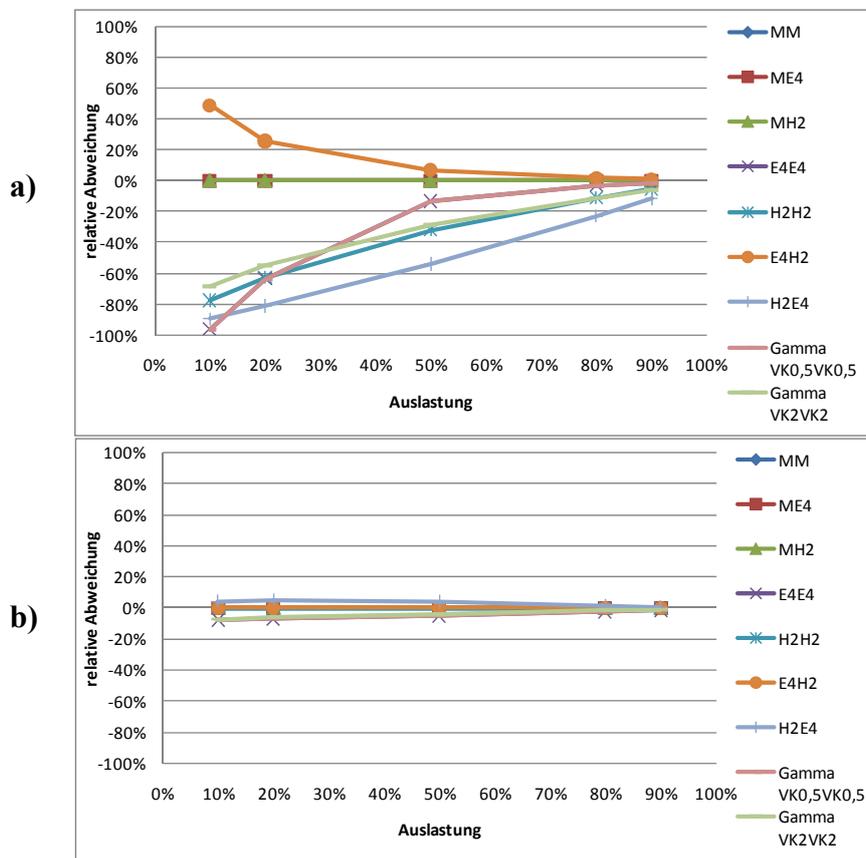


Bild 5.31 Approximationsgüte für $E[S]$ bei a) Basis KLB-Approximation b) Basis Simulation

Insgesamt kann die Güte der $E[S]$ Approximation auch bei Verwendung der KLB-Approximation als gut bezeichnet werden. Die absoluten Abweichungen für die betrachteten Auslastungswerte befinden sich im vertretbaren Rahmen und der allgemeine Verlauf der Trajektorie wird gut nachgebildet. Besonders die Ergebnisse für exponentiell verteilte Zwischenankünfte weisen eine gute Vorhersagegüte auf – unabhängig von

der gewählten Bedienzeitverteilung. Dies ist zurückzuführen auf die exakten Ergebnisse der KLB-Approximation für M/G/1-Systeme. Bild 5.32 zeigt exemplarisch den Verlauf der simulativ und analytisch ermittelten Werte des Dehn-Faktors für das $H_2/E_4/1/PS$ -System. Bildteil a) zeigt das Ergebnis unter Verwendung der KLB-Approximation für $E[W]$ und Bildteil b) zeigt das Ergebnis für simulativ ermittelte Werte für $E[W]$ als Approximationsbasis für Formel (4.23). Das $H_2/E_4/1/PS$ -Beispiel wurde ausgewählt, da es, neben dem $M/E_4/1/PS$ -System, der zu erwartenden Variabilität im realen Funkkanal am ehesten entspricht. Paketankünfte tendieren eher zu einer hohen Variabilität, während die Bedienzeiten eher zu einer niedrigen Variabilität tendieren (siehe dazu auch die Ergebnisse aus 5.1.1). Es ist zu sehen, dass der generelle Verlauf der Trajektorie des Dehn-Faktors von den analytischen Ergebnissen gut nachgeahmt wird und die absoluten Abweichungen auch für niedrige Auslastungen im vertretbaren Rahmen liegen.

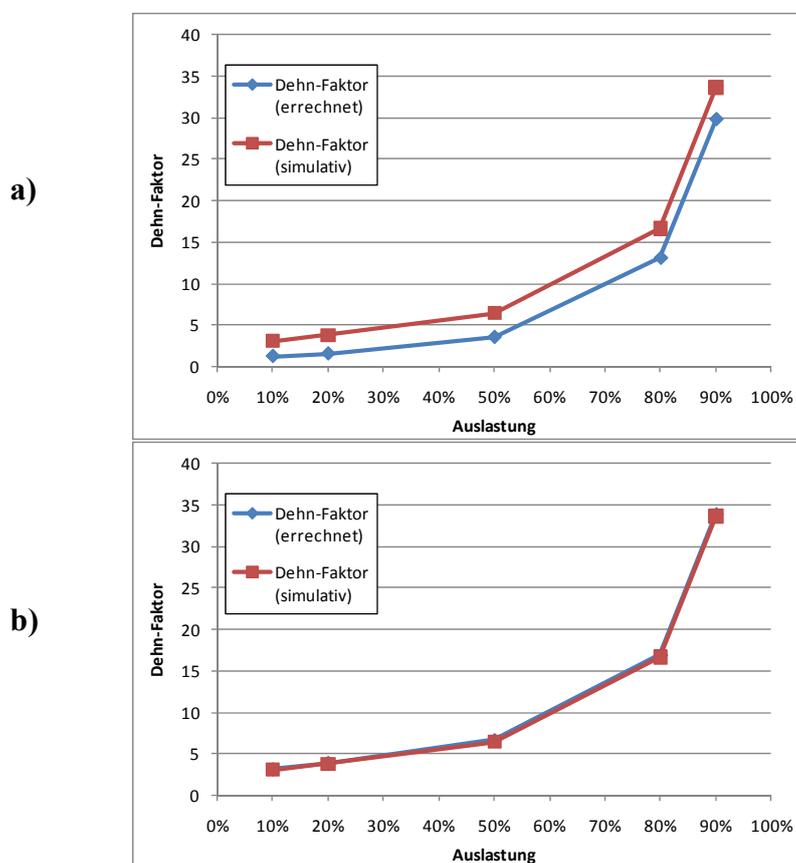


Bild 5.32 Dehn-Faktor-Trajektorie für $H_2/E_4/1/PS$ bei
a) Basis KLB-Approximation b) Basis Simulation

Hinweis: Der Dehn-Faktor Δ ist eine Vergleichsgröße für Veränderungen der Verweilzeit durch unterschiedliche Verarbeitungsstrategien. Er besitzt folgende Definition:

$$\Delta = \frac{E[V]}{E[B]} \quad (5.6)$$

Zukünftig bleibt zu untersuchen, wie gut die verwendete Approximation für Paketverkehr bestehend aus mehreren Verkehrsklassen mit unterschiedlicher Variabilität in einem gemeinsamen Kanal funktioniert. Außerdem muss das transiente Verhalten für Lastwechsel untersucht werden.

5.2.3 Vergleich mit Simulationsstudien des IST Everest Projekts

Der hier entwickelte Simulator ist für die Entwicklung von CRRM-Algorithmen geeignet, wenn er das Verhalten von realen Funkzugangssystemen unterschiedlicher Technologiestandards ausreichend genau nachbilden kann. In einem ersten Validierungsschritt wird hier das Verhalten des hybriden Simulationsmodells mit einem anderen Simulationsansatz verglichen. Das IST Everest Projekt [EVEREST] wurde im Abschnitt 1.2.2 kurz beschrieben. Im Verlauf des IST Everest Projektes wurde ein Systemlevel Simulator für UMTS- und GSM/EGPRS-Funkzugangssysteme entwickelt. Die zum Projekt erhältlichen Dokumente (Deliverables) enthalten detaillierte Simulationsstudien von Funkzugangssystemen basierend auf diesen beiden Funkzugangstechnologien. Die dort aufgeführten Simulationsergebnisse [EVEREST: WP3-UPC-D11 „First report on the evaluation of RRM/CRRM algorithms“ S. 200-210] dienen als Vergleichsgrundlage. Untersucht wurde das Verhalten eines Zellverbundes bestehend aus sieben UMTS- und sieben GSM/EGPRS-Zellen. Die räumliche Anordnung ist für beide Funkzugangssysteme identisch und in Bild 5.33 zu sehen. Es existieren zwei Nutzertypen. Ein Nutzertyp (Sprach-Nutzer) fordert leitungsvermittelte Sprachdienste an und der zweite (Web-Nutzer) fordert Webseiten über eine paketvermittelte Verbindung an. Die Szenarien wurden basierend auf den auf Seite 200 bis 202 im Everest-Dokument angegebenen Szenarioparametern zusammengestellt. Die Parameter des HEKATE-Simulators, die keine direkte Entsprechung in den angegebenen Szenarioparametern besitzen, wurden heuristisch bestimmt. Basis dafür waren die Ergebnisse im Everest-Dokument für die minimale und maximale Anzahl von Nutzern in der Umwelt. Die Parameter des HEKATE-Simulators können auf dem digitalen Datenträger eingesehen werden. Alle Szenarien umfassen eine Szenariozeit von 7 h (inklusive der ersten Stunde, die als transiente Phase verworfen wird). Die dargestellten Ergebnisse wurden aus 6 Wiederholungen ermittelt. Die 95%-Konfidenzintervalle der Ergebnisse sind kleiner als die Darstellungsgenauigkeit der Diagramme.

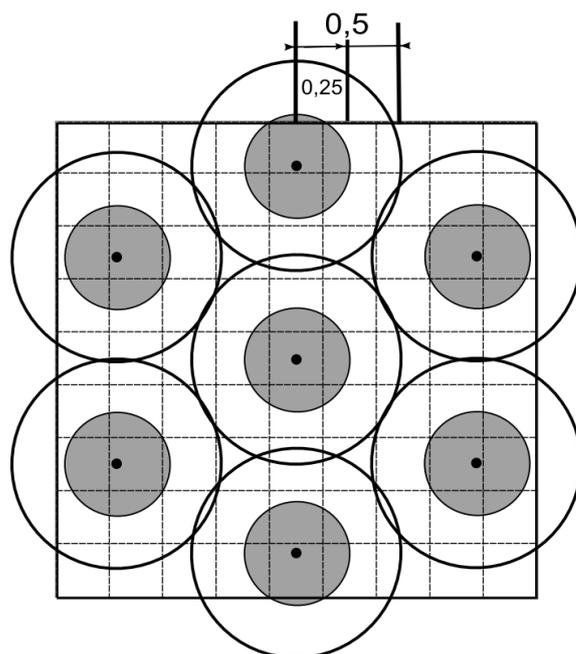


Bild 5.33 Anordnung der sieben Zellen pro RAS in einer Umwelt mit 2,25 km Kantenlänge

Der im Everest-Projekt verwendete Simulator simuliert eine bestimmte Menge Nutzer, die Dienstanforderungen mit einer Rate entsprechend ihres Profils absetzen. HEKATE simuliert Nutzerendgeräte (und deren Nutzermobilität) erst, wenn tatsächlich eine entsprechende Dienstanforderung auftritt. Die Ankunftsrate der Dienstanforderungen für Nutzerendgeräte wurden daher entsprechend der Anzahl der Nutzer und ihrer Anforderungsprofile erstellt. Für die Vergleichbarkeit der Diagramme wird aber die Anzahl der Nutzer (wie in den Everest-Szenarien) als Abszissenkoordinate beibehalten.

Hinweis: Durch die in HEKATE verwendete Szenariodefinition besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich mehr Nutzerendgeräte im System befinden, als in der Abszissenkoordinate Nutzerzahlen angegeben sind. Dies ist der Fall, wenn die Verweilzeiten der Nutzerendgeräte in der Umwelt im Mittel größer sind, als die mittlere Zwischenankunftszeit für neue Dienstanforderungen der Nutzer. Für den Fall der Web-Nutzer ist die mittlere Verweilzeit (basierend auf den Everest Parametern: 5 Web-Seiten * 30 s Lesezeit = 150 s + Datenübertragungs-/ Zugriffs-/ Uplink-Phasenzeiten) leicht größer als die mittlere Zwischenankunftszeit neuer Dienstanforderungen der Nutzer (Ankunftsrate 24/h führt zu $E[A] = 150$ s). Wie dieses Problem im Everest-Simulator gelöst wurde, ist aus dem Everest-Dokument nicht ersichtlich. Im HEKATE-Simulator befinden sich in den Szenarien bis 600 Web-Nutzer rund 8% mehr Nutzerendgeräte in der Umwelt als in der Abszissenkoordinate Nutzer angegeben sind. Ab 600 Web-Nutzern sinkt die Zahl der Nutzerendgeräte in der Umwelt durch vermehrt auftretende Blockierungen.

Die mittlere Anzahl der Nutzerendgeräte mit Diensten in ihrer ON-Phase (d.h. mit Ressourcenverbrauch) ist im Bild 5.34 abgebildet. Diese ON-Phasen-Nutzerendgerätezahl folgt der Web-Nutzerzahl linear so lange die mittlere ON-Phasendauer konstant bleibt.

Für steigende ON-Phasendauern wächst diese Nutzerendgerätezahl nichtlinear (vergleiche Bild 5.35).

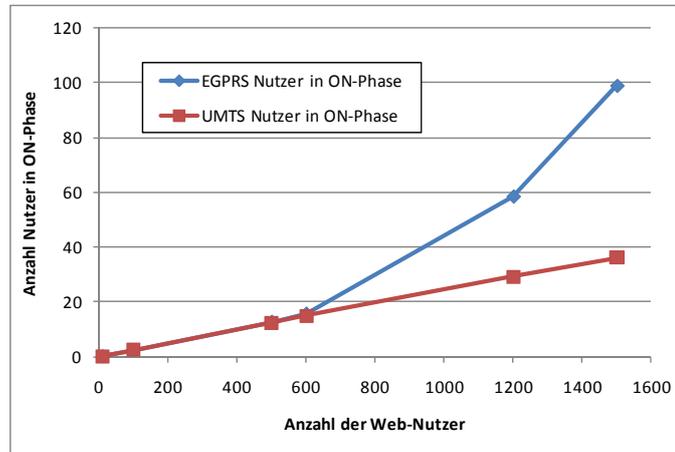


Bild 5.34 Mittlere Anzahl Web-Nutzer die Ressourcen im RAS belegen

Das erste Szenario vergleicht das Verhalten von auf UMTS und EGPRS basierenden Funkzugangssystemen für aktive Web-Nutzer mit paketvermittelten Verbindungen. Das UMTS-Funkzugangssystem verwendet einen exklusiven DCH (Dedicated Channel) pro Verbindung, während das GSM/EGPRS-Funkzugangssystem technologiebedingt nur nichtexklusive Kanäle zur Verfügung stellt. Als Performance-Parameter wurden die Dauer der Übertragung einer Webseite (mittlere ON-Phasendauer $E[T_{ON}]$ in s) und der insgesamt in den sieben Zellen erzielte mittlere Durchsatz in bit/s gewählt. Verglichen wurden die Ergebnisse für 10, 100, 500, 600, 1200 und 1500 konkurrierender Web-Nutzer. Siehe Bild 5.35 und Bild 5.36. Im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem ist die mittlere Dauer der ON-Phase $E[T_{ON}]$ grundsätzlich höher, da die Zeit zur Initialisierung der Verbindung T_I unter den gegebenen Parametereinstellungen höher ist als im UMTS-Funkzugangssystem. Das GSM/EGPRS-Funkzugangssystem erreicht schneller höhere Auslastungsbereiche der Zell-Ressourcen η (für 1500 Web-Nutzer: UMTS-DL mittlere Auslastung = 48 %; EGPRS-DL mittlere Auslastung = 79 %). Die gemeinsame Nutzung des paketvermittelten Kanals in EGPRS führt zu niedrigeren Datenraten pro Nutzer und dadurch zu längeren T_A Phasen ($E[T_{ON}] = E[T_I] + E[T_A]$). Im UMTS-Funkzugangssystem sinkt die Datenrate für einzelne Verbindungen nur leicht durch steigende Interferenzstörungen anderer Nutzer, die bei niedriger Auslastung kaum ins Gewicht fallen.

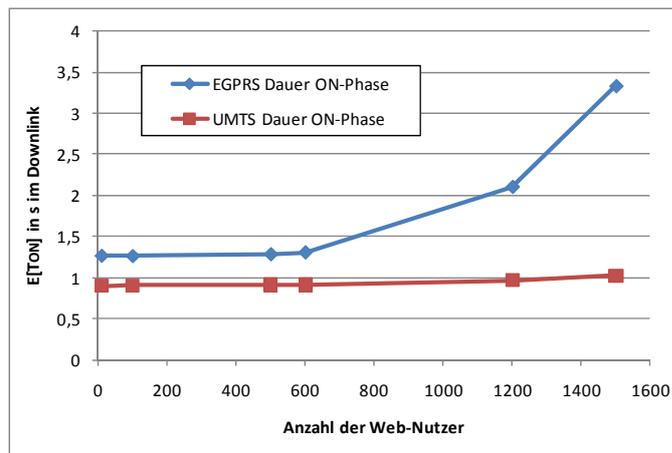


Bild 5.35 Mittlere ON-Phasendauer im Downlink im Web-Nutzerszenario

In Verbindung mit der höheren Auslastung im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem kommt es zu häufigeren Verbindungsblockierungen und Verbindungsabbrüchen, wodurch der mittlere Durchsatz im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem gegenüber dem im UMTS-Funkzugangssystem abfällt.

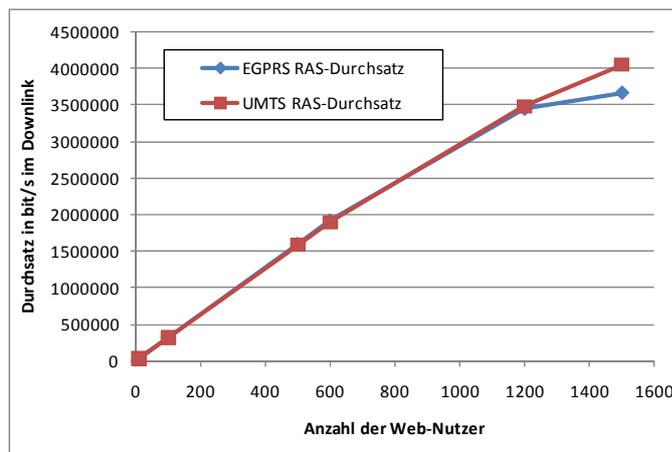


Bild 5.36 Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Web-Nutzerszenario

Insgesamt entspricht das erzielte Verhalten für die Szenarien aus Bild 5.35 und Bild 5.36 im Wesentlichen den Ergebnissen aus den Everest-Szenarien. Bemerkenswert sind die Unterschiede in der minimalen ON-Phasendauer für EGPRS und die höheren Durchsatzwerte für beide Funkzugangssysteme. Die Unterschiede in der ON-Phasendauer sind auf unterschiedliche Verbindungsinitialisierungszeiten zurückzuführen, die für den Everest-Simulator entweder vernachlässigt wurden oder die nötigen Parameterwerte wurden nicht angegeben. Die Unterschiede im mittleren Durchsatz der Funkzugangssysteme sind möglicherweise auf unterschiedliches Blockierungsverhalten oder die Raster-Auflösung der Umwelt oder auf die für HEKATE heuristisch gewählten Parameterwerte zurückzuführen.

