

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Informationstechnik

Kostenoptimale Dimensionierung von Mobil- funksystemen für Multiservice-Teilnehmer unter Berücksichtigung von Handover

Thomas Bregenzer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät
für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. Dr. Schäffler
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tröndle
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Lindenmeier

Tag der Prüfung: 15. Mai 2002

Kostenoptimale Dimensionierung von Mobil- funksystemen für Multiservice-Teilnehmer unter Berücksichtigung von Handover

Thomas Bregenzer

Vorwort

Ein Großteil der vorliegenden Arbeit entstand 1997/98, im letzten Jahr meiner Tätigkeit am Institut für Nachrichtentechnik und Navigation beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Oberpfaffenhofen. Davor arbeitete ich dreieinhalb Jahre auf je einer halben Stelle an der Universität der Bundeswehr und am o.g. Institut beim DLR. Während dieser Zeit konnte ich zahlreiche wertvolle Erfahrungen im Bereich der Forschung, Lehre und internationaler wissenschaftlicher Projekte sammeln.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Tröndle, für das entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung dieser Arbeit und für seine wertvollen didaktischen und fachlichen Anregungen.

Herrn Dr. Lutz, meinem damaligen Chef am Institut für Nachrichtentechnik und Navigation, danke ich für die Ermöglichung dieser Arbeit, die stete Bereitschaft, die Zwischenergebnisse zu diskutieren, seine konstruktive Kritik und für sein Korrekturlesen der ausgearbeiteten Kapitel mit zahlreichen, hilfreichen Hinweisen.

Mein Dank gilt zudem meinen ehemaligen Kollegen, die durch das gute und freundliche Arbeitsklima zum Gelingen dieser Arbeit mit beigetragen haben.

Mein ganz persönlicher Dank gebührt meiner Familie, die mich in den vergangenen 3 Jahren von vielen privaten Aufgaben befreit hat, um für mich in meiner Freizeit die erforderlichen Freiräume zur Fertigstellung dieser Arbeit zu schaffen.

München, im Winter 2001

Für Naemi

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND INHALTSÜBERSICHT	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Inhaltsübersicht und Begriffsdefinitionen	8
2	TEILNEHMERMODELLE UND DIENSTGÜTE	13
2.1	Mobilfunkteilnehmer als Verkehrsquellen	14
2.1.1	Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Verbindungsebene.....	16
2.1.2	Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Aktivitätsebene	27
2.2	Teilnehmermobilität und Handover.....	51
2.2.1	Modell zur Beschreibung der Mobilität des Sprachdienst-Teilnehmers	51
2.2.2	Modell zur Beschreibung der Mobilität des Multiservice-Teilnehmers	72
2.3	Dienstgüte und die Anforderungen an ein Mobilfunksystem	75
2.3.1	Parameter zur Beurteilung der Verkehrsgüte (G_{oS}).....	76
2.3.2	Parameter zur Beurteilung der Übertragungsqualität.....	78
3	RAHMENBEDINGUNGEN FÜR MOBILFUNKSYSTEME	81
3.1	Signalausbreitung.....	82
3.2	Definition des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses	87
3.3	Nutzung der Ressourcen Frequenz, Zeit und Raum	89
3.3.1	Frequenz-, Zeit- und Raummultiplex	91
3.3.2	Gleichkanalinterferenz bei Frequenzwiederverwendung durch die Bildung von Zellclustern.....	94

3.3.3	Minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ bei Frequenzplanung	104
4	ANALYSE VON ZUGRIFFSVERFAHREN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON HANDOVER	107
4.1	Verkehrskapazitätsanalyse von TDMA Systemen für Sprachdienst-Teilnehmer	110
4.1.1	Modell ohne Berücksichtigung von Handover.....	110
4.1.2	Verkehrsmodell unter Berücksichtigung von Handover.....	114
4.2	Verkehrskapazitätsanalyse von TDMA Systemen für Multiservice-Teilnehmer	129
4.2.1	Verkehrsmodell und Verkehrskapazitätsanalyse unter Berücksichtigung von Handover	130
4.2.2	Näherungsverfahren zur Analyse von Systemen mit einer großen Anzahl von Übertragungskanälen m_{BS}	143
4.2.3	Ergebnisse der Verkehrskapazitätsanalyse einer Basisstation für MS-Teilnehmer	148
5	OPTIMALE DIMENSIONIERUNG VON MOBILFUNKSYSTEMEN.....	151
5.1	Maximierung des Gewinns	153
5.1.1	Diskussion der Gewinnfunktion.....	155
5.2	Verfahren zur Maximierung des Funkzellenradius	157
5.2.1	Die Einflussgrößen und die Komponenten eines Mobilfunksystems im Überblick.....	162
5.2.2	Mathematische Beschreibung der Komponenten.....	164
5.2.3	Der maximale Funkzellenradius und die Bestimmung der optimalen, freien Systemgrößen.....	196
5.2.4	Die maximalen Funkzellenradien in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_T	201
5.3	Optimale Wahl der Gesamtbandbreite.....	203

6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	209
7	ANHANG	215
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	245
	LITERATURVERZEICHNIS	253

Kapitel 1

Einleitung und Inhaltsübersicht

In diesem Kapitel ist im ersten Teil kurz die Motivation und das Thema für diese Arbeit umrissen. Im zweiten Teil folgt die Inhaltsübersicht mit der Einführung der wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Begriffe. Die Begriffe sind an der Stelle, an denen ihre Erläuterung erfolgt, kursiv gedruckt. Aufgrund des breitgefächerten Themenbereiches dieser Arbeit sind im Anhang die Begriffe nochmals in alphabetischer Reihenfolge erklärt.

1.1 Einleitung

Die Aufgabe von Mobilfunksystemen besteht in der Bereitstellung von Telekommunikationsdiensten für mobile Teilnehmer. Die Übertragung der Information geschieht dabei über die Luftschnittstelle durch Funksignale zwischen einer der Basisstationen des Mobilfunknetzes und der Mobilstation in der Funkzelle dieser Basisstation. Eine *Funkzelle* ist das geografische Gebiet, in dem die mobilen Teilnehmer von der zuständigen Basisstation mit Telekommunikationsdiensten versorgt werden können.

Der Anstieg der Teilnehmerzahlen in den ersten digitalen Mobilfunknetzen in Europa übertraf alle Prognosen. Darin spiegelt sich der Bedarf des heutigen Menschen an Information bei einem gleichzeitigen hohen Maß an Mobilität wider. Information als vierter Produktionsfaktor gewinnt zunehmend an wirtschaftlicher Bedeutung. Eine Informationsübertragung, unabhängig vom Aufenthaltsort und bei gleichzeitiger Mobilität des Kommunizierenden, kann beim heutigen Stand der Technik nur durch Mobilfunksysteme erreicht werden.

Neben dem stetigen Anwachsen der Teilnehmerzahlen ist in Zukunft zusätzlich mit einem erhöhten Bedarf an Übertragungskapazität pro Teilnehmer zu rechnen. Dieser erhöhte Bedarf

resultiert aus dem Wunsch der Teilnehmer, neben dem gewöhnlichen Telefongespräch zusätzliche neue Dienste wie Videotelefonie, Electronic-Mail (email) und File-Transfer benutzen zu können. Ein *Multiservice-Teilnehmer* (MS-Teilnehmer) [3] ist durch die Möglichkeit charakterisiert, mehrere vom Mobilfunksystem angebotene Telekommunikationsdienste - auch gleichzeitig - benutzen zu können. In Verbindung mit dem World Wide Web (www) wird zudem unabhängig von Ort und Zeit ein Zugang zu den weltweit verfügbaren Informationen möglich. Der in den nächsten Jahren überproportional steigende Bedarf an Übertragungskapazität erfordert eine effiziente Nutzung der begrenzten Ressourcen. Begrenzte, nicht vermehrbare Ressourcen sind die für Mobilfunksysteme zur Verfügung stehende Bandbreite und die Anzahl von geographischen Punkten, die ein Aufstellen von Mobilfunksendern (Basisstationen) erlauben. Beim Aufstellen neuer Basisstationen muss neben den Belangen des Landschaftsschutzes die zunehmende Angst der Bevölkerung vor den Gesundheitsrisiken durch elektromagnetische Funkwellen (*EMV*: Elektromagnetische Verträglichkeit) berücksichtigt werden. Dabei darf die abgestrahlte Sendeleistung die nach dem heutigen Wissensstand als physiologisch unbedenklichen geltenden Grenzwerte nicht überschreiten. Unter diesen äußeren Randbedingungen ist ein Mobilfunksystem so zu dimensionieren, dass festgelegte Mindestanforderungen für die Qualität der dem Teilnehmer angebotenen Telekommunikationsdienste (*Dienstgüte*) eingehalten werden.

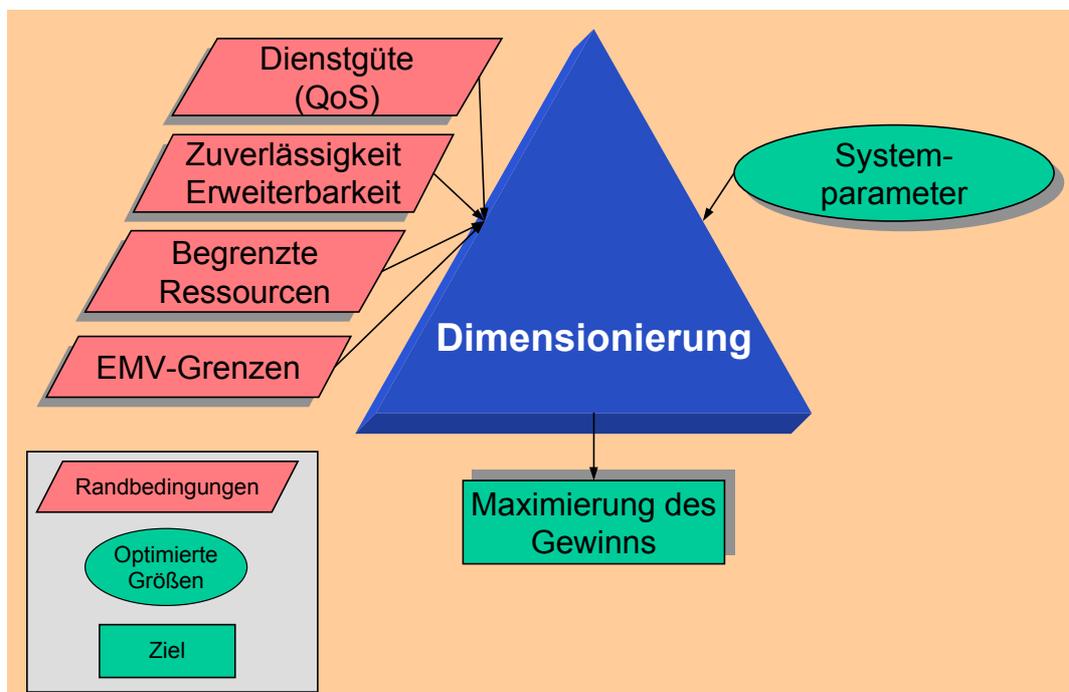


Bild 1.1 Kriterien für die Dimensionierung von Mobilfunksystemen

Bei der Systemauswahl und Systemauslegung sind zudem die Einhaltung der Grenzwerte für die Zuverlässigkeit der Bereitstellung der Dienste (Ausfallsicherheit) und die Sicherstellung der Erweiterbarkeit des Netzes zu beachten. Die beiden zuletzt genannten Punkte gehen nicht in die Dimensionierung der im Rahmen dieser Arbeit optimierten Systemgrößen ein und werden, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, im weiteren nicht betrachtet. Die Übertragungsgüte und die Verkehrsgüte der Verbindungen von der Mobilstation zur Basisstation bestimmen im wesentlichen die Dienstgüte. Als Maß für die *Übertragungsgüte* des Mobilfunksystems wird die Bit- bzw. Paketfehlerwahrscheinlichkeit p_p herangezogen, da sie bestimmend ist für die Korrektheit der empfangenen Daten.

Aus den geforderten Grenzwerten für die Fehlerwahrscheinlichkeiten ergeben sich die Grenzwerte für das minimale Signal-zu-Störleistungsverhältnis ρ_{\min} . Das *Signal-zu-Störleistungsverhältnis* ist der Quotient aus der Signalleistung und der Störleistung. Die genaue Beschreibung findet sich in Abschnitt 2.3.2.1.

Die *Verkehrsgüte* G_{oS} von Verbindungen ist die Qualität der Verkehrsabwicklung, soweit sie von technischen Einrichtungen abhängt. Für Mobilfunksysteme wird sie als gewichtete Summe aus der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit beim Verbindungsaufbau und der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit bestimmt.

Die *Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit* ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine ankommende Verbindungsaufbauanforderung durch das Mobilfunksystem abgewiesen wird.

Die *Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit* ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestehende Verbindung durch das Mobilfunksystem beendet wird. In dieser Arbeit wird sie gleich der Wahrscheinlichkeit gesetzt, dass im Falle eines Handovers bei der übernehmenden Basisstation zum Zeitpunkt des Handovers kein freier Übertragungskanal vorhanden ist und dadurch die Verbindung abbricht. Mit *Handover* wird der Vorgang des Weiterreichens einer Verbindung von einer Basisstation zu einer anderen bezeichnet.

Zur Bereitstellung von Verbindungen mit ausreichender Qualität sind Grenzwerte für die Übertragungsqualität (SINR) und die Verkehrsgüte (*GoS*: Grade of Service) einzuhalten. Die maximal mögliche Funkzellengröße (-radius) $r_{z,\max}$ ist außerdem abhängig von: Den zuvor beschriebenen äußeren Randbedingungen, den Ausbreitungseigenschaften des Übertragungskanals, dem Teilnehmerverhalten, der Teilnehmerdichte und den Parametern des Mobilfunksystems. Durch eine Maximierung der Funkzellengröße wird eine Minimierung der Anzahl

der benötigten Basisstationen zur flächendeckenden Versorgung der Teilnehmer mit Mobilfunkdiensten erreicht. Dies hat eine Minimierung der Investitions- und Betriebskosten für eine gegebene Gesamtbandbreite zur Folge. Aufgrund der Tatsache, dass eine Lizenz für einen Frequenzbereich zum Betrieb eines zukünftigen Mobilfunksystems [26] (UMTS: Universal Mobile Telecommunications System) Kosten in Milliardenhöhe (Euro) verursacht, ist dieser Investitionsfaktor bei der Optimierung von großer Bedeutung. Die Ergebnisse in Kapitel 5 zeigen, dass die richtige Wahl der belegten Gesamtbandbreite zusammen mit der Teilnehmerdichte für den wirtschaftlichen Betrieb von zukünftigen Mobilfunksystemen von entscheidender Bedeutung ist. Diese kostenoptimale Gesamtbandbreite und optimale Wahl der Systemgrößen wird durch einen ganzheitlichen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmus erreicht.

In den aus der Literatur bekannten Dimensionierungsverfahren im Bereich der Mobilfunksysteme werden nur einzelne Bereiche des Systemdesigns betrachtet und optimal dimensioniert. Zwei bedeutende Bereiche sind die Übertragungstechnik mit den Modulation- und Codierungsverfahren und die Kanalzugriffsverfahren. Die Zugriffsverfahren werden mit Hilfe der Verkehrstheorie analysiert und bilden den Ausgangspunkt für die Dimensionierung der Basisstationen (Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Kanälen m_{BS}). Für die neue Generation von Mobilfunksystemen für Multiservice-Teilnehmer (MS-Teilnehmer) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neues analytisches Berechnungsverfahren entwickelt, das die Ermittlung der erforderlichen Anzahl von Übertragungskanälen pro Basisstation m_{BS} unter Berücksichtigung des MS-Teilnehmerverhaltens und der Statistik der MS-Teilnehmerbewegung (Handover) ermöglicht.

Durch die gegenseitigen Abhängigkeiten der Ergebnisse aus den Bereichen Übertragungstechnik und Kanalzugriffsverfahren war bei der bisher üblichen getrennten Betrachtungsweise ein kostenoptimales Systemdesign nicht möglich. Der grundlegende Zusammenhang ist im folgenden Bild 1.2 dargestellt. Durch die Modulation und Kanalcodierung wird aus der Trägerbandbreite B_{Tr} , abhängig von der Anzahl der verwendeten Modulationsstufen und der verwendeten Coderate, eine bestimmte Nutzdatenrate $R_{D,R}$ erzeugt. Mit dieser Nutzdatenrate können unter Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte $G_{oS,soll}$ (Verbindungsaufbauverlust- und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit), abhängig von der Teilnehmerdichte und dem Verkehrsangebot pro Teilnehmer, in einem Umkreis mit dem maximalen Radius $r_{z,v,max}$ von einer Basisstation, die Teilnehmer mit Mobilfunkdiensten versorgt werden (oberer Zweig in Bild 1.2). Das *Verkehrsangebot* errechnet sich aus der pro Zeiteinheit auftretenden Anzahl

von Belegungsversuchen (Ankunftsrate) multipliziert mit der mittleren Belegungsdauer der erfolgreichen Belegungsversuche dieses Verkehrs [23].

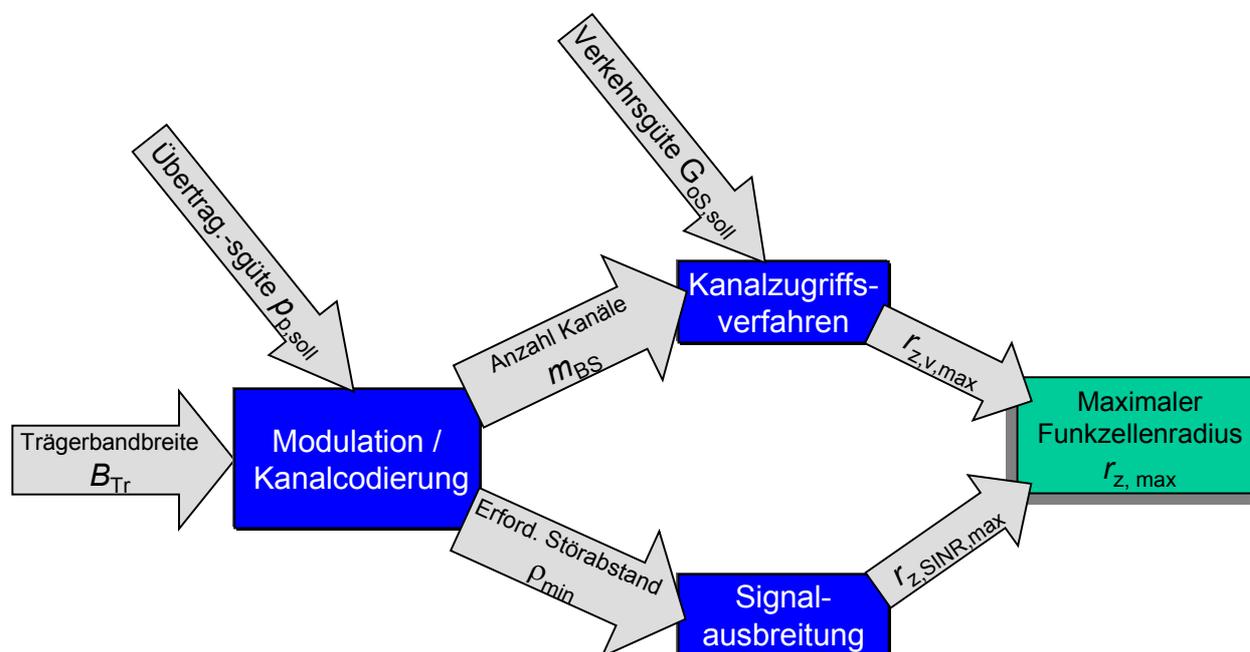


Bild 1.2 Optimierung des Funkzellenradius durch geeignete Wahl der Modulation und Kanalcodierung (Prinzipdarstellung)

Die Einhaltung der Grenzwerte für die Übertragungsgüte (maximale Paketfehlerwahrscheinlichkeit) $p_{p,soll}$ in Verbindung mit der Anzahl der möglichen Übertragungskanäle m_{BS} , erfordert einen minimalen Störabstand ρ_{min} . Dieser ist nur bis zu einer Entfernung $r_{z,SINR,max}$ von der Basisstation gegeben. Der maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,max}$ ist bestimmt durch das Minimum der beiden Radien. Die Parameter des Modulations- und Codierverfahrens sind so einzustellen, dass die beiden maximalen Radien $r_{z,v,max}$ und $r_{z,SINR,max}$ gleich groß werden. Die detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge erfolgt in Abschnitt 5.2.1.

Die folgenden beiden Bilder zeigen, warum bei der bisher angewandten getrennten Optimierung der beiden Bereiche nur suboptimale Ergebnisse erzielt werden konnten.

Im ersten Fall (Bild 1.3) kann der maximale Funkzellenradius aufgrund der geforderten Übertragungsgüte (SINR: Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio) nicht weiter erhöht werden. Die Datenrate aufgrund der Modulation und Codierung ist aber so groß, dass alle Teilnehmer in einer Zelle mit dem Radius $r_{z,v} > r_{z,SINR}$ versorgt werden könnten. Es liegt Übertragungskapazität

azität brach. In diesem Fall bedeutet Optimierung die Verwendung der überschüssigen Bandbreite zur Reduktion des benötigten SINR. Dieser Optimierungsvorgang ist durch den Pfeil im unteren Bild symbolisiert.

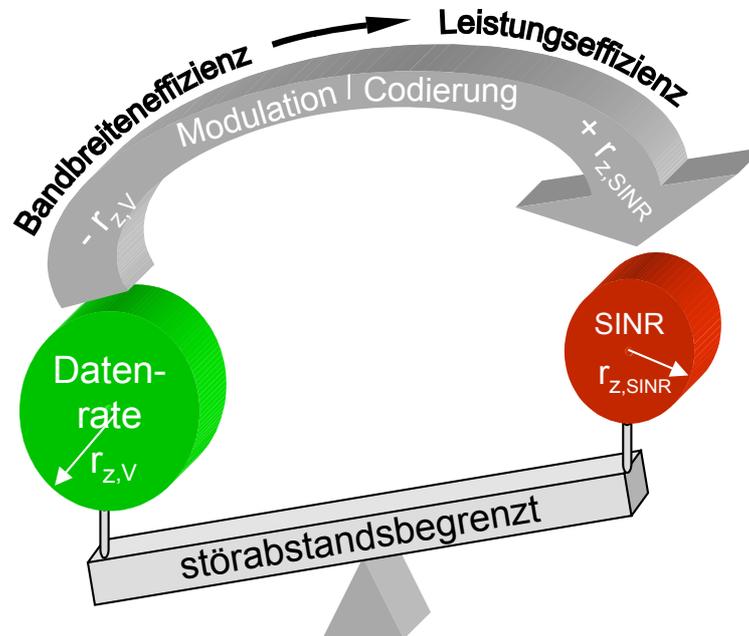


Bild 1.3 Begrenzung des maximalen Zellenradius durch das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR)

Der Fall einer Begrenzung aufgrund einer zu geringen Datenrate ist im folgenden Bild 1.4 dargestellt. Die Anzahl der Übertragungskanäle, die aufgrund der gewählten Modulation und Codierung und der damit erzielbaren Datenrate möglich ist, begrenzt bei Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte G_{oS} den maximalen Zellenradius auf $r_{z,v}$. Das Versorgungsgebiet könnte unter Einhaltung der Übertragungsqualität auf die Größe $r_{z,SINR}$ ausgedehnt werden. Durch die Verwendung eines höherstufigen Modulationsverfahrens und/oder eines geringeren Fehlerkorrekturanteils ist die Nutzdatenrate zu erhöhen und somit eine größere Bandbreiteneffizienz zu erzielen. Dadurch steigt die Größe des möglichen Versorgungsgebietes $r_{z,v}$. Auf der anderen Seite erhöht sich das erforderliche SINR und führt somit zu einer Verringerung des maximal möglichen Radius aufgrund der geforderten Übertragungsgüte (Paketfehlerwahrscheinlichkeit p_p).

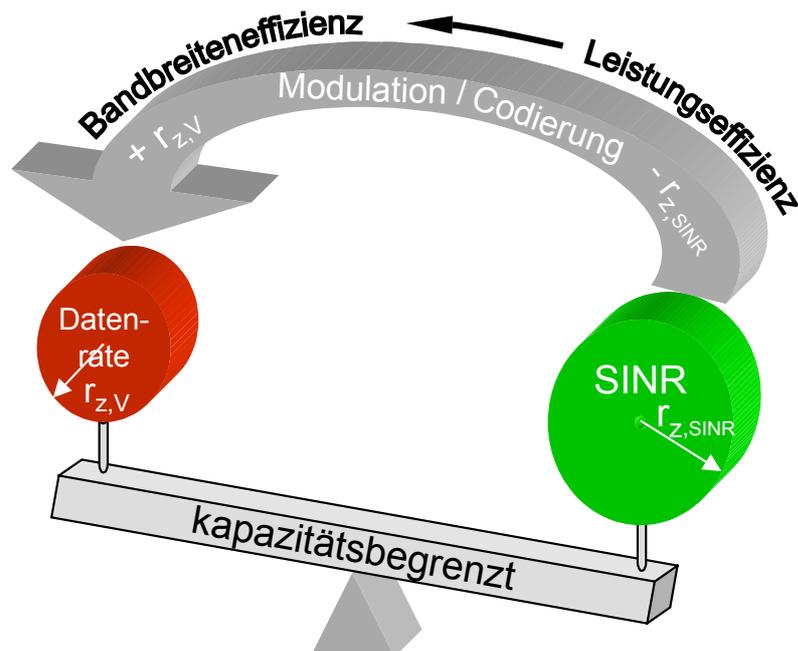


Bild 1.4 Begrenzung des maximalen Zellenradius durch die erforderliche Verkehrsgüte (GoS)

Bei einer optimalen Wahl des Modulations- und Codierverfahrens und deren Parameter wird das System so dimensioniert, dass weder ungenutzte Übertragungskapazität vorhanden ist (Bild 1.3) noch ein nicht erforderliches SINR gegeben ist (Bild 1.4). Dadurch kann der Maximalwert des Funkzellenradius erreicht werden.

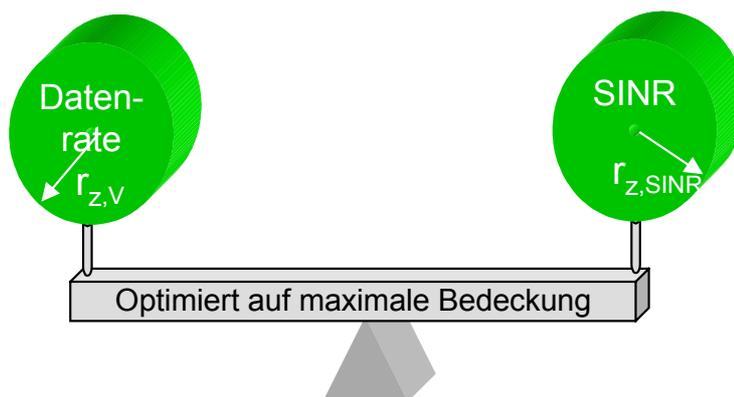


Bild 1.5 Verhältnisse bei optimaler Dimensionierung

Die vorhandenen Ressourcen werden dadurch unter den gegebenen Randbedingungen optimal genutzt (Bild 1.5).