Neben dem Verhalten für Web-Nutzer wurde auch das Verhalten der Funkzugangssysteme für Szenarien mit Sprach-Nutzern getestet. Die mittlere Ankunftsrate von Dienst-anforderungen der Sprachnutzer beträgt 10 pro Stunde. Aus diesem Wert und der mittleren Verbindungsdauer von 180 s ergibt sich eine mittlere Anzahl von Nutzerendgeräten in der Umwelt in HEKATE von 50 % des Wertes der Abszissenkoordinate. Ab 400 Sprachnutzern sinkt dieser Wert unter 50 % aufgrund steigender Blockierungswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen. Beide Funkzugangssysteme stellen leitungsvermittelte Verbindungen für Sprachdienste bereit. Als Performance-Parameter wurden der mittlere Durchsatz im Funkzugangssystem in bit/s, die Zugangswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen (als Komplement der Blockierungswahrscheinlichkeit) und die Abbruchwahrscheinlichkeit für bestehende Verbindungen gewählt.

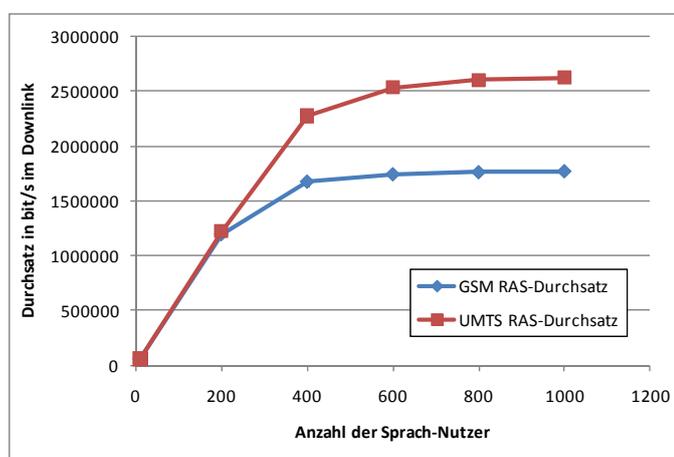


Bild 5.37 Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Sprach-Nutzerszenario

Im Bild 5.37 wird der mittlere Durchsatz der Funkzugangssysteme im Downlink abgebildet. Es ist zu sehen, dass das UMTS-Funkzugangssystem größere Kapazitäten für Sprachverbindungen besitzt, der Sättigungsbereich in beiden Funkzugangssystemen aber relativ früh erreicht wird. Im UMTS-Funkzugangssystem begrenzt unter den gegebenen Parametereinstellungen die Uplink-Richtung die Kapazität der Zellen (für 1000 Sprach-Nutzer: UMTS-DL mittlere Auslastung = 39 %; UMTS-UL mittlere Auslastung = 68 % - Hinweis: Als Lastgrenzwert für den Zugang wurde 70 % gewählt). Die begrenzte Kapazität der Funkzugangssysteme äußert sich auch in der ab 400 Sprach-Nutzer zunehmend fallenden Zugangswahrscheinlichkeit (abgebildet in Bild 5.38). Im Gegensatz zur Blockierungswahrscheinlichkeit, bleibt die Abbruchwahrscheinlichkeit (die in diesen Szenarien nur im Zusammenhang mit Handovern entsteht) relativ gering. Im UMTS-Funkzugangssystem wird dies über die reservierte Kapazität der Zellen für Handover im Lastbereich über 70% erreicht. Im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem wurde im Szenario kein solcher Handover-Bereich vorgesehen. Dies führt zu einer höheren Abbruchwahrscheinlichkeit für Verbindungen beim Zellwechsel im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem. Die mittlere Zahl der Abbruchsereignisse steigt mit steigender Sprach-Nutzerzahl. Die Zahl der Abbruchsereignisse ist jedoch begrenzt

durch die Zahl der Nutzerendgeräte mit aktiver Verbindung und deren Geschwindigkeit. Die mittlere Zahl der Nutzerendgeräte mit aktiven Sprach-Verbindungen (in ON-Phase) bleibt im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem ab 600 Sprach-Nutzern aufgrund der hohen Auslastung nahezu konstant. Die mittlere Zahl der Verbindungsanforderungen steigt aber weiterhin mit steigender Sprach-Nutzerzahl und führt zu einer im Verhältnis absinkenden Abbruchwahrscheinlichkeit - siehe Bild 5.39. Da Abbruchereignisse relativ selten auftraten, wurde der dadurch größere 95%-Konfidenzintervall mit angegeben.

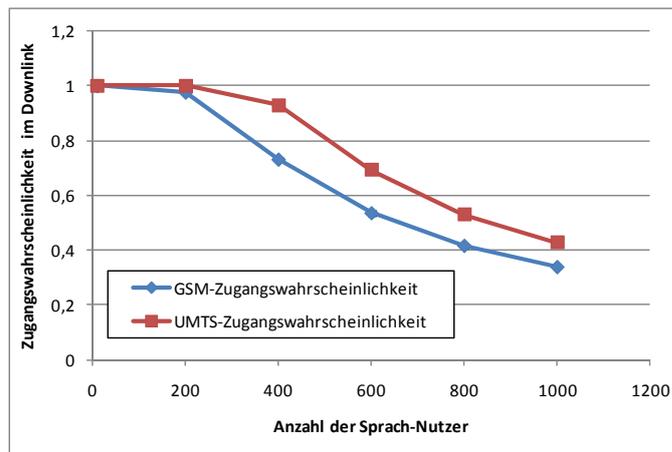


Bild 5.38 Downlink-Zugangswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen im Sprach-Nutzerszenario

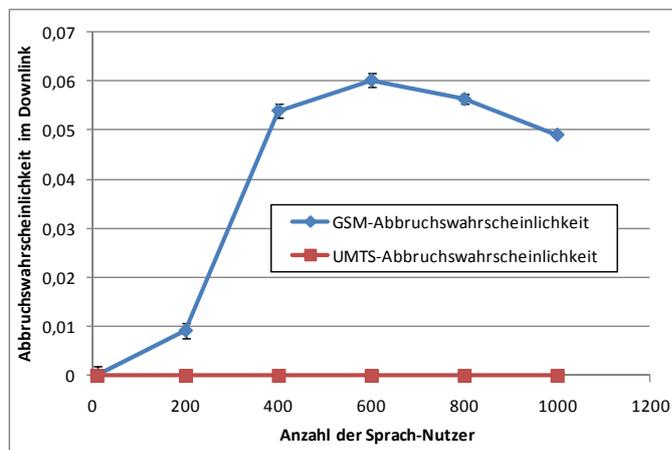


Bild 5.39 Abbruchwahrscheinlichkeit im Downlink für Verbindungen im Sprach-Nutzerszenario

Insgesamt entspricht das erzielte Verhalten für die Szenarien im Bild 5.37 im Wesentlichen den Ergebnissen aus den Everest-Szenarien. Bemerkenswert sind die Unterschiede im Verhalten für die Blockierung und den Abbruch von Sprach-Verbindungen. Der im Bild 5.38 gezeigte Abfall der Zugangswahrscheinlichkeit verlangsamt sich für höhere Sprach-Nutzerzahlen. Dies entspricht eher dem erwarteten Verhalten für M/M/m/m Systeme als der quasi lineare Abfall in den Everest-Ergebnissen. Die Everest-

Ergebnisse weisen zusätzlich eine grundsätzlich größere Zugangswahrscheinlichkeit und eine wesentlich größere Abbruchwahrscheinlichkeit auf. Die größere Zugangswahrscheinlichkeit ist eine Folge der größeren Abbruchwahrscheinlichkeit. Die größere Abbruchwahrscheinlichkeit kann zum Teil durch die gewählte Rasterelementauflösung begründet sein. Ein Nutzerendgerät empfängt im HEKATE-Simulator dadurch evtl. mehr Zellen und hat folglich mehr Handover-Alternativen als im Everest-Simulator. Aber auch dies erklärt nicht die dramatische Höhe der Verbindungsabbrüche in den Everest-Ergebnissen. Ein Nutzerendgerät legt während der Zeit der ON-Phase im Mittel 150 m zurück – bei einem Zelldurchmesser von 1000 m. Selbst wenn jeder Handover erfolglos sein sollte, erscheint es unwahrscheinlich, dass diese Bewegung zu einer Abbruchwahrscheinlichkeit von 40 % führt. Die Ursache der unterschiedlichen Ergebnisse kann aufgrund der vorliegenden Informationen nicht ermittelt werden.

Die nächsten Szenarien vergleichen das Verhalten der Funkzugangssysteme in Gegenwart von leitungs- und paketvermittelten Verbindungen (Mix-Nutzerszenario). Dazu wird pro Szenario jeweils die mittlere Anzahl der Web-Nutzer variiert und eine konstante mittlere Zahl von Sprach-Nutzern als „Störverkehr“ definiert. Alle anderen Szenarioparameter sind identisch zu den vorhergehenden Szenarien. Als Performance-Parameter wurden die Dauer der Übertragung einer Webseite (mittlere ON-Phasendauer $E[T_{ON}]$ in s), der insgesamt in den sieben Zellen erzielte mittlere Durchsatz in bit/s und die Zugangswahrscheinlichkeit gewählt. Wie in den Bildern Bild 5.40, Bild 5.41 und Bild 5.42 zu sehen, werden paketvermittelte Verbindungen im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem am stärksten von leitungsvermittelten Verbindungen beeinträchtigt. Der Grund hierfür liegt in der Priorisierung von leitungsvermittelten Sprachverbindungen, die dem paketvermittelten EGPRS-Systemteil jeweils einen kompletten Verkehrskanal entziehen. Dadurch sinkt die maximale EGPRS-Systemkapazität pro aktiver Sprachverbindung um 44.8 kbit/s. Im UMTS-Funkzugangssystem erhöht sich die Interferenz, was aber erst bei hohen Ressourcenauslastungen zur Verlängerung der ON-Phasen der Web-Nutzer führt.

Auch in diesen Szenarien kann das generelle Verhalten der Funkzugangssysteme, welches in den Everest-Simulationen beobachtet wurde, nachvollzogen werden. Die Dauer der ON-Phasen im GSM/EGPRS-Funkzugangssysteme steigt in den HEKATE-Ergebnissen jedoch nicht so stark an. Der mittlere Durchsatz ist wie schon im Szenario aus Bild 5.36 beobachtet etwas höher und die Zugangswahrscheinlichkeit weist zwar die gleiche Tendenz aber leicht unterschiedliche Absolutwerte auf. Mögliche Gründe hierfür wurden bereits für die anderen Szenarien erläutert. Zusätzlich weist die Trajektorie für die Zugangswahrscheinlichkeit in den Everest-Ergebnissen einen uneinheitlichen Verlauf auf. Die Ursache hierfür kann ein zu großes Konfidenzintervall sein. Angaben über das Konfidenzintervall fehlen jedoch im Everest-Dokument.

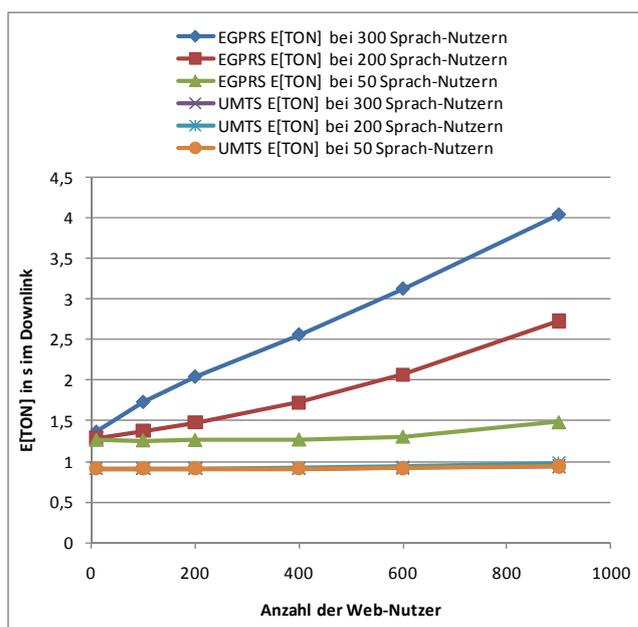


Bild 5.40 Mittlere ON-Phasendauer im Downlink im Mix-Nutzerszenario

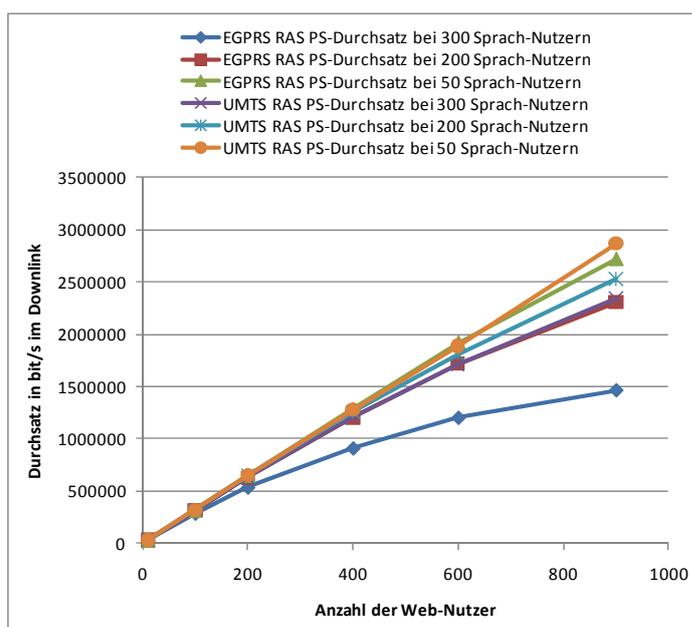


Bild 5.41 Mittlerer Downlink-Durchsatz der RAS im Mix-Nutzerszenario

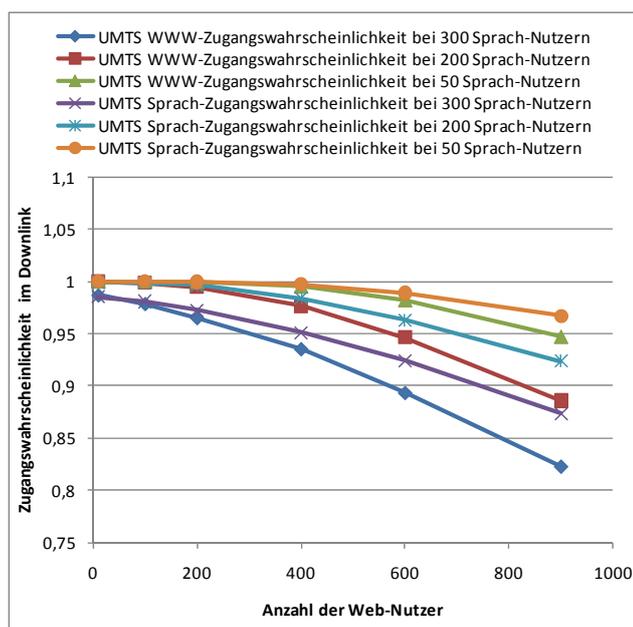


Bild 5.42 Downlink-Zugangswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen im Mix-Nutzerszenario

Abschließend zeigen die vorgenommenen Untersuchungen, dass das hybride Simulationsmodell im HEKATE-Simulator in der Lage ist, unterschiedliches Systemverhalten für unterschiedliche Funkzugangssysteme nachzubilden. Es ist also möglich CRRM-Algorithmen eine Umgebung zur Verfügung zu stellen, die auf unterschiedliche Dienstypen unterschiedlich reagiert. Das erzielte Systemverhalten ist ähnlich zu dem in den Everest-Simulationen beobachteten Verhalten für UMTS- und GSM/EGPRS-Funkzugangssysteme. Unter der Annahme, dass der Everest-Simulator realitätsnahe Ergebnisse erzielt, kann dies auch von den Ergebnissen des HEKATE-Simulators gesagt werden. Beobachtete Unterschiede sind zum Großteil vermutlich auf unterschiedliche CAC-Algorithmen und die heuristisch gewählten Parameter zurückzuführen – ohne näheres Wissen über den Everest-Simulator kann jedoch keine Aussage dazu gemacht werden.

Durch den geringen Speicher- und Zeitbedarf von HEKATE konnten die beschriebenen vergleichenden Untersuchungen in kurzer Zeit durchgeführt werden. HEKATE benötigte z.B. unter den gegebenen Szenarioeinstellungen für 900 Web-Nutzer und 300 Sprach-Nutzer pro Simulationslauf mit 7h Szenariozeit rund 20 Minuten CPU-Zeit und 23 Mi-byte Hauptspeicher. Zur Simulation eines Szenarios mit 600 Web-Nutzern und 300 Sprach-Nutzern wurden 12 Minuten CPU-Zeit und 18 Mi-byte Hauptspeicher benötigt.

6 Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel werden drei Anwendungsbeispiele vorgestellt, die die Einsatzmöglichkeiten des Modellierungsframeworks und des HEKATE Simulators verdeutlichen. Im Abschnitt 6.1 und 6.2 werden Ergebnisse, die bereits in [NiPI2010] und [RePi2009] veröffentlichten Arbeiten beschrieben. Im Abschnitt 6.3 wird auf die Möglichkeit der Untersuchung von transienten Abläufen anhand eines Beispiels eingegangen.

Verwendet wurde das entwickelte Modellierungsframework und der darauf basierende HEKATE Simulator. Zusätzlich wurde eine Linux-Skriptsammlung entwickelt und verwendet, die auf Linux-Bordmitteln wie `awk` und `sort` basiert. Die Skriptsammlung automatisiert die Verteilung von Simulationsserien auf unterschiedliche Rechner und erstellt automatisch MS-Excel-kompatible Ergebnisdateien mit entsprechenden 95%-Konfidenzintervallen für die Zusammenfassung der transienten und stationären Ergebnisausgaben sowie der Histogramme der einzelnen Simulationsläufe.

6.1 MATS-Strategie

Die Multimedia Adaptive Threshold Strategy (MATS) wurde von Vittoria de Nitto Personé entwickelt. In Zusammenarbeit mit ihr wurde die Korrektheit der Ergebnisse ihres Markovmodells für unterschiedliche Szenarien mit Hilfe des HEKATE Simulators überprüft und in [NiPI2010] veröffentlicht.

6.1.1 Beschreibung

Die MATS genannte Strategie ist ein neues Call Admission Control Verfahren, welches die Berücksichtigung von Prioritäten und variablen Dienstqualitätsprofilen für Real-Time Verbindungen in einem Funkzugangssystem ermöglicht. Das MATS Schema zusammen mit dem Markov-Modell für die Performanceanalyse wurde von Vittoria de Nitto Personé und Elisa Campagna entwickelt [PeCa2009]. Zum Veröffentlichungszeitpunkt war die Korrektheit der Ergebnisse des Markov-Modells noch nicht simulativ überprüft worden. Dies wurde mit Hilfe des HEKATE Simulators durchgeführt. Außerdem wurde die Robustheit der Ergebnisse gegenüber unterschiedlichen Verteilungen der Zwischenankunftszeit neuer Verbindungen und der Verweilzeit in einer Zelle untersucht.