In einem 2. Optimierungsvorgang wird die Größe der gesamten für ein System benutzten Bandbreite B_{ges} optimiert. Die Gesamtanzahl der Basisstationen n_{BS} , die zur Versorgung einer

vorgegebenen Fläche erforderlich ist, ist in gewissen Grenzen gegenläufig zur Höhe der Bandbreite B_{ges} . Die Kosten für ein Mobilfunksystem lassen sich durch geeignete Wahl der Größe des Frequenzspektrums, basierend auf den Kosten für die Basisstationen und den Lizenzkosten für das Frequenzspektrum B_{ges} , minimieren. Voraussetzung ist, dass die Größe B_{ges} nicht fest ist. Aus der Kostenbetrachtung werden zusätzlich noch der zu erwartende Gewinn pro Teilnehmer und die Rentabilitätsgrenzen im Hinblick auf die erforderliche Mindestteilnehmerdichte ermittelt.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, ein integrales, mathematisches Modell zu entwickeln, das die Abhängigkeiten der Kosten vom Systemdesign aus den beiden Bereichen Übertragungstechnik und Verkehrstheorie enthält. Durch die optimale Wahl der Anzahl der Modulationsstufen und der Coderate ist eine optimale Dimensionierung für eine gegebene Gesamtbandbreite und Teilnehmerdichte erreicht worden. In der zweiten Stufe des Optimierungsvorgangs wird die optimale Gesamtbandbreite B_{ges} für das System, mit der eine maximale Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap,opt}}$ erreicht wird, in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T ermittelt.

Der modulare Aufbau des Optimierungsverfahrens und eine mathematische Beschreibung mit ausreichendem Abstrahierungsgrad ergibt eine Allgemeingültigkeit, so dass eine Implementierung neuer Verfahren durch den Austausch der entsprechenden Module leicht möglich ist. Beim Aufbau des zugehörigen Berechnungsverfahren wurde darauf geachtet, dass trotz der oftmals nichtlinearen Zusammenhänge und der nicht stetigen Funktionen immer die optimalen Systemparameter gefunden werden.

1.2 Inhaltsübersicht und Begriffsdefinitionen

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

In **Kapitel 2** werden die zur Modellierung des Nachrichtenverkehrs erforderlichen Teilnehmerverkehrsmodelle und die Teilnehmer-Modellparameter beschrieben. Ein *Verkehrsmodell* ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verkehrsablaufs. Mit *Verkehr* (Nachrichtenverkehr) wird die Benutzung von Kommunikationskanälen (z.B. Leitungen, Funkkanälen) oder Steuereinrichtungen von Vermittlungssystemen durch einen Teilnehmer bezeichnet. Die verwendeten Teilnehmerverkehrsmodelle beschreiben den Kanalbelegungsprozess durch den Teilnehmer sowie die Teilnehmerbewegung. Für den Sprachdienst-Teilnehmer werden die aus der Literatur bekannten Modelle [17] [12] verwendet. Für die Beschreibung des Mul-

tiservice-Teilnehmers wurde ein neues Modell zur Beschreibung des Verhaltens auf der Verbindungsebene und ein neues Modell zur Beschreibung auf der Aktivitätsebene entwickelt. Mit der *Beschreibung auf der Verbindungsebene* werden die zeitlichen Abläufe für den Auf- und Abbau von Verbindungen durch den Teilnehmer modelliert. Nicht erfasst wird die Teilnehmeraktivität während der Dauer der Verbindung. Diese Art der Modellierung eignet sich für *Zugriffsverfahren mit statischer Kanalzuteilung*, d.h., der Kanal wird in der Zeit zwischen Verbindungsaufbau und Verbindungsabbau exklusiv durch den Teilnehmer belegt. Bei der *Beschreibung auf der Aktivitätsebene* wird die Teilnehmeraktivität während der Dauer einer Verbindung detaillierter modelliert. Diese Art der Modellierung ist erforderlich, wenn Zugriffsverfahren im Einsatz sind, bei denen der Übertragungskanal nicht während der gesamten Dauer einer Verbindung oder Dienstnutzung belegt ist, sondern nur in den Aktivphasen, d.h. in den Zeiten, in denen Information zu übertragen ist. Beispiele hierfür sind das zellbasierte ATM (Asynchronous Transfer Mode) und das paketorientierte IP-Protokoll. Bei beiden teilen sich die Teilnehmer einen gemeinsamen Übertragungskanal durch statistische Multiplexverfahren.

Durch die Unterscheidung der Beschreibung auf der Verbindungsebene und der Aktivitätsebene stehen für die untersuchten Zugriffsverfahren die geeigneten Modelle zur Verfügung. Da die Teilnehmer-Modellparameter aus der Verkehrsmessung nicht als Parameter der oben beschriebenen Teilnehmerverkehrsmodelle geeignet sind, werden Transformationssysteme aufgestellt, die diese Abbildung leisten. Zusätzlich ist die näherungsweise Abbildung von Teilnehmerverkehrsmodellen der Aktivitätsebene in Modelle auf der Verbindungsebene beschrieben. Dadurch kann die Komplexität des Zustandsraums für das resultierende Verkehrsmodell der Basisstation erheblich reduziert werden. Dies ermöglicht auch für diese detaillierter zu modellierenden Zugriffsverfahren näherungsweise eine analytische Bestimmung der zulässigen Teilnehmeranzahl M_{BS} . Am Ende des Kapitels werden die grundsätzlichen Einflüsse von der Teilnehmerbewegung auf die Ankunftsrate von Verbindungsaufbauanforderungen und die Enderaten von Verbindungen bestimmt. Die *Ankunftsrate* ist der Kehrwert des Mittelwerts der Ankunftsabstände T_A . Die *Enderate* ist der Kehrwert des Mittelwerts der Verbindungsdauern T_B [16]. Diese mathematische Erfassung des Einflusses auf die Raten ermöglicht die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Systemen unter Berücksichtigung des Einflusses der Teilnehmerbewegung. Für den MS-Teilnehmer ist es gelungen, ein Näherungsverfahren zu entwickeln, das es ermöglicht, den Einfluss von Handover auf die Verkehrskapazität in analytischen Berechnungsmethoden zu berücksichtigen. Die Auswir-

kungen von Handover auf die Systemdimensionierung wird bei der Untersuchung der Zugriffsverfahren in Kapitel 4 betrachtet.

Kapitel 3 beschreibt die Rahmenbedingungen für die Ausbreitung von Funksignalen und das verwendete Signalausbreitungsmodell. Ausgehend von einer ortsabhängigen Dämpfung werden die Interferenzverhältnisse und das minimale Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis („worst case“ am Rand der Funkzelle) in Abhängigkeit vom Funkzellenradius ermittelt.

Das bei der Dimensionierung eingesetzte Zugriffsverfahren Time Division Multiple Access (TDMA) wird in **Kapitel 4** beschrieben, durch Markoff-Ketten modelliert und die statistischen Leistungsgrößen ermittelt. Ausgehend vom Sprachdienst-Teilnehmerverkehrsmodell wurde für die Mobilfunksysteme mit Multiservice-Teilnehmern (MS-Teilnehmern) ein neues Systemmodell entwickelt, das es erlaubt, das Teilnehmerverhalten und die Teilnehmerbewegung auf die MS-Teilnehmernennkapazität pro Basisstation analytisch mit Markoff-Modellen zu ermitteln. Die *Teilnehmernennkapazität* ist die Teilnehmeranzahl M_{BS} , die bei vorgegebener Verkehrsgüte G_{oS} gerade noch bewältigt werden kann.

Mit *Systemmodell* wird das für den MS-Teilnehmer mehrdimensionale Markoff-Verkehrsmodell bezeichnet, das alle möglichen Kanalbelegungszustände und Zustandsübergänge einer Basisstation enthält. Die Zustandsübergänge und -Raten sind durch die Zustandsübergänge des Teilnehmer-Verkehrsmodells bestimmt. Da der Zustandsraum mehrere zehntausend Zustände erreichen kann, wird er während des Berechnungsvorgangs automatisch aufgespannt. Mit Hilfe der Näherungsverfahren aus Kapitel 2 sind die Methoden zur Dimensionierung, wie sie am Beispiel von TDMA in Kapitel 4 beschrieben sind, auf andere Zugriffsverfahren, wie z.B. bei Verwendung von Wide Band CDMA für UMTS [11], übertragbar.

In **Kapitel 5** werden zuerst die mathematischen Beziehungen zur Gewinnoptimierung für den Betrieb eines Mobilfunksystems abgeleitet. Es folgt die Beschreibung des mathematischen Modells zur Dimensionierung des Mobilfunksystems. Das Modell besteht aus den Modulen Signalausbreitung, Frequenzplanung, Multiplexverfahren, Modulation/Codierung und Zugriffsverfahren. Nach der allgemeinen Kurzbeschreibung der Module werden diese abschnittsweise in Form von mathematischen Gleichungen beschrieben. Aus diesen Zusammenhängen wird ein Dimensionierungsverfahren abgeleitet, in dessen erster Stufe für ein gegebenes Szenario die freien Parameter so gewählt werden, dass unter den gegebenen Voraussetzungen ein maximales Versorgungsgebiet pro Basisstation erreicht wird. Die Größe des Ver-

sorgungsgebietes wird durch den maximal möglichen Funkzellenradius $r_{z,\max}$ angegeben. Neben der optimalen Einstellung der Systemgrößen wird die Größe der eingesetzten Gesamtbandbreite B_{ges} abhängig von den Lizenzgebühren so bestimmt, dass die Gesamtkosten minimal werden. Dies erfolgt in der zweiten Stufe des Optimierungsvorgangs.

In **Kapitel 6** - Zusammenfassung und Ausblick - werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit nochmals im Überblick aufgezeigt und ein Ausblick auf weitere Fragestellungen gegeben, deren Bearbeitung aufbauend auf die grundlegenden Ergebnisse der vorliegenden Arbeit möglich sind.

Im **Anhang** sind neben den Erläuterungen zu den verwendeten Begriffen, Abkürzungen, Symbolen und mathematischen Formelzeichen die Flussdiagramme zum Gesamtablauf der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Optimierungsalgorithmen zu finden.

Alle Kapitel sind so aufgebaut, dass im ersten Teil die theoretischen Grundlagen mathematisch beschrieben sind und sie im zweiten Teil an Anwendungsbeispielen verdeutlicht werden. Dabei sind die Beispiele so gewählt, dass am Ende der Arbeit Ergebnisse zu aktuellen Fragestellungen aus der Praxis vorliegen.

Kapitel 2

Teilnehmermodelle und Dienstgüte

Zur Informationsübertragung zwischen einer Basisstation und den Teilnehmern innerhalb der Funkzelle - Versorgungsgebiet der Basisstation - stehen den Teilnehmern sogenannte Kommunikationskanäle zur Verfügung. Um eine bestimmte Verkehrsgüte G_{oS} einzuhalten, darf eine maximale Verkehrsbelastung nicht überschritten werden. Die *Verkehrsbelastung* ist die mittlere Anzahl gleichzeitig belegter Übertragungskanäle. Die Verkehrsbelastung, bei der die geforderte Verkehrsgüte gerade noch eingehalten wird, ist als die *Verkehrsnennkapazität* eines Telekommunikationssystems definiert. Die Verkehrsnennkapazität bestimmt zusammen mit den Teilnehmer-Parametern die maximale Anzahl von Mobilfunkteilnehmern M_{BS} , die sich in der Funkzelle aufhalten dürfen. Bei einer bestimmten Teilnehmerdichte D_T ist damit der maximale Zellenradius $r_{z,v}$ bestimmt.

Das Teilnehmerverhalten und die Dienstgüte sind deshalb wichtige Faktoren bei der Dimensionierung von Mobilfunksystemen. Bei der Bewertung der Dienstgüte werden in dieser Arbeit die für die Dimensionierung entscheidenden Faktoren Verkehrsgüte und Übertragungsgüte berücksichtigt.

Sie bestimmen die Anzahl der notwendigen Kommunikationskanäle der Basisstationen und die Auslegung der Zellenstruktur. Die Dienstgüte wird durch die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Bewertungsparameter beurteilt. Für eine ausreichende Qualität des Telekommunikationsdienstes dürfen bestimmte Grenzwerte der Dienstgüteparameter nicht überschritten werden. Sie bilden die Randbedingungen der Dimensionierung.

2.1 Mobilfunkteilnehmer als Verkehrsquellen

Der Verkehr beginnt mit dem Belegen und endet mit der Freigabe der Bedieneinheiten [23]. In einem Mobilfunksystem ist der rufende Teilnehmer die *Verkehrsquelle*. Er initiiert den Verbindungsaufbau zu einer Basisstation. Wenn nur dieser Verbindungsabschnitt betrachtet wird, ist die Basisstation die Verkehrssenke. Für die gesamte Ende-zu-Ende-Betrachtung ist der gerufene Teilnehmer die *Verkehrssenke*.

Durch die stochastische Natur der Verkehrsgenerierungsprozesse eignen sich stochastische Verkehrsmodelle zu ihrer mathematischen Beschreibung. Die zeitlichen Ankunftsabstände und die Bewegung der Teilnehmer (Abschnitt 2.2) werden durch Zufallsvariablen und ihre Verteilungsfunktionen beschrieben. Von großer Bedeutung sind die im Anhang beschriebenen Markoff-Prozesse zur Beschreibung der Ankunfts- und Bedienprozesse in Kommunikationssystemen. Der *Bedienprozess* beschreibt innerhalb eines Verkehrsmodells die Verteilung von Bediendauern (hier Kanalbelegungsauern).

Die Beschreibung des Teilnehmerverhaltens durch eine zeitkontinuierliche Markoff-Kette ist für Kommunikationssysteme geeignet, bei denen Zustandsübergänge der Teilnehmer zu beliebigen Zeitpunkten (kontinuierliche Zeitachse) Zustandsübergänge im Systemmodell verursachen können. Sie sind aber auch mit guter Näherung für getaktete Systeme (mit TDM-Multiplex-Struktur) anwendbar, wenn die Taktrate für mögliche Zustandsübergänge (z.B. $1/\text{Rahmendauer}$) sehr viel größer ist als die größte Übergangsrate im Teilnehmer-Verkehrsmodell ($>$ Faktor 50, siehe Anhang). Diese Voraussetzung ist bei der Modellierung der meisten Systeme erfüllt.

Die Ankunftsprozesse von Verbindungsaufbauanforderungen und die Kanalbelegungsprozesse werden als Markoff-Prozesse angenommen. Dies hat sich in der Praxis als ausreichend genau erwiesen. *Markoff-Prozesse* sind Prozesse, deren zukünftige Entwicklung nur vom momentanen Zustand abhängig ist, nicht jedoch von der Zeitdauer des Bestehens des momentanen Zustands. Zufallsgrößen gedächtnisloser Markoff-Prozesse mit kontinuierlichem Wertebereich besitzen eine negativ exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF Gleichung (2.1)). Es ist die einzige WDF, bei der die Prozesse die Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit besitzen. Als *Ankunftsprozess* in einem Kommunikationssystem wird die zeitliche Folge ankommender Rufe bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit sind es die bei der Basisstation eintreffenden Verbindungsaufbauanforderungen. Der Ankunftsabstand T_A zwischen zwei

aufeinanderfolgenden Verbindungsaufbauanforderungen ist eine Zufallsgröße. Ist der Ankunftsprozess ein Markoff-Prozess, so ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF)

$$f_{T_A}(t) = \lambda e^{-\lambda t} . \quad (2.1)$$

Der Parameter $\lambda = 1/\overline{T_A}$ ist die *mittlere Ankunftsrate*. Sie ist der Kehrwert des mittleren Ankunftsabstandes $\overline{T_A}$.

Der Kanalbelegungsprozess beschreibt die Belegung der Übertragungskanäle durch Verbindungen. Die Zufallsgröße T_B ist dabei die Dauer der Belegung eines Kanals. Sie wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF)

$$f_{T_B}(t) = \mu e^{-\mu t} . \quad (2.2)$$

beschrieben.

Der Parameter $\mu = 1/\overline{T_B}$ ist die *mittlere Enderate* [16]. Sie ist der Kehrwert der mittleren Belegungsdauer $\overline{T_B}$.

Beide Prozesse besitzen die Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit und eignen sich durch ihre Einfachheit in besonderer Weise für die analytische Bestimmung der statistischen Leistungsgrößen von Systemen. Die Zustandsübergangsraten sind die Parameter der Markoff-Modelle. Sie sind in der Praxis nur bei sehr einfachen Teilnehmer-Verkehrsmodellen direkt durch Verkehrsmessungen zu bestimmen, da sie die Zustandswahrscheinlichkeiten, Verzweigungswahrscheinlichkeiten und Verweildauern in den Zuständen gleichzeitig beeinflussen. Gut geeignet sind diejenigen, die im folgenden als Teilnehmer-Messgrößen bezeichnet sind. Die Teilnehmer-Verkehrsmodellparameter (Raten in den Markoff-Modellen) können anschließend aus den Teilnehmer-Messgrößen durch eine lineare Abbildung gewonnen werden. Durch diese Abbildung wird die Beschreibung des Teilnehmers in einem ersten Schritt durch die Teilnehmer-Messgrößen möglich, auch wenn anschließend Markoff-Modelle zur Berechnung der statistischen Leistungsgrößen des Kommunikationssystems verwendet werden.

Im folgenden werden zwei Arten von Modellen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur mathematischen Beschreibung des Teilnehmerverhaltens erläutert. Das erste beschreibt das Verhalten auf der Verbindungsebene. Das zweite detailliertere Modell beschreibt den Teilnehmer auf der Aktivitätsebene. In den ersten beiden Abschnitten sind die Teilnehmer-

Messgrößen und die für die Analyse notwendigen Verkehrs-Modellparameter beschrieben. Anschließend erfolgt die Ableitung der Verkehrsmodellparameter aus den Teilnehmer-Messgrößen. Die Verkehrs-Modellparameter sind so gewählt, dass sie den Teilnehmer im Hinblick auf das zu untersuchende Telekommunikationssystem charakterisieren, ermöglichen aber auch die Analyse des Teilnehmer-Verkehrsmodells zur Bestimmung der Zustandswahrscheinlichkeiten π des Teilnehmers und weiterer abgeleiteter Größen. Abgeleitete Größen sind die mittlere Anzahl belegter Kanäle pro Teilnehmer \bar{m}_T und der Multiservice-Faktor K , der ein Maß für die Statistische Abhängigkeit der gleichzeitigen Benutzung von Diensten ist.

Zur Bezeichnung der Raten wird in den generischen Markoff-Modellen, bei denen der zugrundeliegende Markoff-Prozess keinen speziellen Prozess modelliert, der Buchstabe q verwendet.

2.1.1 Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Verbindungsebene

Die Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Verbindungsebene ist ausreichend für die Untersuchung von Systemen, in denen die Systemressourcen, die von einem Teilnehmer beim Verbindungsaufbau belegt werden, diesem während der gesamten Dauer der Verbindung exklusiv zur Verfügung stehen. Sie werden in Zeiten, in denen der Teilnehmer keine Information überträgt, nicht für die Nutzung durch andere Teilnehmer freigegeben. Die Zustände unterscheiden sich durch die benutzten Dienste und den damit verbundenen Bandbreitenbedarf, die Aufenthaltszeit und das weitere Verhalten des Teilnehmers (mögliche Zustandsübergänge).

2.1.1.1 Teilnehmer-Messgrößen zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens

Ein Teilnehmer kann einen oder mehrere der angebotenen Dienste \check{D}_A benutzen. Das folgende Bild 2.1 zeigt das Zustandsübergangsdiagramm eines Mobilfunkteilnehmers. Er benutzt die Dienste \check{D}_i im Zustand i . Zustände, in denen mehrere Dienste gleichzeitig benutzt werden (Kombination von Diensten), werden im folgenden als Kombinationszustände bezeichnet.

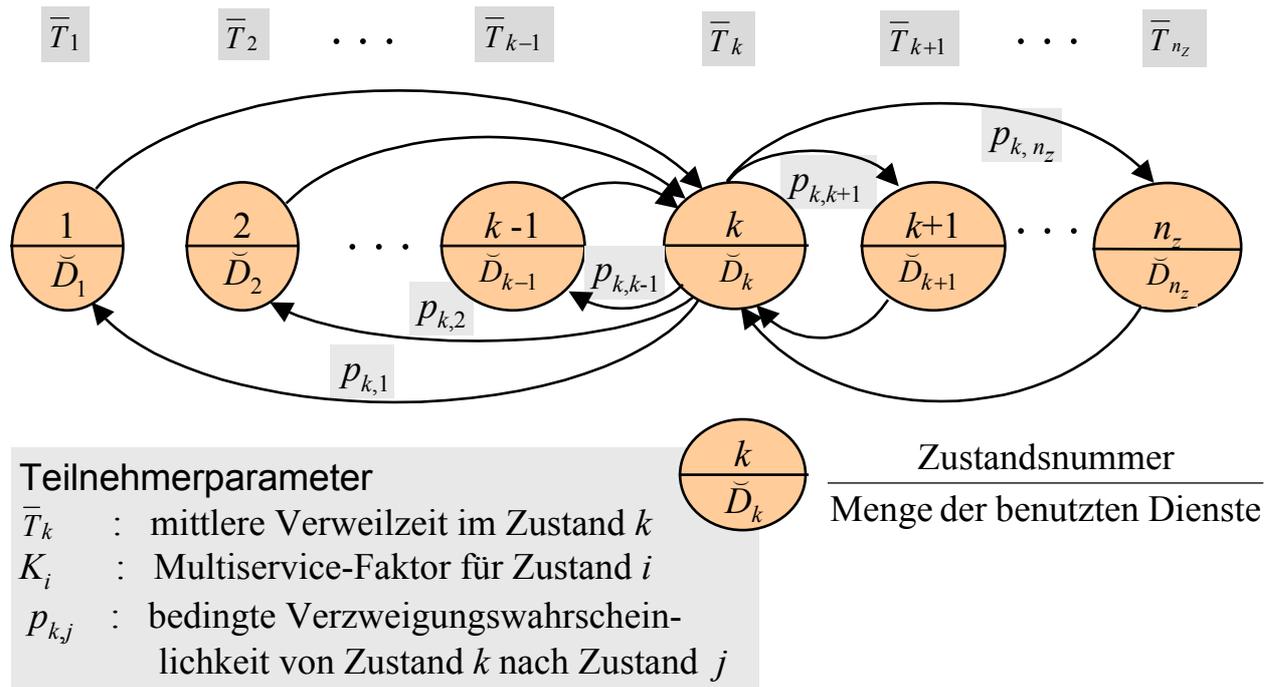


Bild 2.1 Zustandsübergangsdiagramm mit den Messgrößen $p_{k,j}$ eines Multiservice-Teilnehmers, dem mehrere Dienste D_i zur Verfügung stehen (nur Übergänge von und nach k dargestellt)

Zur mathematischen Beschreibung des Teilnehmerverhaltens bezüglich der Benutzung der angebotenen Telekommunikationsdienste eignen sich folgende Teilnehmer-Messgrößen.

$p_{k,j}$: die Verzweigungswahrscheinlichkeit von Zustand k nach Zustand j unter der Bedingung, dass Zustand k verlassen wird.

$$p_{k,j} = p(X_n = j | X_{n-1} = k, \text{Verlassen von } k) \quad \text{mit} \quad \sum_{\forall i, i \neq k} p_{k,i} = 1 \quad (2.3)$$

\bar{T}_k : die mittlere Aufenthaltsdauer in einem Zustand k .

Unter der Annahme von Markoff-Prozessen für die Zustandsübergänge ist mit diesen Parametern das Teilnehmerverhalten vollständig beschrieben.

2.1.1.2 Modellparameter zur Beschreibung des Verhaltens auf der Verbindungsebene

Für die zeitkontinuierlichen Markoff-Ketten, die als Verkehrsmodelle verwendet werden, sind die Zustandsübergangsraten $q_{k,j}$ die Modellparameter. Sie eignen sich im Gegensatz zu den

oben definierten Teilnehmer-Messgrößen nicht zur unmittelbaren Beschreibung des Teilnehmerverhaltens.

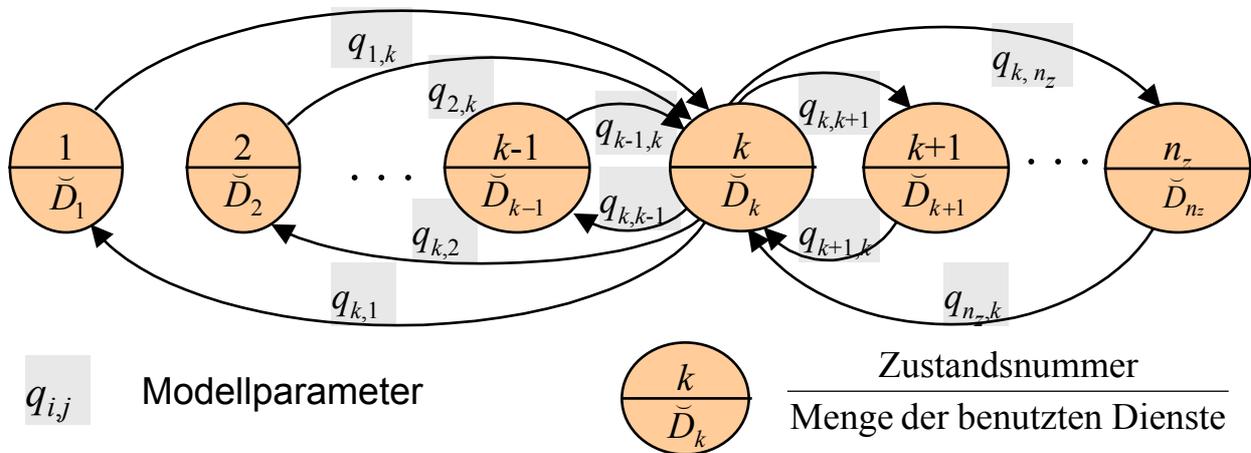


Bild 2.2 Verkehrsmodell mit den Zustandsübergangsraten $q_{k,j}$ (Markoff-Modell) eines Multiservice-Teilnehmers, dem mehrere Dienste D_i zur Verfügung stehen (nur Übergänge von und nach k dargestellt)

Durch eine geeignete lineare Abbildung ist es jedoch möglich, die Verkehrsmodellparameter (Raten des Markoff-Modells) aus den Teilnehmer-Messgrößen zu berechnen. Dies erfolgt im kommenden Abschnitt.

2.1.1.3 Berechnung der Modellparameter aus den Teilnehmer-Messgrößen

Ein Teilnehmer hat n_z Zustände. Für einen Zustand k , von dem aus $n_{\bar{u}}(k)$ Übergänge zu anderen Zuständen möglich sind, sind die $n_{\bar{u}}(k)$ Zustandsübergangsraten $q_{i,j}$ festzulegen. Aus den bekannten (gemessenen) $n_{\bar{u}}(k)$ bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten $p_{k,j}$ erhält man $n_{\bar{u}}(k)-1$ linear unabhängige Bestimmungsgleichungen. Die noch fehlende Bestimmungsgleichung erhält man aus der mittleren Verweildauer \bar{T}_k für diesen Zustand. Die sich ergebenden Bestimmungsgleichungen werden in den folgenden zwei Abschnitten hergeleitet.