Das verwendete Markov-Modell geht von folgenden grundlegenden Annahmen aus. Es existieren verschiedene Klassen eines mobilen Dienstes, wobei die Klassen strikt hinsichtlich ihrer Priorität geordnet sind. Die Dienste sind Real-Time Dienste, daher wird die Verweilzeit ihrer Verbindungen im System nicht von der zur Verfügung gestellten Datenrate beeinflusst. Für die Zwischenankunftszeiten und die Bedienzeitanforderungen der Dienste wird eine exponentielle Verteilung angenommen. Innerhalb einer Klasse

werden die Verbindungen der Dienste noch einmal zusätzlich hinsichtlich ihrer Herkunft unterschieden: Verbindungen können entweder innerhalb einer Zelle neu entstehen oder per Handover an eine Zelle übergeben werden. Das Markov-Modell bezieht sich auf eine einzige Zelle. Handover in andere Zellen oder weitere Interaktionen mit anderen Zellen sind nicht vorgesehen. Für Verbindungen, die per Handover an die Zelle übergeben werden, existieren pro Klasse reservierte Kapazitäten. Die Positionen bzw. die Mobilität der Nutzerendgeräte, die die Dienste anfordern, werden vom Markov-Modell nicht beachtet (mit Ausnahme der externen Handover in die Zelle hinein). Eine Zelle besitzt eine festgelegte Kapazität die in „Bandwith-Units“ (BWU) angegeben wird. Die Verbindungen der Dienste jeder Klasse benötigen eine bestimmte Zahl an Bandwith-Units, um den Nutzer eine ausreichende Dienstqualität zu liefern. Dabei können pro Klasse mehrere Qualitätsstufen definiert werden. Die oberen Qualitätsstufen benötigen mehr Bandwith-Units als die niedrigeren Qualitätsstufen. Falls ein Dienst erfolgreich eine Verbindung zur Zelle etablieren kann, verbleibt er im System bis seine Bedienzeit abgelaufen ist. Während ihrer Verweilzeit in der Zelle können Dienste lastabhängig zwischen den Qualitätsstufen wechseln. Der Wechsel in eine niedrige Qualitätsstufe wird bei einer drohenden Blockierung angestoßen. Der Wechsel in eine höhere Qualitätsstufe wird bei genügend freien BWU angestoßen. MATS behandelt ankommende Verbindungen nach dem in Bild 6.1 dargestellten Ablaufplan.

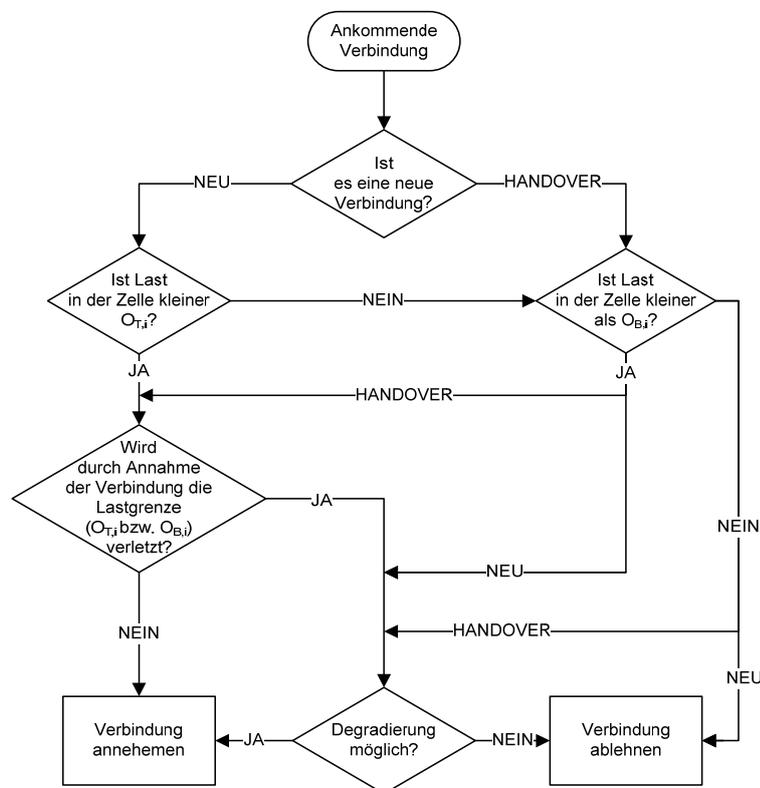


Bild 6.1 MATS schematischer Ablaufplan für ankommende Verbindung [PeCa2009]

Für neue Verbindungen und Handover-Verbindungen werden pro Prioritätsklasse unterschiedliche Lastgrenzwerte definiert. Für eine neue Verbindungen i gilt grundsätzlich ein niedrigerer Lastgrenzwert $O_{T,i}$ als für eine Handover-Verbindungen ($O_{B,i}$), um eine Bevorzugung der Handover-Verbindungen zu erreichen. Es wird jeweils überprüft, ob die Aufnahme der Verbindung mit ihrer maximalen BWU-Forderung den entsprechenden Lastgrenzwert verletzen würde. Wenn dies nicht der Fall ist, wird die Verbindung ohne Änderungen aufgenommen. Wird der Grenzwert verletzt, dann wird zuerst die Verbindung degradiert (ihr Ressourcenverbrauch wird entsprechend niedrigerer Qualitätsstufen angepasst). Wenn dies nicht ausreicht, um die Verbindung aufzunehmen, werden andere Verbindungen in der Zelle entsprechend ihrer Prioritätsklassen degradiert. Die Degradierung beginnt dabei mit der Klasse der kleinsten Priorität. Pro Prioritätsklasse werden zufällig Verbindungen gewählt und auf ihre untere Qualitätsstufe gesetzt. Falls dadurch genügend Kapazität frei wird, wird die ankommende Verbindung angenommen. Falls die frei werdende Kapazität zu klein ist und keine Verbindung niedrigerer oder gleicher Priorität mehr auf eine untere Qualitätsstufe gesetzt werden kann, wird die Verbindung abgewiesen (in diesem Fall wird die Degradierung der anderen Verbindungen nicht umgesetzt). Falls ein Dienst seine Verbindung beendet, wird getestet, ob die dadurch freigesetzte BWU-Kapazität ausreicht, um andere Verbindungen höherer, dann gleicher, später niedrigerer Priorität auf ihre obere Qualitätsstufe zu setzen. Die Verbindungen werden dabei zufällig innerhalb ihrer Prioritätsstufe gewählt. Dies wird umgesetzt bis die freigewordene Kapazität aufgebraucht ist oder keine Dienstverbindungen auf unterer Qualitätsstufe vorhanden sind. Die Last in der Zelle darf dabei nicht über die Lastgrenzwerte für die jeweilige Klasse steigen.

Der Zustandsraum ZM der Markovkette für zwei Dienst-Klassen mit max_1 und max_2 vielen Qualitätsstufen ist folgendermaßen definiert:

$$ZM = \left\{ s = \left\{ (n_1, \dots, n_{max_1}), (m_1, \dots, m_{max_2}) \right\} \mid 1 \leq f(n) \leq O_{B,1}, 1 \leq f(m) \leq O_{B,2} \right\} \quad (6.1)$$

wobei ein Zustand s die Anzahl der jeweiligen Dienste auf dem entsprechenden Dienstqualitätsniveau wiedergibt. Die Funktionen $f(n)$ und $f(m)$ repräsentieren den aufsummierten BWU-Verbrauch aller Dienstverbindungen der Klassen auf ihren aktuellen Qualitätsstufen. Der Index ordnet die Qualitätsstufen in aufsteigender Reihenfolge. So steht beispielsweise folgender Zustand $s = \{ (2, 1), (3) \}$ für zwei Dienste der Klasse 1 auf unteren Qualitätsniveau und einen Dienst dieser Klasse auf oberem Qualitätsniveau. Die Klasse 2 besitzt nur ein Qualitätsniveau und es existieren aktuell drei aktive Dienstverbindungen dieser Klasse. Insgesamt befinden sich in diesem Zustand sechs aktive Verbindungen in der Zelle. Der Parameter $O_{B,i}$ gibt dabei den erlaubten maximalen BWU-Verbrauch aller Verbindungen dieser Klasse an.

Eine ausführlichere Beschreibung des Markov-Modells und der Berechnung der Leistungsparameter ist in [PeCa2009, NiPi2010] zu finden. Das MATS Schema ist für den

Einsatz als RRM-Verfahren entwickelt worden. Im Modellframework sind seine Abläufe daher in der RAS-Komponente angesiedelt.

Für die Übernahme der Szenarioannahmen des Markov-Modells wurde die BWU Funkzugangstechnologie verwendet, welche im Abschnitt 4.1.3 auf Seite 87 beschrieben ist. Pro BWU-RAS-Komponente kann eine beliebige Anzahl Zellen vorhanden sein. Pro Zelle wird eine maximale BWU Zahl angegeben, zusammen mit den Lastgrenzwerten für die einzelnen Klassen. Eine Besonderheit ist die Trennung in Handover- und neue Verbindungen im Markov-Modell bei Existenz nur einer Zelle. Um Handover-Ereignisse zu generieren, benötigt der Simulator mindestens zwei Zellen. Auch ist es nicht möglich die Handover-Verteilung direkt anzugeben, da sie sich aus der Mobilität der Nutzer-Endgeräte ergibt. Um trotzdem die Szenarioannahmen des Markov-Modells nachbilden zu können, wurde folgende Hilfskonstruktion verwendet. Pro Klasse im Markov-Modell wurden zwei Klassen (Sim-Klassen) im Simulator mit gleicher Priorität definiert. Eine Sim-Klasse besitzt die Ankunftsrate (und Verteilung) für neue Verbindungen und die andere Sim-Klasse die Ankunftsrate (und Verteilung) für Handover-Verbindungen. In der Zelle werden für die einzelnen Sim-Klassen die Grenzwerte entsprechend für neue Verbindungen und Handover-Verbindungen der Markov-Modellklasse zugeordnet. Diese Abstraktion hat den Nachteil, dass Handover-Verbindungen gleichverteilt in der Zelle auftreten; dass Handover-Ereignisse häufiger am Rand der Zelle auftreten wird daher nicht berücksichtigt. Da das Markov-Modell die Position der Nutzerendgeräte in den Zellen nicht betrachtet, ist dies als Modellannahme vertretbar.

Die Ergebniswerte der Simulation wurden ermittelt aus 70 Wiederholungen pro Szenario mit einer Szenariozeit von jeweils 14 Tagen (die Länge der transienten Phase wurde ermittelt und berücksichtigt). HEKATE benötigte unter den gegebenen Szenarioeinstellungen pro Simulationslauf mit 14 Tagen Szenariozeit rund drei Minuten CPU-Zeit und fünf Mibyte Hauptspeicher.

6.1.2 Ergebnisse

Folgendes Szenario wurde untersucht, um die Korrektheit der Ergebnisse des Markov- und des Simulationsmodells für MATS anhand allgemein bekannter Ergebnisse durch Auswertung der Erlang-B-Formel bzw. des Little Theorems zu untersuchen.

Simuliert wurden eine Zelle und zwei Klassen mit unterschiedlichen Prioritäten (Prio). Die Lastgrenzwerte in der Zelle $O_{T,i}$ (für neue Verbindungen) und $O_{B,i}$ (für Handover-Verbindungen) wurden für alle Klassen zusammengelegt und auf 100% gesetzt. Jede Klasse besitzt eine Dienstqualitätsanforderung von 10 BWU. Die Ankunftsraten für Handover und neue Verbindungen der Klasse i sind mit $\lambda_{H,i}$ und $\lambda_{N,i}$ bezeichnet; die Bedienrate wird mit μ_i bezeichnet. In Tabelle 6.1 sind die Szenarioparameter aufgeführt. Dieses Szenario ist gleichzusetzen mit einem M/M/m/m System mit $m = 10$ Kanälen und einem Verkehrsangebot von 12 Erlang. Für dieses Szenario kann über die Erlang-

B-Formel die Blockierungswahrscheinlichkeiten errechnet werden. Die unterschiedlichen Prioritäten der Klassen werden erst in der Dienstqualitätsanpassungsphase des MATS-Schemas berücksichtigt und haben folglich hier keinen Einfluss.

Tabelle 6.1 Szenarioeinstellung für M/M/10/10 System

Zelle	$O_{T,1} = 100\%$; $O_{T,2} = 100\%$ $O_{B,1} = 100\%$; $O_{B,2} = 100\%$ $BWU = 100$
Klasse 1	$BWU_1 \{10\}$; $\lambda_{H,1} = 0,1$ 1/min ; $\lambda_{N,1} = 0,2$ 1/min $\mu_1 = 0,05$ 1/min; Prio = 1
Klasse 2	$BWU_2 \{10\}$; $\lambda_{H,2} = 0,1$ 1/min ; $\lambda_{N,2} = 0,2$ 1/min $\mu_2 = 0,05$ 1/min; Prio = 2

Für die Berechnung der Erlang-B-Formel Ergebnisse wurde das Call-Center-Toolkit verwendet [KaMC2007]. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. Für die Ergebnisse des Simulators wird ein 95%-Konfidenzintervall angegeben. Die Ergebnisse des Markov-Modells stimmen exakt mit den erwarteten Ergebnissen überein. Der Konfidenzintervall des Simulationsergebnisses schließt die zu erwartenden Werte ein. Die Blockierungswahrscheinlichkeit ist identisch zu den Abbruchwahrscheinlichkeiten der Handover-Verbindungen, da gleiche Lastgrenzen gelten. Die Blockierungswahrscheinlichkeit ist identisch für beide Klassen. Es besteht insgesamt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Simulation und des Markov-Modells mit den Ergebnissen der analytischen Modelle (Erlang-B-Formel, Theorem von Little).

Aus der Übereinstimmung der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass der HEKATE-Simulator korrekte Ergebnisse für diese Klasse von Problemen liefert.

Tabelle 6.2 Ergebnisse M/M/10/10 Szenario

Parametername	Little Theorem	Erlang-B-Formel	Markov-Modell	HEKATE-Simulator
Blockierungswahrscheinlichkeit		30,19 %	30,19 %	30,34 % $\pm 1,11$ %
Auslastung			83,77 %	83,81 % $\pm 0,28$ %
Mittlere Anzahl der Aufträge im System	8,377			8,381 $\pm 0,028$

Die diversitäre Modellierung des MATS-Schemas über ein Markovmodell und über ein Simulationmodell in HEKATE führte zu äquivalenten Ergebnissen. In Tabelle 6.3 ist beispielhaft die gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Markovmodells und des HEKATE-Simulators bei gleichen Szenarioparametern zu sehen. Für eine genauere Beschreibung des Szenarios und eine Interpretation der Ergebnisse siehe [NiPI2010].

Tabelle 6.3 Gute Übereinstimmung der HEKATE Ergebnisse mit den Ergebnissen des MATS Markov-Modells für gleiche Szenarioparameter

λ_{Gesamt}	Blockierungswahrscheinlichkeit für neue Verbindungen		Abbruchwahrscheinlichkeit für Handover	
	Simulationsergebnis [± 95%-Konfidenzintervall]	Markovmodell Ergebnis	Simulationsergebnis [± 95%-Konfidenzintervall]	Markovmodell Ergebnis
0,135	8,60 [0,40]	8,81	3,47 [0,27]	3,55
0,27	36,90 [0,67]	36,63	20,19 [0,61]	20,22
0,405	59,51 [0,74]	59,49	39,02 [0,88]	38,85
0,54	73,37 [0,72]	73,48	53,17 [0,84]	53,31
0,675	81,85 [0,68]	81,83	64,13 [0,83]	63,70
0,81	87,00 [0,68]	87,00	71,10 [0,76]	71,16

6.2 GMKP-Algorithmus

In der Bachelorarbeit [Rein2009] von Christian Reinartz wurde der HEKATE-Simulator verwendet, um einen Multiple-Knapsack Lösungsalgorithmus auf seine Eignung für JCAC zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in [RePi2009] veröffentlicht. Ein weiteres Ziel war zu ermitteln wie geeignet das Konzept des HEKATE-Simulators ist, um einen Multikriterien-Optimierungsalgorithmus zu implementieren und zu testen.

6.2.1 Beschreibung

Das Multiple-Knapsack Problem beschreibt das Problem der optimalen Verteilung von Objekten auf Behälter. Dabei besitzt jedes Objekt ein Gewicht und einen Profit. Die Behälter besitzen feste, aber unterschiedliche Kapazitäten. Ziel ist es, die Objekte so den einzelnen Behältern zuzuordnen, dass ein maximaler Profit unter der gegebenen maximalen Gesamtkapazität erzielt werden kann. Formeln (6.2) bis (6.5) sind die mathematische Repräsentation des zu lösenden Problems, wobei p_j der Profit von Objekt x_j ist, w_j das Gewicht von Objekt x_j ist und c_i ist die Kapazität des Behälters i .

$$\text{maximiere } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_j x_{ij} \quad (6.2)$$

$$\text{gemäß } \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \leq c_i \quad i \in M = \{1, \dots, m\} \quad (6.3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad j \in N = \{1, \dots, n\} \quad (6.4)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad i \in M, j \in N \quad (6.5)$$

Überträgt man das Problem auf mobile Kommunikationsnetze, so sind die Zellen die Behälter mit begrenzten Kapazitäten und die Verbindungen der Nutzerendgeräte die Objekte mit Gewichten und Profit. Das Gewicht wird durch den Ressourcenverbrauch

repräsentiert. Der Profit ergibt sich aus den Eigenschaften der Verbindung. Es ist aber nicht möglich, jede Verbindung der Nutzerendgeräte in jede Zelle zu verschieben. Nur empfangbare Zellen mit unterstützter Funkzugangstechnologie können verwendet werden. Es bestehen also Zuordnungsbeschränkungen von Verbindungen zu Zellen. Die verwendete Polynomialzeitapproximationslösung des Multiple-Knapsackproblems von Martello und Toth findet sehr schnell relativ gute Lösungen [Hamr2009]. Sie unterstützt jedoch keine Zuordnungsbeschränkungen. Die Berücksichtigung der Zuordnungsbeschränkungen musste daher für den Einsatz in HEKATE nachträglich zugefügt werden. Umgesetzt wurde dies durch entsprechende Gruppierung der Nutzerendgeräte hinsichtlich möglicher Zielzellen (da hier jedes Nutzerendgerät nur eine Verbindung gleichzeitig hat). Die Gruppen wurden danach an den Multiple-Knapsack-Lösungsalgorithmus übergeben. Das Verfahren wurde daher gruppenbasierte Multiple-Knapsack-Problemlösung (GMKP) genannt. Dabei wurden verschiedene Gruppentypen und Profittypen definiert, die aber in den Simulationen keinen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse hatten. Der Einfluss von Gruppen- und Profittypen muss noch in weiteren Szenarien genauer untersucht werden.

Der Multiple-Knapsack-Lösungsalgorithmus wurde als Bestandteil eines netzseitigen Level B CRRM implementiert. Der GMKP-Algorithmus ist dezentral organisiert und in den CRRM-D-Komponenten implementiert. Das Informationsmanagement ist hierarchisch organisiert. Informationen über den Zustand des Funkzugangssystems der jeweils anderen Funkzugangstechnologie werden über eine zentrale Informationsmanagementkomponente ausgetauscht. Der schematische Aufbau des Szenarios wird in Bild 6.2 basierend auf dem Modellierungskonzept aus Abschnitt 3.1 dargestellt.

Als Zielzellen kommen alle empfangbaren Zellen des Nutzerendgerätes in Betracht, die über eine ausreichende Kapazität für die Verbindung des Nutzerendgerätes verfügen. Das Kriterium war hierbei die aktuelle Datenrate der Verbindung und die potenzielle Datenratenkapazität einer Zielzelle. Die potenzielle Datenratenkapazität wurde anhand des aktuellen Zelldurchsatzes und der aktuellen Zellressourcenauslastung der Zielzelle ermittelt. Dadurch konnte die aktuelle Gesamtsituation (Interferenzen, verwendete Kodierungsschemata, etc.) in der Zielzelle in Grundzügen berücksichtigt werden. Die Schätzung des Ressourcenverbrauchs der Verbindung in der Zielzelle berücksichtigte neben der Datenrate keine weiteren Eigenschaften der zu übergebenden Verbindung (dies wäre als zukünftige Erweiterung möglich). In den untersuchten Szenarien betrug die Zeitspanne zwischen der Informationsübermittlung und der Entscheidung des GMKP-Algorithmus zwei Sekunden.

Für den Ablauf des Verfahrens waren vier Lastgrenzwerte einer Zelle von Bedeutung. Basis war der Parameter η_k pro Zelle k . Definiert wurde, ab welchem Wert von η_k Informationen über die Zelle von den CRRM-IM-Komponenten gesammelt wurden und welcher Lastwert in der Zelle als Überlast (im Sinne von Handlungsbedarf der CRRM-D-Komponente) gewertet wurde. Ein weiterer Grenzwert legte die für Handover reser-

vierte Kapazität fest. Ein zusätzlicher Grenzwert in der CRRM-D-Komponente legte fest, bis zu welchem Lastwert η_k eine Zelle als Zielzelle verwendet werden konnte.