Bestimmungsgleichungen aus den Verzweigungswahrscheinlichkeiten

Betrachtet wird ein Zustand k , von dem $n_{\bar{u}}(k)$ Verzweigungen zu anderen Zuständen existieren. Aus den $n_{\bar{u}}(k)$ Verzweigungswahrscheinlichkeiten lassen sich $n_{\bar{u}}(k)-1$ linear unabhängige Bestimmungsgleichungen für die Raten $q_{k,j}$ aufstellen. Die Verzweigungswahrscheinlichkeit

$p_{k,j}$ von k nach j ist bestimmt durch das Verhältnis der Rate für den Übergang von Zustand k nach j und der Summe aller abgehenden Raten:

$$p_{k,j} = \frac{q_{k,j}}{\sum_{\forall i, i \neq k} q_{k,i}} \quad \text{für } k = 1, 2 \dots n_z, j = 1, 2 \dots n_z \wedge j \neq k \quad . \quad (2.4)$$

Durch Umformen von Gleichung (2.4) und Herausziehen der Rate $q_{k,j}$ aus der Summe ergibt sich folgende Bestimmungsgleichung für die Raten aus den bekannten Verzweigungswahrscheinlichkeiten:

$$\left(1 - \frac{1}{p_{k,j}}\right) q_{k,j} + \sum_{\forall i, i \neq k, i \neq j} q_{k,i} = 0 \quad \text{für } k = 1, 2 \dots n_z, j = 1, 2 \dots n_z - 1 \wedge j \neq k \quad . \quad (2.5)$$

Für den Fall, dass zwischen zwei Knoten k und j keine Verbindung im Markoff-Modell existiert, ist die entsprechende Verzweigungswahrscheinlichkeit $p_{k,j}$ gleich Null und folglich auch zugehörige Rate $q_{k,j}$.

Bestimmungsgleichung mit der mittleren Verweildauer \overline{T}_k

Die noch fehlende Bestimmungsgleichung ergibt sich aus der mittleren Verweildauer \overline{T}_k im Zustand k zu

$$\sum_{\forall i, i \neq k} q_{k,i} = \frac{1}{\overline{T}_k} \quad . \quad (2.6)$$

Nach Anwenden der Gleichungen (2.5) und (2.6) für jeden Teilnehmerzustand sind alle Zustandsübergangsraten im Teilnehmer-Verkehrsmodell bestimmt.

2.1.1.4 Definition der abgeleiteten Beschreibungsgrößen zur Charakterisierung des Teilnehmerverhaltens auf der Verbindungsebene

Wichtige Größen zur Charakterisierung des Teilnehmers auf der Verbindungsebene sind die Zustandswahrscheinlichkeiten π_k im stationären, statistischen Gleichgewichtszustand des Teilnehmers, die Multiservice-Faktoren K_k für alle Zustände des Teilnehmers und der mittlere Kanalbedarf \overline{m}_T des Teilnehmers.

Zustandswahrscheinlichkeiten

Im stationären, statistischen Gleichgewichtszustand ist die Wahrscheinlichkeit für den Übergang in einen Zustand gleich der Wahrscheinlichkeit für das Verlassen dieses Zustands. Für die Zustandswahrscheinlichkeiten der n_z Zustände lässt sich zusammen mit der Normierungsbedingung ein Gleichungssystem mit n_z linear unabhängigen Gleichungen aufstellen. Eine Gleichung ist die Normierungsbedingung für die Wahrscheinlichkeiten.

$$\begin{aligned} -\pi_k \cdot \sum_{\forall i, i \neq k} q_{k,i} + \sum_{\forall i, i \neq k} \pi_i \cdot q_{i,k} &= 0 & \text{für } k = 1, 2 \dots n_z - 1 \\ \sum_{\forall i} \pi_i &= 1 & \text{für } k = n_z \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die erste Summe in den Gleichungen für die Gleichgewichtsbedingungen enthält alle Raten an den abgehenden Kanten und die zweite Summe die Raten von ankommenden Kanten im Markoff-Modell (Bild 2.2).

Multiservice-Faktoren K_k in den Zuständen k , in denen mehr als ein Dienst benutzt wird

Der Multiservice-Faktor K_k für einen Zustand k beschreibt die statistische Abhängigkeit für die Benutzung der Dienste der Menge \tilde{D}_k durch den Teilnehmer im Zustand k . Er wird definiert als die Zustandswahrscheinlichkeit π_k dividiert durch das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Zustände, in denen jeweils nur der eine Dienst D_i benutzt wird.

$$K_k = \frac{\pi_k}{\prod_{\forall i | i \in \{1, \dots, n_z\}, |\tilde{D}_i|=1, \tilde{D}_i \subset \tilde{D}_k} \pi_i} \quad (2.8)$$

Die zulässigen Werte für die Multiservice-Faktoren sind größer oder gleich Null. Ihr Wert gibt an, um welchen Faktor sich die Zustandswahrscheinlichkeit eines Kombinationszustands von derjenigen des unkorrelierten Falls unterscheidet. Multiservice-Faktoren kleiner eins sagen aus, dass die Wahrscheinlichkeit für eine gleichzeitige Benutzung der Dienste geringer als im unkorrelierten Fall ist. Im unkorrelierten Fall, wenn die Benutzung der einzelnen Dienste statistisch unabhängige Ereignisse sind, ist K_k gleich eins. Ein Wert größer eins ergibt sich, wenn die gleichzeitige Benutzung der Dienste wahrscheinlicher ist als im unkorrelierten Fall.

Die Multiservice-Faktoren sind zusammen mit dem mittleren Kanalbedarf für die Verkehrskapazität von Telekommunikationssystemen die entscheidenden Teilnehmer-Modellparameter auf der Verbindungsebene.

Mittlerer Kanalbedarf pro Teilnehmer $\overline{m_{T,V}}$

In den n_z unterschiedlichen Zuständen, in denen sich ein Teilnehmer befinden kann, benötigt er eine unterschiedliche Anzahl von Kommunikationskanälen. Der Bedarf wird durch den Kanalbedarfsvektor $\underline{m_{T,V}}$ des Teilnehmers beschrieben.

$$\underline{m_{T,V}} = [m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_k \quad \cdots \quad m_{n_z}] \quad (2.9)$$

Der mittlere Kanalbedarf $\overline{m_{T,V}}$ ist gleich dem Skalarprodukt aus Kanalbedarfsvektor und dem transponierten Zustandswahrscheinlichkeitsvektor $\underline{\pi}^T$.

$$\overline{m_{T,V}} = \underline{m_{T,V}} \cdot \underline{\pi}^T \quad (2.10)$$

Das Skalarprodukt ist die mit den Zustandswahrscheinlichkeiten gewichtete Summe aus dem Kanalbedarf in den einzelnen Zuständen.

2.1.1.5 Modellierung eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Verbindungsebene

Ein Sprachdienst-Teilnehmer befindet sich aus der Sicht des Kommunikationssystems im Zustand 'Frei', wenn er keine Sprachverbindung unterhält. Nach einer Aufenthaltszeit T_F wechselt er in den Zustand 'Sprachverbindung'. Diese Zustände sind in Bild 2.3 mit 'F' und 'S' bezeichnet. Die Aufenthaltszeit T_F ist eine Zufallsgröße. Sie wird durch eine negativ exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) mit der mittleren Ankunftsrate $\lambda = 1/\overline{T_F}$ ausreichend genau modelliert. Die Dauer einer Sprachverbindung, oder aus Sicht des Systems die Belegungsdauer eines Kommunikationskanals, wird auch durch eine negativ exponentiell verteilte Zufallsgröße T_S mit der mittleren Enderate $\mu = 1/\overline{T_S}$ beschrieben.

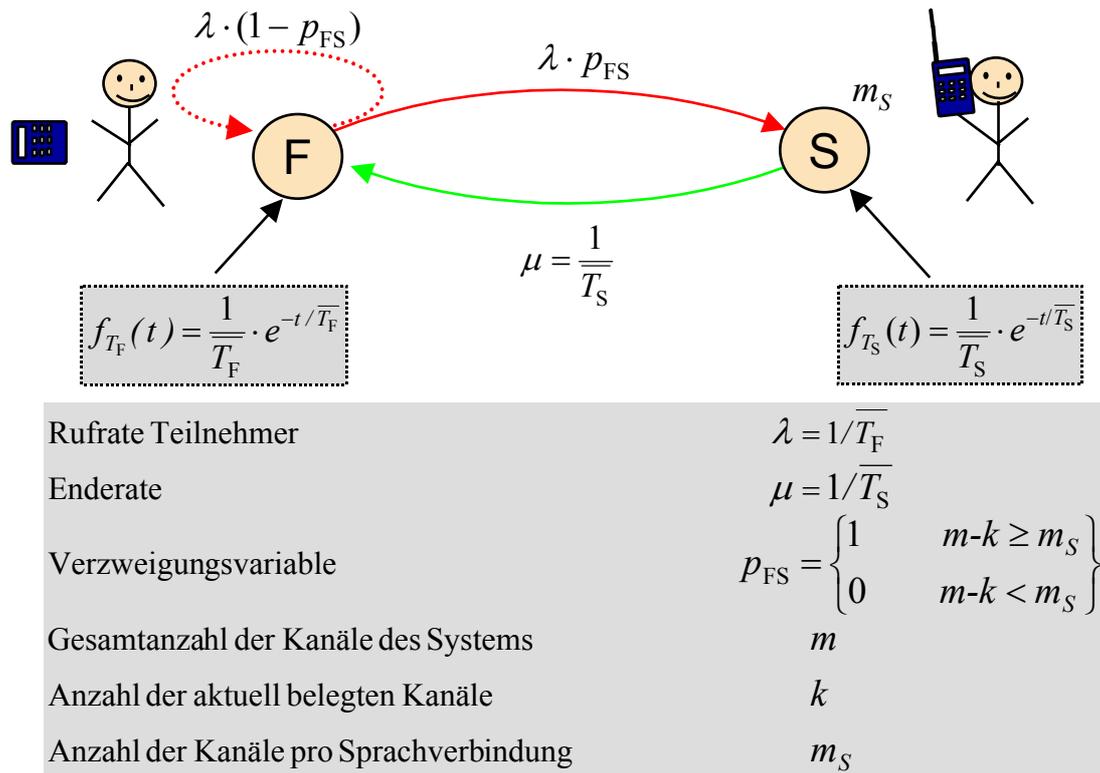


Bild 2.3 Markoff-Modell zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Verbindungsebene

Der Teilnehmer ist entweder im Zustand ‘Frei’ oder im Zustand ‘Sprachverbindung’. Vom Zustand ‘Frei’ wechselt er nach der Zeit T_F in den Zustand ‘Sprachverbindung’ und belegt m_S Kanäle, sofern die Anzahl der freien Kanäle $m-k$ nicht kleiner als sein Kanalbedarf m_S ist. Der *Kanalbedarf* ist die Anzahl an Übertragungskanälen, die zur Bereitstellung eines Telekommunikationsdienstes erforderlich ist. Für eine Sprachverbindung ist $m_S=1$.

Die Größe m ist die gesamte Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle. Die zum Zeitpunkt des Belegungsversuchs bereits belegte Anzahl von Kanälen wird mit k bezeichnet. Falls weniger als m_S Kanäle im System frei sind ($m-k < m_S$), wird der Ruf abgewiesen. Der Teilnehmer bleibt im Zustand ‘Frei’ (punktierte Linie) und startet nach einer weiteren Zeit T_F einen erneuten Belegungsversuch. Im Zustand ‘Sprachverbindung’ verbleibt der Teilnehmer die Zeit T_B , bevor er die m_S Kanäle wieder freigibt und in den Zustand ‘Frei’ zurückkehrt.

Abbildung der Teilnehmer-Messgröße auf die Modellparameter

Zur Beschreibung eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Verbindungsebene genügen die beiden Parameter mittlere Verweildauer \overline{T}_F im Zustand ‘Frei’ und mittlere Gesprächsdauer \overline{T}_S im Zustand ‘Sprachverbindung’.

Die Übergangsraten λ und μ sind die Kehrwerte der mittleren Verweildauern in den Zuständen ‘F’ und ‘S’:

$$\begin{aligned}\lambda &= 1/\overline{T}_F \\ \mu &= 1/\overline{T}_S\end{aligned}\quad (2.11)$$

Abgeleitete Beschreibungsgrößen zur Charakterisierung eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Verbindungsebene

Die Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand ‘Frei’ ist

$$\pi_F = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.12)$$

und für den Zustand ‘Sprachverbindung’

$$\pi_S = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.13)$$

Der Vektor für den Kanalbedarf lautet

$$\underline{m}_{T,V} = [0 \quad m_S] \quad (2.14)$$

Daraus ergibt sich ein mittlerer Kanalbedarf von

$$\overline{m}_{T,V} = \pi_S \cdot m_S = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot m_S = \frac{\overline{T}_S}{\overline{T}_S + \overline{T}_F} \cdot m_S \quad (2.15)$$

Rückwirkung des Systems auf den Teilnehmer

Ein Teilnehmer befindet sich mit der Wahrscheinlichkeit π_S im Zustand ‘Sprachverbindung’, wenn er bei jedem Belegungsversuch die geforderte Anzahl von Kanälen m_S erhält (kein Verbindungsaufbaublockierung). Erhält er nur mit der Wahrscheinlichkeit $1-p_B$ die für einen Ver-

bindungsaufbau erforderliche Anzahl von Kanälen, so wirkt sich diese auf die Zustandswahrscheinlichkeiten aus.

Die Zustandswahrscheinlichkeiten des Teilnehmers im Fall einer Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit größer Null sind

$$\pi_{R,F} = \frac{\mu}{\lambda(1-p_B) + \mu} \quad (2.16)$$

im Zustand ‘Frei’ und

$$\pi_{R,S} = \frac{\lambda(1-p_B)}{\lambda(1-p_B) + \mu} \quad (2.17)$$

im Zustand ‘Sprachverbindung’. Aus dem Vergleich der Gleichungen (2.12) und (2.13) mit den Gleichungen (2.16) und (2.17) ist ersichtlich, dass die Übergangsrate vom Zustand ‘Frei’ zum Zustand ‘Sprachverbindung’ um den Faktor $(1-p_B)$ modifiziert wird. Der Faktor $(1-p_B)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass keine Blockierung auftritt.

2.1.1.6 Modellierung eines Multiservice-Teilnehmers auf der Verbindungsebene

Im Gegensatz zu einem Sprachdienst-Teilnehmer kann ein Multiservice-Teilnehmer zwischen unterschiedlichen Diensten und deren Kombinationen auswählen. Als ein typisches Teilnehmerterminal könnte man sich einen Laptop mit integriertem DECT- oder GSM-Terminal [4] vorstellen. Es bietet Terminalmobilität und ermöglicht dem Teilnehmer, zu telefonieren und Daten zu übertragen. Der Teilnehmer kann auch beide Dienste gleichzeitig benutzen, um z.B. während einer längeren Datenübertragung ein Telefongespräch zu führen.

Das Verkehrsmodell Bild 2.4 beschreibt das Teilnehmerverhalten eines Benutzers von Sprach- und Datendiensten auf der Verbindungsebene. Der Teilnehmer ist in einem der Zustände Frei ‘F’, Sprachverbindung ‘S’, Datenverbindung ‘D’ oder bei gleichzeitiger Benutzung der beiden Dienste im Zustand Sprach-/Datenverbindung ‘SD’. Die Pausen bei der Informationsübertragung während dieser Zustände werden nicht modelliert, da die Kanäle exklusiv während der gesamten Dauer der Verbindung zugeteilt sind und die Pausen somit keinen Einfluss auf die Verkehrslast des Systems haben. Während der Dauer einer Verbindung werden bei Auswahl des Sprachdienstes m_s Übertragungskanäle und bei Auswahl des Datendienstes m_D Übertragungskanäle belegt. Wenn beide Dienste gleichzeitig benutzt werden (im

Zustand ‘Sprach-/Datenverbindung’), werden m_{SD} Kanäle belegt. Diese Anzahl ist in der Regel die Summe aus den Kanalbelegungen der beiden Dienste Sprach- und Datenübertragung. Die Dynamik im Teilnehmerverhalten wird durch die Zustandsübergangsraten λ und μ bestimmt. Der Parameter λ wird zur Beschriftung von Übergängen verwendet, bei denen zusätzliche Kanäle erforderlich sind. Der Parameter μ steht an Übergängen, bei denen Übertragungskanäle freigegeben werden.

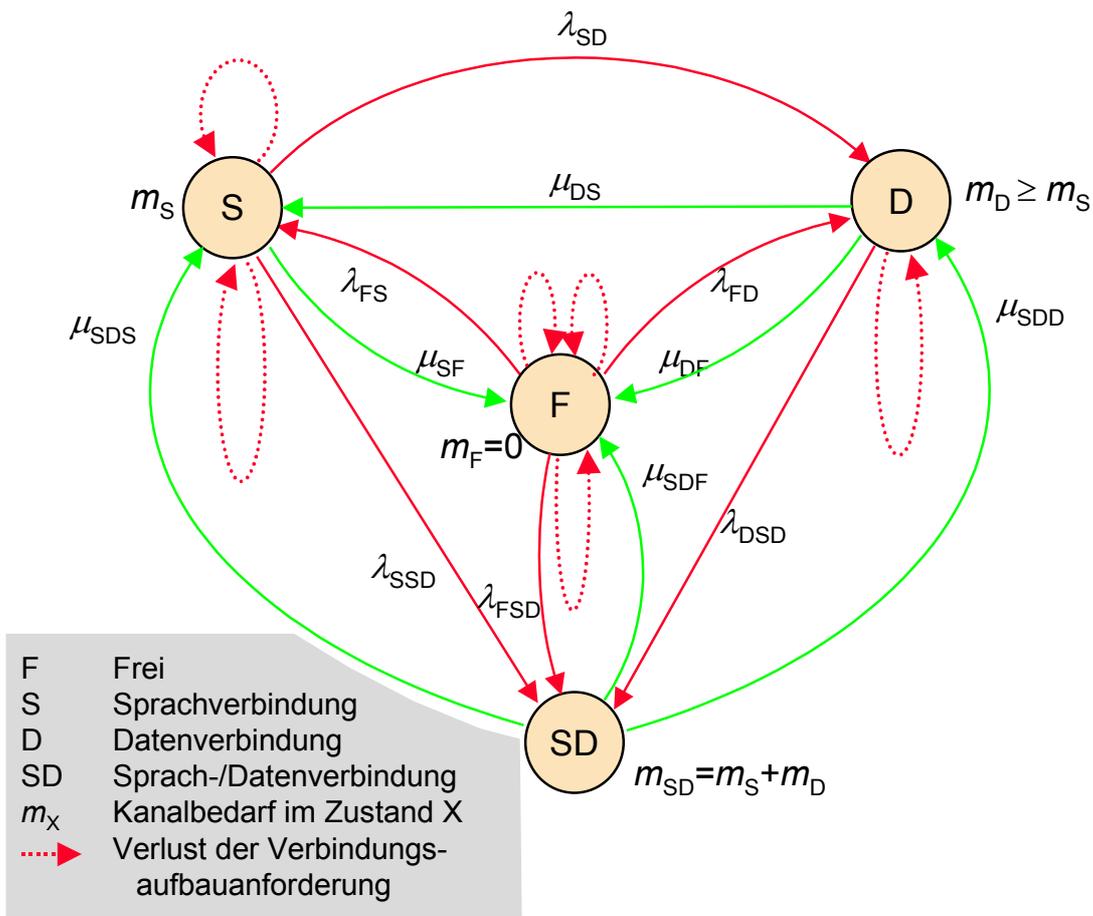


Bild 2.4 Verkehrsmodell eines Multiservice-Teilnehmers, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt

Die Übergangsraten λ und μ sind die Verkehrsmodellparameter. Sie sind keine geeigneten Teilnehmer-Messgrößen. Gut eignen sich die bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten gemäß Gleichung (2.3) und eine der mittleren Verweilzeiten der einzelnen Zustände, wie sie in Abschnitt 2.1.1.3 allgemein definiert sind. Im folgenden Abschnitt ist die Ermittlung der Raten des Multiservice-Verkehrsmodells aus den oben genannten Teilnehmer-Messgrößen durch Anwendung der allgemeingültigen Gleichungen (2.5) und (2.6) kurz beschrieben.

Abbildung der Teilnehmer-Messgrößen auf die Modellparameter

Geeignete Teilnehmer-Messgrößen sind die Verzweigungswahrscheinlichkeiten und die mittlere Verweildauer im Zustand ‘Frei’ \overline{T}_F . Die Teilnehmer-Messgrößen sind damit für den Multiservice-Teilnehmer:

\overline{T}_F	Mittlere Verweildauer im Zustand Frei,
p_{XY}	bedingte Verzweigungswahrscheinlichkeit vom Zustand X in den Folgezustand Y (unter der Bedingung, dass ein Zustandswechsel erfolgt),

für die vier Zustände ‘F’, ‘S’, ‘D’ und ‘SD’.

Die zwölf Übergangsraten erhält man durch Lösen eines linearen Gleichungssystems mit 3 Gleichungen für jeden der vier Knoten. Jeweils 2 Gleichungen enthalten die Verzweigungswahrscheinlichkeit und eine Gleichung die mittlere Verweilzeit des betrachteten Zustands. Die so ermittelten Raten eignen sich für die weitere Berechnung der Leistungsgrößen von Mobilfunksystemen mit Multiservice-Teilnehmern bei fester Kanalzuteilung (Abschnitt 4.2).

Aus den Messgrößen abgeleitete Beschreibungsgrößen zur Charakterisierung eines Multiservice-Teilnehmers auf der Verbindungsebene

Zur Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten π werden die Gleichgewichtsbedingungen für drei Zustände und die Normierungsbedingung für die Wahrscheinlichkeiten nach Gleichung (2.7) aufgestellt. Der Zustand ‘SD’ ist der einzige Zustand, in dem mehr als ein Dienst benutzt wird. Der Multiservice-Faktor für die gleichzeitige Benutzung dieser Dienste ist:

$$K_{SD} = \frac{\pi_{SD}}{\pi_S \cdot \pi_D} \quad (2.18)$$

Ein Multiservice-Faktor ungleich eins bedeutet in diesem Fall, dass die Benutzung der beiden Dienste ‘Sprache’ und ‘Datenübertragung’ statistisch abhängig ist. Ein Multiservice-Faktor K_{SD} kleiner eins bedeutet $\pi_{SD} < \pi_S \cdot \pi_D$, d.h. wenn bereits ein Dienst benutzt wird, ist die Wahrscheinlichkeit für die Benutzung des zweiten Dienstes geringer, als dies der Fall wäre, wenn noch kein Dienst benutzt wird. Bei einem Multiservice-Faktor größer eins erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für die Benutzung des zweiten Dienstes.

Der mittlere Kanalbedarf eines Multiservice-Teilnehmers ist das Skalarprodukt aus dem Kanalbedarfsvektor \underline{m}_T und dem transponierten Zustandswahrscheinlichkeitsvektor π des Teilnehmers.

$$\overline{m_{T,V}} = \underline{m}_T \cdot \underline{\pi} = m_{SD} \cdot \pi_{SD} + m_D \cdot \pi_D + m_S \cdot \pi_S + 0 \cdot \pi_F \quad . \quad (2.19)$$

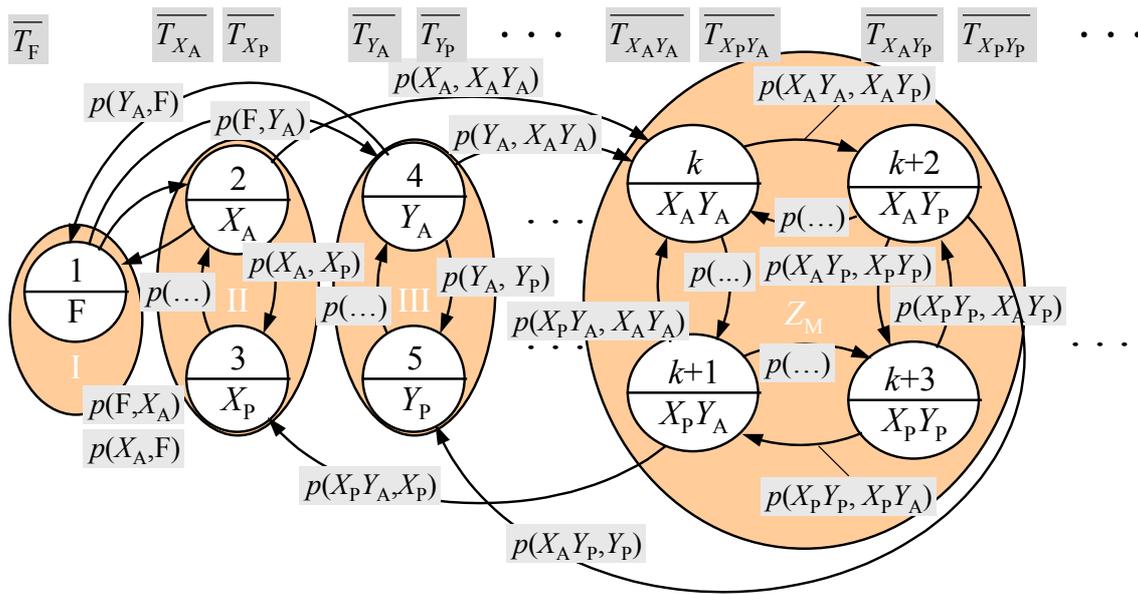
Durch die Definition des mittleren Kanalbedarfs für Sprachdienst-Teilnehmer und Multiservice-Teilnehmer erhält man eine gemeinsame Größe als Maß für die mittlere Verkehrsbelastung des Telekommunikationssystems durch einen Teilnehmer. Bei einem Vergleich der maximal möglichen Teilnehmeranzahlen zeigt sich, dass bei Multiservice-Teilnehmern mit gleicher nomineller Last (gleichem mittleren Kanalbedarf) geringere Teilnehmeranzahlen als bei Sprachdienst-Teilnehmern möglich sind (Bild 4.22).

2.1.2 Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Aktivitätsebene

Die Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Aktivitätsebene unterscheidet die verschiedenen Aktivitätszustände einer Verbindung. Im Vergleich zur Beschreibung auf der Verbindungsebene, werden bei der Beschreibung auf der Aktivitätsebene die Vorgänge mit einer feineren Zeitauflösung wiedergegeben. Die Aktivitätszustände einer Verbindung unterscheiden sich in ihrem Bedarf an Systemressourcen und ihrer zeitlichen Dauer. Diese feinere zeitliche Auflösung des Teilnehmerverhaltens ist notwendig zur Bestimmung der statistischen Leistungsgrößen von Systemen, in denen die von einem Teilnehmer belegten Ressourcen am Ende einer Übertragungsphase wieder für andere Teilnehmer frei gegeben werden. Ein Beispiel hierfür sind Systeme, die 'Packet Reservation Multiple Access' (*PRMA*) als Zugriffsverfahren verwenden. Die Unterschiede in der Tiefe der Modellierung werden aus dem Vergleich von Bild 2.1 mit Bild 2.5 deutlich.

Jeder Zustand i eines Teilnehmers auf der Verbindungsebene ist gekennzeichnet durch die Menge der benutzten Dienste \check{D}_i und durch deren Aktivitätszustände. Die Menge der benutzten Dienste mit ihren Aktivitätsvariablen in Zustand i ist

$$\check{D}_i^A = \{D_{a,j}\} \quad . \quad (2.20)$$



Zustandsnummer
Dienste mit Aktivitätsvariablen

Teilnehmerparameter	
Z_M	Makrozustand Z_M : in den zugehörigen Einzelzuständen i werden die gleichen Dienste benutzt
$\overline{T_{X_U Y_V}}$	Mittlere Verweilzeit im Zustand ' $X_U Y_V$ '
U, V	Aktivitätsvariablen für den Dienst X bzw. Y mit den Werten : 'A' = Aktiv, 'P' = Pause
$p(Z_{M1}, Z_{M2})$	Bedingte Verzweigungswahrscheinlichkeit zwischen den Zuständen Z_{M1} und Z_{M2}

Bild 2.5 Ausschnitt aus dem Teilnehmermodell eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene

Zum Beispiel haben für den Zustand k in Bild 2.5 die Elemente D_{aj} die Werte 'X_A' und 'Y_A'. Die Elemente der Menge der benutzten Dienste \check{D}_i sind dagegen nur die Dienste X und Y ohne Kennzeichnung ihres Aktivitätszustandes. Diese Mengen sind für alle Zustände eines Makro-Zustandes gleich. Ein *Makro-Zustand* ist definiert durch die Menge aller Zustände, in denen die gleiche Kombination von Diensten XY benutzt wird.

Die Zustände innerhalb eines Makro-Zustandes unterscheiden sich in mindestens einer der Aktivitätsvariablen. Die Anzahl der benutzten Dienste in Zustand i ist die Mächtigkeit $|\check{D}_i|$

der Menge \check{D}_i . Sie ist gleich der Mächtigkeit $|\check{D}_i^A|$ und für alle Zustände eines Makro-Zustandes gleich.

Der Ausschnitt aus dem Zustandsübergangsdiagramm in Bild 2.5 beschreibt die Zustände des Teilnehmers, in denen die Dienste X und Y benutzt werden. Innerhalb der Makro-Zustände liegen Zustände, die durch die benutzten Dienste und ihre momentane Aktivität gekennzeichnet sind. Im obigen Beispiel existieren für beide Dienste X und Y die Aktivitätsmerkmale ‘Aktiv’ und ‘Pause’. Die Aktivität wird durch die beiden Indizes ‘A’ (für Aktivitätsmerkmal „Aktiv“) und ‘P’ (für Aktivitätsmerkmal „Pause“) festgehalten. Die gerichteten Kanten sind mit den bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten beschriftet. Sie sind in Gleichung (2.3) definiert. Dabei existieren innerhalb eines Makro-Zustandes nur Übergänge zwischen Zuständen, die sich nur in einer Aktivitätsvariablen unterscheiden. Das resultiert aus der Modellierung mit zeitkontinuierlichen Markoff-Ketten, bei denen immer nur eine Zustandsänderung zu einem Zeitpunkt stattfindet.

Dieses Modell eignet sich auch zur mathematischen Beschreibung zeitlicher Schwankungen in der Anzahl der erforderlichen Kanäle während der Benutzung eines Dienstes, die nicht nur zwischen den beiden Extremen ‘Null’ und ‘maximale Anzahl erforderlicher Kanäle’ wechseln (Dienste mit variabler Bandbreite). Um diesen Sachverhalt abzubilden, sind für diesen Dienst zu den beiden Aktivitätszuständen ‘Aktiv’ und ‘Pause’ weitere Zustände mit dem dazwischen liegenden Bedarf an Kanälen einzuführen.

2.1.2.1 Berechnung der Modellparameter aus den Teilnehmer-Messgrößen

Zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens auf der Aktivitätsebene eignen sich die gleichen Parameter wie auf der Verbindungsebene (Abschnitt 2.1.1). Es sind die bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten p_{XY} und die Verweildauern $\overline{T_X}$ in jedem der Zustände. Dabei ist es ohne Bedeutung, zu welchem Makro-Zustand die Zustände gehören. Dadurch ist es möglich, bei Verwendung der Knotennummern zur Indizierung, die Gleichungen (2.5) und (2.6) aus Abschnitt 2.1.1 anzuwenden. Das zeitkontinuierliche Markoff-Modell auf der Aktivitätsebene erhält man durch Ersetzen der Verzweigungswahrscheinlichkeiten p im Zustandsübergangsmodell (Bild 2.5) durch die ermittelten Zustandsübergangsraten q . Die Ermittlung der entsprechenden Zustandsübergangsraten erfolgt nach den Gleichungen (2.5) und (2.6).

2.1.2.2 Definition der abgeleiteten Beschreibungsgrößen zur Charakterisierung des Teilnehmerverhaltens auf der Aktivitätsebene

Die entscheidenden Teilnehmer-Messgrößen auf der Aktivitätsebene für die Verkehrskapazität von Telekommunikationssystemen sind neben dem mittleren Kanalbedarf auf der Aktivitätsebene $\overline{m_{T,Ak}}$ die Multiservice-Faktoren K_{ZM} in den Makro-Zuständen. Er ist bei einem kleinen Wert der Verkehrsgüte G_{oS} näherungsweise gleich dem Verkehrswert pro Teilnehmer.

Zustandswahrscheinlichkeiten der Einzelzustände π_k und der Makro-Zustände π_{ZM}

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zustände π_k im statistischen Gleichgewichtszustand erfolgt über die Gleichung (2.7) in Abschnitt 2.1.1. Die Zustandswahrscheinlichkeit eines Makro-Zustands π_{ZM} ist die Summe der Wahrscheinlichkeiten der zugehörigen Einzelzustände.

$$\pi_{ZM} = \sum_{\forall i: \check{D}_i = \check{D}_{ZM}} \pi_i \quad (2.21)$$

Das gemeinsame Merkmal der Einzelzustände i im gleichen Makrozustand ist die identische Menge der benutzten Dienste

$$\check{D}_i = \check{D}_{ZM} \quad (2.22)$$

\check{D}_{ZM} ist die Menge der benutzten Dienste im Makro-Zustand Z_M .

Multiservice-Faktoren K_{ZM} in den Makro-Zuständen Z_M , in denen mehr als ein Dienst benutzt wird

Der Multiservice-Faktor K_{ZM} für einen Makro-Zustand Z_M beschreibt die statistische Abhängigkeit der Benutzung der einzelnen Dienste der Menge \check{D}_{ZM} durch den Teilnehmer im Makro-Zustand Z_M . Er wird definiert als die Zustandswahrscheinlichkeit π_{ZM} dividiert durch das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Makro-Zustände, in denen jeweils nur der eine Dienst D_{YM} benutzt wird.

$$K_{ZM} = \frac{\pi_{ZM}}{\prod_{\forall YM: |\bar{D}_{YM}|=1 \wedge \bar{D}_{YM} \subseteq \bar{D}_{ZM}} \pi_{YM}} \quad (2.23)$$

Die zulässigen Werte für Multiservice-Faktoren sind größer oder gleich Null. Ihr Wert gibt an, um welchen Faktor sich die Zustandswahrscheinlichkeit eines Kombinationszustands von derjenigen des statistisch unabhängigen Falls bei der Benutzung der Dienste unterscheidet. Im statistisch unabhängigen Fall ist die Zustandswahrscheinlichkeit des Kombinationszustands Z_M gleich dem Produkt der Zustandswahrscheinlichkeiten der Zustände Y_M , in denen die Dienste exklusiv genutzt werden. In diesem Fall ist der Multiservice-Faktor gleich eins. Die Aussagen, die aufgrund der Größe des Multiservice-Faktors gemacht werden können, sind die gleichen wie bei der Modellierung auf der Verbindungsebene. Multiservice-Faktoren kleiner eins sagen aus, dass die Wahrscheinlichkeit für eine gleichzeitige Benutzung der Dienste kleiner ist als die im statistisch unabhängigen Fall. Im statistisch unabhängigen Fall ist K_i gleich eins. Ein Wert größer eins ergibt sich, wenn die gleichzeitige Benutzung der Dienste wahrscheinlicher ist als im statistisch unabhängigen Fall.

Mittlerer Kanalbedarf pro Teilnehmer auf der Aktivitätsebene $\overline{m_{T,Ak}}$

In den n_z unterschiedlichen Zuständen, in denen sich ein Teilnehmer befinden kann, benötigt er eine unterschiedliche Anzahl von Kommunikationskanälen. Der Bedarf wird durch den Kanalbedarfsvektor $\underline{m}_{T,Ak}$ des Teilnehmers auf der Aktivitätsebene beschrieben:

$$\underline{m}_{T,Ak} = [m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_k \quad \cdots \quad m_{n_z}] \quad (2.24)$$

Der mittlere Kanalbedarf $\overline{m_{T,Ak}}$ ist gleich dem Skalarprodukt aus Kanalbedarfsvektor $\underline{m}_{T,Ak}$ und dem transponierten Zustandswahrscheinlichkeitsvektor $\underline{\pi}^T$ der Einzelzustände.

$$\overline{m_{T,Ak}} = \underline{m}_{T,Ak} \cdot \underline{\pi}^T \quad (2.25)$$

Das Skalarprodukt ist die mit den Zustandswahrscheinlichkeiten gewichtete Summe aus dem Kanalbedarf in den einzelnen Zuständen.

Mittlerer Kanalbedarf eines Teilnehmers in dem Makro-Zustand Z_M

Der mittlere Kanalbedarf im Makro-Zustand Z_M ist die Summe der mit den Zustandswahrscheinlichkeiten π_i gewichteten Kanalansforderungen m_i in den Zuständen, die zum Makro-Zustand Z_M gehören:

$$\overline{m_{Z_M, Ak}} = \sum_{\forall i: \bar{D}_i = \bar{D}_{Z_M}} (m_i \pi_i) \quad . \quad (2.26)$$

Äquivalenter mittlerer Kanalbedarf $\overline{m_{T, V\ddot{a}q}}$ des auf der Verbindungsebene modellierten Teilnehmers

Der äquivalente, mittlere Kanalbedarf des Teilnehmers auf der Verbindungsebene ist definiert als der Bedarf an Kanälen in einem Telekommunikationssystem, der erforderlich wäre, wenn das System nicht die Möglichkeit bietet, die Anzahl der vom Teilnehmer belegten Kanäle während der Dauer einer Verbindung zu variieren. Bei solchen Systemen wird ungeachtet des Aktivitätszustands in allen Zuständen eines Makro-Zustandes Z_M immer die maximal erforderliche Anzahl von Kanälen:

$$m_{Z_M, V\ddot{a}q} = \max_{\forall i: \bar{D}_i = \bar{D}_{Z_M}} (m_i) \quad (2.27)$$

ab dem Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus belegt. Dadurch ist gewährleistet, dass auch in den Spitzenzeiten die für den Dienst benötigte Übertragungsrate zur Verfügung steht. Dies ist der Fall, wenn von allen im Makro-Zustand Z_M benutzten Diensten gleichzeitig die maximale Übertragungsrate benötigt wird (worst case). Ein System mit einem statischen Zugriffsverfahren (TDMA) hat den Nachteil, dass in den Übertragungspausen während der Dauer einer Verbindung der in diesen Phasen ungenutzte Übertragungskanal nicht für andere Teilnehmer freigegeben wird.

Der äquivalente mittlere Kanalbedarf für einen Teilnehmer in einem System mit statischem Zugriffsverfahren ist die mit den Zustandswahrscheinlichkeiten der Makro-Zustände gewichtete Summe der maximalen Kanalanzahlen $m_{Z_M, V\ddot{a}q}$ der Marko-Zustände Z_M :

$$\overline{m_{T, V\ddot{a}q}} = \sum_{\forall Z_M} m_{Z_M, V\ddot{a}q} \cdot \pi_{Z_M} \quad . \quad (2.28)$$

Dieser äquivalente mittlere Kanalbedarf ermöglicht zusammen mit den Multiservice-Faktoren in Gleichung (2.23), ein äquivalentes Teilnehmermodell auf der Verbindungsebene zu erzeugen. Es erzeugt eine vergleichbare Verkehrslast auf der Verbindungsebene. Dadurch wird es auch möglich, auf der Verbindungsebene modellierte Systeme mit statischer Kanalzuteilung mit auf der Aktivitätsebene modellierten Systemen mit dynamischer Kanalzuteilung zu vergleichen. Zugriffsverfahren mit *dynamischer Kanalzuteilung* können die Anzahl der einer Verbindung zugeteilten Übertragungskanäle während der Dauer der Verbindung variieren.

Mittlere Verweildauer im Makro-Zustand Z_M

Die mittlere Verweildauer im Makro-Zustand Z_M

$$\overline{T_{Z_M}} = \frac{1}{\sum_{\forall (M,u; N,v), v \neq u} q(Z_{M,u}; Z_{N,v}) \pi_{M,u}} \quad (2.29)$$

ist der Kehrwert der mit den Zustandswahrscheinlichkeiten gewichteten Summe der Zustandsübergangsraten aller Kanten, die den Makro-Zustand Z_M verlassen. Die mittlere Verweildauer ist einer der Parameter, die im äquivalenten Ersatzmodell auf der Verbindungsebene (Abschnitt 2.1.2.3) gleich gewählt werden.

Beispiele für Verkehrsmodelle auf der Aktivitätsebene sind für einen Sprachdienst-Teilnehmer in Bild 2.7 und für einen Multiservice-Teilnehmer in Bild 2.10 gegeben.

2.1.2.3 Näherungslösung durch ein Ersatzmodell auf der Verbindungsebene

Die Anzahl der Zustände des Systemmodells $n_{Z, Sys}$ sind von der Ordnung

$$n_{Z, Sys} \approx O(m^{n_{Z, T}-1}) \quad (2.30)$$

Im Exponenten der Abschätzung für das Anwachsen der Anzahl der Zustände des Systemmodells $n_{Z, Sys}$ steht die Anzahl der Zustände des Teilnehmermodells $n_{Z, T}$. Eine Analyse des sich für Multiservice-Teilnehmer ergebenden Systemmodells auf der Aktivitätsebene durch Lösen des Gleichungssystems der Gleichgewichtsbedingungen, ist für realistische Kanalanzahlen ($m > 10$) nur möglich, wenn die Anzahl der Zustände im Teilnehmermodell $n_{Z, T}$ klein (< 5) ist. Für das Multiservice-Teilnehmermodell in Bild 2.10 ist das analytische Berechnungsverfahren, das die Zustandswahrscheinlichkeiten berechnet, bereits für eine Anzahl von $m > 10$ Kommunikationskanälen nur auf Großrechnern anwendbar.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Abbildung des Modells der Aktivitätsebene (Bild 2.5) auf ein Modell auf der Verbindungsebene (Bild 2.6) entwickelt.

Das Ersatzmodell entsteht aus dem Modell auf der Aktivitätsebene (Bild 2.5), indem die Einzelzustände aus den Makro-Zuständen entfernt werden und die gerichteten Kanten an den Makro-Zuständen enden. Das Ersatzmodell besitzt somit die gleichen Übergänge zwischen den Makro-Zuständen.

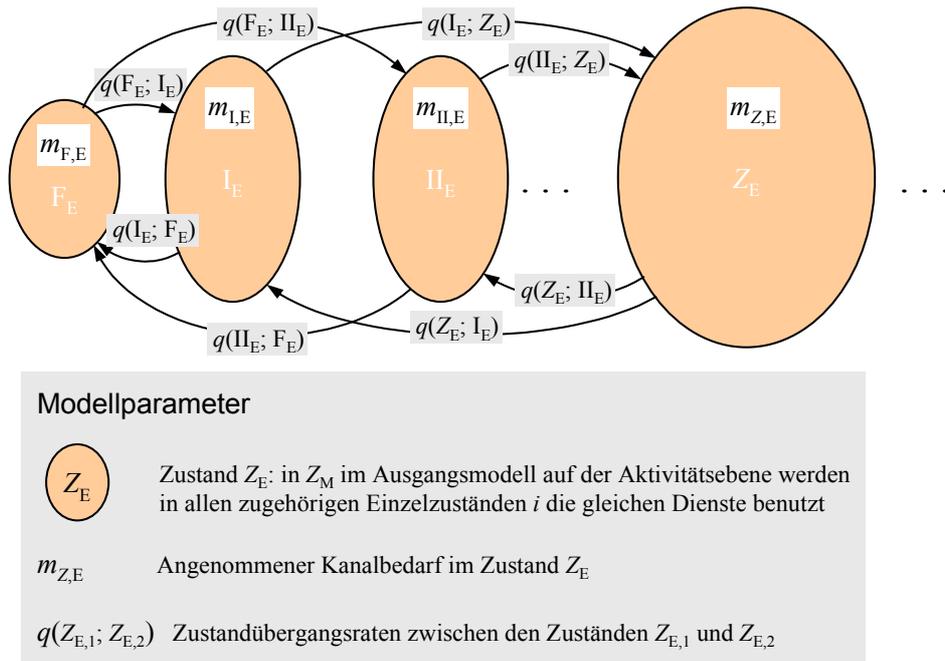


Bild 2.6 Ausschnitt aus dem Ersatzmodell eines Multiservice-Teilnehmers, der auf der Aktivitätsebene modelliert war (Bild 2.5)

Durch geeignete Wahl der Zustandsübergangsraten $q(Z_{E,u}; Z_{E,v})$ im Ersatzmodell auf der Verbindungsebene wird erreicht, dass der mittlere Kanalbedarf im Zustand Z_E des Ersatzmodells

$$\overline{m_{Z_E}} = m_{Z_E} \cdot \pi_{Z_E} \stackrel{!}{=} \overline{m_{Z_M}} = \sum_{\forall i: \bar{D}_i = \bar{D}_{Z_M}} (m_i \pi_i), \quad (2.31)$$

gleich dem mittleren Kanalbedarf im Zustand Z_M des zugehörigen Makro-Zustandes auf der Aktivitätsebene ist. Dabei wird der Kanalbedarf im Zustand Z_E des Ersatzmodells nach Gleichung (2.27) gleich der maximalen Anzahl im Makro-Zustand Z_M belegter Kanäle gewählt:

$$m_{Z_E} \stackrel{!}{=} \max_{\forall i: \bar{D}_i = \bar{D}_{Z_M}} (m_i) . \quad (2.32)$$

Durch diese Annahme ergeben sich die $n_{Z_E} - 1$ Bestimmungsgleichungen in Gleichung (2.35). Die Größe n_{Z_E} ist die Anzahl der Zustände im Ersatzmodell (= Anzahl der Makro-Zustände im Modell auf der Verbindungsebene). Eine weitere Bestimmungsgleichung erhält man durch die Wahl der Verweildauer eines Zustands des Ersatzmodells gleich der Verweildauer im Originalmodell auf der Verbindungsebene (Teil 2 von Gleichung (2.35)). Die noch fehlenden $n_{Z_E} - 2$ Gleichungen pro Knoten sind bestimmt durch die Forderung, dass die bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten zwischen den Makro-Zuständen im Originalmodell gleich den

Verzweigungswahrscheinlichkeiten zwischen den korrespondierenden Knoten im Ersatzmodell sind (Gleichung (2.38)). Die Herleitung der Gleichungen ist in den folgenden Abschnitten zu finden.

Aufstellen der Bestimmungsgleichungen für die Zustandsübergangsraten $q(Z_{E,u};Z_{E,v})$ des Ersatzmodells

Bestimmungsgleichungen aufgrund des gleichen mittleren Kanalbedarfs

Zur Erzielung des gleichen mittleren Kanalbedarfs (Gleichung (2.31)) in einem Zustand Z_E des Ersatzmodells bei einem angenommenen Kanalbedarf von m_{ZE} , aus Gleichung (2.32), muss die Zustandswahrscheinlichkeit für diesen Zustand im Ersatzmodell

$$\pi_{ZE} = \frac{\sum_{\forall i: D_i = \bar{D}_{ZM}} (m_i \pi_i)}{\max_{\forall i: D_i = \bar{D}_{ZM}} (m_i)} \quad (2.33)$$

sein. Die Parameter m_i und π_i in Gleichung (2.33) sind der Kanalbedarf bzw. die Zustandswahrscheinlichkeit eines Zustands i , der zum Makro-Zustand Z_M gehört. Die Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand 'F_E', in dem kein Kanal belegt wird, ergibt sich aus der Normierungsbedingung:

$$\pi_{FE} = 1 - \sum_{\forall ZE} \pi_{ZE} \quad . \quad (2.34)$$

Durch die Wahl des Kanalbedarfs m_{ZE} in den Zuständen des Ersatzmodells gleich dem maximal auftretenden Kanalbedarf im zugehörigen Makro-Zustand im Modell auf der Aktivitätsebene (Gleichung (2.32)), sind die Zustandswahrscheinlichkeiten im Ersatzmodell für alle Zustände außer dem Zustand 'F_E' kleiner oder höchstens gleich den Wahrscheinlichkeiten der zugehörigen Makro-Zustände im Modell auf der Aktivitätsebene. Aus der Normierungsbedingung folgt für den Zustand 'F_E' im Ersatzmodell auf der Verbindungsebene, dass die Zustandswahrscheinlichkeit mindestens gleich, in der Regel jedoch größer als die des Zustands 'F' im Modell auf der Aktivitätsebene ist.

Für $n_{ZE} - 1$ Zustände erhält man die Bestimmungsgleichungen (Gleichung (2.35)) für die Übergangsraten $q(Z_{E,u};Z_{E,v})$ zwischen zwei Zuständen $Z_{E,u}$ und $Z_{E,v}$ im Ersatzmodell aus den zuvor berechneten Zustandswahrscheinlichkeiten durch Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen (nach Gleichung (2.7)). Die Gleichung für den letzten Zustand n_{ZE} wäre linear abhängig. Aus

diesem Grund wird die mittlere Verweilzeit für den noch nicht berücksichtigten Zustand der insgesamt n_{ZE} Zustände als in beiden Modellen übereinstimmender Parameter gewählt. Besonders geeignet ist der Zustand 'F_E', da die mittlere Verweilzeit des zugehörigen Makro-Zustands 'F_M' im Originalmodell als Teilnehmer-Messgröße bereits bekannt ist und nicht zuerst berechnet werden muss.

$$\begin{aligned}
 -\pi_{ZE,u} \cdot \sum_{\forall v, v \neq k} q(Z_{E,u}; Z_{E,v}) + \sum_{\forall v, v \neq u} \pi_{ZE,v} \cdot q(Z_{E,v}; Z_{E,u}) &= 0 \quad \text{für } u = 1, 2 \dots n_{ZE} - 1 \\
 \sum_{\forall v, v \neq u} q(Z_{E,u}; Z_{E,v}) &= \frac{1}{T_{ZM,u}} \quad \text{für } u = n_{ZE}
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Die zur Bestimmung der $n_{ZE} - 1$ Übergangsraten noch fehlenden $n_{ZE} - 2$ Bestimmungsgleichungen pro Zustand Z_E werden so gewählt, dass die bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten zwischen den Zuständen im Ersatzmodell gleich den bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Originalmodell sind. Es sind jeweils die Verzweigungswahrscheinlichkeiten unter der Bedingung, dass der Makro-Zustand verlassen wird. Existiert zwischen zwei Zuständen $Z_{E,u}$ und $Z_{E,v}$ keine gerichtete Kante von $Z_{E,u}$ nach $Z_{E,v}$, so ist die Verzweigungswahrscheinlichkeit $p(Z_{E,u}; Z_{E,v})$ per Definition gleich Null.

Bestimmungsgleichungen aufgrund der gleichen bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten

Die unnormierte Verzweigungswahrscheinlichkeit (2.36) im Ersatzmodell für einen Zustandübergang vom Makro-Zustand $Z_{E,u}$ zum Makro-Zustand $Z_{E,v}$ berechnet sich als Summe der mit den Zustandswahrscheinlichkeiten π_i gewichteten Verzweigungswahrscheinlichkeiten $p_{i,j}$ des Verkehrsmodells auf der Aktivitätsebene.

$$p_{un}(Z_{E,u}; Z_{E,v}) = \sum_{\forall i: \bar{D}_i = \bar{D}_{ZM,u}} \left(\sum_{\forall j: \bar{D}_j = \bar{D}_{ZM,v}} (p_{i,j} \cdot \pi_i) \right) \quad \text{für } \forall u, v: u \neq v \tag{2.36}$$

Die innere Summe ist die Summe der gewichteten Verzweigungswahrscheinlichkeiten zwischen einem Zustand i des Ausgangs-Makro-Zustands u und den Zuständen j des Ziel-Makro-Zustandes v . In allen Zuständen j besteht eine Kommunikationsverbindung für die gleichen Dienste $\bar{D}_j = \bar{D}_{ZM,v}$. Die äußere Summe geht anschließend über alle Knoten i des Ausgangsmakro-Zustands u . Die benutzten Dienste sind in diesen Zuständen $\bar{D}_i = \bar{D}_{ZM,u}$. Die Wahrscheinlichkeiten für die Zustände des Verkehrsmodells auf der Aktivitätsebene sind entweder

als Teilnehmer-Messgröße bekannt oder können mit Hilfe von Gleichung (2.4) aus dem Verkehrsmodell auf der Aktivitätsebene berechnet werden.

Die unnormierten bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten (2.36) werden so normiert, dass die Summe der Verzweigungswahrscheinlichkeiten unter der Bedingung, dass der Zustand Z_E verlassen wird, eins ergibt.

$$p(Z_{E,u}; Z_{E,v}) = \frac{p_{\text{un}}(Z_{E,u}; Z_{E,v})}{p_{\text{un}\Sigma}(Z_{E,u})} \quad \text{mit} \quad p_{\text{un}\Sigma}(Z_{E,u}) = \sum_{\forall w: w \neq u} p_{\text{un}}(Z_{E,u}; Z_{E,w}) \quad \text{für} \quad u \neq v \quad (2.37)$$

In obiger Gleichung ist die Größe $p_{\text{un}\Sigma}(Z_{E,u})$ die Summe aller unnormierten bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Zustand $Z_{E,u}$ des Ersatzmodells. Sie ist gleich der Summe aller bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Makro-Zustand Z_{Mu} des Originalmodells.