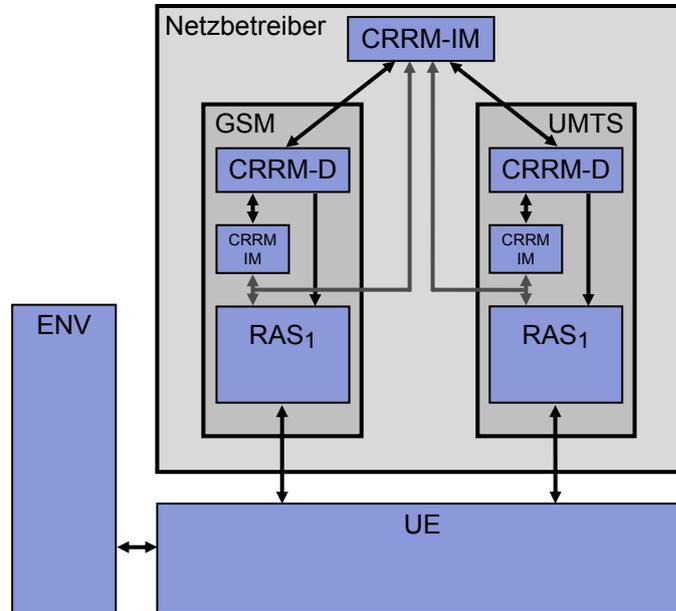


Bild 6.2 CRRM Level B Szenario für GMKP-Algorithmus

In jedem der betrachteten Szenarien existierten drei Klassen von Nutzerendgeräten. Alle Klassen unterstützen GSM/EGPRS- und UMTS-Verbindungen.

- Klasse 1 bevorzugt das GSM-Funkzugangssystem für seine paketvermittelten Verbindungen mit einer Datenrate von 2 kbit/s.
- Klasse 2 bevorzugt das UMTS-Funkzugangssysteme für seine paketvermittelten Verbindungen mit der Datenrate 12 kbit/s.
- Klasse 3 bevorzugt das UMTS-Funkzugangssysteme für seine paketvermittelten Verbindungen mit einer Datenrate von 64 kbit/s.

Für jede Klasse ist eine mittlere Zwischenankunftszeit neuer Verbindungen $E[A_{UE}]$ von 2 s festgelegt. Diese Zwischenankunftszeit ist exponential-verteilt. Die zu übertragende Gesamtdatenmenge S_{Gesamt} beträgt 150 kbyte. Alle Nutzerendgeräte folgen dem Random-Waypoint-Mobilitätsmodell bei einer Geschwindigkeit zwischen 3,6 km/h – 7,2 km/h (Fußgängerverkehr).

Für UMTS und GSM/EGPRS existierten jeweils zwei Zellebenen, die gemeinsam von der jeweiligen RAS-Komponente verwaltet wurden. Eine Ebene besitzt neun kleinere Zellen mit einem Zellradius von 1,06 km und der Radius der Zone des guten Empfangs beträgt pro Zelle 0,5 km. Die zweite Ebene besitzt vier größere Zellen mit einem Zellradius von 1,59 km und der Radius der guten Empfangszone beträgt 0,75 km. Die Rasterelementgröße der Umwelt beträgt 250 m (siehe Bild 6.3). Bis zu einem Lastgrenz-

wert von 86,4 % nahmen die Zellen neue Verbindungen auf; die restliche Kapazität der Zellen war für Handover reserviert.

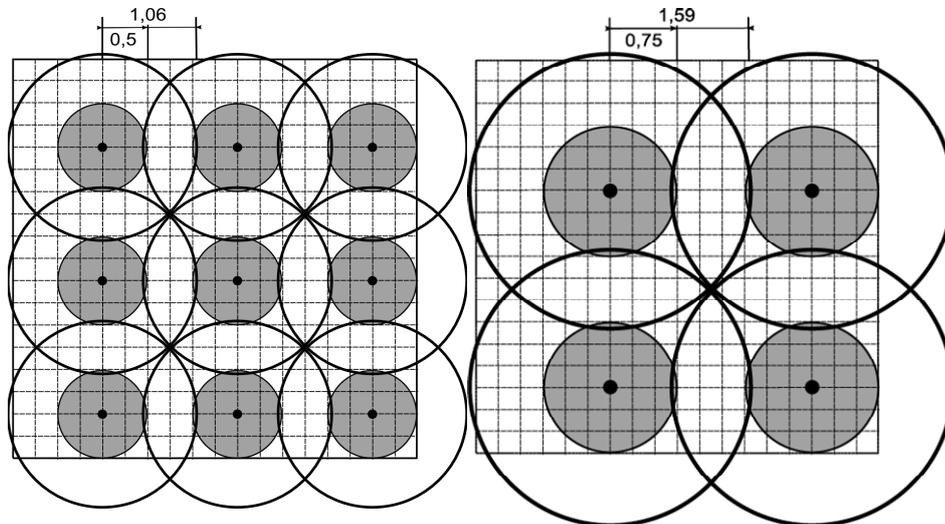


Bild 6.3 Zellebenen mit 9 und 4 Zellen in Umwelt mit 4500 m Torusumfang

Die Kanaleinstellungen entsprechen den Kanaleinstellungen aus Tabelle 5.1 auf Seite 110 mit folgenden Abweichungen: Die Anzahl der PDCH Y beträgt maximal 8 pro Zelle, die SDU-Größe Θ beträgt 500 byte und die Fehlerwahrscheinlichkeit P_e für PDU in der Zone mit mittlerem Empfang beträgt 10 %.

Aus diesen Einstellungen ergaben sich die in Tabelle 6.4 pro Zelle aufgeführten Werte für die mittlere Anzahl der Verbindungen in der Phase der aktiven Datenübertragung und die mittlere Zahl der Verbindungen insgesamt (ON- und OFF-Phase). Aus den Werten ergibt sich, dass sich im Mittel rund 792 Nutzerendgeräte zu jedem Zeitpunkt in der Umwelt befanden. Die Werte entstanden ohne aktivierten GMKP-Algorithmus (Fußgängerverkehr-Basisszenario) und werden als Mittelwert über alle Zellen eines RAS angegeben.

Tabelle 6.4 Anzahl Verbindungen pro Zelle im UMTS-RAS und GSM/EGPRS-RAS im Fußgängerverkehr-Basisszenarios

RAS	Mittlere Anzahl der Verbindungen in der Phase der aktiven Datenübertragung [±95%-Konfidenzintervall]	Mittlere Anzahl der Verbindungen (ON- und OFF-Phase) [±95%-Konfidenzintervall]
GSM/EGPRS	22,31 [0,04]	33,70 [0,07]
UMTS	4,56 [0,01]	27,20 [0,05]

Für eine genauere Beschreibung der Szenarioparameter siehe [Rein2009].

Die Ergebnisse wurden aus 49 Simulationsläufen ermittelt mit jeweils 13 h Szenariozeit, wobei die erste Stunde als Einschwingphase betrachtet und verworfen wurde. Ein Simulationslauf des Fußgängerverkehr-Basisszenarios ohne aktivierten GMKP-

Algorithmus verbrauchte rund sieben Minuten CPU-Zeit und benötigte 11 MiByte Hauptspeicher. Ein Simulationslauf mit aktiviertem GMKP-Algorithmus verbrauchte rund 12 Minuten CPU-Zeit und benötigte 13 MiByte Hauptspeicher.

6.2.2 Ergebnisse

Die erfolgreiche Umsetzung eines CRRM-Verfahrens mit HEKATE basierend auf dem Multiple-Knapsack-Polynomialzeitlösungsalgorithmus von Martello und Toth zeigt die prinzipielle Eignung des Modellierungsframeworks. Ein abstrakter Multikriterien-Optimierungsalgorithmus konnte im Rahmen einer Bachelorarbeit auf CRRM-Szenarien übertragen und angewendet werden.

Der Einfluss des Lastgrenzwertes in der CRRM-D-Komponente auf den getragenen Verkehr ist in Bild 6.4 abgebildet. Es ist zu sehen, dass es einen optimalen Lastgrenzwert für empfangbare Zellen gibt, ab dem diese noch als Zielzellen verwendet werden können (Eine Restunsicherheit aufgrund der relativ großen 95%-Konfidenzintervalle bleibt.). Ist dieser Lastgrenzwert (LG) in der CRRM-D-Komponente zu hoch angesetzt, sinkt der getragene Verkehr aufgrund von Verbindungsblockierungen (siehe Bild 6.5). Ist er hingegen zu niedrig angesetzt, sinkt der getragene Verkehr, weil keine Zielzellen zum Lastausgleich mehr zur Verfügung stehen. Dies ist in Bild 6.6 daran zu erkennen, dass ab einen Lastgrenzwert von 45 % keine Handover mehr durch den CRRM-Algorithmus angestoßen wurden. Zu beachten ist, dass in dem Szenario erst ab einem Lastwert von 50 % überhaupt Informationen über eine Zelle von der CRRM-IM-Komponente gesammelt wurden. Der Wert für die erfolglosen Verbindungen setzt sich nicht nur zusammen aus den Verbindungsblockierungen und -abbrüchen; zusätzlich dazu wird auch die Zahl der Verbindungsabbrüche durch CRRM-Fehlentscheidungen mitgezählt. Diese entstehen, wenn eine Verbindung an eine Zelle übergeben werden soll, diese aber nicht mehr vom Nutzerendgerät empfangen werden kann. Solche CRRM-Fehlentscheidungen entstehen durch veraltete Informationen in der CRRM-IM-Komponente oder durch zu lange Übermittlungszeiten für Informationen und Kommandos. Verursacht wird diese Informationsalterung zum Teil durch die Nutzermobilität (siehe Abschnitt 2.1). Der CRRM-Algorithmus führte insgesamt eher Intrasystem-Handover (RAS HO) als Intersystem-Handover (ISHO) durch. Es wurden ungefähr halb so viele Handover durch den CRRM-Algorithmus ausgelöst wie durch den normalen RRM-Algorithmus der Funkzugangssysteme (siehe Bild 6.6).

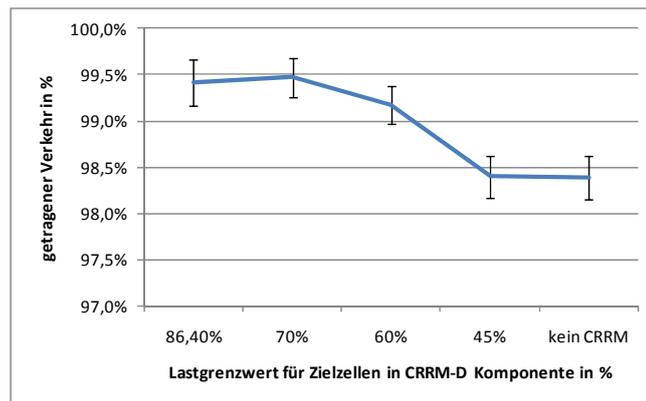


Bild 6.4 Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf den getragenen Verkehr

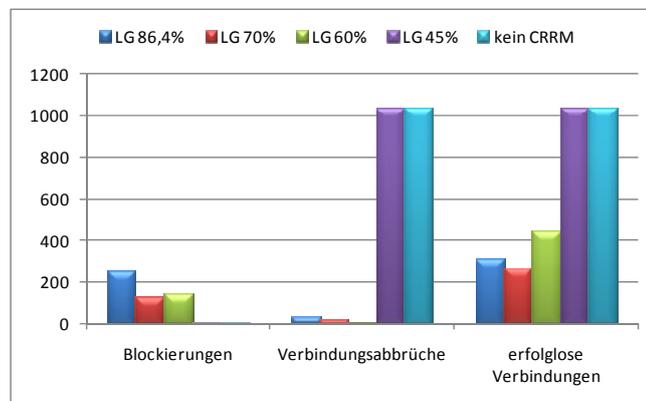


Bild 6.5 Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf die Zahl der erfolglosen Verbindungen im Beobachtungszeitraum

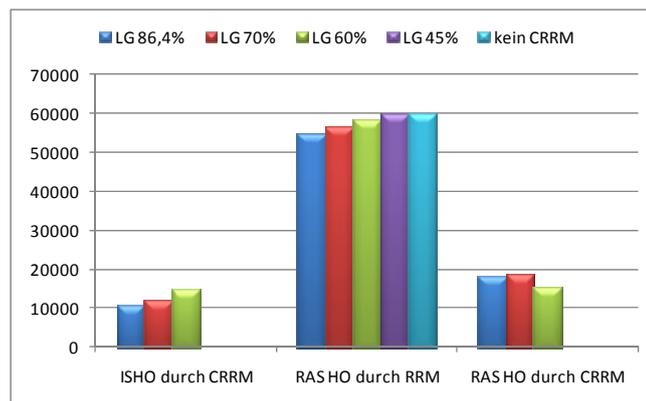


Bild 6.6 Einfluss des Lastgrenzwertes (LG) in der CRRM-D-Komponente auf die Handover-Zahl im Beobachtungszeitraum

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Systemverhalten wird in Bild 6.7 bis Bild 6.12 weiter verdeutlicht. In Tabelle 6.5 ist eine Übersicht über die Geschwindigkeiten in den einzelnen Szenarien zu sehen. Die Werte ergeben sich aus der Umrechnung der Simulatorparameter von m/s in km/h

Tabelle 6.5 Geschwindigkeitsbereiche der Szenarien

Szenario	Geschwindigkeitsbereich der Nutzerendgeräte
Fußgängerverkehr	3,6 km/h – 7,2 km/h
Stadtverkehr	3,6 km/h – 50,4 km/h
Autobahnverkehr	79,2 km/h – 140,4 km/h

Mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt der getragene Verkehr. Besonders die Verbindungen der Nutzerendgeräte der Klasse 1 werden von höheren Geschwindigkeiten beeinträchtigt. Über die anderen Klassen kann aufgrund der zu großen 95%-Konfidenzintervalle keine eindeutige Aussage getroffen werden. Die Verbindungen der Nutzerendgeräte der Klasse 2 scheinen aber von den häufigeren erfolglosen Verbindungen der Klasse 3 zu profitieren. In Bild 6.9 ist die steigende Zahl der erfolglosen Verbindungen für höhere Geschwindigkeiten zu sehen. Dies ist bedingt durch die höhere Mobilität und die dadurch schneller alternenden Informationen über empfangbare Zellen. Der CRRM-Algorithmus ist jedoch trotz dieses Effektes in der Lage ein gutes Ergebnis zu erzielen. Es ist besser als das zum Vergleich aufgeführte Ergebnis ohne CRRM und Fußgängerverkehr. Die starke Belastung der Funkzugangssysteme durch hohe Geschwindigkeiten kann anhand der steigenden Zahl von RRM-Intrasystem-Handovern in Bild 6.10 nachvollzogen werden. Ohne CRRM-Algorithmus würde diese Mobilität zu einem starken Einbruch im getragenen Verkehr führen.

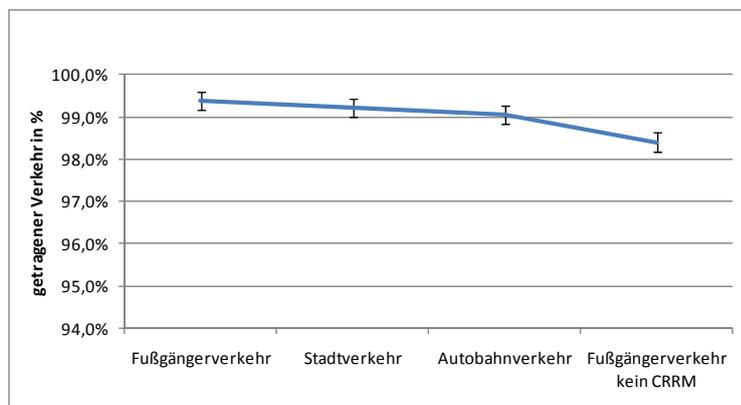


Bild 6.7 Einfluss der Geschwindigkeit auf den getragenen Verkehr (gesamt)

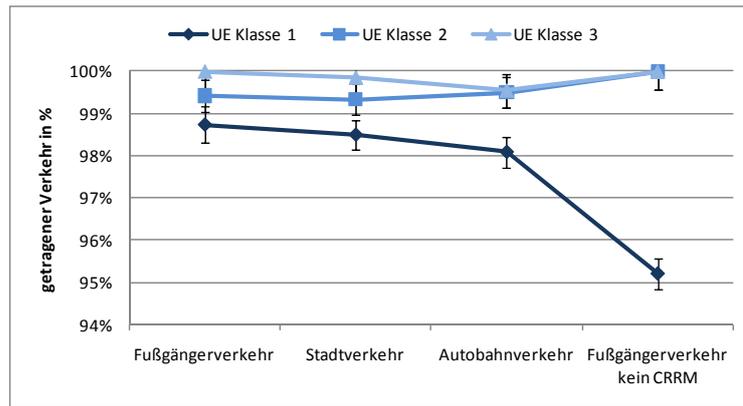


Bild 6.8 Einfluss der Geschwindigkeit auf den getragenen Verkehr (pro Nutzerendgeräteklasse)

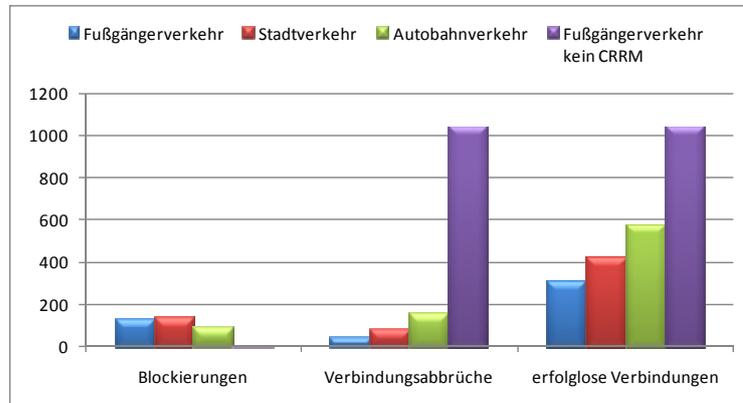


Bild 6.9 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Zahl der erfolgreichen Verbindungen im Beobachtungszeitraum

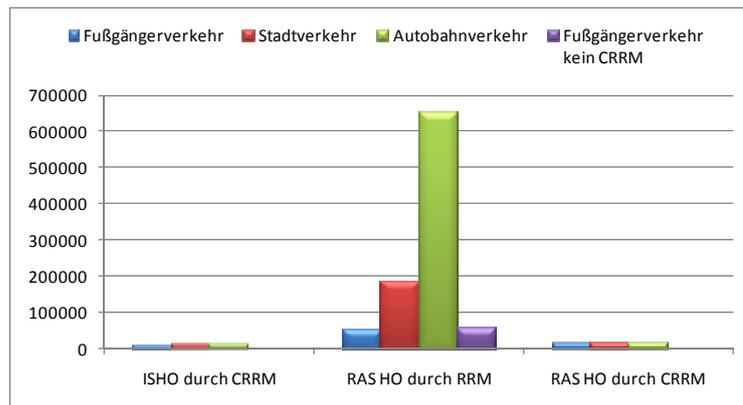


Bild 6.10 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Handover-Zahl im Beobachtungszeitraum

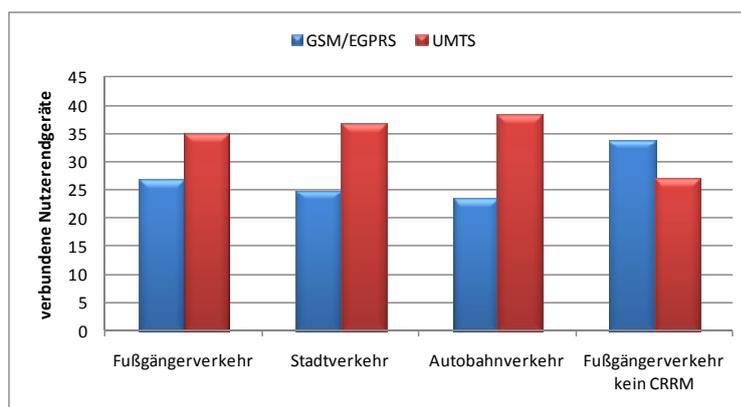


Bild 6.11 Einfluss der Geschwindigkeit auf die mittlere Zahl der verbundenen Nutzerendgeräte

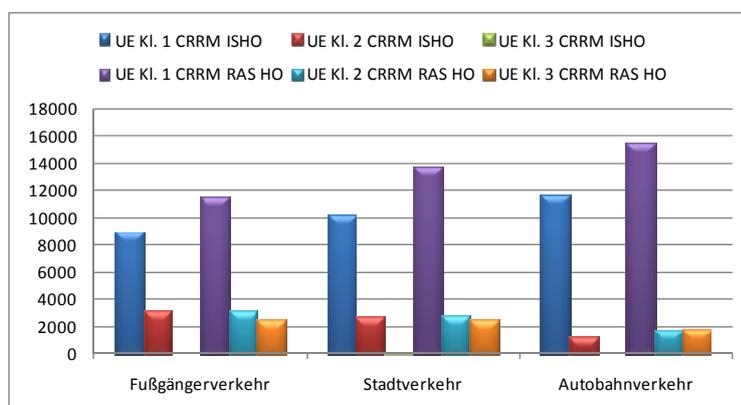


Bild 6.12 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Handover-Zahl pro UE-Klasse im Beobachtungszeitraum

Bild 6.11 zeigt anhand der mittleren Zahl der Nutzerendgeräte mit Verbindungen zum GSM/EGPRS- oder UMTS-Funkzugangssystem, dass der CRRM-Algorithmus Verbindungen aus dem GSM/EGPRS-Funkzugangssystem in das UMTS-Funkzugangssystem verschiebt. Mit steigender Tendenz für höhere Geschwindigkeiten. Dies wird auch im Bild 6.12 durch die höhere Zahl von Intersystem-Handovern für Nutzerendgeräte der Klasse 1 deutlich (Verbindungen dieser Nutzerendgeräte bevorzugen initial das GSM-Funkzugangssystem - siehe Seite 152). Verbindungen der Klasse 3 werden nicht in das GSM/EGPRS verschoben, weil dieses System unter den gegebenen Kanalparametern schlecht für höhere Datenraten geeignet ist.