Mit diesen Verzweigungswahrscheinlichkeiten lassen sich die Bestimmungsgleichungen, wie in Abschnitt 2.1.1.3, Gleichung (2.5) beschrieben, aufstellen.

$$\left(1 - \frac{1}{p(Z_{E,u}; Z_{E,v})}\right) q(Z_{E,u}; Z_{E,v}) + \sum_{\forall w, w \neq v} q(Z_{E,u}; Z_{E,w}) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{für } u = 1, 2 \dots n_{ZE}, \\ v = 1, 2 \dots n_{ZE} - 2 \quad \wedge \quad v \neq u \end{array} \quad (2.38)$$

Nach Lösen des Gleichungssystems mit den Zustands- und Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Gleichungen aus (2.35) und (2.38)), ist das Ersatzmodell vollständig spezifiziert. Durch diese näherungsweise Abbildung eines Verkehrsmodells von der Aktivitätsebene auf die Verbindungsebene ist eine erhebliche Reduktion der Zustände und Parameter erreicht. Dies macht in der Regel eine analytische Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten eines Telekommunikationssystems mit auf der Aktivitätsebene modellierten Teilnehmern erst möglich.

Die Anwendung dieses Ersatzmodells bei der Bestimmung der statistischen Leistungsgrößen eines Telekommunikationssystems stellt eine obere Schranke für die auftretende Last dar. Dadurch ist die Einhaltung der geforderten Leistungsmerkmale bei Anwendung des oben beschriebenen Ersatzmodells für die Dimensionierung (z.B. zulässige Teilnehmerzahl) gewährleistet. Sie werden in der Regel übertroffen.

2.1.2.4 Modellierung eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene

Ein Telefongespräch besteht aus einer Folge von Sprachaktivitäten und Sprachpausen (in der Regel während des Zuhörens). Bei Systemen mit Sprachpausenausnutzung wird der Übertragungskanal nach einer Sprachaktivität wieder freigegeben, und kann von anderen Teilnehmern belegt werden. Das Modell in Bild 2.7 gibt das Teilnehmerverhalten wieder. Der Zustand 'S' wird aufgespalten in die Teilmzustände Sprachaktivität 'S_A', Sprachpause 'S_P' und den Zustand Belegungsversuch 'S_B'. Im Zustand 'Sprachaktivität' werden m_s Kanäle belegt. In den Zuständen 'Frei', 'Sprachpause' und 'Belegungsversuch' werden keine Kanäle belegt.

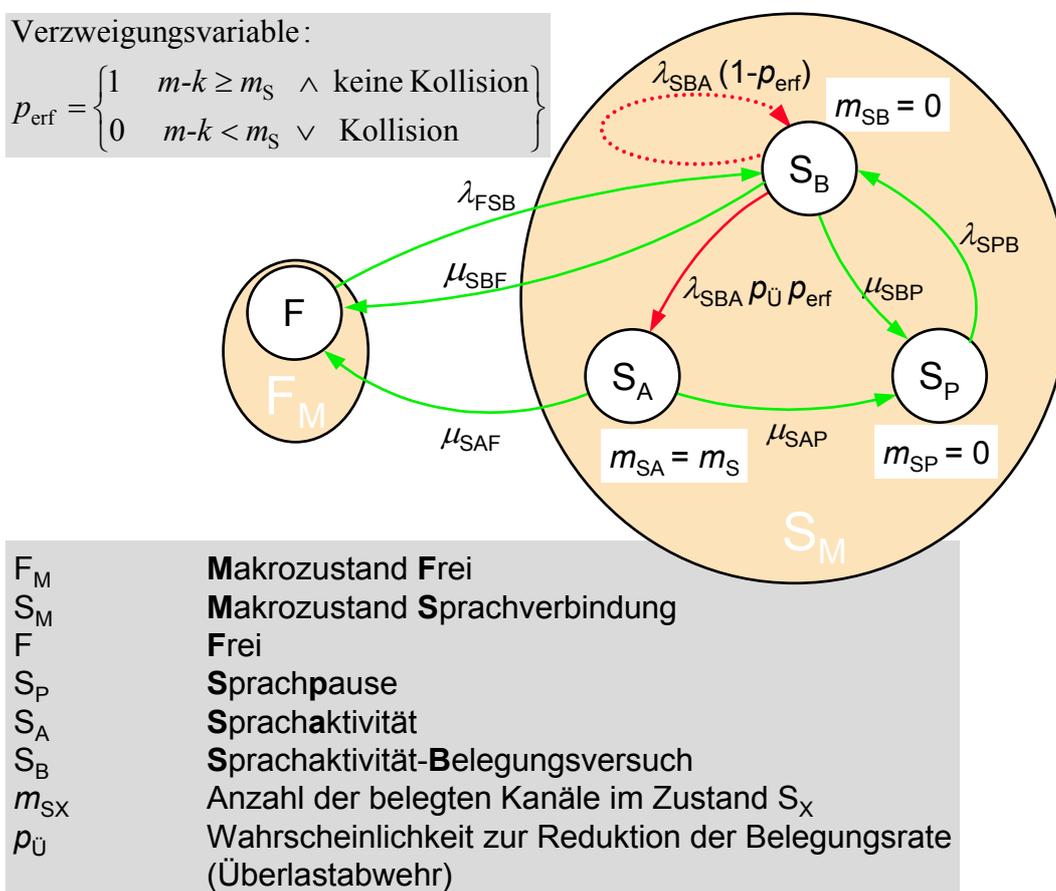


Bild 2.7 Verkehrsmodell zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene

Ein Teilnehmer befindet sich im Zustand 'Frei', wenn er keine Sprachverbindung unterhält. Beim Verbindungsaufbau wechselt er in den Zustand 'Belegungsversuch' mit der Rate

$$\lambda_{\text{FSB}} = \frac{1}{T_{\text{F}}} \quad (2.39)$$

$\overline{T_{\text{F}}}$ ist die mittlere Verweilzeit im Zustand ‘Frei’, in dem keine Gesprächsverbindung existiert.

Im Zustand ‘Belegungsversuch’ versucht das Terminal einen freien Kommunikationskanal zu belegen. Dies gelingt ihm, wenn ein Kanal frei ist und es zu keiner Kollision von Reservierungsanforderungen kommt. *Kollision* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass mindestens ein weiterer Teilnehmer zur gleichen Zeit auf diesen freien Übertragungskanal zugreift und durch die Signalüberlagerung die Reservierungsanforderung von der Basisstation nicht korrekt empfangen wird. Die mittlere Wartezeit bis zum Zugriff auf einen freien Zeitschlitz beträgt in der Regel, wenn in jedem Rahmen nur ein Belegungsversuch erlaubt ist, eine Rahmendauer T_{R} des TDM-Zeitrahmens. Bei der Reservierung kann es zu Kollisionen von Datenpaketen kommen, wenn mehr als ein Terminal zum gleichen Zeitpunkt auf diesem Kommunikationskanal (bei FDMA/TDMA gleiche Frequenz, gleicher Zeitschlitz) zu senden beginnt. Zur Überlastabwehr (Call Admission Control), die notwendig ist, um das System in einem stabilen Zustand zu halten, dürfen die an der Kollision beteiligten Terminals beim nächst möglichen Belegungszeitpunkt (z.B. nächster TDM-Zeitrahmen) nur mit einer verminderten Wahrscheinlichkeit p_{V} auf diesen freien Kanal zugreifen. Dies vermindert die Wahrscheinlichkeit von Folgekollisionen, die eine Gefahr für die Stabilität des Systems darstellen würden. Dadurch wird verhindert, dass der Durchsatz des Systems bei Überlast gegen Null geht. Dieser Einfluss des Protokolls und die Rückwirkung des Systemzustands auf das Teilnehmerverhalten sind in der Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Belegungsversuch p_{SBA} berücksichtigt. Die minimale Wartezeit von einer TDM-Zeitrahmendauer T_{R} vor dem Belegungsversuch bestimmt die Rate

$$\lambda_{\text{SBA}} = \frac{1}{T_{\text{R}}} \quad (2.40)$$

Wenn innerhalb der Zeit T_{SBJF} keine Belegung möglich ist, beendet der Teilnehmer sein Gespräch. Die zugehörige Übergangsrate μ_{SBJF} ist der Kehrwert der mittleren Verweilzeit $\overline{T_{\text{SBJF}}}$. Sie ist der Mittelwert der Verweilzeit T_{SBJF} im Zustand ‘Belegungsversuch’, unter der Bedingung, dass während der Zeit T_{SBJF} keine erfolgreiche Kanalbelegung möglich war:

$$\mu_{\text{SBF}} = \frac{1}{T_{\text{SBF}}} \quad . \quad (2.41)$$

Wenn innerhalb der Zeit T_{SBP} die Belegungsversuche nicht erfolgreich waren und zudem kein Übergang in den Zustand ‘Frei’ stattgefunden hat, geht der Teilnehmer in den Zustand ‘Sprachpause’. Die Datenpakete dieser Aktivitätsphase, in der keine Belegung zustande gekommen ist, gehen verloren. Die Rate für den Übergang in den Zustand Sprachpause ist

$$\mu_{\text{SBP}} = \frac{1}{T_{\text{SBP}}} \quad . \quad (2.42)$$

Nach einem erfolgreichen Belegungsversuch befindet sich der Teilnehmer für die Zeit T_A im Zustand ‘Sprachaktivität’. Danach geht er für den Fall einer Sprachpause in den Zustand ‘Sprachpause’, oder er beendet das Gespräch und geht in den Zustand ‘Frei’. Die Raten sind

$$\mu_{\text{SAP}} = \frac{p_{\text{SAP}}}{T_{\text{SA}}} \quad (2.43)$$

für den Übergang in den Zustand ‘Sprachpause’ und

$$\mu_{\text{SAF}} = \frac{p_{\text{SAF}}}{T_{\text{SA}}} \quad (2.44)$$

für den Übergang in den Zustand ‘Frei’. Sie sind umgekehrt proportional zur mittleren Dauer der ‘Sprachaktivität’ $\overline{T_{\text{SA}}}$. Die Größe p_{SAP} ist die Verzweigungswahrscheinlichkeit in Richtung ‘Sprachpause’ und

$$p_{\text{SAP}} = 1 - p_{\text{SAF}} \quad (2.45)$$

in Richtung ‘Frei’. Das Verhältnis der beiden Verzweigungsraten μ_{SAP} und μ_{SAF} wird bestimmt durch die mittlere Anzahl von Sprachpausen während der Dauer einer Verbindung, für den Fall, dass keine Verbindungsabbrüche vorkommen.

Nach einer Sprachpause der Dauer T_P geht das Terminal in den Zustand ‘Belegungsversuch’, um erneut einen freien Kommunikationskanal zu belegen. Die Rate

$$\mu_{\text{SPB}} = \frac{1}{T_{\text{P}}} \quad (2.46)$$

ist der Kehrwert der mittleren Sprachpausendauer.

Abgeleitete Beschreibungsgrößen zur Charakterisierung des Teilnehmer- verhaltens auf der Aktivitätsebene

Der mittlere Kanalbedarf $\overline{m_{\text{T,AK}}}$ eines Sprachdienst-Teilnehmers bei einem Zugriffsverfahren mit Sprachpausenausnutzung - modelliert auf der Aktivitätsebene - ist geringer als bei dem gleichem Sprachdienst-Teilnehmer bei einem Zugriffsverfahren ohne Sprachpausenausnutzung. Das zuletzt genannte wird auf der Verbindungsebene modelliert. Um die Leistungsfähigkeit von Systemen mit statischer und dynamischer Kanalzuteilung vergleichen zu können, muss das Teilnehmer-Ersatzmodell auf der Verbindungsebene bei Verwendung eines Verfahrens mit Sprachpausenausnutzung näherungsweise das gleiche Verkehrsangebot wie das Originalmodell erzeugen. Dies ist in diesem Fall gegeben, wenn die Zustandswahrscheinlichkeiten des Ersatzmodells auf der Verbindungsebene gleich den Zustandswahrscheinlichkeiten der Makro-Zustände im Verkehrsmodell auf der Aktivitätsebene gesetzt werden und der maximale Kanalbedarf m_{SM} des Markozustandes 'S_M' gleich dem Kanalbedarf m_{s} im Modell auf Verbindungsebene ist.

Zustandswahrscheinlichkeiten π_{k} und π_{ZM} der Einzelzustände bzw. der Makro-Zustände

Die Zustandswahrscheinlichkeiten π_{k} für die Einzelzustände können nach Gleichung (2.7) berechnet werden. Für Rahmendauern

$$T_{\text{R}} \ll \overline{T_{\text{SBIF}}} \quad \wedge \quad T_{\text{R}} \ll \overline{T_{\text{SBIP}}} \quad (2.47)$$

ist, unter der Bedingung, dass keine Blockierung auftritt, die Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand 'Belegungsversuch' näherungsweise Null. Von diesen Verhältnissen kann im Bereich der üblichen Verkehrs-Nennangebote, für das Dimensionierungen erfolgen, ausgegangen werden. Der Zustand S_B kann unter diesen Voraussetzungen entfernt werden. Damit kann für die Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten das folgende vereinfachte Verkehrsmodell angenommen werden.

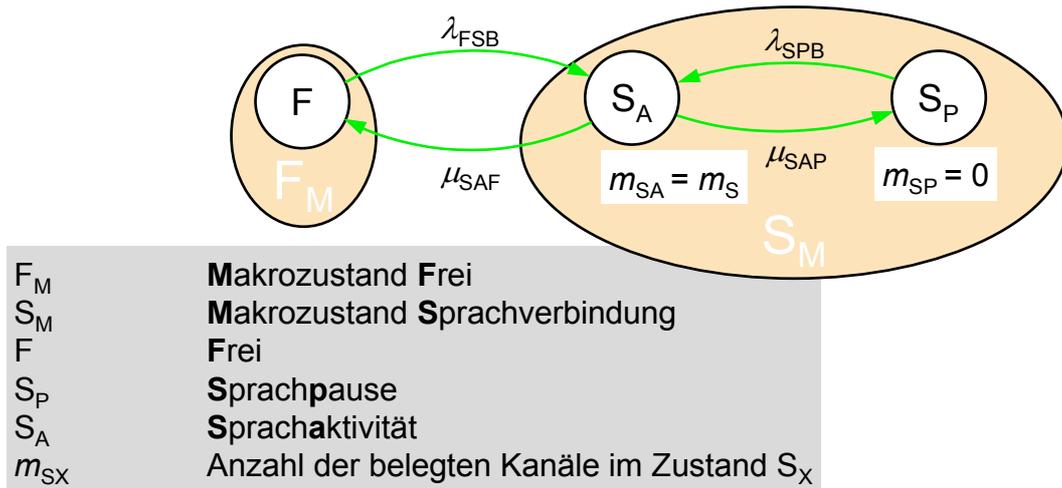


Bild 2.8 Vereinfachtes Verkehrsmodell zur näherungsweisen Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene (vgl. Bild 2.7)

Die vier Zustandswahrscheinlichkeiten sind damit näherungsweise:

$$\begin{aligned}
 \pi_F &\approx \frac{\lambda_{SPB} \cdot \mu_{SAF}}{\lambda_{FSB}(\lambda_{SPB} + \mu_{SAP}) + \lambda_{SPB} \cdot \mu_{SAF}} & \pi_{SP} &\approx \frac{\lambda_{FSB} \cdot \mu_{SAP}}{\lambda_{FSB}(\lambda_{SPB} + \mu_{SAP}) + \lambda_{SPB} \cdot \mu_{SAF}} \\
 \pi_{SA} &\approx \frac{\lambda_{FSB} \cdot \lambda_{SPB}}{\lambda_{FSB}(\lambda_{SPB} + \mu_{SAP}) + \lambda_{SPB} \cdot \mu_{SAF}} & \pi_{SB} &\approx 0
 \end{aligned}
 \tag{2.48}$$

Die Wahrscheinlichkeiten für die Makro-Zustände sind

$$\pi_{FM} = \pi_F \quad \text{und} \quad \pi_{SM} = \pi_{SA} + \pi_{SP} + \pi_{SB} \approx \pi_{SA} + \pi_{SP} = \left(1 + \frac{\mu_{SAF}}{\lambda_{FSB}} \left[1 + \frac{\lambda_{SPB}}{\mu_{SAP}} \right]^{-1} \right)^{-1}. \tag{2.49}$$

Für den gleichen Teilnehmer müssen die Zustandswahrscheinlichkeiten der Makro-Zustände π_{FM} und π_{SM} im Modell für die Aktivitätsebene (Bild 2.8) gleich den Zustandswahrscheinlichkeiten für die Zustände ‘F’ bzw. ‘S’ im Modell auf Verbindungsebene (Bild 2.3) gewählt werden (Gleichung (2.49)). Dadurch ist das Modell der Aktivitätsebene (Bild 2.8) auf der Verbindungsebene betrachtet äquivalent zum Teilnehmer-Verkehrsmodell der Verbindungsebene (Bild 2.3).

Äquivalenter, mittlerer Kanalbedarf des auf der Aktivitätsebene modellierten Sprachdienst-Teilnehmers

Unter den zuvor genannten Voraussetzungen ist der mittlere, äquivalente Kanalbedarf (Gleichung (2.28))

$$\overline{m_{T,V\ddot{a}q}} = m_{SA} \cdot \pi_{SM} \approx m_{SA} \left(1 + \frac{\mu_{SAF}}{\lambda_{FSB}} \left(\frac{\mu_{SAP}}{\mu_{SAP} + \lambda_{SPB}} \right) \right)^{-1} \quad (2.50)$$

gleich dem mittleren Kanalbedarf $\overline{m_{T,V}}$ des Teilnehmers auf der Verbindungsebene.

Mittlerer Kanalbedarf $\overline{m_{T,Ak}}$ des auf der Aktivitätsebene modellierten Sprachdienst-Teilnehmers

Der tatsächliche, mittlere Kanalbedarf eines Teilnehmers für ein System mit variabler Kanalzuteilung (z.B. bei **Packet Reservation Multiple Access**) ist:

$$\begin{aligned} \overline{m_{T,Ak}} &= m_{SA} \cdot \pi_{SA} \approx m_{SA} \frac{\lambda_{FSB} \cdot \lambda_{SPB}}{\lambda_{FSB} (\lambda_{SPB} + \mu_{SAP}) + \lambda_{SPB} \cdot \mu_{SAF}} \\ &= m_{SA} \left(1 + \frac{\mu_{SAF}}{\lambda_{FSB}} + \frac{\mu_{SAP}}{\lambda_{SPB}} \right)^{-1} < \overline{m_{T,V\ddot{a}q}} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Er ist geringer als der äquivalente, mittlere Kanalbedarf $\overline{m_{T,V\ddot{a}q}}$, da die Freigabe des Kanals in Sprachpausen beim Modell auf der Aktivitätsebene modelliert wird.

Das vereinfachte Modell (Bild 2.8), das an dieser Stelle zur näherungsweisen Berechnung der abgeleiteten Beschreibungsgrößen verwendet wurde, eignet sich auch zur exakten Modellierung des Teilnehmers in Systemen mit variabler Kanalzuteilung, in denen keine Kollisionen der Datenpakete auftreten. Dies ist dann der Fall, wenn die Reservierung des Kanals auf getrennten Signalisierungskanälen mit ausreichender Kapazität erfolgt.

Ersatzmodell für einen auf der Aktivitätsebene modellierten Sprachdienst-Teilnehmer

Das vereinfachte Sprachdienst-Teilnehmermodell (Bild 2.8) auf der Aktivitätsebene lässt sich durch die Rückführung auf die Verbindungsebene weiter vereinfachen. Die beiden Makro-Zustände F_M und S_M werden im Ersatzmodell in die Zustände F_E und S_E abgebildet.

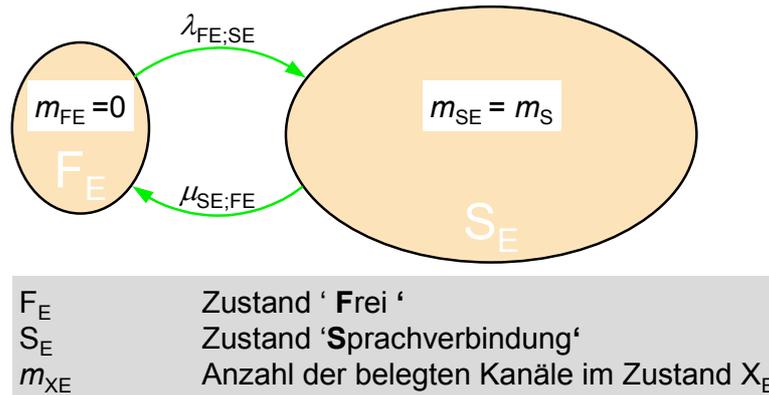


Bild 2.9 Ersatzmodell für das vereinfachte Verkehrsmodell des Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene (in Bild 2.8)

Der Kanalbedarf m_{SE} ist nach Gleichung (2.32) gleich m_{SA} , da innerhalb des Makro-Zustands S_M im Zustand S_A der maximale Kanalbedarf auftritt. Im Zustand 'F_E' ist der Kanalbedarf gleich Null, da im Makro-Zustand F_M der (maximale) Kanalbedarf gleich Null ist. Die Rate $\lambda_{FE;SE}$ bestimmt die mittlere Verweilzeit im Zustand 'F_E'. Sie wird so gewählt, dass die mittleren Verweilzeiten im Originalmodell und im Ersatzmodell für diesen Zustand identisch sind.

$$\lambda_{FE;SE} = \frac{1}{T_F} \quad (2.52)$$

Um den gleichen mittleren Kanalbedarf für den Zustand S_E im Ersatzmodell zu erhalten, ist

$$\pi_{SE} = \frac{m_{SA} \cdot \pi_{SA}}{m_{SE}} = \pi_{SA} \quad (2.53)$$

zu wählen. Daraus resultiert für den Zustand 'Frei' im Ersatzmodell die gegenüber dem Originalmodell erhöhte Zustandswahrscheinlichkeit

$$\pi_{FE} = 1 - \pi_{SE} = 1 - \pi_{SA} \quad (2.54)$$

Die Bedingung für den statistischen Gleichgewichtszustand von Zustand 'S_E' lautet

$$-\mu_{SE,FE} \cdot \pi_{SE} + \lambda_{FE,SE} \cdot \pi_{FE} = 0 \quad . \quad (2.55)$$

Aus dieser Gleichung erhält man nach Einsetzen von Gleichung (2.53) und Gleichung (2.54) die noch fehlende Zustandsübergangsrate von S_E nach F_E :

$$\mu_{SE,FE} = \frac{1}{T_F} \left(\frac{1}{\pi_{SA}} - 1 \right) \quad . \quad (2.56)$$

Das Berechnen von Verzweigungswahrscheinlichkeiten ist bei diesem sehr einfachen Modell auf der Aktivitätsebene (Bild 2.8) zur Bestimmung der Zustandsübergangsrate nicht erforderlich, da von allen Makro-Zuständen nur eine Verzweigung zu einem anderen Makro-Zustand existiert. Die bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten besitzen somit alle den Wert eins. Bei dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Multiservice-Teilnehmer (Bild 2.10) existieren dagegen in jedem Makro-Zustand Verzweigungen zu den beiden anderen Makro-Zuständen. Dort ist zur Ermittlung der Parameter des Ersatzmodells eine Bestimmung der bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten erforderlich.

2.1.2.5 Modellierung eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene

Bei FDMA/TDMA Systemen gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren zur Belegung eines Funkkanals (Zugriffsverfahren). Die Reservierung eines Kanals vom Mobilterminal aus erfolgt entweder direkt auf dem FDM/TDM Übertragungskanal, auf dem die Nutzinformation übertragen werden soll, oder auf getrennten Reservierungskanälen, die ausschließlich der Übertragung der Reservierungsanforderungen dienen. Für diese beiden Arten des Zugriffs sind unterschiedliche Teilnehmerverkehrsmodelle erforderlich. Sie sind in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben.

Multiservice-Teilnehmermodell für Mobilfunksysteme mit separaten Reservierungskanälen

Bild 2.10 beschreibt das Teilnehmerverhalten eines Benutzers von Sprach- und Datendiensten in einem System, das in Zeiten, in denen ein Teilnehmer keine Information überträgt, die von ihm belegten Ressourcen (Übertragungskanäle) für andere Teilnehmer wieder freigibt (Pausenausnutzung). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Reservierung auf speziellen, in ausreichender Anzahl vorhandenen Signalisierungskanälen durchgeführt wird, so dass beim Re-

servierungsvorgang keine Kollisionen von Datenpaketen auftreten. Die angeforderten Kanäle können sofort belegt werden, wenn ihre Anzahl im System noch frei ist.

Das folgende Bild 2.10 beschreibt einen Multiservice-Teilnehmer mit den folgenden Zuständen:

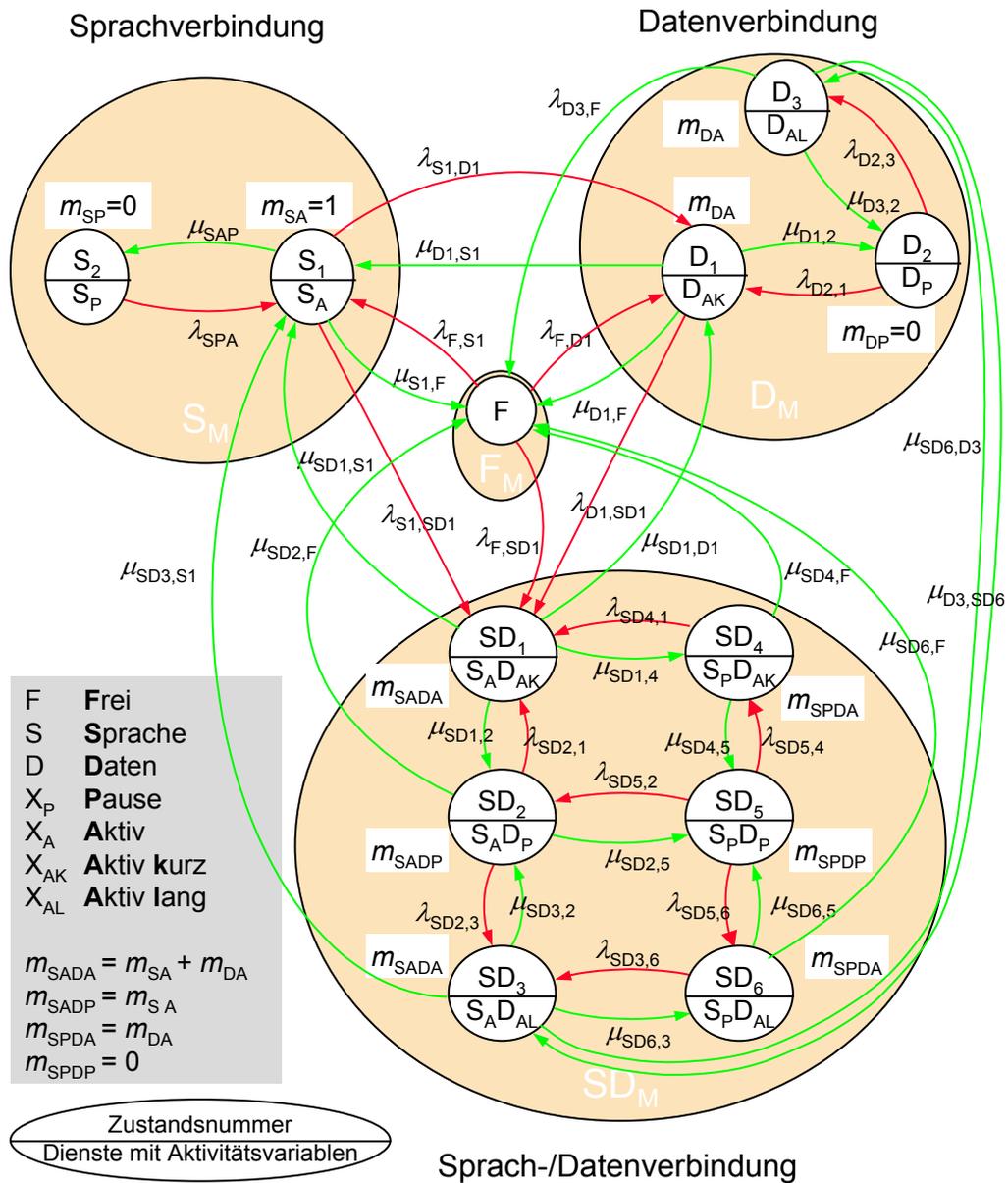


Bild 2.10 Verkehrsmodell eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt

Ein Teilnehmer ist im Zustand Frei 'F', wenn er keinen Dienst benutzt. In den Makro-Zuständen Telefongespräch 'S' und Datenübertragung 'D' benutzt er jeweils einen Dienst.

Bei gleichzeitiger Benutzung des Sprach- und Datendienstes befindet er sich im Makro-Zustand Sprach/Datenübertragung ‘SD’. Diese Makro-Zustände beinhalten in sich Zustände, die die Aktivität des Teilnehmers während der Benutzung des Dienstes modellieren.

Durch Aufspalten der Makro-Zustände wird eine zeitlich feinere Modellierung des Verkehrsprozesses erreicht. Dadurch erhöht sich gegenüber dem Modell auf der Verbindungsebene die Anzahl der Modellparameter beträchtlich. Die direkte Beschreibung eines einfachen Teilnehmerverhaltens ist durch unmittelbare Spezifikation mit Hilfe der Raten nicht mehr möglich. Dies wird deutlich am Verkehrsmodell eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene (Bild 2.10). Zur Spezifikation des Teilnehmerverhaltens sind die Teilnehmermessgrößen nach Abschnitt (2.1.2.1) festzulegen und die Zustandübergangsraten q aus ihnen zu bestimmen. Das Ergebnis ist das Verkehrsmodell in Bild 2.10. Die Zustandswahrscheinlichkeiten der Einzelzustände π_i und der Makro-Zustände π_{Z_M} , die Multiservice-Faktoren K_k und der mittlere Kanalbedarf lassen sich dann durch Lösen des linearen Gleichungssystems für die Zustandswahrscheinlichkeiten ermitteln. Dieses Verkehrsmodell ist jedoch in dieser Form als Basis zur analytischen Berechnung der Leistungsgrößen eines Telekommunikationssystems mit Multiservice-Teilnehmern nicht brauchbar, da das Verkehrsmodell des Telekommunikationssystems zu viele Zustände besitzen würde. Das im folgenden Abschnitt beschriebene Ersatzmodell ist eine brauchbare Näherung für das Multiservice-Teilnehmermodell auf der Aktivitätsebene (Bild 2.10).

Ersatzmodell für einen auf der Aktivitätsebene modellierten Multiservice-Teilnehmer

Durch das Vorgehen nach Abschnitt 2.1.1.3 entsteht das Ersatzmodell für den Multiservice-Teilnehmer auf der Aktivitätsebene in Bild 2.10. Zuerst werden die Einzelzustände aus den Makro-Zuständen Z_M entfernt. Als Kanalbedarf in den Zuständen S_E , D_E und SD_E wird der jeweilige Maximalbedarf in den entsprechenden Makro-Zuständen angenommen (Gleichung (2.31)).

$$\begin{aligned} m_{S,E} &= m_{SA} & m_{D,E} &= m_{DA} \\ m_{SD,E} &= m_{SADA} = m_{SA} + m_{DA} & m_{F,E} &= 0 \end{aligned} \quad (2.57)$$

Das folgende Bild 2.11 zeigt das Ersatzmodell für den Multiservice-Teilnehmer mit seinen Zustandsübergangsraten. Diese gilt es in geeigneter Weise durch Anwenden der Gleichungen aus Abschnitt 2.1.2.3 zu bestimmen.

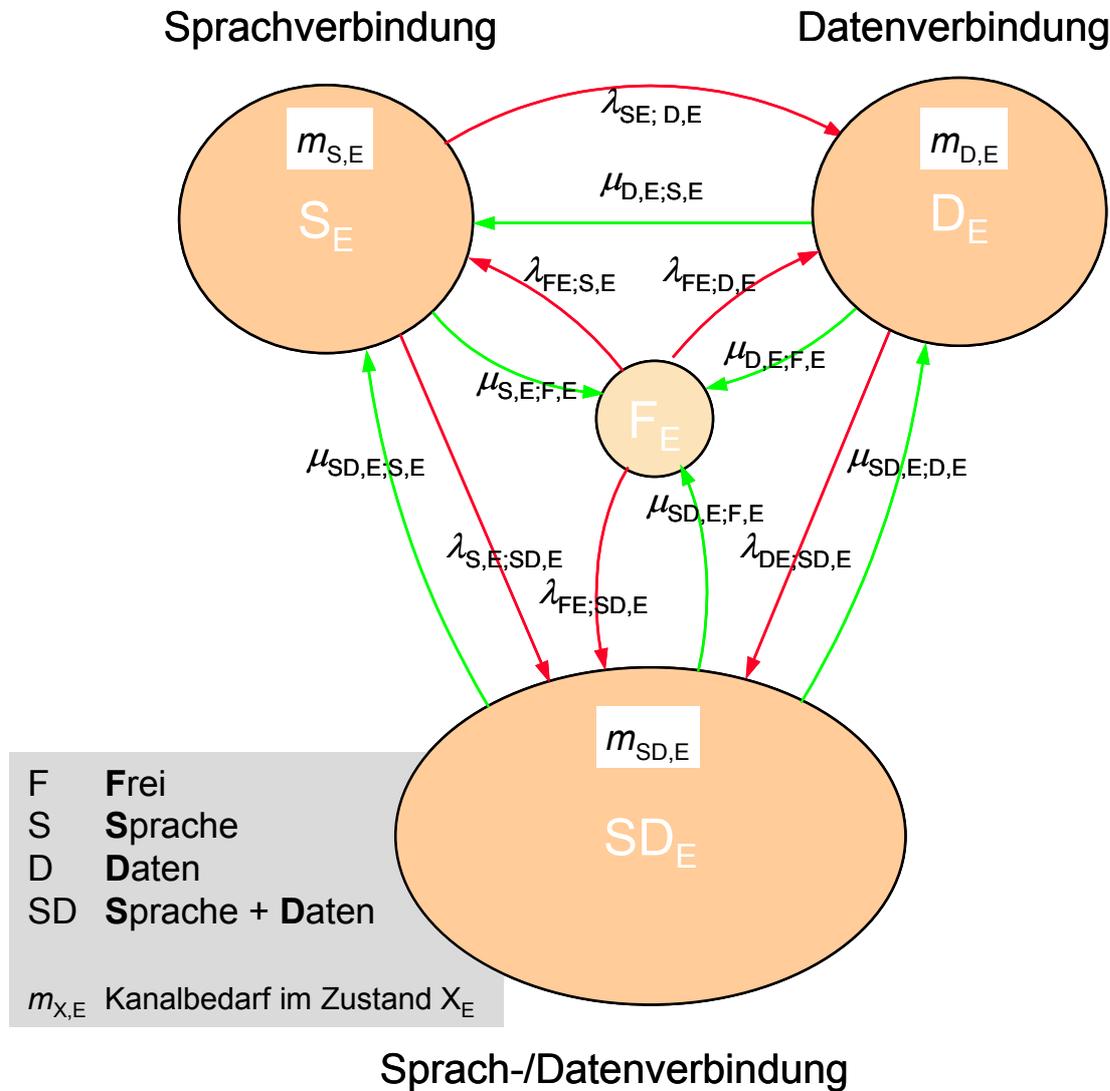


Bild 2.11 Ersatzmodell eines auf der Aktivitätsebene modellierten Multiservice-Teilnehmers, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt

Aus der Forderung des gleichen mittleren Kanalbedarfs (Gleichung (2.31)) in den einzelnen Makro-Zuständen erhält man bei einem angenommenen Kanalbedarf in den Zuständen Z_E nach Gleichung (2.57), folgende Zustandswahrscheinlichkeiten für die Zustände des Ersatzmodells (Bild 2.11).

$$\begin{aligned}
\pi_{S,E} &= \frac{m_{SA} \cdot \pi_{S1}}{m_{SA}} = \pi_{S1} \\
\pi_{D,E} &= \frac{m_{DA} (\pi_{D1} + \pi_{D2})}{m_{DA}} = \pi_{D1} + \pi_{D2} \\
\pi_{SD,E} &= \frac{m_{SA} (\pi_{SD1} + \pi_{SD2} + \pi_{SD3}) + m_{DA} (\pi_{SD1} + \pi_{SD3} + \pi_{SD4} + \pi_{SD6})}{m_{SA} + m_{DA}} \\
\pi_{F,E} &= 1 - (\pi_{S,E} + \pi_{D,E} + \pi_{SD,E})
\end{aligned} \tag{2.58}$$

Das Aufstellen der Bestimmungsgleichungen für die Raten im Ersatzmodell ist im folgenden beschrieben. Auf die Darstellung der Ergebnisse für die Zustände ‘S_E’ und ‘SD_E’ wurde verzichtet, da sie in gleicher Weise wie für den Zustand ‘D_E’ mit Hilfe der Gleichungen (2.35), (2.37) und (2.38) ermittelt werden. Für die Zustandsübergangsraten (in Bild 2.11 mit q bezeichnet) wird in den folgenden Gleichungen der Buchstabe λ (=Ankunftsrate) verwendet, wenn sich durch den Zustandsübergang die Anzahl der belegten Kanäle erhöht. Die Bezeichnung μ (=Enderate) wird verwendet, wenn Kanäle frei gegeben werden.

Bestimmungsgleichungen für die Zustandsübergangsraten des Zustands ‘F_E’

Für den Zustand ‘F_E’ wird die erste Bestimmungsgleichung mit Hilfe der mittleren Aufenthaltsdauer \bar{T}_F im Zustands ‘F’ im Aktivitätsmodell ermittelt.

$$\lambda_{FE;SE} + \lambda_{FE;DE} + \lambda_{FE;SDE} = \frac{1}{\bar{T}_F} \tag{2.59}$$

Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Zustand ‘F_E’ sind gleich den Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Zustand ‘F’ des Originalmodells, da die beiden Zustände und die abgehenden Verzweigungen identisch sind.

$$p(F_E;S_E) = p_{F,S1} \quad , \quad p(F_E;D_E) = p_{F,D1} \quad , \quad p(F_E;SD_E) = p_{F,SD1} \tag{2.60}$$

Aus diesen drei Verzweigungswahrscheinlichkeiten können zwei linear unabhängige Bestimmungsgleichungen für die Zustandsübergangsraten des Zustands ‘F_E’ gemäß Gleichung (2.38) aufgestellt werden.

$$\begin{aligned}
\left(1 - \frac{1}{p(F_E;S_E)}\right) \lambda_{F,E;S,E} + \lambda_{F,E;D,E} + \lambda_{F,E;SD,E} &= 0 \\
\left(1 - \frac{1}{p(F_E;D_E)}\right) \lambda_{F,E;D,E} + \lambda_{F,E;S,E} + \lambda_{F,E;SD,E} &= 0
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Bestimmungsgleichungen für die Zustandsübergangsraten des Zustands ‘D_E’

Als eine weitere Bestimmungsgleichung wird mit Hilfe der in Gleichung (2.58) bestimmten Zustandswahrscheinlichkeiten die Gleichung für das statistische Gleichgewicht für den Zustand ‘D_E’ aufgestellt:

$$-(\mu_{D,E;F,E} + \mu_{D,E;S,E} + \mu_{D,E;SD,E})\pi_{D,E} + \lambda_{F,E;D,E} \cdot \pi_{F,E} + \lambda_{S,E;D,E} \cdot \pi_{S,E} + \lambda_{SD,E;D,E} \cdot \pi_{SD,E} = 0 \quad . \quad (2.62)$$

Zum Aufstellen von zwei weiteren, linear unabhängigen Bestimmungsgleichungen für die Zustandsübergangsraten im Ersatzmodell nach Gleichung (2.38) werden zwei der drei bedingten Verzweigungswahrscheinlichkeiten benötigt.

$$p(D_E;F_E) = \frac{p_{D1,F} \cdot \pi_{D1} + p_{D3,F} \cdot \pi_{D3}}{p_{un\Sigma}(D_E)} \quad , \quad p(D_E;SD_E) = \frac{p_{D1,SD1} \cdot \pi_{D1} + p_{D3,SD3} \cdot \pi_{D3}}{p_{un\Sigma}(D_E)}$$

$$p(D_E;S_E) = \frac{p_{D1,S1} \cdot \pi_{D1}}{p_{un\Sigma}(D_E)} \quad \text{mit} \quad p_{un\Sigma}(D_E) = p_{D1,F} \cdot \pi_{D1} + p_{D3,F} \cdot \pi_{D3} + p_{D1,S1} \cdot \pi_{D1} + p_{D1,SD1} \cdot \pi_{D1} + p_{D3,SD3} \cdot \pi_{D3} \quad (2.63)$$

Die Bestimmungsgleichungen mit den Zustandswahrscheinlichkeiten und den Verzweigungswahrscheinlichkeiten der beiden Zustände ‘S_E’ und ‘SD_E’ werden in gleicher Weise wie für den Zustand ‘D_E’ ermittelt.

Multiservice-Teilnehmermodell für Mobilfunksysteme mit direkter Reservierung auf den Verkehrskanälen

Für ein System bei dem die Reservierung direkt über den zu belegenden Verkehrskanal durchgeführt wird, sind die im Teilnehmermodell in Bild 2.10 mit ‘λ_{X_i,Y_j’ beschrifteten Kanten aufzutrennen und jeweils ein Belegungszustand mit zusätzlichen Zustandsübergängen einzufügen. Die zusätzlichen Zustandsübergänge führen vom Belegungszustand zurück zum Ausgangszustand und zu einem Zustand, in dem der Dienst, für den die Kanalbelegung erfolglos blieb, nicht mehr benutzt wird. Eine analytische Berechnung der Leistungsgrößen mit Hilfe des Systemmodells ist aufgrund der großen Dimension des Zustandsraums in der Praxis nicht mehr durchführbar. Auch ist eine Reduktion des Zustandsmodells auf das Ersatzmodell auf der Verbindungsebene wie in Abschnitt 2.1.2.3 nicht möglich, da die Belegungszustände aufgrund der vom Zustand des Systemmodells abhängigen Raten im Modell verbleiben müssen. Somit ist eine Reduktion der Anzahl der Zustände bei diesem erweiterten Modell nicht}

möglich. Das durch das Einfügen der Belegungszustände erhaltene Verkehrsmodell für einen Multiservice-Teilnehmer eignet sich jedoch sehr gut als stochastisches Teilnehmermodell in einer ereignisgesteuerten Simulation von Telekommunikationssystemen mit variabler Kanalzuteilung. Eine Ausweitung der Analyseverfahren auf ereignisgesteuerte Simulationen würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In dieser Arbeit werden Systeme untersucht, in denen die Reservierung der Kanäle über getrennte Signalisierkanäle erfolgt. Deren Verkehrskapazität wird so groß angenommen (blockierungsfreie Signalisierung), dass die Zeit zwischen Kanal Anforderung durch den Teilnehmer und der Kanalbelegung vernachlässigbar ist. Die Anzahl der benötigten Reservierungskanäle ist klein gegenüber der Anzahl der Verkehrskanäle, da diese Kanäle nur zur Übertragung der Datenpakete, die die Reservierungsanforderung enthalten, benötigt werden. Danach stehen sie wieder den anderen Teilnehmern zur Verfügung.

2.2 Teilnehmermobilität und Handover

Das Modell für den Sprachdienst-Teilnehmer und die Herleitung der aus der Geschwindigkeitswahrscheinlichkeitsdichteverteilung (WDF) des Teilnehmers abgeleiteten Größen wird in diesem Abschnitt beschrieben. Im ersten Teil sind die Ansätze für das Mobilitätsmodell des Sprachdienst-Teilnehmers, wie sie in der Literatur zu finden sind, wiedergegeben [12]. Ein *Mobilitätsmodell* beschreibt die Bewegung der Mobilfunk-Teilnehmer als statistischen Prozess. Im zweiten Teil ist das für den Multiservice-Teilnehmer entwickelte Handover-Modell dargestellt. Das *Handover-Modell* ist ein aus dem Mobilitätsmodell abgeleitetes Modell. Es beschreibt die Auswirkungen von Handover-Vorgängen, hervorgerufen durch die Mobilität der Teilnehmer, auf die Zustandübergangsraten im Verkehrsmodell des betrachteten Mobilfunksystems. Für den MS-Teilnehmer konnte eine einfach anzuwendende Näherungslösung entwickelt werden, die es ermöglicht, die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für den Sprachdienst-Teilnehmer auf den Multiservice-Teilnehmer zu übertragen.

2.2.1 Modell zur Beschreibung der Mobilität des Sprachdienst-Teilnehmers

In den zuvor beschriebenen Teilnehmerverkehrsmodellen ist die Mobilität und das Weiterreichen (Handover) von Verbindungen zwischen zwei Basisstationen nicht enthalten. Die Zeitabstände T_A zwischen zwei Verbindungswünschen eines Teilnehmers werden durch die negativ-exponentielle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) mit der mittleren Ankunftsrate

λ_A in Gleichung (2.1) beschrieben. Die WDF der Bedienzeiten eines Teilnehmers ist in Gleichung (2.2) dargestellt.

Durch das Weiterreichen von Verbindungen zwischen benachbarten Basisstationen ergeben sich andere Ankunfts- und Enderaten für die Verbindungen an den Basisstationen. Dabei sind die mittlere Geschwindigkeit der Teilnehmer und die Zellengröße die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Änderungen der Übergangsraten. Ausgehend von der idealisierten, sechseckigen Form der Funkzellen mit dem Radius r_z wird im Abstand R_{eq} (äquivalenter Radius) die Verbindung an die angrenzende Basisstation übergeben (Bild 2.12).

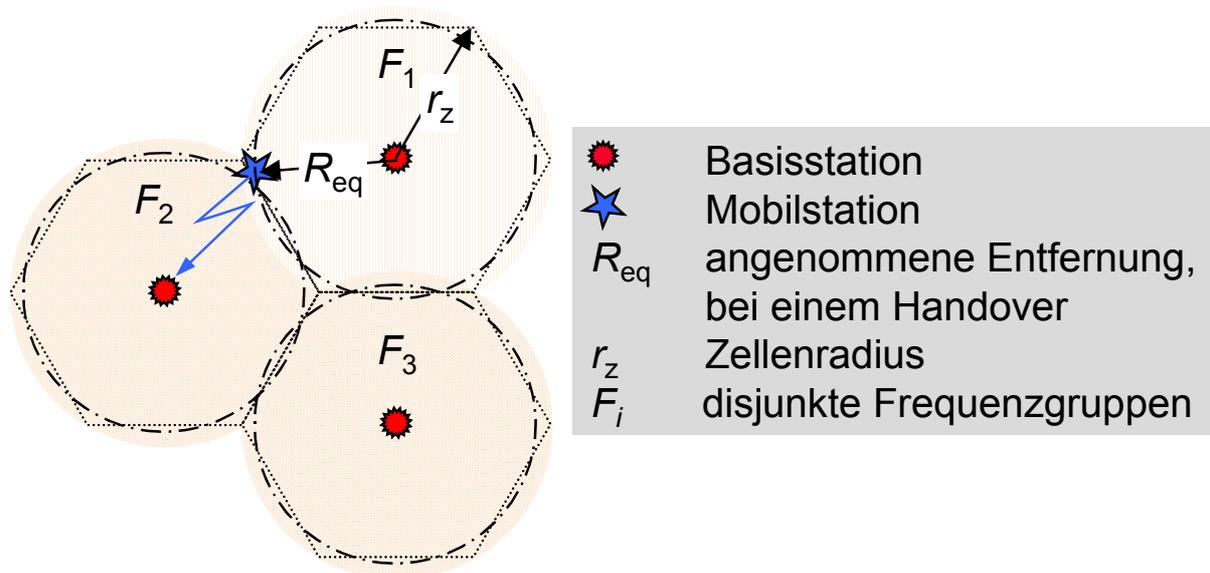


Bild 2.12 Funkzellen mit Radius r_z und angenommene Entfernung R_{eq} von der Basisstation, bei der ein Handover erfolgt

Der Radius R_{eq} des kreisförmigen Funkzellenmodells für die Analyse von Handover wird so gewählt, dass seine Fläche gleich der des sechseckigen Funkzellenmodells ist. Das sechseckige Modell wird im Bereich der Frequenzplanung verwendet (Abschnitt 3.3). Für den Mittelwert R_{eq} des Abstands von der Basisstation, bei dem die Verbindung an die Basisstation der angrenzenden Funkzelle übergeben wird, ist

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} r_z \cong 0.91 r_z \quad . \quad (2.64)$$

Im folgenden wird zur Berechnung der Handover-Raten nach [12] vorgegangen und auf eine allgemeinere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) erweitert. Zudem wird die Normierung

$$\tau_h = \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}} \quad (2.65)$$

eingeführt. Die eingeführte Größe τ_h ist die maximale Aufenthaltszeit eines Teilnehmers in einer Funkzelle mit dem Radius r_z , wenn er sich mit einer konstanten Geschwindigkeit v_{mean} bewegt. Die Normierung hat den Vorteil, dass nicht für jedes Wertepaar aus mittlerer Geschwindigkeit v_{mean} und angenommenem Handover-Abstand R_{eq} die Berechnung neu durchgeführt werden muss, sondern aus der einmal berechneten Kurve für τ_h ermittelt werden kann. Die angenommene Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Teilnehmersgeschwindigkeit v_T ist in Bild 2.13 dargestellt. Sie lautet

$$f_{v_T} = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma} & \text{für } v_{\text{mean}} - \sqrt{3}\sigma < v < v_{\text{mean}} + \sqrt{3}\sigma \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.66)$$

Die WDF in Gleichung (2.66) ist unabhängig von der Realisierung der Geschwindigkeitsvariablen v . Diese Art von WDF wird als *Gleichverteilung* und die damit beschriebene Zufallsvariable V_T als *gleichverteilt* bezeichnet.

Sie eignet sich durch die beiden Parameter mittlere Geschwindigkeit v_{mean} und Standardabweichung σ gut als Modell zur Approximation von real vorkommenden Verteilungen. Der Einfluss der Kurvenform der Verteilungsfunktion auf die zu bestimmenden Mittelwerte ist nur von untergeordneter Bedeutung. Die Breite b der Rechteckfunktion (Bild 2.13) bei einer Standardabweichung von σ ist

$$b = \sqrt{3}\sigma \quad (2.67)$$

Da keine negativen Geschwindigkeiten zugelassen sind, ist die maximale, mit dieser Funktion zu realisierende Standardabweichung

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{b_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = \frac{v_{\text{mean}}}{\sqrt{3}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{\text{norm,max}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.68)$$

Um die Einflüsse der Teilnehmersgeschwindigkeit auf ein Mobilfunksystem ermitteln zu können, genügt es, den Mittelwert v_{mean} und die Standardabweichung σ der Geschwindigkeitsverteilung aus den gemessenen Werten zu berechnen.

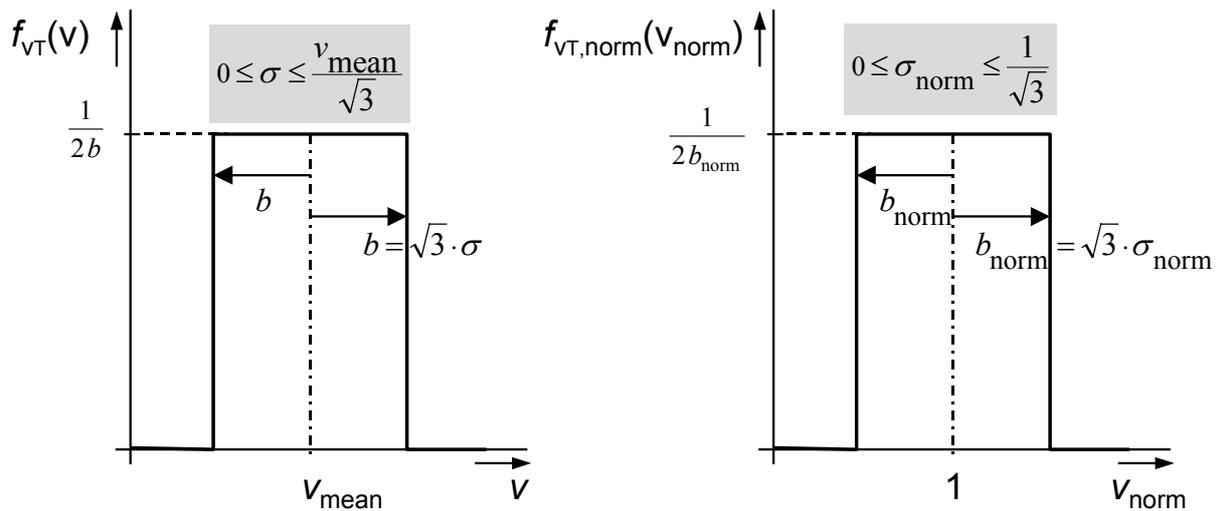


Bild 2.13 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Geschwindigkeit v_T und der normierten Geschwindigkeit $v_{T,norm}$

Die Geschwindigkeit \vec{v}_T eines Teilnehmers wird über die Zeit in Betrag und Richtung als konstant angenommen. In anderen Modellen werden die Geschwindigkeit und die Richtung der Teilnehmerbewegung verändert. Ein sehr umfassender Ansatz findet sich in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** Hier werden die Richtung und die Geschwindigkeit nach einer inkrementell kleinen Zeitdauer $\Delta\tau$ neu festgelegt. Die Richtungsänderungen und die Betragsänderungen der Geschwindigkeit sind dabei in einem vorgegebenen Bereich gleichverteilte Zufallsgrößen. Das wesentliche Ergebnis der oben angeführten Arbeit sind die Ermittlung von effektiven Zellradien eines einfachen Referenzmodells mit geradliniger Bewegung und einer begrenzten, normalverteilten Geschwindigkeitsverteilung. Aufgrund der geringen Abhängigkeit der mittleren Aufenthaltsdauer von der Form der Geschwindigkeitsverteilungsfunktion sind die Ergebnisse von **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** in die im folgenden ermittelten Ergebnisse leicht integrierbar. Dazu wird der Radius R_{eq} durch die effektiven Radien aus **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** ersetzt.

Es sind zwei Arten von Aufenthaltszeiten zu unterscheiden:

Aufenthaltszeiten T_h von Teilnehmern, die aus einer Nachbarzelle kommen (Bild 2.14) und beim Eintritt in die Funkzelle eine Verbindung (Handover) zur Basisstation dieser Funkzelle aufbauen.