Insgesamt zeigt sich, dass der GMKP-Algorithmus die Anzahl der erfolglosen Verbindungen nur bei geeigneter Wahl der Lastgrenzwerte reduzieren kann. Je höher die Geschwindigkeit der Nutzerendgeräte, umso schneller altern die Informationen über empfangbare Zellen auf die der GMKP-Algorithmus zurückgreift. Daher steigt die Zahl der erfolglosen Verbindungen mit der Geschwindigkeit der Nutzerendgeräte.

6.3 Analyse von transienten Verhalten

In den bisher aufgeführten Anwendungsbeispielen wurden stationäre Ergebnisse präsentiert. Mit Hilfe des HEKATE Simulators kann auch transientes Verhalten wiedergegeben werden, um CRRM-Verfahren zu untersuchen.

Nachfolgend wird der Einfluss von vorübergehend erhöhter Last auf die Übertragungsdauer $E[V]$ eines SDU-Pakets in einem GSM/EGPRS-Funkzugangssystem untersucht. Erfasst werden neben den Leistungsparametern auch die Kosten der CRRM-Aktivitäten.

Die Diagramme der zeitlichen Verläufe geben das Verhalten der Downlink-Richtung wieder. Angegeben sind die Ergebnisse für Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall aus 70 Läufen. HEKATE benötigt unter den gegebenen Szenarioeinstellungen pro Simulationslauf von 6000 s Szenariozeit rund 30 s CPU-Zeit und 10 MiByte Hauptspeicher. Mit Hilfe der bereitgestellten automatisierten Auswertungsunterstützung war daher die Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente innerhalb eines Arbeitstages möglich.

6.3.1 Beschreibung

Es wurde das netzseitige GMKP-CRRM-Verfahren für Level B CRRM aus Abschnitt 6.2 verwendet. Als Basisszenario für den Aufbau und die Eigenschaften der Funkzugangssysteme und Nutzerendgeräte wurde das Szenario aus Abschnitt 5.2.3 gewählt – mit der Abweichung, dass jeder Zelle nur maximal acht Kanäle für EGPRS zur Verfügung stehen und der Ankunftsprozess der Sprach-Nutzer für die Erzeugung einer Lastspitze verändert wurde.

Die Grundlast im GSM/EGPRS-Funkzugangssystem besteht aus 200 paketvermittelten Web-Nutzern. Untersucht werden soll das transiente Verhalten des Systems, wenn ab 3700 s zusätzlich 300 leitungsvermittelte Sprach-Nutzer im Abdeckungsbereich der Zellen eintreffen, die ab 5000 s wieder den Abdeckungsbereich verlassen (erst nach Beendigung evtl. aktiver Dienstanforderungen). Im Szenario unterstützen die Sprach-Nutzer auch das UMTS-Funkzugangssystem. Alle Nutzer bevorzugen initial das GSM/EGPRS-Funkzugangssystem, sodass im UMTS-Funkzugangssystem ohne CRRM keine aktiven Verbindungen existieren. Untersucht wurden die in Tabelle 6.6 beschriebenen Szenariovariationen.

Tabelle 6.6 Szenariovarianten für die Untersuchung des transienten Verhaltens.

Szenario	Beschreibung
RRM	Dies ist das Basisszenario ohne CRRM.
CRRM intensiv zeitlos	Der CRRM-Algorithmus beginnt ab 30 % Auslastung der Zellressourcen damit Informationen über die Zellen zu sammeln und verschiebt ab dieser Grenze auch bereits Verbindungen, um diesen Lastlevel möglichst nicht zu überschreiten. Über jede erfolglose Verbindung und über jede Laständerung die größer als 1 % ist, wird die CRRM-IM-Komponente informiert. Die einzelnen CRRM-Aktionen besitzen dabei nur jeweils 0.01 s zeitliche Kosten und 10 Einheiten abstrakte Kosten.
CRRM intensiv zeitbehaftet	Zusätzlich zum Szenario intensiv zeitlos wird das Senden der Informationen über eine Zelle oder erfolglose Verbindung von der RAS-Komponente und die Weitergabe der CRRM-Kommandos von der CRRM-D-Komponente zur RAS-Komponente mit jeweils 5 s zeitlichen Kosten belegt.
CRRM zeitlos	Wie CRRM intensiv zeitlos, nur dass erst ab 60 % Auslastung mit der Informationssammlung begonnen wird. Die CRRM-IM-Komponente wird auch erst ab einer Laständerung von größer 10 % in einer Zelle informiert.
CRRM zeitbehaftet	Wie CRRM intensiv zeitbehaftet nur das erst ab 60 % Auslastung mit der Informationssammlung begonnen wird. Die CRRM-IM-Komponente wird auch erst ab einer Laständerung von größer 10 % in einer Zelle informiert.

6.3.2 Ergebnisse

Es zeigt sich, dass die gebotene Dienstqualität durch das Umleiten der zusätzlichen Last der Sprachverbindungen in das UMTS- Funkzugangssystem verbessert werden kann. Dabei ist in Bild 6.16 und Bild 6.17 zu sehen, dass das „intensive“ CRRM mehr Sprachverbindungen in das UMTS- Funkzugangssystem verschiebt und damit auch früher beginnt. Der Unterschied zwischen zeitlosen und zeitbehafteten CRRM ist kleiner. Aufgrund der großen 95%-Konfidenzintervalle, die beispielhaft als grauer Bereich für die zeitlosen Szenariovarianten angegeben wurden, ist noch keine eindeutige Aussage möglich. Tendenziell verschiebt die zeitlose CRRM-Variante aber mehr Verbindungen. Der Vergleich zwischen den zeitlosen und zeitbehafteten Szenariovarianten zeigt, dass die anfallenden abstrakten CRRM-Kosten im Beobachtungszeitraum für die Informationsübermittlung ähnlich sind (siehe Bild 6.13 und Bild 6.14); das erzielte Ergebnis im zeitbehafteten Fall jedoch schlechter ausfällt (Bild 6.18 bis Bild 6.22). Ebenso sinken die abstrakten CRRM-Kosten im Beobachtungszeitraum für die Informationsübermittlung des Zellzustandes, wenn die Beobachtung der Zelllast weniger intensiv ausfällt – gleichzeitig steigen jedoch auch die Kosten für die Übermittlung von Informationen für erfolglose Verbindungen. Je intensiver die Beobachtung des Systems durch die CRRM-IM-Komponente wird, umso mehr Handover werden durch das CRRM durchgeführt. Dabei überwiegen Intersystem-Handover (Siehe Bild 6.15).

In Bild 6.18 ist der zeitliche Verlauf des Auftretens von erfolglosen Verbindungen (Blockierungen und Abbrüche) für Web-Nutzer abgebildet. In Bild 6.19 für Sprachnutzer. Ohne CRRM treten im beobachteten Zeitraum zwischen 3000 s und 6000 s insgesamt 1040 ± 19 erfolglose Web-Nutzer-Verbindungen und 146 ± 7 erfolglose Sprach-Nutzer-Verbindungen auf. Die Aktivierung des CRRM-Verfahrens führt zu einer deutlichen Verbesserung auf maximal 78 ± 7 erfolglose Web-Nutzer-Verbindungen und maximal $2 \pm 0,4$ erfolglose Sprach-Nutzer-Verbindungen, wobei das intensive CRRM besser in der Lage ist die Anzahl der auftretenden erfolglosen Web-Nutzer-Verbindungen zu reduzieren (24 ± 3). Der Unterschied zwischen zeitbehafteten und zeitlosen CRRM ist wieder nicht signifikant (angegeben ist als grauer Bereich der 95%-Konfidenzintervall der zeitbehafteten Szenarien). Das Verhalten scheint sich aber für den intensiven und nicht intensiven Fall zu unterscheiden. Erfolgreiche Sprach-Nutzer-Verbindungen scheinen vor allem durch veraltete Informationen über die Zielzellen zu entstehen.

Eine höhere Anzahl von aktiven Sprachverbindungen im EGPRS/GSM-Funkzugangssystem verringert die für paketvermittelte Verbindungen zur Verfügung stehenden Ressourcen. Dies führt zu einer erhöhten Auslastung der noch vorhandenen EGPRS-Kanäle, was zu höheren Übertragungsdauern der SDU-Pakete $E[V]$ führt. Im Szenario „CRRM intensiv zeitlos“ ist das CRRM-Verfahren sehr gut in der Lage die Übertragungsdauern stabil zu halten (vgl. Bild 6.20 und Bild 6.21). Auch für das CRRM-Szenario „CRRM zeitbehaftet“ ergibt sich noch eine deutliche Verbesserung der Situation (Bild 6.22).

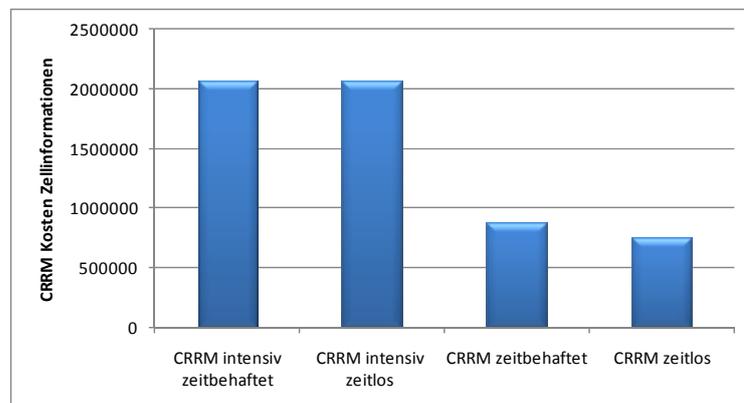


Bild 6.13 CRRM-Kosten für die Übermittlung von Zellinformationen im Beobachtungszeitraum

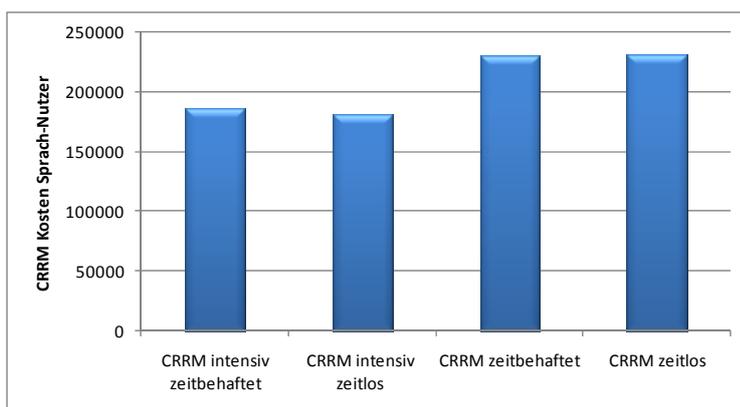


Bild 6.14 CRRM-Kosten für die Übermittlung von Informationen über erfolgreiche Verbindungen von Sprach-Nutzern im Beobachtungszeitraum

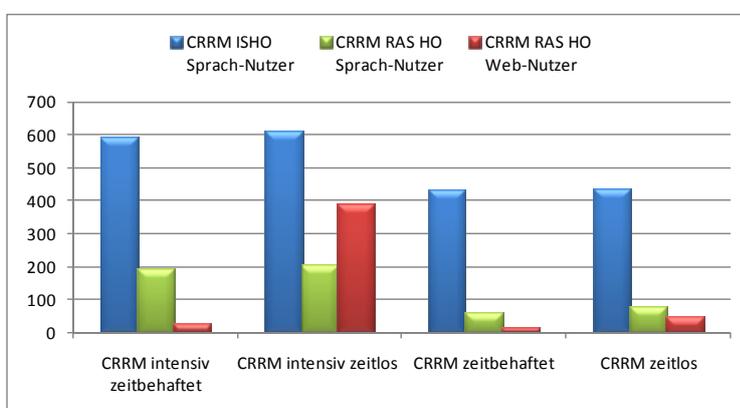


Bild 6.15 Vergleich von Handover-Zahlen im Beobachtungszeitraum

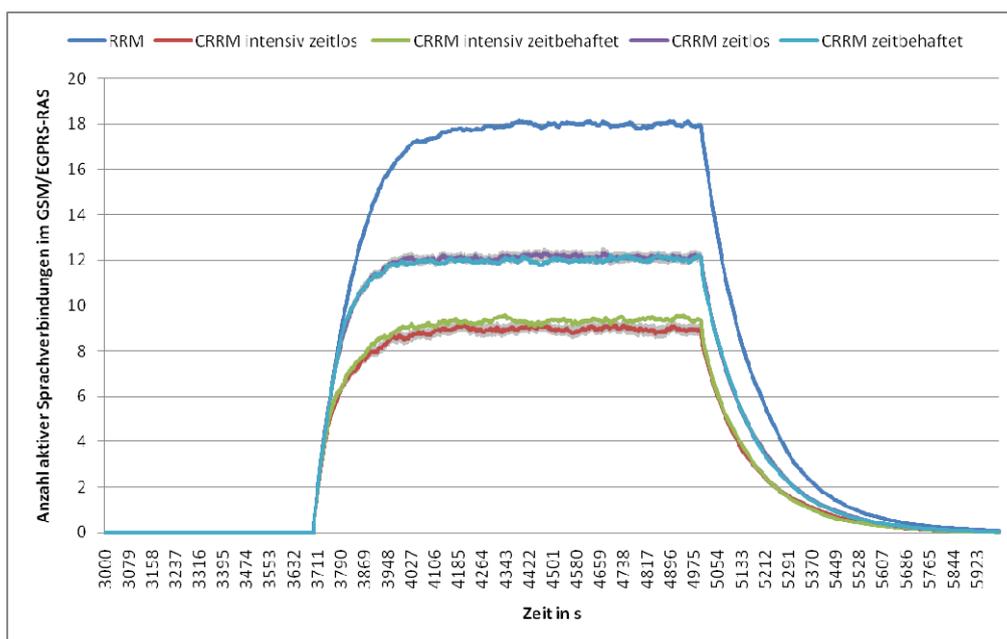


Bild 6.16 Anzahl aktiver Verbindungen der Sprach-Nutzer im GSM/EGPRS-RAS

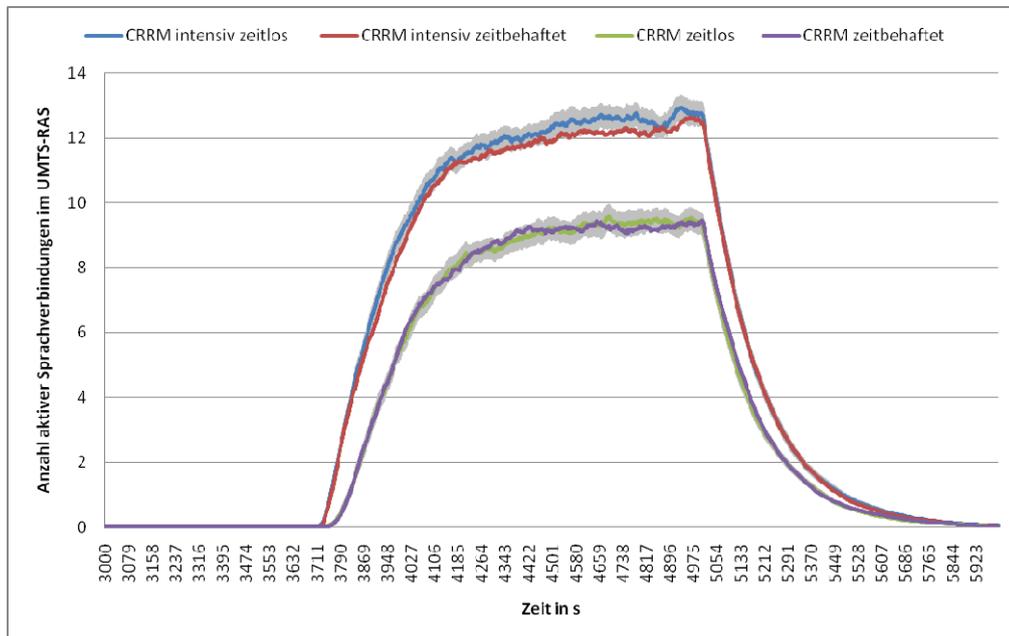


Bild 6.17 Anzahl aktiver Verbindungen der Sprach-Nutzer im UMTS-RAS

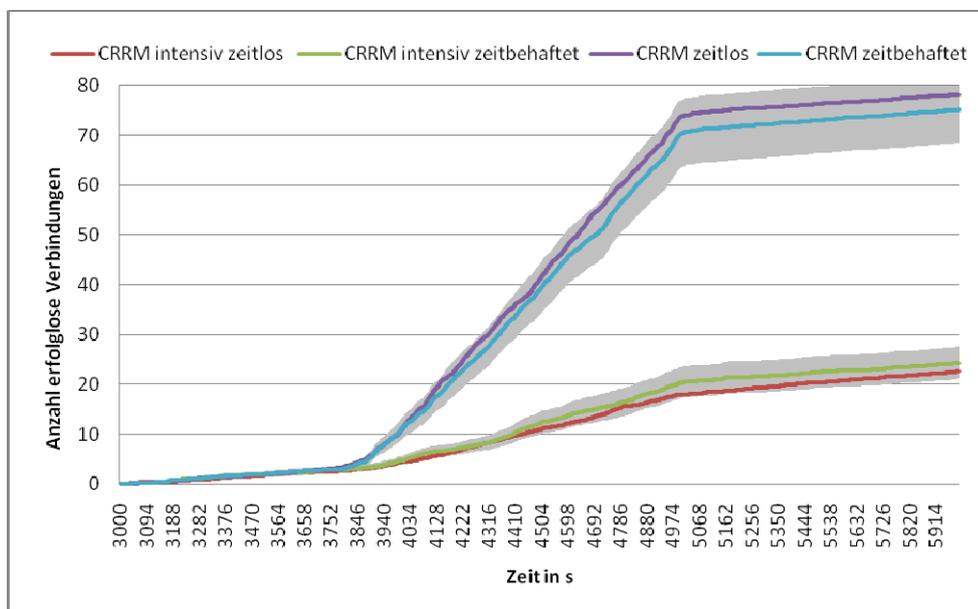


Bild 6.18 Anzahl der erfolglosen Verbindungen der Web-Nutzer

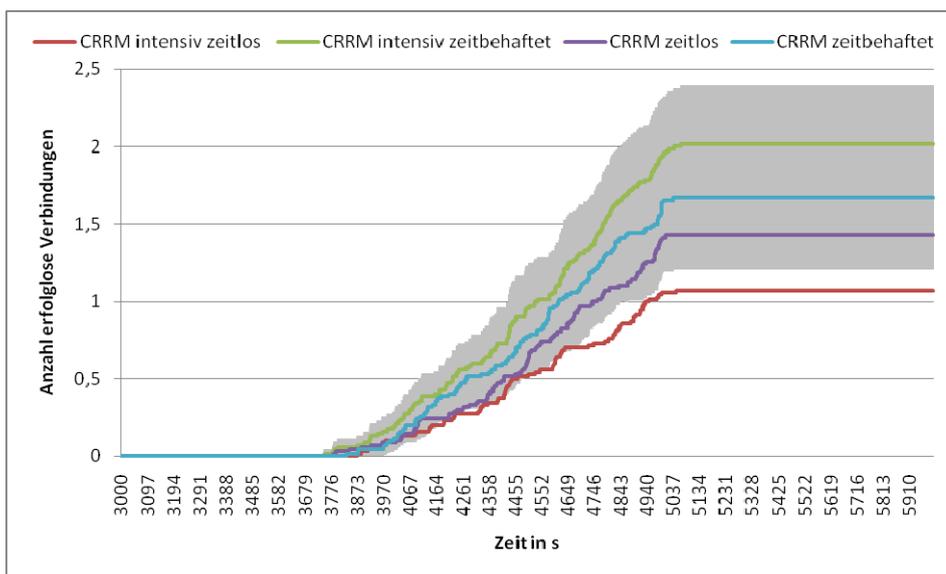


Bild 6.19 Anzahl der erfolglosen Verbindungen der Sprach-Nutzer

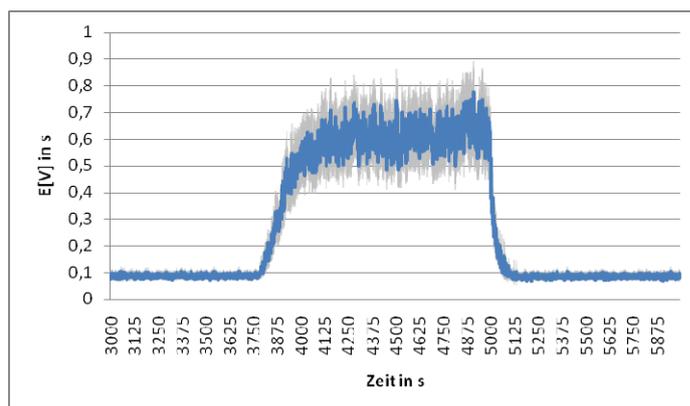


Bild 6.20 Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall) ohne CRRM

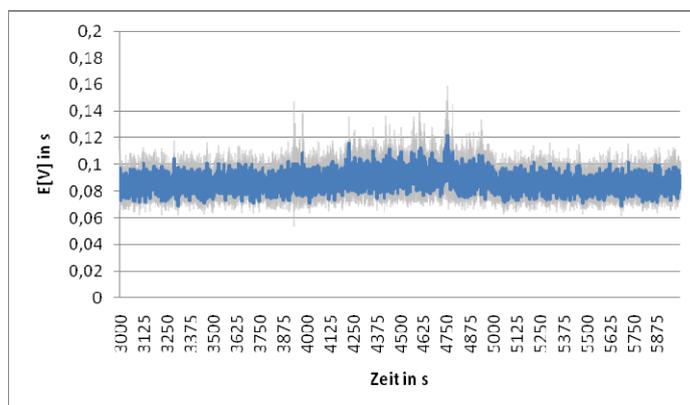


Bild 6.21 Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall) im Szenario CRRM intensiv zeitlos

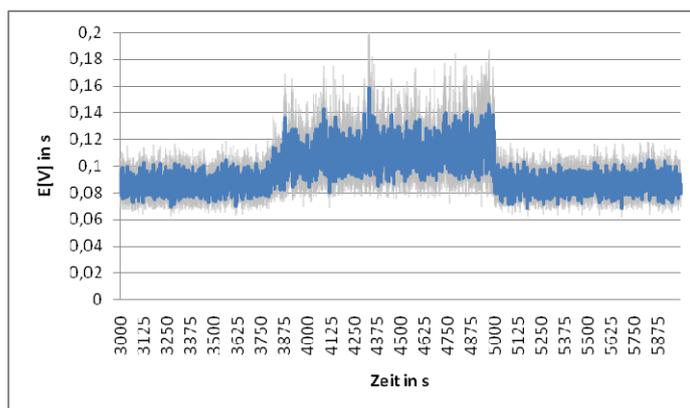


Bild 6.22 Übertragungsdauern der SDU-Pakete (mit 95%-Konfidenzintervall) im Szenario CRRM zeitbehaftet

Insgesamt zeigt sich, dass der GMKP-Algorithmus in der Lage ist kurzfristige Lastspitzen in ein anderes RAS zu transferieren. Das intensive CRRM verursachte zwar mehr Kosten für die Erfassung des Zellzustandes, dafür verursachte es weniger Kosten für die Übermittlung der Information zu erfolglosen Verbindungen. Die Unterschiede in den Ergebnissen des zeitlosen und zeitbehafteten CRRM-Verfahrens waren in den durchgeführten Untersuchungen zum großen Teil nicht signifikant. Nach Auswertung der Ergebnisse ergibt sich ein nachvollziehbares transientes Verhalten der Funkzugangssysteme; dies ermöglicht es grundsätzliche Einflussfaktoren und Abhängigkeiten für transientes Verhalten von CRRM-Verfahren mit Hilfe des HEKATE Simulators zu untersuchen.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Modellierungsframework für die technologieübergreifende Verwaltung der Ressourcen heterogener Funkzugangsnetze (CRRM) entwickelt, implementiert und erprobt. Die Basis für die Ermittlung der benötigten Modellkomponenten waren die im Kapitel 2 beschriebenen allgemeinen Eigenschaften von Funkzugangstechnologien und Einsatzmöglichkeiten von CRRM. In diesem Kapitel wurden ausgehend von den widersprüchlichen Teilzielen des CRRM (hohe Nutzerzufriedenheit und geringer Ressourcenverbrauch) und den möglichen Gewinnen durch CRRM (Bündelungsgewinn, Servicezuweisungsgewinn, Redundanz) die Eigenschaften von CRRM beschrieben. Anhand des starken Einflusses der Mobilität, der Dienstanforderungen und der Empfangssituation an der Position der Nutzer wurde die Problematik der zeitlich begrenzten Gültigkeitsdauer der Lösungen des Multikriterienoptimierungsproblems verdeutlicht. Aus dieser begrenzten Gültigkeitsdauer, der erfassten Situation und der gefundenen Lösung, ergibt sich die Notwendigkeit eines CRRM-Regelkreises. Dieser Regelkreis kann grob in Informationsmanagement- und Durchführungsphase unterteilt werden. Darauf aufbauend wurden die am CRRM-Prozess hauptsächlich beteiligten Komponenten Nutzerendgerät, Funkzugangssystem, CRRM-Informationsmanager und CRRM-Entscheider identifiziert. Durch die Variation der Eigenschaften und der Beziehungen zwischen den Komponenten entstehen verschiedene CRRM-Systemgrenzen (Level A, Level B, Level C) und CRRM-Integrationssebenen (gering, mittel, hoch).

Aufbauend auf den Betrachtungen in Kapitel 2 wurde in Kapitel 3 ein Modellierungskonzept entwickelt, das in der Lage ist CRRM-Szenarien abstrakt abzubilden – unter Beibehaltung der grundlegenden Strukturen der Szenarien. Ein wesentlicher Aspekt dabei war die Trennung zwischen Informationsmanagement und Durchführung. Diese Trennung ermöglicht eine einfache Übertragung bekannter Lösungen für Multikriterien-Optimierungsprobleme auf CRRM. Die Komponenten des Modellierungsframeworks sind die Umwelt (ENV), das Funkzugangssystem (RAS), das Nutzerendgerät (UE), der CRRM-Informationsmanager (CRRM-IM) und der CRRM-Entscheider (CRRM-D). Die Variation der Eigenschaften und der Beziehungen zwischen den Komponenten des Modellierungsframeworks ermöglicht es unterschiedliche CRRM-Systemgrenzen und CRRM-Integrationssebenen abzubilden. Über die Belegung der CRRM-Aktionen mit Kosten kann die Bewertung der Lösungsansätze nicht nur hinsichtlich des erzielten Ergebnisses, sondern auch hinsichtlich des notwendigen Aufwands erfolgen. Es wird daher eine Kosten-/ Nutzen-Analyse ermöglicht, die den in 2.4.4 beschriebenen CRRM-Regelkreislauf berücksichtigt.

Nach Betrachtung der Anforderungen des Modellierungskonzeptes wurde ein hybrides Simulationsmodell für die Umsetzung des Modells vorgeschlagen. In Kapitel 4 wurden die wichtigsten Elemente für diese Umsetzung beschrieben. Der resultierende diskrete

ereignisorientierte Simulator basiert auf OMNeT++ und wird HEKATE genannt. Der Simulator kann Szenarien mit leitungsvermittelten und paketvermittelten Verkehr im Uplink und Downlink betrachten. Er wurde entwickelt für die Untersuchung von Szenarien und Algorithmen bis zur mittleren CRRM-Integrationsstufe. Im Simulationsmodell wurde der Verbindungsankunftsprozess daher nicht bis auf die Paketebene aufgelöst. Die Eigenschaften des Paketankunftsprozesses werden jedoch in den analytischen Modellen der Funkzugangstechnologien berücksichtigt. Die Dynamik des Gesamtsystems wird im Simulator über simulative Teilmodelle realisiert. Diese Teilmodelle liefern zeitgetreu neue Eingabeparameter für analytische Teilmodelle, deren Ausgabeparameter wiederum die Eingabeparameter der simulativen Teilmodelle sind. Die Interaktion der Teilmodelle wird über Nachrichten realisiert, die den durch den Modellaufbau vorgegebenen Kommunikationswegen folgen. Es existieren analytische Modelle für die Verweildauer in einem Rasterelement der Umwelt, für die Dienstanforderungen der Nutzerendgeräte und für die gebotene Dienstqualität sowie den Ressourcenverbrauch in den Funkzugangssystemen.

Das Verhalten der wichtigsten Elemente des hybriden Simulationsmodells wurde in Kapitel 5 untersucht. Der Einfluss der Eingabeparameter auf die Ergebnisse des analytischen Kanalmodells für UMTS und GSM/EGPRS wurde in Abschnitt 5.1.1 dargestellt. Danach wurde der Einfluss der Rasterung der Umwelt auf die Ergebnisse des Simulators untersucht. Die Untersuchungen ergaben, dass eine Verkleinerung der Rasterelemente ab einer Grenzgröße keinen signifikanten Gewinn für die Genauigkeit der Ergebnisse, aber einen starken Anstieg in Speicher und Zeitverbrauch der Simulation verursacht. Es wurde außerdem ein Modell für die Vorhersage der Geschwindigkeitsverteilung von Nutzerendgeräten mit endlicher Verweilzeit in der Umwelt entwickelt. Es zeigte sich, dass dieses Modell zwar die Geschwindigkeitsverteilung korrekt vorher sagte, aber nicht zur Abkürzung der transienten Phase verwendet werden konnte. Dies wurde durch ein Begrenzungsintervall für die maximale Abweichung beim Ziehen von neuen Geschwindigkeiten erreicht. Abhängig von der mittleren Verweilzeit der Nutzerendgeräte muss dieses Intervall klein genug gewählt werden, um eine Gleichverteilung der Geschwindigkeiten zu erreichen. Weiterhin wurden die Ergebnisse, der analytischen Modelle für die Berechnung der SR-ARQ-Bedienzeit und der Approximation der Verweilzeit der SDU-Pakete im Übertragungssystem, erfolgreich simulativ überprüft. Mittels vergleichender Simulationsstudien wurde das hybride Simulationsmodell überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass der HEKATE Simulator in der Lage ist das Langfristverhalten von Funkzugangssystemen basierend auf UMTS und GSM/EGPRS ausreichend genau wiederzugeben. Die Korrektheit der Ergebnisse für sehr kleine Zeiträume hängt sehr von der Abbildungsgenauigkeit der verwendeten analytischen Modelle hinsichtlich transients Übergänge ab. Dies muss für die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Modelle zukünftig noch intensiver mit Hilfe von System-Level-Simulationen untersucht werden.

Der große Vorteil des Simulators liegt im geringen Ressourcenverbrauch. Die Verwendung des hybriden Simulationsmodells ermöglicht die Untersuchung von umfangreichen Szenarien in kurzer Zeit - typischerweise innerhalb weniger Minuten bis Stunden. Die im Abschnitt 5.2.3 und Kapitel 6 durchgeführten Simulationsstudien benötigten pro Simulationslauf zwischen 30 Sekunden und 20 Minuten CPU-Zeit bei einem Speicherbedarf von fünf bis 23 Mibyte.

Der Einsatz des Modellierungsframeworks zur Untersuchung von CRRM-Szenarien wurde im Kapitel 6 dargestellt. Es wurde die erfolgreiche Überprüfung der Ergebnisse eines Markovmodells für einen Call Admission Control Algorithmus beschrieben. Die diversitäre Modellbildung (Simulationsmodell, Markovmodell) führte zu gleichwertigen Ergebnissen. Weiterhin wurde der Einsatz eines Lösungsalgorithmus für das Multiple-Knapsack-Problem in CRRM-Szenarien beschrieben. Der Einsatz des Algorithmus führte zu einer messbaren Verbesserung des stationären wie transienten Systemverhaltens. Durch den Einsatz des Algorithmus sank die Zahl der erfolglosen Verbindungen ebenso die Übertragungsdauer für SDU-Pakete. Anhand der betrachteten Beispiele wurde verdeutlicht, dass Lösungsalgorithmen für Multikriterien-Optimierungsprobleme und Ressourcenverwaltungsabläufe mit HEKATE abgebildet und untersucht werden können.

8 Ausblick

8.1 Forschungsmöglichkeiten

Der entwickelte HEKATE-Simulator soll für die Entwicklung, Bewertung und Anwendung von CRRM-Algorithmen unter Berücksichtigung der beschriebenen CRRM-Szenario-Randbedingungen eingesetzt werden. Besonderes Augenmerk soll auf eine Kosten-Nutzen-Analyse und die Analyse des Einflusses gealterter oder fehlerhafter Informationen gelegt werden. Untersucht werden soll die Eignung von CRRM-Algorithmen in unterschiedlichen zentralen bis dezentralen Szenarien mit unterschiedlich großen Service- und Mobilitätsdynamiken. Es soll erfasst werden welche Einflussgrößen unter welcher Multikriterien-Optimierungsmethode den Erfolg von CRRM am stärksten beeinflussen.

Besonderes Interesse soll auch der Untersuchung von Modellierungsannahmen für die analytische Modellierung von CRRM gelten. Überprüft werden soll welche Verteilungen unter bestimmten Szenariorahmenbedingungen entstehen. Der Begriff Verteilung bezieht sich dabei unter anderem auf räumliche Nutzerverteilungen, Verteilungen des Handover-Prozesses, der Verweilzeiten und der Zwischenankunftszeiten neuer Verbindungen. Zum besseren Verständnis werden beispielhaft drei mögliche Fragestellungen aufgeführt:

- Welchen Einfluss hat die Blockierungswahrscheinlichkeit in bestimmten Zellen (unter verschiedenen CRRM-Algorithmen) auf die räumliche Verteilung der aktiven Verbindungen in der Umwelt.
- Welchen Einfluss hat die Mobilität der Nutzer und die räumliche Verteilung der Zellen auf die Verteilung der Verweilzeiten der Verbindungen in den Zellen.
- Welchen Einfluss haben die Anpassung von Datenraten und die damit verbundene Variable Anzahl von aktiven Verbindungen in der Zelle auf den Handover-Prozess.

Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht die Idee: Das Random-Waypoint-Modell wurde intensiv untersucht. Es ist möglich tatsächlich resultierende Positions- und Geschwindigkeitsverteilungen vorherzusagen, die sich von den initialen Verteilungen unterscheiden. Ähnliche Effekte existieren auch in Kommunikationsnetzen mit unterschiedlichen Funkzugangstechnologien. Verbindungen mit niedrigen Datenraten verweilen länger im System als Verbindungen mit hohen Datenraten bei ähnlichen zu übertragenden Datenvolumina. Aus der unterschiedlichen mittleren Anzahl von Diensten im System resultieren andere Blockierungs- und Handover-Wahrscheinlichkeiten. Analytische Modelle für

Algorithmen, die Datenraten von Verbindungen anpassen oder Verbindungen in unterschiedliche Netze verschieben, müssen diesen Zusammenhang berücksichtigen.

Die Auswertungsfunktionen von OMNeT++ (Erfassung von Histogrammen, transienten Verläufen und stationären Größen) und die entwickelte Skriptsammlung zur Weiterverarbeitung der OMNeT++ Ausgaben ermöglichen dabei eine detaillierte Beobachtung von internen Prozessen innerhalb und zwischen den Modellkomponenten im HEKATE Simulator.

Es soll weiterhin überprüft werden, inwieweit vereinfachende Annahmen Einfluss auf die Vorhersagequalität der analytischen Modelle haben. Die Ergebnisse der Simulation werden mit den Ergebnissen des analytischen Modells verglichen und es wird ermittelt welche Szenarioänderungen den größten Einfluss auf die Vorhersagequalität haben.

Die vom Modellierungsframework vorgegebene abstrakte Sicht auf CRRM ermöglicht die Untersuchung allgemeiner Eigenschaften der CRRM-Algorithmen. Eine Vertiefung der gewonnen Erkenntnisse mittels System-Level Simulatoren oder Messaufbauten soll Gegenstand zukünftiger Kooperationen werden.

Die angestrebten zukünftigen Forschungsvorhaben sind zusammenfassend durch folgende Punkte charakterisiert:

- Untersuchung der Eignung von CRRM-Algorithmen in unterschiedlichen Szenarien.
- Überprüfung von Verteilungsannahmen und Erkenntnisse zur Einsetzbarkeit analytischer Methoden zur Bewertung von CRRM-Algorithmen.
- Ermittlung von Methoden zur szenarioabhängigen Vorhersage von Parametern für Verteilungen in CRRM-Szenarien.

8.2 HEKATE Erweiterungen

Für die Untersuchung aktueller oder zukünftiger Funkzugangstechnologien müssen die analytischen Modelle hierfür in den Simulator implementiert werden. Eine erste Voruntersuchung gab es am Lehrstuhl hinsichtlich der Implementierung des 802.11 Standards [Stam2007, Kram2008]. Auch [LaSC2008] bietet hier einen interessanten Lösungsansatz. Ansätze für die analytische Modellierung von HSPA werden in [Mäder2008] vorgestellt. Für eine erweiterte Abbildung der gebotenen Dienstqualität wäre eine zusätzliche analytische Modellierung des funkzugangstechnologieabhängigen Verhaltens höherer Schichten im ISO/OSI Modell wie z.B. TCP möglich. Arbeiten hierzu finden sich z.B. in [KhTr2004].