Aufenthaltszeiten T_n der Teilnehmer, die innerhalb der Funkzelle eine neue Verbindung aufbauen (Bild 2.16). Sie sind aus Sicht des Mobilfunknetzes die Neuankünfte.

Die beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zufallsgrößen T_h bzw. T_n werden in den beiden folgenden Abschnitten hergeleitet. In Abschnitt 2.2.1.3 werden damit die normierten Ankunfts- und Enderaten in Abhängigkeit von der maximalen Aufenthaltszeit τ_h in der Funkzelle berechnet. Sie ist in Gleichung (2.65) definiert.

Es ist möglich, Näherungslösungen für die normierten Ankunftsrate $\lambda_{H,norm}$ und die Enderaten $\mu_{BH,norm}$ anzugeben. Durch die Verwendung der Näherungslösung entfällt die Iteration, wie sie bei den Ergebnissen aus [12] notwendig wäre. Diese Iteration würde ein mehrmaliges ($n > 10$) Lösen des Gleichungssystems zur Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten erfordern. Dadurch wäre für größere Systeme mit komplexem Benutzerverhalten (Multiservice-Teilnehmer) eine Berechnung ohne diese Näherung aufgrund der erforderlichen Rechenleistung nicht mehr möglich. Durch die Normierung und die Fehlerabschätzung vereinfacht sich der Algorithmus zur Berechnung der Leistungsgrößen eines Telekommunikationssystems erheblich.

2.2.1.1 WDF der Aufenthaltsdauer T_h und Handover-Wahrscheinlichkeit eines Teilnehmers, dessen Verbindung durch Handover am Zellenrand zur Basisstation kam

Das folgende Bild 2.14 zeigt die geometrischen Zusammenhänge zwischen der Weglänge d_h , die ein Teilnehmer in einer Funkzelle in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel Θ zurücklegt, wenn der maximal zurückgelegte Weg $2 R_{eq}$ (Definition siehe Gleichung (2.64)) beträgt.

Für die Weglänge d_h eines mobilen Teilnehmers in einer Funkzelle ist bei geradliniger Bewegung und einem Eintrittswinkel Θ (Bild 2.14):

$$d_h = 2 R_{eq} \cdot \cos(\Theta) \quad \text{für } -\pi/2 \leq \Theta \leq \pi/2 \quad . \quad (2.69)$$

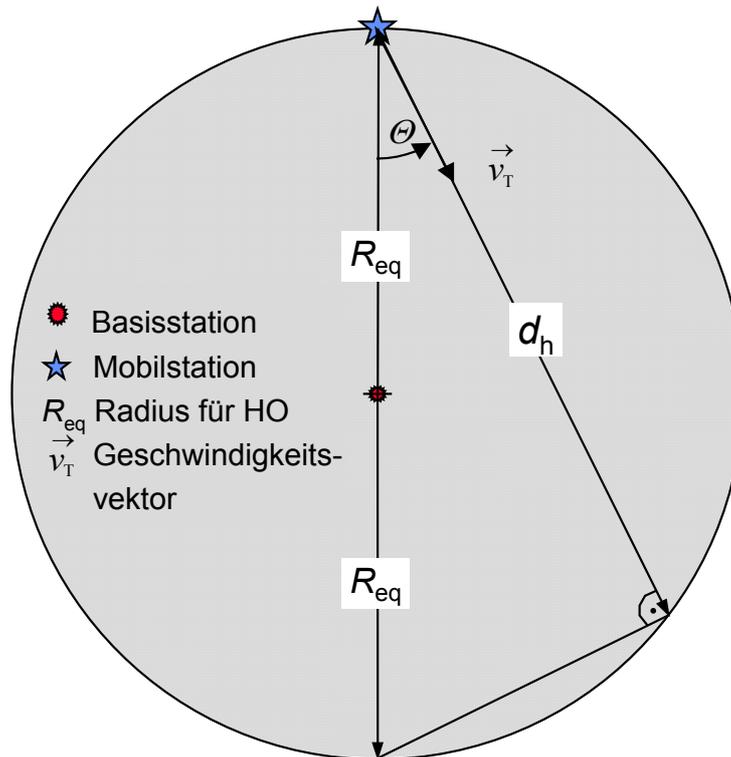


Bild 2.14 Weglänge d_h eines mobilen Teilnehmers innerhalb einer Funkzelle bei geradliniger Bewegung und einem Verbindungsaufbau zur Basisstation am Rand der Funkzelle (Handover von einer angrenzenden Basisstation)

Für die Eintrittswinkel wird eine Gleichverteilung im Bereich $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ angenommen. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lautet

$$f_{\varphi}(\varphi) = \begin{cases} 1/\pi & \text{für } -\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.70)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_Y(y)$ einer Größe $Y = f_U(X)$ lässt sich nach Abbildungsverzeichnis aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_X(x)$ der Zufallsvariablen X durch

$$f_Y(y) = f_X(x) \cdot \frac{1}{\left| \frac{df_U(x)}{dx} \right|} \quad (2.71)$$

ermitteln. Durch die Anwendung von Gleichung (2.71) auf Gleichung (2.69) erhält man für die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Weglänge d_h

$$f_{d_h}(d) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{R_{\text{eq}}^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}} & \text{für } 0 \leq d \leq 2R_{\text{eq}} \\ 0 & \text{sonst} \end{array} \right\} . \quad (2.72)$$

Die WDF $f_{T_X}(t)$ für die Aufenthaltszeit T_X eines Mobilfunkteilnehmers in einer Funkzelle unter der Annahme der Durchführung eines Handovers im Abstand R_{eq} von der Basisstation, erhält man aus der Verteilung $f_{d_X}(d)$ der in der Funkzelle zurückgelegten Strecken und der Verteilung für die Geschwindigkeiten $f_{v_T}(v)$ durch folgende Integration [12]:

$$f_{T_X}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\bar{v}| f_{d_X}(v \cdot t) f_{v_T}(v) dv \quad . \quad (2.73)$$

Durch Einsetzen von $f_{d_h}(d)$ nach Gleichung (2.72) und der Geschwindigkeitsverteilung nach (2.66) in Gleichung (2.73) erhält man die WDF der Aufenthaltszeit T_h für einen Teilnehmer, der mit einer bestehenden Verbindung in die Zelle eintritt. Nach dem anschließenden Ersetzen von t durch

$$t = t_{\text{norm}} \cdot \tau_h = t_{\text{norm}} \cdot \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}} \quad (2.74)$$

und dem Einführen einer neuen Zufallsvariablen

$$T_{h,\text{norm}} = \frac{T_h}{\tau_h} \quad (2.75)$$

ergibt sich für die neue Zufallsvariable $T_{h,\text{norm}}$:

$$f_{T_{h,\text{norm}}}(t_{\text{norm}}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{1-(t_{\text{norm}})^2}} \quad 0 \leq t_{\text{norm}} \leq 1 \\ 0 \quad \text{sonst} \end{array} \right\} \quad \text{für } \sigma_{\text{norm}} = 0 \\ \\ \frac{1}{\pi \sigma_{\text{norm}} (t_{\text{norm}})^2} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1-[(1-\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2} - \sqrt{1-[(1+\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2} \\ \sqrt{1-[(1-\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2} \end{array} \right\} \quad \text{für } \frac{1}{1+\sigma_{\text{norm}}} \leq t_{\text{norm}} \leq \frac{1}{1-\sigma_{\text{norm}}} \\ 0 \quad \text{für } t_{\text{norm}} > \frac{1}{1-\sigma_{\text{norm}}} \end{array} \right\} \quad \text{für } \sigma_{\text{norm}} > 0
\end{array} \right. \quad (2.76)$$

Die WDF $f_{T_{h,\text{norm}}}$ für $\sigma_{\text{norm}}=0$ geht aus der Funktion für $\sigma_{\text{norm}}>0$ durch zweifachen Grenzübergang nach der Regel von de l'Hospital hervor. Die WDF für die unnormierte Zufallsgröße T_h erhält man durch Ersetzen von t_{norm} durch t in Gleichung (2.76) und Division durch τ_h .

$$f_{T_h}(t) = \frac{1}{\tau_h} f_{T_{h,\text{norm}}}(t/\tau_h) \quad (2.77)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass von einem Teilnehmer nach einem erfolgreichen Handover ein weiterer Handover erforderlich wird, bevor er die Verbindung beendet, ist:

$$p_h = p(T_B > T_h) = \int_0^{\infty} e^{-(\mu_B t)} f_{T_h}(t) dt$$

$$p_h(\tau_{H,\text{norm}}) = \int_0^{\infty} e^{-(\tau_{H,\text{norm}} \cdot t_{\text{norm}})} \cdot f_{T_{h,\text{norm}}}(t_{\text{norm}}) dt_{\text{norm}} \quad \text{mit } \tau_{H,\text{norm}} = \mu_B \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}} \quad (2.78)$$

Durch die Normierung ist es möglich, dass die Wahrscheinlichkeit nur noch von der Größe $\tau_{H,\text{norm}}$ abhängig ist. Dies hat den Vorteil, dass p_h als eindimensionale Funktion nur einmal berechnet werden muss und als eindimensionaler Vektor von Stützstellenwerten abgespeichert werden kann. Die Funktionswerte $p_h(\mu_B, R_{\text{eq}}, v_{\text{mean}})$ für unterschiedliche Wertetripel werden

dann durch Berechnung des zugehörigen Wertes $\tau_{H,norm}$ und durch eine anschließende Interpolation für $\tau_{H,norm}$ aus dem abgespeicherten Vektor $p_h(\tau_{H,norm})$ berechnet.

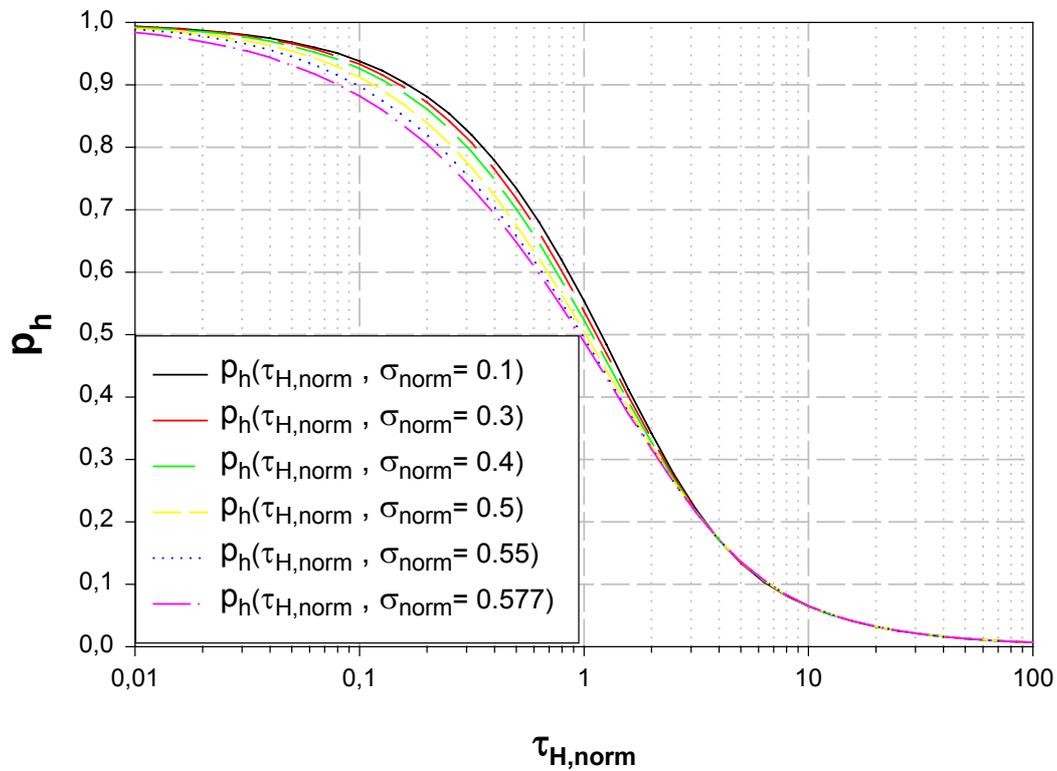


Bild 2.15 Die Wahrscheinlichkeit für einen weiteren Handover eines Teilnehmers, dessen Verbindung zur betrachteten Basisstation durch Handover zustande gekommen ist, in Abhängigkeit der Größe $\tau_{H,norm}=(2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung.

In den Kurven in Bild 2.15 ist die Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_h(\tau_{H,norm}, \sigma_{norm})$ von der Größe $\tau_{H,norm}=(2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung des Betrags der Geschwindigkeit dargestellt. Die Größe $\tau_{H,norm}$ ist das Verhältnis aus der Zeit, die ein Teilnehmer zum Durchqueren der Funkzelle auf ihrem Durchmesser benötigt, wenn er sich mit der Geschwindigkeit v_{mean} fortbewegt (Aufenthaltsdauer) und der mittleren Gesprächsdauer. Die Abhängigkeit von der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeits-WDF der Mobilfunkteilnehmer ist in der Regel vernachlässigbar. Folgende Tabelle gibt die Wahrscheinlichkeit $p_h(\tau_{H,norm}, \sigma_{norm})$ für einige charakteristische Werte $\tau_{H,norm}$ und σ_{norm} wider.

Gebiet	Funkzellenradius [m]	Mittlere Gesprächsdauer [s]	Mittlere Tln. Geschwindigkeit [m/s]	Streuung der Tln. Geschw.	$\tau_{H,norm}$	Handoverwahrscheinlichkeit p_h
Zentrum Großstadt	260	240	2	0,3	1,0	0,55
Vorstadtgebiet	1300	240	10	0,5	1,0	0,52
Land	13000	240	20	0,1	5,0	0,15

Tabelle 2.1: Übersicht über charakteristische Werte für die die Handover-Wahrscheinlichkeit p_h bestimmenden Parameter

Diese Wahrscheinlichkeit $p_h(\mu_B, R_{eq}, v_{mean}, \sigma_{norm})$ für einen weiteren Handover eines Teilnehmers in der betrachteten Funkzelle geht in die durch Handover veränderten Ankunfts- und Bedienraten ein. Diese werden in Abschnitt 2.2.1.3 bestimmt.

2.2.1.2 WDF der Aufenthaltsdauer T_n und Handover-Wahrscheinlichkeit eines Teilnehmers, dessen Verbindung innerhalb der Funkzelle zur Basisstation aufgebaut wurde

Ein Teilnehmer kann eine Verbindung innerhalb der Funkzelle in einem beliebigen Abstand $r \leq R_{eq}$ zur Basisstation aufbauen. Es wird von einer Gleichverteilung der Teilnehmer in der Funkzelle ausgegangen.

Bild 2.16 zeigt die geometrischen Zusammenhänge zwischen der Weglänge d_n , dem Handover-Radius R_{eq} und den beiden Zufallsvariablen r und Θ .

Die Gleichung für die Weglänge d_n eines mobilen Teilnehmers in einer Funkzelle bei geradliniger Bewegung und einem Winkel θ zwischen dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_T und der Verbindungslinie Basisstation-Teilnehmer lautet:

$$d_n = \sqrt{R_{eq}^2 - [r \sin(\theta)]^2} - r \cos(\theta) \quad \text{für } -\pi \leq \Theta \leq +\pi \quad . \quad (2.79)$$

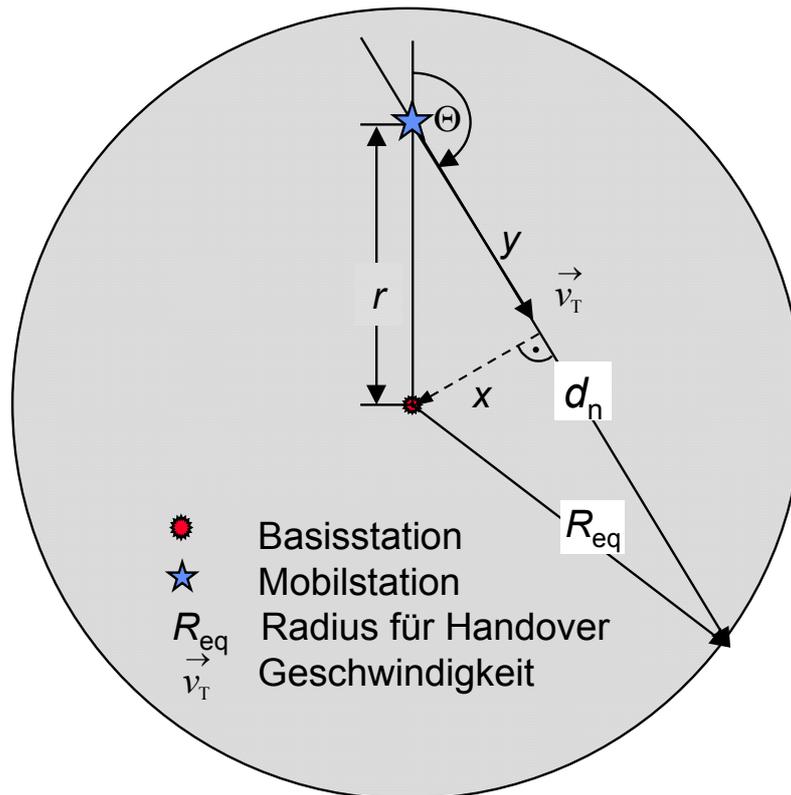


Bild 2.16 Weglänge d_n eines mobilen Teilnehmers bei geradliniger Bewegung und einem Verbindungsaufbau innerhalb der Funkzelle (Neuankunft im System)

Die zwei neuen Zufallsvariablen

$$x = r \cos(\theta) \quad \text{und} \quad y = r \sin(\theta) , \quad (2.80)$$

sind die kartesischen Koordinaten des Teilnehmers in einem Koordinatensystem, dessen Ausrichtung sich an der Bewegungsrichtung des Teilnehmers orientiert. Durch Anwenden der Beziehungen zur Ermittlung der WDF einer Übertragungsfunktion von zwei Variablen nach [25] erhält man für die WDF der zurückgelegten Strecke d_n in einer Funkzelle mit dem Handover-Radius R_{eq} :

$$f_{T_{n,\text{norm}}}(t_{\text{norm}}) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{\pi} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1-(t_{\text{norm}})^2} \quad 0 \leq t_{\text{norm}} \leq 1 \\ 0 \quad \text{sonst} \end{array} \right\} \quad \text{für } \sigma_{\text{norm}} = 0 \\ \\ \frac{2}{3\pi\sigma_{\text{norm}}(t_{\text{norm}})^2} \left\{ \begin{array}{l} \left(1-[(1-\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2\right)^{3/2} - \left(1-[(1+\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2\right)^{3/2} \\ \quad \text{für } 0 \leq t_{\text{norm}} \leq \frac{1}{1+\sigma_{\text{norm}}} \\ \left(1-[(1-\sigma_{\text{norm}})t_{\text{norm}}]^2\right)^{3/2} \\ \quad \text{für } \frac{1}{1+\sigma_{\text{norm}}} \leq t_{\text{norm}} \leq \frac{1}{1-\sigma_{\text{norm}}} \\ 0 \quad \text{für } t_{\text{norm}} > \frac{1}{1-\sigma_{\text{norm}}} \end{array} \right\} \quad \text{für } \sigma_{\text{norm}} > 0 \end{array} \right. \quad (2.81)$$

Dabei ist die gleiche Geschwindigkeitsverteilung, wie bei der Berechnung der WDF von T_h zu verwenden. Die WDF für die unnormierte Zufallsgröße T_n erhält man durch Ersetzen von t_{norm} durch t in Gleichung (2.81) und Division durch τ_h .

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilnehmer, der innerhalb einer Zelle eine neue Verbindung aufgebaut hat, auch ein Handover während der Dauer dieser Verbindung durchführt, ist

$$p_n = p(T_B > T_n) = \int_0^{\infty} e^{-(\mu_B t)} f_{T_n}(t) dt$$

$$p_n(\tau_{H,\text{norm}}) = \int_0^{\infty} e^{-(\tau_{H,\text{norm}} \cdot t_{\text{norm}})} \cdot f_{T_{n,\text{norm}}}(t_{\text{norm}}) dt_{\text{norm}} \quad \text{mit } \tau_{H,\text{norm}} = \mu_B \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}} \quad (2.82)$$

In Bild 2.17 ist die Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit p_n für einen Handover von einem Teilnehmer, der zuvor noch keinen Handover durchgeführt hat, dargestellt. Der Verlauf ist ähnlich zu dem der Kurven p_h , die Wahrscheinlichkeiten sind aber an der gleichen Stelle $\tau_{H,\text{norm}}$ höher.

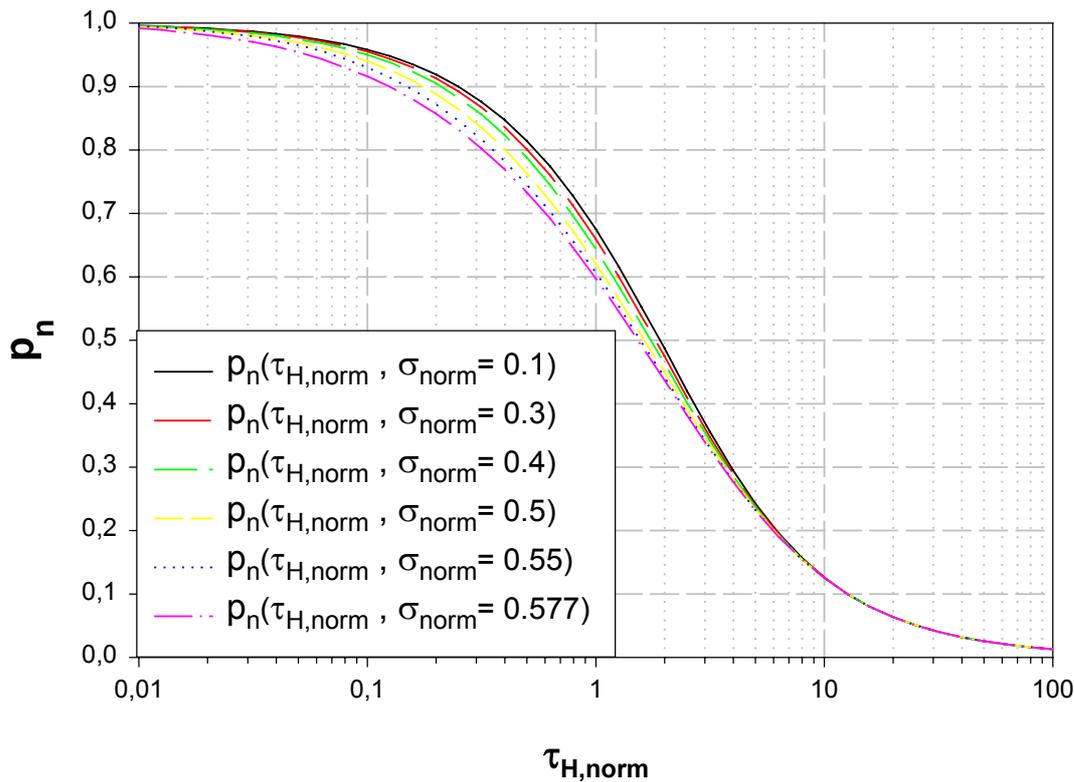


Bild 2.17 Wahrscheinlichkeit p_n für Handover eines Teilnehmers, der eine neue Verbindung zur betrachteten Basisstation aufgebaut hat in Abhängigkeit von der Größe $\tau_{H,norm} = (2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} in der Geschwindigkeits-WDF

Die untere Tabelle zeigt typische Werte für die Handover-Wahrscheinlichkeit p_n . Es wurden die Werte p_n für die gleichen Parameter wie in Tabelle 2.1 ermittelt. Es fällt auf, dass alle Werte p_n größer sind als die vergleichbaren Werte p_h in Tabelle 2.1. Der Grund hierfür ist folgender: Die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen des Funkzellenrandes, bevor die Verbindung durch den Teilnehmer beendet wird, ist für einen Teilnehmer größer, der die Verbindung in der betrachteten Funkzelle begonnen hat.

Gebiet	Funkzellenradius [m]	Mittlere Gesprächsdauer [s]	Mittlere Tln. Geschwindigkeit [m/s]	Streuung der Tln. Geschw.	$\tau_{H,norm}$	Handover-w'keit p_n
Zentrum Großstadt	260	240	2	0,3	1,0	0,67
Vorstadtgebiet	1300	240	10	0,5	1,0	0,63
Land	13000	240	20	0,1	5,0	0,25

Tabelle 2.2: Charakteristische Werte für die die Handover-Wahrscheinlichkeit p_n bestimmenden Parameter

Die obige Wahrscheinlichkeit p_n und die Wahrscheinlichkeit p_h aus Abschnitt 2.2.1.1 bestimmen zusammen die mittlere Anzahl von Handover während der Dauer einer Verbindung.

2.2.1.3 Berechnung der Ankunfts- und Enderate aufgrund des Auftretens von Handover

Handover wirkt sich auf die Verkehrsgüte eines Systems über die veränderten Ankunfts- und Enderaten aus. Die Berechnung erfolgt mit den in den vorhergehenden Abschnitten ermittelten Parametern, die den Einfluss des Handovers enthalten.

Zusätzliche normierte Ankunftsrate λ_H aufgrund von Handover

Die zusätzliche Ankunftsrate ergibt sich nach [12] aus der ursprünglichen Rate λ_A der Neuankünfte zu

$$\lambda_H = \lambda_{H,norm} \cdot \lambda_A \quad \text{mit} \quad \lambda_{H,norm} = (1 - p_B) \frac{(p_n - \pi_{HB} p_h)}{1 - p_h}. \quad (2.83)$$

Die Größen in Gleichung (2.83) sind:

- λ_A Ankunftsrate ohne Handover-Einfluss,
- $\lambda_{H,norm}$ Verhältnis zwischen der zusätzlichen Ankunftsrate λ_H verursacht durch Handover und der Ankunftsrate λ_A ohne Handover-Einfluss
- p_n, p_h Wahrscheinlichkeiten für die Durchführung eines Handovers in einer Funkzelle,
- p_B Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit,

π_{HB} *Handover-Blockierwahrscheinlichkeit*: Wahrscheinlichkeit, dass der Handover einer Verbindung aufgrund fehlender freier Kommunikationskanäle bei der übernehmenden Basisstation nicht angenommen werden kann. Der Zustandsübergang im Verkehrsmodell des Mobilfunksystems ist blockiert.