Besonderes Augenmerk bei der Auswahl und Entwicklung von analytischen Modellen muss dabei auf die Berücksichtigung transienter Vorgänge gelegt werden. Dazu muss auch der Einfluss von Gruppenankünften besser berücksichtigt werden. Evtl. bietet die umfangreiche Forschung zu BMAP-Modellen (Batch Markovian Arrival Process) hier-

zu zukünftig eine Lösung. z.B. [LiLTGG2006]. Für die Verwendung im hybriden Simulationsmodell muss jedoch auf eine geringe Berechnungskomplexität der Lösung geachtet werden.

Ad-hoc Netze werden momentan nicht vom HEKATE Simulator unterstützt. Hierfür müsste ein Modell einer RAS-Komponente existieren, welches auf den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Prinzipien für Sensornetzwerke beruht. Über eine solche Komponente könnten auch Szenarien untersucht werden, die eine um Ad-hoc Elemente erweiterte Infrastruktur vorsehen.

Um den Einfluss unterschiedlicher Mobilitäts- und Dienstanforderungsmodelle zu untersuchen, müssen diese an das hybride Simulationsmodell angepasst und in den HEKATE Simulator implementiert werden.

Anhang

Symbolik der Ablaufdiagramme

Das Ablaufdiagramm (Bild A.1) ist an die Symbolik eines UML 2 Aktivitätsdiagramms angelehnt. Nachrichten/Ereignisse, die von extern (aus der Quelle) auf die Modellkomponente treffen, bewirken den Start einer vordefinierten Ereignisroutine (Vorgang). Dieser Vorgang kann Folgevorgänge anstoßen. Die Trennung in einzelne Vorgänge dient der Verdeutlichung des internen Ablaufs. Die Übergänge können durch Selbstnachrichten (zeitbehaftet) oder Funktionsaufrufe (zeitlos) ausgelöst werden. Nachrichten oder Ereignisse, die zu einem Folgevorgang führen, können über ein Vervielfältigungssymbol dupliziert werden und damit mehrere Folgevorgänge (intern oder extern) anstoßen. Bestimmte Übergänge können je nach aktuellem Zustand unterschiedliche Folgevorgänge anstoßen. Dies wird durch eine bedingte Verzweigung ausgedrückt. Dieses Symbol kann auch als Stoppsymbol verwendet werden. In dem Fall wird der Übergang abgebrochen und der Folgevorgang wird aufgrund fehlender Randbedingungen nicht gestartet. Externe Folgevorgänge werden über Nachrichten an extern angestoßen und verlassen über die Senke die Modellkomponente.

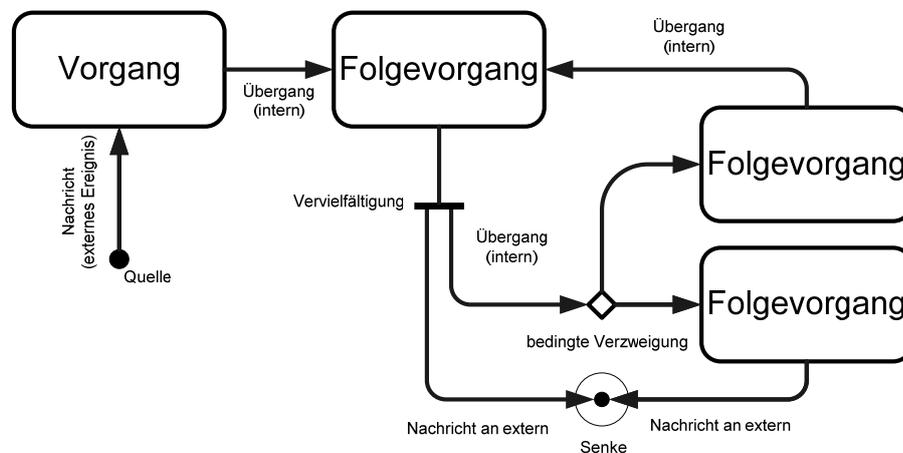


Bild A.1 Symbolik des Ablaufdiagramms

Erweiterte Symbolik der MSC

Die Symbolik beruht auf dem Standard „Message Sequence Chart (MSC)“ ITU Z.120 von 1999 - wird aber erweitert um Selbstnachrichten und die Möglichkeit Nachrichten aufgrund von Ereignissen zu suspendieren und zu löschen. Die verwendete Symbolik für diese Erweiterungen wird in Bild A.2 dargestellt.

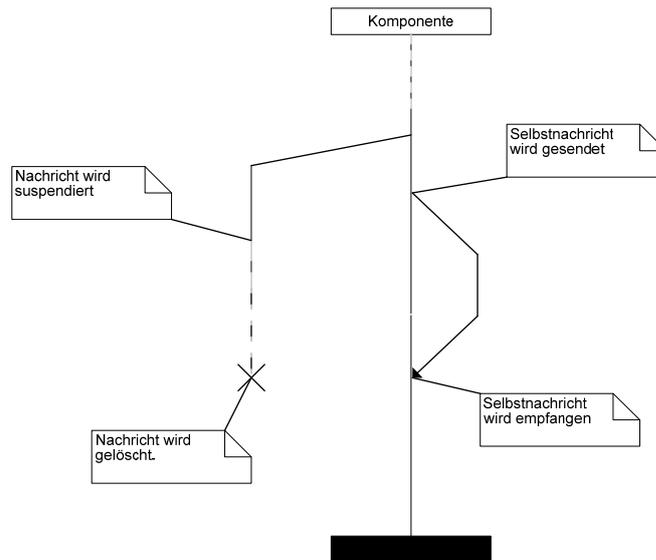


Bild A.2 Erweiterung der MSC Symbolik um Selbstnachrichten, Suspendierung und Löschen

Literaturverzeichnis

- AN ABRAMOWICZ, Henrik: Ambient Networks. URL <http://www.ambient-networks.org/> - Aktualisierungsdatum: 19.10.2007. – E-Mail: info@ambient-networks.org
- ARAGORN MÄHÖNEN, Petri: Adaptive Reconfigurable Access and generic Interfaces for Optimization in Radio Networks – ARAGORN. URL <http://www.ict-aragorn.eu> - Aktualisierungsdatum: 07.04.2009. - E-Mail: pma-at-mobnets.rwth-aachen.de
- AROMA CASADEVALL, Fernando: Advanced Resource Management Solutions for Future All IP Heterogeneous Mobile Radio Environments – AROMA. URL <http://www.aroma-ist.upc.edu/> - Aktualisierungsdatum: 27.10.2008. – E-Mail: ferranc@tsc.upc.edu
- BaJL2005 BARAEV, A. ; JORGUSESKI, L. ; LITJENS, R.: Performance Evaluation of Radio Access Selection Procedures in Multi-Radio Access Systems. In: *The 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'05)*, Aalborg, Dänemark, 17.-22. September, 2005
- BeLi2006 BERGGREN, F. ; LITJENS, R.: Performance analysis of access selection and transmit diversity in multi-access networks. In: *12th annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Los Angeles (CA), USA, 23. – 29. September, 2006
- BeNa2009 BEJAOU, T. ; NASSER, N.: Efficient call admission control scheme for 4G wireless networks. In: *Wireless Communications and Mobile Computing*, Band 9 (2009), Nr. 4, S. 489-499
- Bitkom2008 GOLDHAMMER, Klaus (Hrsg.): *Mobile Life 2012 - Mobile Life in the 21st century. Status quo and outlook in Germany*. Deutschland: Goldmedia GmbH - Media Consulting & Research, 2008. – Auftraggeber Bitkom
- BIWKS2007 BLAU, I. ; WUNDER, G. ; KARLA, I. ; SIEGLE, R.: Cost based Heterogeneous Access Management in Multi-Service, Multi-System Scenarios. In: *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*, Athen, Griechenland, 3.-7. September, 2007
- BoDFNO2002 BOURSE, D. ; DILLINGER, M. ; FARNHAM, T. ; NAVARRO, R. ; OLAZIREGI, N. ; WIEBKE, T.: SDR Equipment in Future Mobile Networks. In: *IST Summit 2002*, Thessaloniki, Greece, 2002
- BoGMT1998 BOLCH, G. ; GREINER, S. ; De MEER, H. ; TRIVEDI, K. S.: *Queueing Networks and Markov Chains*. 1. Aufl. New York : John Wiley and Sons, 1998
- Boud2005 LE BOUDEC J.-Y.: *Understanding the Simulation of Mobility Models with Palm Calculus*. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale, Technischer Bericht, 2005. – TR-2005-33
- BoVo2006 LE BOUDEC J.-Y. ; VOJNOVIC, M.: *The Random Trip Model: Stability, Stationary Regime, and Perfect Simulation*. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale, Technischer Bericht, 2006. - TR-2006-26
- BrBr2006 BRANDT, A. ; BRANDT, M.: A sample path relation for the sojourn times in G/G/1-PS systems and its applications. In: *Queueing Systems Theory and Applications*, Band 52 (2006), Nr. 4, S. 281-286
- Bria2006 BRIA, Aurelian: *Hybrid Cellular-Broadcasting Infrastructure Systems : Radio Resource Management Issues*. Stockholm, Universität, KTH Communication Systems, Licentiate Thesis, 2006
- CAUTION KYRIAZAKOS, Sofoklis: Capacity and Network Management Platform for increased Utilisation of Wireless Systems of next Generation++ – CAUTION++. URL <http://www.telecom.ece.ntua.gr/CautionPlus/> - Aktualisierungsdatum: 04.11.2003. - E-Mail: skyriazakos@telecom.ntua.gr
- ChBB2006 CHEUNG-S.-K. ; Van Den BERG, H. ; BOUCHERIE, R.J.: Insensitive bounds for the moments of the sojourn time distribution in the M/G/1 processor-sharing queue. In: *Queueing Systems*, Band 53 (2006), Nr. 1-2, S. 7-18
- ChDa2003 CHITRE, V. A. ; DAIGLE, J. N.: Performance of IP-Based Services over GPRS. In: *IEEE Transactions on Computers*, Band 52 (2003), Nr. 6, S. 727-741
- ChLi1999 CHOI, H. ; LIMB, J.: A Behavioral Model of Web Traffic. In: *Proc. of IEEE International Conference of Networking Protocol (ICNP 1999)*, Toronto, Kanada, 31. Oktober-3. November, 1999
- ChSHCT2001 CHAN, P.M.L. ; SHERIFF, R.E. ; HU, Y.F. ; CONFORTO, P. ; TOCCI, C.: Mobility management incorporating fuzzy logic for heterogeneous a IP environment. In: *IEEE Communications Magazine*, Band 39 (2001), Nr. 12, S. 42-51
- ChYYFJ2006 CHEN, J. ; YU, K. ; YANG, G. ; FENG, Z.Y. ; JI, Y. ; ZHANG, P. ; HUANG, Q. ; BAI, Y. ; CHEN, L. ; MINOMO, M.: An Ecology-Based Adaptive Network Control Scheme for Radio Resource Management in Heterogeneous Wireless Networks. In: *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, Cavalese, Italien, 11.-13. Dezember, 2006

- DaSJ1997 DAS, S. K. ; SEN, S. K. ; JAYARAM, R.: A structured channel borrowing scheme for dynamic load balancing in cellular networks. In: *17th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 1997)*, Baltimore (MD), USA, 27.-30. Mai, 1997
- DePSTV2002 DEMESTICHAS, P. ; PAPADOPOULOU, L. ; STAVROULAKI, V. ; THEOLOGOU, M. ; VIVIER, G. ; MARTINEZ, G. ; GALLIANO, F.: Wireless beyond 3G: managing services and network resources. In: *IEEE Computer*, Band 35 (2002), Nr. 8, S. 80-82
- DeSt2004 DEMESTICHAS, P. ; STAVROULAKI, V.: Issues in introducing resource brokerage functionality in B3G composite radio environments. In: *IEEE Wireless Communications*, Band 11 (2004), Nr. 5, S. 32- 40
- DFG-1140 ZITTERBART, M.: Basissoftware für Selbstorganisierende Infrastrukturen für Vernetzte Mobile Systeme - DFG Schwerpunktprogramm 1140. URL <http://www.tm.uka.de/forschung/SPP1140/> - Aktualisierungsdatum: 28.01.2008. – E-Mail: zit@tm.uka.de
- DFG-AKOM EBERSPÄCHER, Jörg: Adaptivität in heterogenen Kommunikationsnetzen mit drahtlosem Zugang - AKOM. URL <http://www.lkn.ei.tum.de/AKOM/> - Aktualisierungsdatum: 22.02.2006. – E-Mail: joerg.eberspaecher@tum.de
- E3 KÖNIG, Wolfgang: End-to-End Efficiency (E³). URL <http://www.ict-e3.eu> – Aktualisierungsdatum: 14.04.2009. - E-Mail: Wolfgang.Koenig@alcatel-lucent.de
- EVEREST CASADEVALL, Fernando: Evolutionary Strategies for Radio Resource Management in Cellular Heterogeneous Networks – EVEREST. URL <http://www.everest-ist.upc.es/> - Aktualisierungsdatum: 16.01.2006. - E-Mail: ferranc@tsc.upc.edu
- FaCh2006 FALOWO, O.E. ; CHAN, H.A.: Fuzzy Logic Based Call Admission Control for Next Generation Wireless Networks. In: *3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '06)*, Valencia, Spanien, 5.-8.September, 2006
- FaCh2007 FALOWO, O.E. ; CHAN, H. A: Adaptive bandwidth management and joint call Admission control to enhance system utilization and QoS in heterogeneous wireless networks. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Band 2007 (2007), Nr 3. - Artikelnr.: 34378
- FaCh2008 FALOWO, O. E. ; CHAN, H. A.: Joint Call Admission Control Algorithms: Requirements, approaches, and design considerations. In: *Elsevier Computer Communications*, Band 31 (2008), Nr. 6, S. 1200-1217
- Färb2007 FÄRBER, Johannes Wolfgang: *Modellierung von IP-basiertem Paketverkehr ausgewählter interaktiver Dienste*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme, Dissertation, 2007
- Fish2001 FISHMAN, G.S.: *Discrete-Event Simulation – Modelling, Programming, and Analysis*. 1. Aufl. New York : Springer Verlag, 2001
- FuZa2005 FURUSKAR, A. ; ZANDER, J.: Multiservice allocation for multiaccess wireless systems. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Band 4 (2005), Nr. 1, S. 174-184
- GePSA2008 GELABERT, X. ; PEREZ-ROMERO, J. ; SALLENT, O. ; AGUSTI, R: A Markovian Approach to Radio Access Technology Selection in Heterogeneous Multiaccess/Multiservice Wireless Networks. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Band 7 (2008), Nr. 10, S. 1257-1270
- GiAPS2006 GIUPPONI, L. ; AGUSTÍ, R. ; PÉREZ-ROMERO, J. ; SALLENT, O.: A framework for JRRM with resource reservation and multiservice provisioning in heterogeneous networks. In: *Mobile Networks and Applications*, Band 11 (2006), Nr. 6, S. 825-846
- GrPM2005 GRAJA, H. ; PERRY, P. ; MURPHY, J.: A Statistical Estimation of Average IP Packet Delay in Cellular Data Networks. In: *Proc. of IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, New Orleans, USA , 13.-17. März, 2005
- GrWo2007 GRABE, Martin ; WOLFAHRT, Björn: *Simulative Validierung analytischer SR-ARQ Modelle unter Verwendung von OMNeT++*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Bachelor Abschlussarbeit, 2007. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- GuJo2003 GUSTAFSSON, Eva ; JONSSON, Annika: Always best connected. In: *IEEE Wireless Communications*, Band 10 (2003), Nr. 1, S. 49-55
- Gunt2007 GUNTHER N. J.: *Guerrilla Capacity Planning – a Tactical Approach to Planning for Highly Scalable Applications and Services*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2007
- HaFa2008 HASIB, A. ; FAPOJUWO, A.O.: Analysis of Common Radio Resource Management Scheme for End-to-End QoS Support in Multiservice Heterogeneous Wireless Networks. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 57 (2008), Nr. 4, S. 2426-2439
- Hamr2009 EL HAMRI, Mokhtar: *Algorithmen zur Lösung des Multiple Knapsackproblems*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Projektseminar, 2009. – Betreuer: Bruno Müller-Clostermann, Milen Tilev, Andreas Pillekeit

- HaVSW2001 HAVINGA, P.J.M. ; VOGNILD, L.K. ; SMIT, G.J.M. ; WU, G.: Resource Management for Seamless Mobile Services. In: *The fourth international symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC 2001)*, 2001
- HeiseNews2009 VBR (Autorenkürzel): Datenhunger der iPhone-Nutzer belastet Netzbetreiber. In: *Heise News*, URL <http://www.heise.de/mobil/Datenhunger-der-iPhone-Nutzer-belastet-Netzbetreiber--newsticker/meldung/137613> - Aktualisierungsdatum: 11.05.2009 13:00 Uhr. – E-Mail: vbr@ct.heise.de
- HiGDSZ2004 HILDEBRAND, M. ; PIAO, G. ; DAVID, K. ; SIGLE, R. ; ZELLER, D. ; KARLA, I.: Performance investigation of multi standard radio resource management for packet switched services. In: *IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004)*, Los Angeles, USA, 26.-29. September, 2004
- Hild2005 HILDEBRAND, Matthias: *Optimized Network Access in Heterogeneous Wireless Networks*. Kassel, Universität, Fachbereich Elektrotechnik, Diss., 2005
- HoJG2007 HORRICH, S. ; JAMAA, B. S. ; GODLEWSKI, P.: Adaptive Vertical Mobility Decision in Heterogeneous Networks. In: *Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC '07)*, Guadeloupe, Frankreich, 4.-9. März, 2007
- Hos2008 HOSSAIN, Ekram (Hrsg.): *Heterogeneous Wireless Access Networks – Architectures and Protocols*. 1. Aufl. New York : Springer, 2008.
- HoTo2001 HOLMA, H., TOSKALA, A.: *WCDMA for UMTS - Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. überarbeitete Aufl. New York : John Wiley and Sons, 2001
- InVNC2008 INZERILLI, T ; VEGNI, A. M. ; NERI, A. ; CUSANI R.: A Location-Based Vertical Handover Algorithm for Limitation of the Ping-Pong Effect. In: *IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication (WiMob 2008)*, Avignon, Frankreich, 12.-14. Oktober, 2008
- KaHB2004 KARABUDAK, D. ; HUNG, C.-C. ; BING, B.: A call admission control scheme using genetic algorithms. In: *Symposium on Applied Computing: Mobile computing and applications (MCA 2004)*, Nicosia, Zypern, 14.-17. März, 2004
- KaKY2005 KAFLE V. P. ; KAMIOKA E. ; YAMADA S.: Maximizing user satisfaction based on mobility in heterogeneous mobile multimedia communication networks : Mobile multimedia communications. In: *IEICE transactions on communications*, Band 88 (2005), Nr. 7, S. 2709-2717
- KaMC2007 KACZMARCZYK, Martin: *Web-based Modeling and Evaluation of Call Centers*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Projektseminar, 2007. – Betreuer: Bruno Müller-Clostermann, URL <http://sysmod.icb.uni-due.de/index.php?id=cct>
- KhTr2004 KHALIFA, I. ; TRAJKOVIC, L.: An overview and comparison of analytical TCP models. In: *Proc. of International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2004)*, Vancouver, Kanada, 23.-26. Mai, 2004
- Klei1975 KLEINROCK Leonard: *Queueing Systems – Volume 1: Theory*. 1. Aufl. New York : John Wiley and Sons, 1975
- Köll1974 KÖLLERSTROM, J.: Heavy traffic theory for queues with several servers. In: *Journal of Applied Probability*, Band 11 (1974), S. 544-552
- Kram2008 KRAMER, Urs: *Simulative Validierung von analytischen IEEE 802.11 Modellen*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Bachelor-Abschlussarbeit, 2008. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- Kuro2010 KUROWSKY, Nils: *Simulative Überprüfung einer analytischen Verweilzeitapproximation für G/G/1-Systeme unter der Bedienstrategie Processor Sharing*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Projektseminar, 2010. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- KyKGCJ2003 KYRIAZAKOS, S. ; KARETSOS, G ; GIANDOMENICO, F. ; CASADEVAL, F. ; JUBERA, M. ; MURA, I. ; TSELIKAS, N. ; VLAHODIMITROPOULOS, K.: *Managing Resources in Heterogeneous Wireless Networking Environments*. Athen, National Technical University, Technical Report, 2003. - 2003-TR-45
- LaKe2000 LAW, A. M. ; KELTON, W.D.: *Simulation Modelling and Analysis*. 3. Aufl. Boston : McGraw-Hill, 2000
- LaSC2008 LAUWENS, B. ; SCHEERS, B. ; Van de Capelle, A.: Queuing analysis of multi-hop CSMA/CA wireless networks handling many traffic flows. In: *Proc. of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, Marseille, Frankreich, 03.-07. März, 2008
- LiLR2004 LI Ma ; FEI Yu ; LEUNG, V.C.M. ; RANDHAWA, T.: A new method to support UMTS/WLAN vertical handover using SCTP. In: *Wireless Communications*, Band 11 (2004), Nr. 4, S. 44-51
- LiLTGG2006 LI, X. ; LI, S. ; TIMM-GIEL, A. ; GORG C. ; SCHEL B, R.: Delay in UMTS radio access networks: analytical study and validation. In: *Australian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC 2006)*, Melbourne, Australien, 4.-6. Dezember, 2006

- Linc2007 LINCKE, S.J.: Validation of a Load Shared Integrated Network with Heterogeneous Services. In: *40th Annual Simulation Symposium (ANSS'07)*, Norfolk (VA), USA, 26.-28. März, 2007
- LuBNC2005 LUO, W. ; BALACHANDRAN, K. ; NANDA, S. ; CHANG, K.K.: Delay analysis of selective-repeat ARQ with application to link adaptation in wireless packet data systems. In: *IEEE transactions on wireless communications*, Band 4 (2005), Nr. 3, S. 1017-1029
- MaCSF2006 MARIZ, D. ; CANANEA, I. ; SADOK, D. ; FODOR, G.: Simulative analysis of access selection algorithms for multi-access networks. In: *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2006)*, Buffalo, USA, 26.-29. Juni, 2006
- Mäder2008 MÄDER, Andreas: Performance Models for UMTS 3.5G Mobile Wireless Systems. Würzburg, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Informatik, Dissertation, 2008
- MaRG2007 MAROJEVIC, Vuk ; REVES, Xavier ; GELONCH, Antoni: Cooperative Resource Management in Cognitive Radio. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC 2007)*, Glasgow, Großbritannien, 24.-28. Juni, 2007
- McZ2004 MCNAIR, J. ; ZHU, F.: Vertical handoffs in fourth-generation multinet network environments. In: *IEEE Wireless Communications*, Band 11 (2004), Nr. 3, S. 8-15
- Meli2007 MELIA, Telemaco: *IP Converged Heterogeneous Mobility in 4G networks : Network-side Handover Management Strategies*. Göttingen, Universität, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten, Diss., 2007
- MiMa1999 MITOLA, Joseph ; MAGUIRE, Gerald: Cognitive radio: making software radios more personal. In: *IEEE Personal Communications*, Band 6 (1999), Nr. 4, S. 13-18
- MiMAK2008 MIRMOTAHHARY, N. ; MAFINEJAD, Y. ; ATBAEI, F. ; KOUZANI, A.: An Adaptive Policy-Based Vertical Handoff Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks. In: *IEEE 8th International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2008): Workshops*, Sydney, Australien, 8.-11. Juli, 2008
- MoMBBT2003 MOHYELDIN, E. ; MOTTE, N. ; BACHMANN, J. ; BERZOSA, F. ; TOUCHAIS, S. ; BARET, S.: Concepts and Scenarios for Intersystem Handover in Heterogeneous Environments. In: *Proc. 12th IST Mobile Wireless Communications Summit 2003*, Aveiro, Portugal, 2003
- MuPe2007 MURRAY, K. ; PESCH, D.: Call Admission and Handover in Heterogeneous Wireless Networks. In: *IEEE Internet Computing*, Band 11 (2007), Nr. 2, S. 44-52
- NaHH2006 NASSER, N. ; HASSWA, A. ; HASSANEIN, H.: Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. In: *IEEE Communications Magazine*, Band 44 (2006), Nr. 10, S. 96-103
- Nass2006 NASSER, N.: A theoretical approach for service provider decision in heterogeneous wireless networks. In: *3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006)*, Las Vegas, USA, 8.-10. Januar, 2006
- NiHo2005 NIYATO, D. ; HOSSAIN, E.: Call admission control for QoS provisioning in 4G wireless networks: issues and approaches. In: *IEEE Network*, Band 19 (2005), Nr. 5, S. 5-11
- NiHo2008 NIYATO, D. ; HOSSAIN, E.: A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Band 7 (2008), Nr. 3, S. 332-345
- NiPI2010 De NITTO PERSONÈ, V. ; PILLEKEIT, A. ; IACARI, M.: Investigation of the Multimedia Adaptive Threshold Strategy for Mobile Integrated Services Networks. In: *15th International GI/ITG Conference on "Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems" and "Dependability and Fault Tolerance" (MMB&DFT 2010)*, Essen, Deutschland, 15.-17. März, 2010
- OMNeT VARGA, A.: Object-oriented Modular discrete event Network simulation Tool - OMNeT++. URL <http://www.omnetpp.org/> - Zugriffsdatum: 05.12.2009. – E-Mail: andras@omnetpp.org
- OrMM2006 ORMOND, O. ; MURPHY, J. ; MUNTEAN, G.-M.: Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC '06)*, Istanbul, Türkei, 11.-15. Juni, 2006
- PeCa2009 DE NITTO PERSONE, V. ; CAMPAGNA, E.: Adaptive bandwidth allocation and admission control for wireless integrated services networks. In: *2nd International Workshop on the Evaluation of Quality of Service through Simulation in the Future Internet (QoSSim 2009)*, Rom, Italien, 6. März, 2009
- PeSAKB2005 PEREZ-ROMERO, J. ; SALLENT, O. ; AGUSTI, R. ; KARLSSON, P. ; BARBARESI, A. ; WANG, L. ; CASADEVALL, F. ; DOHLER, M. ; GONZALEZ, H. ; CABRAL-PINTO, F.: Common radio resource management: functional models and implementation requirements. In: *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2005)*, Berlin, Germany, 11.-14. September, 2005

- PiDJMT2004 PILLEKEIT, A. ; DERAKHSHAN, F. ; JUGL, E. ; MITSCHELE-THIEL, A.: Force-based Load Balancing in Co-located UMTS/GSM Networks. In: *60th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC 2004)*, Los Angeles, USA, 26.-29. September, 2004
- PiDKS2006 PIAO, G. ; DAVID, K. ; KARLA, I. ; SIGLE, R.: Performance of Distributed MXRRM. In: *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)*, Helsinki, Finland, 11.-14. September, 2006
- PiDMC2007 PILLEKEIT, A. ; DERAKHSHAN, F. ; MÜLLER-CLOSTERMANN, B.: Modeling of Common Radio Resource Management Scenarios. In: *10th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS 2007) part of the 2007 Spring Simulation Multiconference (SpringSim 2007)*, Norfolk (VA), USA, 25.-29. März, 2007
- PiMC2009 PILLEKEIT, A. ; MÜLLER-CLOSTERMANN, B.: A Simulation Framework for the Evaluation of Scenarios and Algorithms for Common Radio Resource Management. In: *2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SimuTools 2009)*, Rom, Italien, 2.-6. März, 2009
- QuMB1998 QUADROS, G. ; MONTEIRO, E. ; BOAVIDA, F.: A QoS Metric for Packet Networks. In: *SPIE's Symposium on Voice, Video, and Data Communications conference on Quality of Service Issues Related to Internet*, Boston (MA), USA, 2.-5. November, 1998
- Rein2008 REINARTZ, Christian: *Ein Visualisierungstool für die Kopplung von analytischen Modellen mobiler Netze*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Projektseminar, 2008. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- Rein2009 REINARTZ, Christian: *Anwendung von Multiple Knapsack Algorithmen in Common Radio Resource Management Szenarien*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Bachelor Abschlussarbeit, 2009. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- ReJFLU2005 REICHL, P. ; JORDAN, N. ; FABINI, J. ; LAUSTER, R. ; UMLAUFT, M. ; JÄGER, W. ; ZIEGLER, T. ; EICHINGER, P. ; POSPISCHIL, G. ; WIEDERMANN, W.: Wireless Inter-System Quality-of-Service: A Practical Network Performance Analysis of 3G and Beyond. In: *14. ITG/GI-Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS 2005)*, Kaiserslautern, Deutschland, 28. Februar - 3. März, 2005
- ReKJCH2007 RENK, T. ; KLOECK, C. ; JONDRAL, F.K. ; CORDIER, P. ; HOLLAND, O. ; NEGREDO, F.: Spectrum Measurements supporting Reconfiguration in Heterogeneous Networks. In: *16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Budapest, Ungarn, 1.-5. Juli, 2007
- RePi2009 REINARTZ, C. ; PILLEKEIT, A.: Anwendung von Multiple-Knapsack Algorithmen in Common Radio Resource Management Szenarien. In: *MMBnet 2009 - Workshop Universität Hamburg*, Hamburg, Deutschland, 10.-11. September, 2009
- RoRC2008 ROMIRER, P. ; RICCIATO, F. ; COLUCCIA, A.: Explorative Analysis of One-way Delays in a Mobile 3G Network. In: *16th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN 2008)*, Cluj-Napoca, Rumänien, 3.-6. September, 2008
- Sal2004 SALKINTZIS, A.K.: Interworking techniques and architectures for WLAN/3G integration toward 4G mobile data networks. In: *IEEE Wireless Communications*, Band 11 (2004), Nr. 3, S. 50- 61
- SaMa2007 SAITO, M. ; MATSUMOTO, M.: SIMD-Oriented Fast Mersenne Twister: a 128-bit Pseudorandom Number Generator. In: KELLER, A. ; HEINRICH S. ; NIEDERREITER, H. (Hrsg.): *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 2006*. 1. Aufl. New York : Springer Verlag, 2007. - S. 607-622. - DOI:10.1007/978-3-540-74496-2_36
- SaPG2007 SACHS, J. ; PRYTZ, M. ; GEBERT, J.: Multi-access Management in Heterogeneous Networks. In: *IEEE Wireless Personal Communications*, Springer, November, 2007
- ScSt1997 SCHNEKENBURGER, T. ; STELLNER, G.: *Dynamic load distribution for parallel applications*. 1. Aufl. Stuttgart : Teubner Verlag, 1997
- ShSa1983 SHANTHIKUMAR, J.G., SARGENT, R.G.: A Unifying View of Hybrid Simulation/Analytic Models and Modeling. In: *Operations Research*, Band 31 (1983), Nr.6, S. 1030-1052. - DOI: 10.1287
- SoJZS2005 SONG, W. ; JIANG, H. ; ZHUANG, W. ; SHEN, X.: Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking. In: *IEEE Network*, Band 19 (2005), Nr. 5, S. 12-18
- SoNCCP2005 SOUSA, V.A. ; NETO, R.A.O. ; CHAVES, F.S. ; CARDOSO, L.S. ; PIMENTEL, J.F. ; CAVALCANTI, F.R.P.: Performance of access selection strategies in cooperative wireless networks using genetic algorithms. In: *Proceedings of the 15th World Wireless Research Forum Meeting (WWR'05)*, Paris, Frankreich, 8.-9. Dezember, 2005.
- SoZS2007 SONG, W. ; ZHUANG, W. ; SALEH, A.: Interworking of 3G cellular networks and wireless LANs. In: *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, Band 2 (2007), Nr.4, S. 237-247

- Spel2004 SPELTACKER, Wilfried: persönliche Kommunikation. Kontakt: wspeltacker@lucent.com, ehemals Lucent Technologies Network Systems GmbH
- Stam2007 STAMER, Jan: *Bewertung und Vergleich analytischer Modelle für Protokolle nach IEEE 802.11*. Essen, Universität Duisburg-Essen, ICB, Bachelor-Abschlussarbeit, 2007. – Betreuer: Andreas Pillekeit, Bruno Müller-Clostermann
- Stuc2003 STUCKMANN, Peter: *Traffic Engineering Concepts for Cellular Packet Radio Networks with Quality of Service Support*. Aachen, RWTH Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, 2003
- SuPO2004 I. M. SULIMAN, C. ; POMALAZA-RÁEZ, I. ; OPPERMANN, J.: Radio resource allocation in heterogeneous wireless networks using cooperative games. In: *Nordic Radio Symposium 2004 / Finnish Wireless Communications Workshop 2004 (NRS/FWCW 2004)*, Oulu, Finland, 16.-18. August, 2004
- TöHH2002 TÖLLI, A. ; HAKALIN, P. ; HOLMA, H.: Performance evaluation of common radio resource management (CRRM). In: *IEEE International Conference on Communications (ICC 2002)*, New York, USA, 28. April – 2. Mai, 2002
- TR 25.881 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network: *Improvements of RRM across RNS and RNS/BSS; (Release 5)*. Technischer Bericht, 2002. - (3GPP TR 25.881, Version 5.0.0)
- TR 25.891 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network: *Improvements of RRM across RNS and RNS/BSS (Post Rel-5); (Release 6)*. Technischer Bericht, 2003. - (3GPP TR 25.891, Version 0.3.0)
- VaSP2003 VANEM, E. ; SVAET, S. ; PAINT, F.: Effects of multiple access alternatives in heterogeneous wireless networks. In: *IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC 2003)*, New Orleans, USA, 16.-20. März, 2003
- WaANPS2007 WANG, L. ; AGHVAMI, H. ; NAFISI, N. ; PÉREZ-ROMERO, J. ; SALLEN, O. ; AGUSTÍ, R.: Coverage-based Common Radio Resource Management in heterogeneous CDMA/TDMA. In: *Cellular Systems Conference, 2nd International Workshop on eSafety and Convergence of Heterogeneous Wireless Networks*, New Orleans, Louisiana (USA), 11.-13. April, 2007
- WaWh2000 WARD, A.R. ; WHITT, W.: Predicting Response Times in Processor-Sharing Queues. In: *Proceedings of the Fields Institute Conference on Communication Networks*, 2000. - S. 1-29.
- Wiki2009 WIKIMEDIA : Wikipedia, the free encyclopedia. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page - Zugriffsdatum: 01.08.2009. – E-Mail: info@wikimedia.org
- WuMH2002 WU, G. ; MIZUNO, M. ; HAVINGA, P.J.M.: MIRAI Architecture for Heterogeneous Network. In: *IEEE Communications Magazine*, Band 40 (2002), Nr. 2, S. 126-134
- XiHR2007 XIE, J. ; HOWITT, I. ; RAJA, A.: Cognitive Radio Resource Management Using Multi-Agent Systems. In: *4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2007)*, Las Vegas, USA, 11.-13. Januar, 2007
- XiVe2005 XING, B. ; VENKATASUBRAMANIAN, N.: Multi-constraint dynamic access selection in always best connected networks. In: *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous 2005)*, San Diego, USA, 17.-21. Juli, 2005
- Ylia2005 YLIANTTILA, Mika: *Vertical Handoff and Mobility : System Architecture and Transition Analysis*. Oulu, Universität, Department of Electrical and Information Engineering, Diss., 2005
- YuKr2007 YU, F. ; KRISHNAMURTHY, V.: Optimal Joint Session Admission Control in Integrated WLAN and CDMA Cellular Networks with Vertical Handoff. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Band 6 (2007), Nr. 1, S. 126-139
- ZhMc2006 ZHU, F. ; MCNAIR, J.: Multiservice vertical handoff decision algorithms. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Band 2006 (2006), Nr. 2, S. 1-13. – Artikel ID 25861

Index

A	
AAA.....	21, 31
B	
BWU.....	87, 146
C	
CDMA.....	64
CRRM.....	2, 13
D.....	25, 33, 92
IM.....	25, 33, 90
Integrationsstufen.....	23
Level.....	22
Regelkreis.....	25
CS.....	65
D	
DCH.....	109
E	
ENV.....	30, 47
F	
Formelzeichen	
<i>a</i>	83
<i>A_{UE}</i>	57
<i>c</i>	150
<i>C_{CH}</i>	81, 82
<i>C_{ON}</i>	57
<i>C_{SF}</i>	86
<i>d</i>	85
<i>D</i>	54
<i>DATA_{ON}</i>	72, 88
<i>E</i>	85
<i>E[A]</i>	70, 71
<i>E[A_{UE}]</i>	57
<i>E[B(K)]</i>	72, 75
<i>E[B]</i>	71, 76
<i>E[N]</i>	74
<i>E[Q]</i>	74
<i>E[R]</i>	70, 71
<i>E[S]</i>	77, 78
<i>E[S i]</i>	67
<i>E[T_A]</i>	72
<i>E[T_I]</i>	67
<i>E[T_{ON}]</i>	61
<i>E[V]</i>	70, 77, 159
<i>E[W]</i>	78
<i>E_b/N₀</i>	83, 85
<i>F</i>	78, 79
<i>G</i>	126
<i>H</i>	67
<i>K</i>	71, 73, 74
<i>M</i>	71
<i>N_{Neben}</i>	57
<i>O_B</i>	148
<i>O_T</i>	148
<i>p</i>	150
<i>P</i>	54
<i>P[C]</i>	67
<i>P[n i]</i>	68
<i>P[S i]</i>	67
<i>P[S n]</i>	68
<i>P_e</i>	71, 73, 75
<i>Q</i>	71
<i>QoS</i>	55
<i>r</i>	84
<i>R</i>	83
<i>RTT</i>	73
<i>S_{Anforderung}</i>	57
<i>SF</i>	86
<i>S_{Gesamt}</i>	57
<i>S_{Haupt}</i>	57
<i>S_{Inhalt}</i>	57
<i>T_A</i>	61, 88
<i>T_{BFdown}</i>	67
<i>T_{BFup}</i>	67

T_C	67	H	
T_I	61, 99	HEKATE	10, 47
T_{Id}	67	I	
T_{lu}	67	ISHO	10
T_{OFF}	56, 95	J	
T_{ON}	56, 95	JCAC	2, 150
T_P	67	K	
T_{RT}	75	KLB	78
TTI	73, 75	M	
U	81	MATS	145
v	85	N	
$V[B(K)]$	72, 75	NACK	71
$VK[A]$	70	NED	45, 102
$VK[A_{UE}]$	57	O	
$VK[B]$	75	OMNeT++	45
w	150	P	
W_0	79	PDU	71
W_{CR}	83	PS	65, 77
x	150	R	
x/y	52	RAN	20
Y	81	RAS	10, 20, 31, 60
z	79	RAS HO	10
Z	84	RAT	10, 19
α	80	RLC	69
δ	83, 84	RRM	10, 20
ε	55	RTT	71
η	80, 85, 88	S	
Θ	70, 71	SDU	70
λ	148	SF	86
μ	79, 148	SNR	83
ρ	81	SR-ARQ	69
ρ_{AVG}	74	T	
ρ_{ch}	71	TDMA	64
ρ_{ch-est}	74	TTI	71
σ	79, 81		
φ	83, 85		
Ψ	74		
Ω	82		
G			
GMKP	150		

U

UE..... 10, 18, 20, 32, 53

W

WGAN..... 19

WLAN..... 19

WPAN..... 19

WWAN..... 19