Die Handover-Rate ist von der Anruf- und der Handover-Blockierwahrscheinlichkeit der Verbindungen abhängig. Diese beiden Wahrscheinlichkeiten sind Leistungsparameter des betrachteten Kommunikationssystems und werden ihrerseits auch durch die Handover-Raten beeinflusst. Diese vorhandene Rückkopplung erfordert bei der Ermittlung der Leistungsgrößen eines Systems unter Berücksichtigung des Einflusses von Handover i.a. einen iterativen Berechnungsalgorithmus. Bei realen Systemen wird jedoch eine Verkehrsgüte G_{os} (Definition siehe Abschnitt 2.3.1) von ein bis zwei Prozent gefordert. Für diese Fälle kann mit guter Näherung, wie die Fehlerabschätzung in Gleichung (2.85) zeigt, die Ankunftsrate aufgrund von Handover durch

$$\lambda_{\text{H}} = \lambda_{\text{Happr,norm}} \cdot \lambda_{\text{A}} \quad \text{mit} \quad \lambda_{\text{Happr,norm}} \approx \frac{p_{\text{n}}}{1 - p_{\text{h}}} \quad \text{für} \quad p_{\text{B}} \leq 0.02 \wedge \pi_{\text{HB}} \leq 0.02 \quad (2.84)$$

angenähert werden. Die approximierte, relative Rate $\lambda_{\text{Happr,norm}}$ ist die näherungsweise bestimmte Anzahl von Handovern während der Dauer einer Verbindung (Gleichung (2.87)). Der relative Fehler für die Handover-Rate λ_{H} ist:

$$\Delta\lambda_{\text{Happr}} = \frac{\lambda_{\text{H,norm}} - \lambda_{\text{Happr,norm}}}{\lambda_{\text{H,norm}}} < \frac{\lambda_{\text{H,norm}} - \lambda_{\text{Happr,norm}}}{\lambda_{\text{Happr,norm}}} < p_{\text{B}} + \pi_{\text{HB}} - p_{\text{B}}\pi_{\text{HB}} < p_{\text{B}} + \pi_{\text{HB}} < G_{\text{os}} \quad (2.85)$$

Eine obere Schranke für den relativen Fehler ist gleich der Verkehrsgüte (G_{os}). Für Berechnungen, in denen die Verkehrsgüte G_{os} über 5% liegt, ist die exakte Berechnungsmethode nach Gleichung (2.83) zu verwenden.

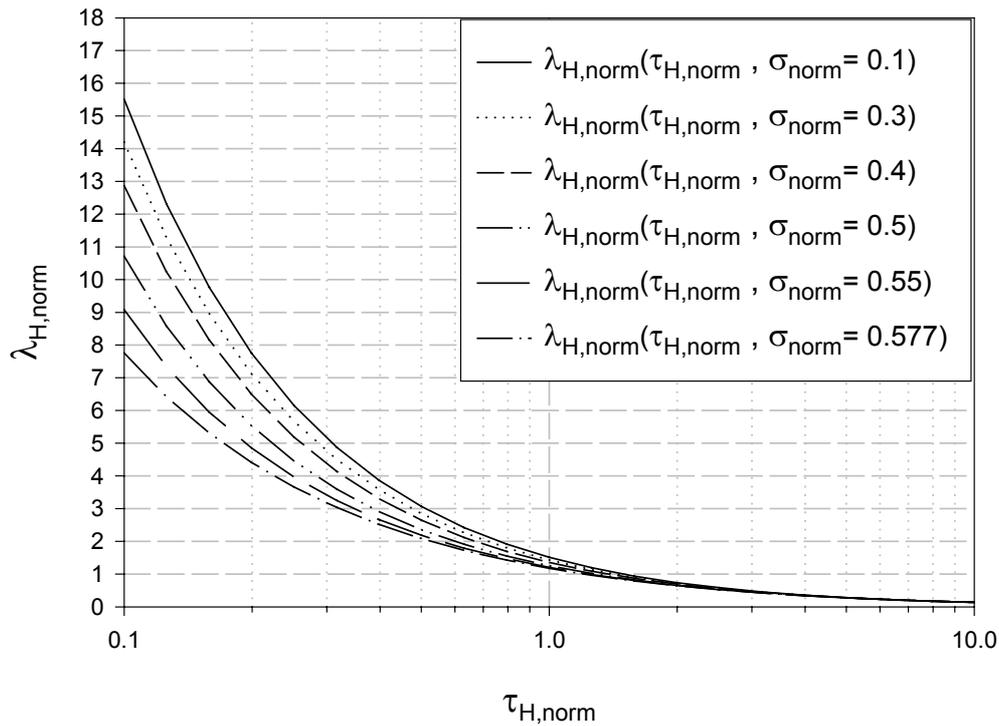


Bild 2.18 Die zusätzlichen Ankunftsraten $\lambda_{H,norm} = \lambda_H/\lambda_A$ in Abhängigkeit von der Handover-Rate $\tau_{H,norm} = (2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung (Bild 2.13)

Die normierten, zusätzlichen Ankunftsraten $\lambda_{H,norm}$, verursacht durch Handover, sind sehr groß für kleine Werte $\tau_{H,norm}$. Der Wert $\tau_{H,norm} = 0.5$ sagt aus, dass die Zeit für das Durchqueren einer Zelle auf der maximalen Strecke $2R_{eq}$ mit der Geschwindigkeit v_{mean} die Hälfte der mittleren Verbindungsdauer $1/\mu_B$ beträgt. Die zusätzliche Ankunftsrate $\lambda_{H,norm}$ an einer Basisstation ist dann für $\sigma_{norm} = 0.1$ ungefähr das 3-fache der Ankunftsrate ohne Handover (λ_A). Ihre Berücksichtigung ist wichtig für die Dimensionierung der erforderlichen Anzahl von Übertragungskanälen m_{BS} einer Basisstation. Für größere Werte $\tau_{H,norm}$ nimmt die zusätzliche normierte Ankunftsrate $\lambda_{H,norm}$ ab. Sie geht asymptotisch gegen den Wert Null. Für Werte $\tau_{H,norm}$ größer 100 beträgt die zusätzliche Ankunftsrate λ_H weniger als 2 % der ursprünglichen Rate λ_A . Sie kann bei dieser Größenordnung bei der Dimensionierung in der Regel vernachlässigt werden. Der maximale Unterschied von $\lambda_{H,norm}$ für unterschiedliche Streuungen der Geschwindigkeitsverteilung ist bereits ab $\tau_{H,norm}$ größer 10 kleiner 1.2% und kann somit für diesen Bereich als näherungsweise unabhängig von der Streuung σ_{norm} betrachtet werden.

Veränderte normierte Bedienrate $\mu_{\text{BH,norm}}$ aufgrund von Handover

Die zweite wichtige Größe zur mathematischen Beschreibung des Teilnehmerverhaltens ist neben der Ankunftsrate λ die WDF der Haltezeit T_{H} der Verbindung.

Die komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion $F_{T_{\text{H}}}^{\text{C}}$ der veränderten Bedienzeit T_{H} ist nach [12]

$$F_{T_{\text{H}}}^{\text{C}}(t) = 1 - F_{T_{\text{H}}}(t) = F_{T_{\text{B}}}^{\text{C}}(t) \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma_{\text{c}}} \cdot [F_{T_{\text{n}}}(t) + \gamma_{\text{c}} F_{T_{\text{h}}}(t)] \right) \quad \text{mit} \quad \gamma_{\text{c}} = \frac{\rho_{\text{n}} - \pi_{\text{HB}}}{1 - \rho_{\text{h}}} \quad (2.86)$$

Die Konstante γ_{c} ist gleich der mittleren Anzahl von Handover eines Teilnehmers während der Dauer einer Verbindung. Diese Konstante kann γ_{c} für die Handover-Blockierwahrscheinlichkeiten $\pi_{\text{HB}} < 0.2$, was in den praktischen Anwendungen in der Regel immer erfüllt ist, durch

$$\gamma_{\text{C,appr}} = \lambda_{\text{Happr,norm}} \approx \frac{\rho_{\text{n}}}{1 - \rho_{\text{h}}} \quad \text{für} \quad \pi_{\text{HB}} < 0.2 \quad (2.87)$$

angenähert werden. Dadurch wird es möglich, die Rate $\mu_{\text{BH,norm}}$ unabhängig vom betrachteten System zu berechnen. Das folgende Bild zeigt, dass für $\pi_{\text{HB}} < 0.2$ der Fehler kleiner gleich 3 % ist. Für übliche, zulässige Handover-Blockierwahrscheinlichkeiten kleiner 1%, liegt der Fehler unter 0.2%. Durch den geringen Fehler kann diese systemunabhängige Näherung in den meisten Fällen verwendet werden.

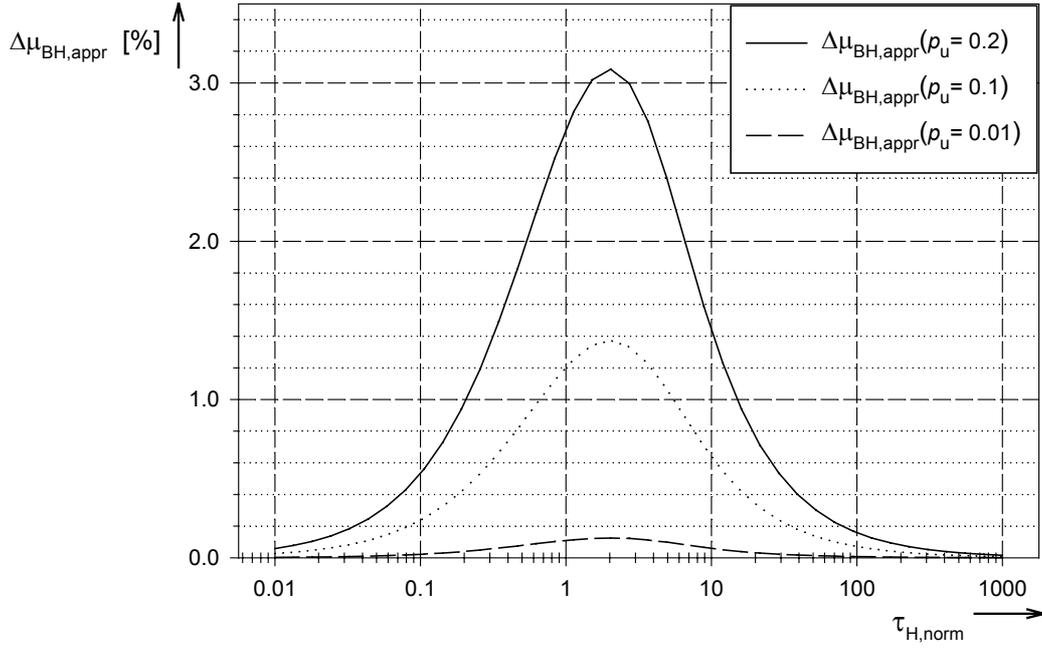


Bild 2.19 Fehler $\Delta\mu_{\text{BH,appr}}(\tau_{\text{H,norm}}, \rho_u)$ der approx. Raten für die Handover-Blockierwahrscheinlichkeiten für $\pi_{\text{HB}}=0.2, 0.1$ und 0.01

Nach der Normierung der Zufallsgröße T_{H} und ihrer Realisierung t durch

$$T_{\text{H,norm}} = \frac{T_{\text{H}}}{\tau_{\text{h}}} \quad \text{und} \quad t_{\text{norm}} = \frac{t}{\tau_{\text{h}}}, \quad \text{mit} \quad \tau_{\text{h}} = \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}}, \quad (2.88)$$

erhält man für die normierte, komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion

$$F_{\text{T}_{\text{H,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}, \tau_{\text{h,norm}}) = F_{\text{T}_{\text{B,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma_{\text{c}}} \cdot [F_{\text{T}_{\text{n,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}) + \gamma_{\text{c}} F_{\text{T}_{\text{h,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}})] \right)$$

$$\text{mit} \quad F_{\text{T}_{\text{B,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}, \tau_{\text{h,norm}}) = 1 - \int_0^{t_{\text{norm}}} \tau_{\text{H,norm}} \cdot e^{-(\tau_{\text{H,norm}} \cdot u)} du = e^{-(\tau_{\text{H,norm}} \cdot t_{\text{norm}})},$$

$$F_{\text{T}_{\text{n,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}) = \int_0^{t_{\text{norm}}} f_{\text{T}_{\text{n,norm}}}(u) du, \quad F_{\text{T}_{\text{h,norm}}}^{\text{C}}(t_{\text{norm}}) = \int_0^{t_{\text{norm}}} f_{\text{T}_{\text{h,norm}}}(u) du \quad \text{und}$$

$$\tau_{\text{H,norm}} = \mu_{\text{B}} \frac{2R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}}.$$

(2.89)

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f_{\text{T}_{\text{h,norm}}}$ und $f_{\text{T}_{\text{n,norm}}}$ in Gleichung (2.89) sind den Gleichungen (2.76) und (2.81) zu entnehmen. Durch die Normierung ist es gelungen, die

Funktion $F_{T_H}^C$ in [12], die von drei Parametern abhängt, auf eine Funktion mit nur einem Parameter zu reduzieren.

Die normierte komplementäre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion $F_{T_H, \text{norm}}^C$ geht für kleine Werte der normierten Handover-Zeitkonstanten $\tau_{H, \text{norm}} \rightarrow 0$ in die komplementäre, exponentielle Bedienzeitverteilungsfunktion $F_{T_B, \text{norm}}^C$ über. Aus diesem Grund und der Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit für Markoff-Prozesse (im Anhang erklärt) ist die Exponentialfunktion

$$F_{T_{BH, \text{norm}}}^C = e^{-\mu_{BH} t_{\text{norm}}} \quad (2.90)$$

zur Approximation von $F_{T_H, \text{norm}}^C$ in Gleichung (2.89) die geeignete Funktion. Die Rate μ_{BH} wird so gewählt, dass das Integral über die Differenz von der komplementären Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion $F_{T_H}^C$ und der approximierten, komplementären exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (WVF) $F_{T_B, \text{norm}}^C$ gleich Null ist (Gleichung (2.91) und Bild 2.20).

$$\int_0^{\infty} \left[F_{T_{BH, \text{norm}}}^C(t_{\text{norm}}, \tau_{h, \text{norm}}) - e^{-\mu_{BH} t_{\text{norm}}} \right] dt_{\text{norm}} = 0 \quad (2.91)$$

Aus der obigen Gleichung erhält man die Bestimmungsgleichung

$$\mu_{BH}(\tau_{h, \text{norm}}) = \left[\int_0^{\infty} F_{T_{BH, \text{norm}}}^C(t_{\text{norm}}, \tau_{h, \text{norm}}) dt_{\text{norm}} \right]^{-1} \quad (2.92)$$

in Abhängigkeit von der normierten Zeitkonstanten $\tau_{H, \text{norm}}$, die das Verhältnis zwischen der Handover-Zeit τ_H und der mittleren Bedienzeit $\overline{T_B} = 1/\mu_B$ ist. Ein Maß für die Güte der Näherung der komplementären WVF $F_{T_H, \text{norm}}^C$ aus Gleichung (2.89) durch eine Exponentialfunktion nach Gleichung (2.91) ist der Faktor [12]

$$G = \frac{\int_0^{\infty} \left| F_{T_{BH, \text{norm}}}^C(t_{\text{norm}}, \tau_{h, \text{norm}}) - e^{-\mu_{BH} t_{\text{norm}}} \right| dt_{\text{norm}}}{2 \int_0^{\infty} F_{T_{BH, \text{norm}}}^C(t_{\text{norm}}, \tau_{h, \text{norm}}) dt_{\text{norm}}} \quad (2.93)$$

Er beschreibt die Korrelation zwischen der exakten und der Näherungsfunktion. Seine Werte liegen im Intervall $[(0,1)]$. Der Wert Null bedeutet, dass die beiden Funktionen exakt übereinstimmen. Für den Fall $G = 1$ sind die beiden Funktionen unkorreliert. Das folgende Bild zeigt die exakte komplementäre WVF, die exponentielle Näherung nach Gleichung (2.92) und die ursprüngliche komplementäre WVF ohne Handover für die beiden normierten Handover-Zeiten $\tau_{H,\text{norm}}$ gleich 0.1 und 1.0. Die normierte Handover-Zeit $\tau_{H,\text{norm}} = 0.1$ sagt aus, dass die mittlere Zeit zwischen zwei Handovern τ_H näherungsweise im Mittel ein Zehntel der ursprünglichen mittleren Dauer $\overline{T_B}$ der Verbindung ist.

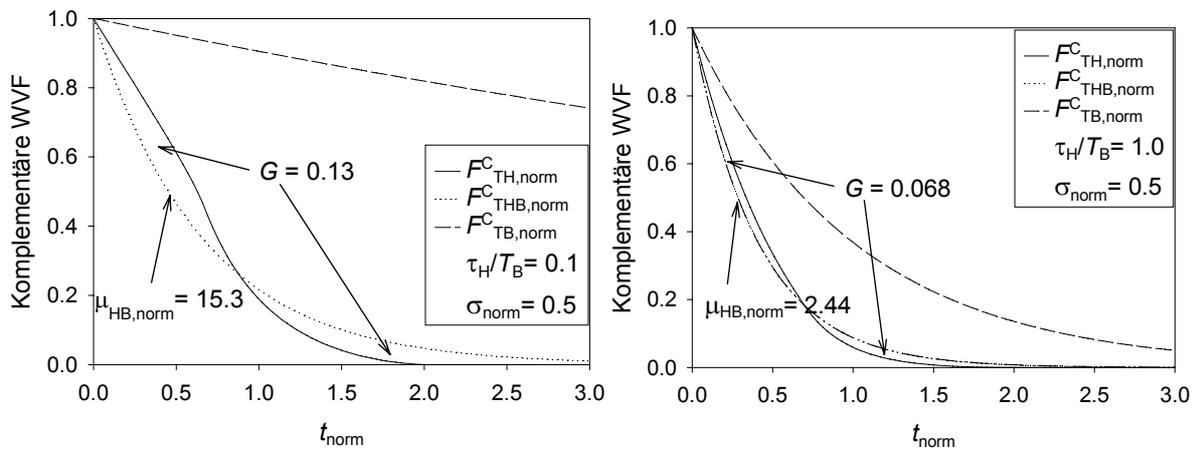


Bild 2.20 Darstellung der komplementären WVF $F_{T_H,\text{norm}}^C$ für die Bedienzeit mit Handover-Einfluss, der Näherung $F_{T_{HB},\text{norm}}^C$ durch eine Exponentialfunktion und der komplementären WVF $F_{T_B,\text{norm}}^C$ der ursprünglichen Bedienzeit

Durch Vergleich der beiden Graphen in Bild 2.20 ist zu erkennen, dass die Güte für die Approximation bei zunehmender normierter Handover-Zeit $\tau_{H,\text{norm}}$ größer wird. Ursache ist der abnehmende Einfluss des Handovers. Die komplementäre WVF der neuen Bedienzeit T_H nähert sich der Exponentialfunktion. Die Abweichung G geht für größere Handover-Zeiten $\tau_{H,\text{norm}}$ gegen Null.

Die Bedienrate $\mu_{BH,\text{norm}}$ unter Berücksichtigung von auftretendem Handover, ist in Bild 2.21 dargestellt. Der Scharparameter σ_{norm} ist die Streuung der Geschwindigkeit. Sie kann Werte zwischen 0 und $\sigma_{\text{max}} = 1/\sqrt{3}$ annehmen. Für die Wahl $\sigma = \sigma_{\text{max}}$ ist die Geschwindigkeit gleichverteilt zwischen 0 und $2v_{\text{mean}}$.

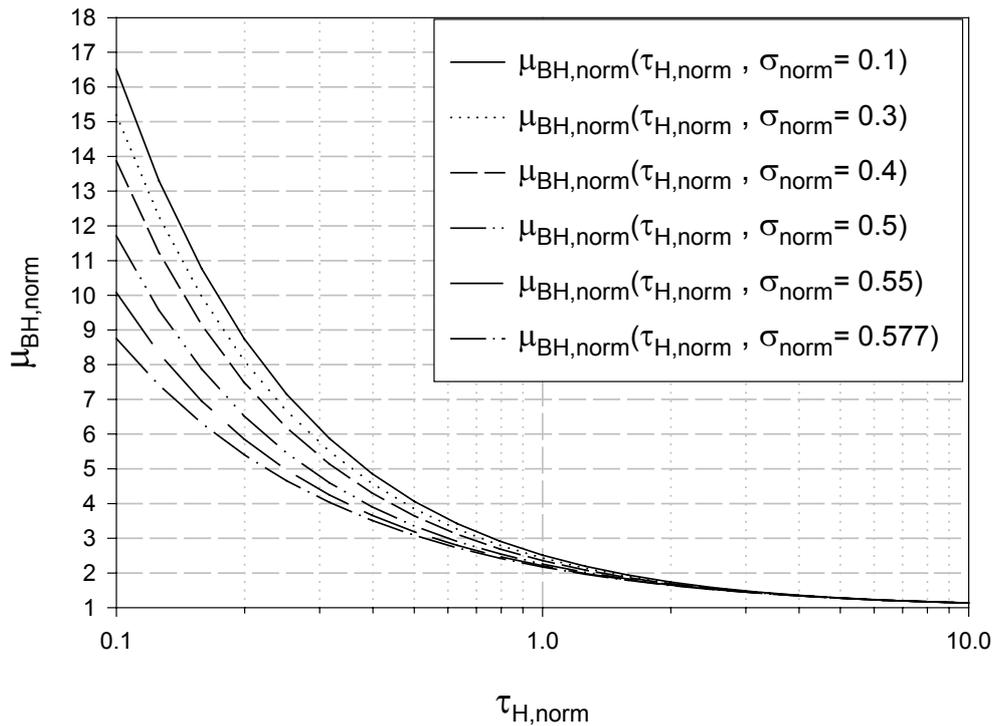


Bild 2.21 Die normierten Bedienraten $\mu_{\text{BH, norm}} = \mu_{\text{BH}} / \mu_{\text{B}}$ in Abhängigkeit von der Handover-Rate $\tau_{\text{H, norm}} = (2R_{\text{eq}}/v_{\text{mean}})\mu_{\text{B}}$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung (Bild 2.13)

Die normierte Bedienrate $\mu_{\text{BH, norm}}$ ist für kleine Werte $\tau_{\text{H, norm}}$ sehr groß und auch stark von der Streuung der Geschwindigkeit abhängig. Der Wert $\tau_{\text{H, norm}} = 0.3$ sagt aus, dass die Zeit für das Durchqueren einer Zelle auf der maximalen Strecke $2R_{\text{eq}}$ mit der Geschwindigkeit v_{mean} ein Zehntel der mittleren Dauer $1/\mu_{\text{B}}$ einer Verbindung beträgt. Die mittlere Dauer einer Verbindung mit einer Basisstation beträgt dann für $\sigma_{\text{norm}}=0.1$ nur noch ca. $1/5$ der mittleren Gesamtverbindungsdauer $1/\mu_{\text{B}}$. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Enderate um den Faktor 5. Für größere Verhältnisse $\tau_{\text{H, norm}}$ nimmt der Einfluss des Handover auf die normierte Enderate $\mu_{\text{BH, norm}}$ ab. Sie geht asymptotisch gegen den Wert eins. Für Werte $\tau_{\text{H, norm}}$ größer 50 beträgt die Zunahme der Enderate weniger als 3 % und kann in der Regel bei der Dimensionierung vernachlässigt werden. Bereits ab $\tau_{\text{H, norm}}$ größer 10 ist der maximale Unterschied für unterschiedliche Streuung der Geschwindigkeit kleiner 0.2% und kann somit als unabhängig von der Streuung σ_{norm} betrachtet werden.

Die Teilnehmerbewegung und der Einfluss von Handover auf die Verkehrsnennkapazitäten in Mobilfunksystemen werden durch die zusätzliche Ankunftsrate λ_{H} und die Enderate $\mu_{\text{BH, norm}}$ modelliert. Sie sind vom Mittelwert und der Streuung der Geschwindigkeitsverteilung und der

Größe der Funkzelle abhängig. Somit kann die Teilnehmerbewegung durch diese beiden Parameter mit ausreichender Genauigkeit bei der Verkehrsanalyse berücksichtigt werden.

2.2.2 Modell zur Beschreibung der Mobilität des Multiservice-Teilnehmers

Die Berücksichtigung der Auswirkungen von Handover auf die Verkehrsnennkapazität eines Mobilfunksystems für MS-Teilnehmer machte es erforderlich, ein einfaches Handover-Modell für diesen neuen Teilnehmertyp zu entwickeln. Das Modell musste dabei so gestaltet werden, dass sich durch die Integration von Handover in das Verkehrsmodell des Mobilfunksystems für Multiservice-Teilnehmer dessen Komplexität (Anzahl der Zustände) nicht erhöht. Das Verkehrsmodell wird in Kapitel 4 bei den Zugriffsverfahren beschrieben. Dies ist durch die im folgenden beschriebene Näherungslösung gegeben. Wie sich in den Ergebnissen bei der Analyse des TDMA-Zugriffsverfahrens für MS-Teilnehmer unter Berücksichtigung von Handover in Kapitel 4 zeigt, ist die damit erzielte Genauigkeit vollkommen ausreichend.

2.2.2.1 Mobilitätsmodell des MS-Teilnehmers

Für den MS-Teilnehmer wird das gleiche Mobilitätsmodell wie für den Sprachdienst-Teilnehmer verwendet. Das Modell und die Herleitung der statistischen Modellparameter ist in den Abschnitten 2.2.1.1 und 2.2.1.2 für den Sprachdienst-Teilnehmer ausführlich beschrieben. Auf eine wiederholte Darstellung wird hier verzichtet. Zur Übertragung der Ergebnisse der Berechnung der normierten Verbindungsenergie $\mu_{BH, \text{norm}}$ und der Handover-Wahrscheinlichkeiten p_n und p_h des Sprachdienst-Teilnehmers auf den MS-Teilnehmer gilt es den Wert

$$\tau_{H, \text{norm}} = \mu_B \frac{2 R_{\text{eq}}}{v_{\text{mean}}} \quad (2.94)$$

für den MS-Teilnehmer in geeigneter Weise zu bestimmen. Der äquivalente Funkzellenradius für Handover R_{eq} und die mittlere Teilnehmergewindigkeit v_{mean} sind vom Teilnehmer-Verkehrsmodell unabhängige Größen. Abhängig vom Teilnehmer-Verkehrsmodell ist dagegen die mittlere Verbindungsenergie μ_B . Für den MS-Teilnehmer (Bild 2.4) sind es im Gegensatz zum Sprachdienst-Teilnehmer 3 Zustände, aus denen heraus Verbindungen beendet werden. Es sind die Zustände Sprachdienst- (S), Datendienst- (D) und die kombinierte Sprach/Datendienst-Benutzung (SD). In diesen Zuständen werden unterschiedliche Anzahlen von Übertragungskanälen m_x durch den MS-Teilnehmer belegt. Im Zustand Frei (F) des MS-Teilnehmers besteht keine Verbindung, es wird auch kein Kanal belegt, und somit können aus

diesem Zustand heraus auch keine Verbindungen beendet werden. Dieser Zustand ist ohne Bedeutung für die Auswirkungen von Handover. Das Verkehrs-Ersatzmodell des MS-Teilnehmers (Bild 2.22) zur Berücksichtigung von Handover und zur Berechnung der erforderlichen Modellparameter besteht aus den folgenden 3 Teilmodellen. Auf diese Teilmodelle lassen sich die Methoden und Ergebnisse des Sprachdienst-Teilnehmers zur Berücksichtigung von Handover übertragen.

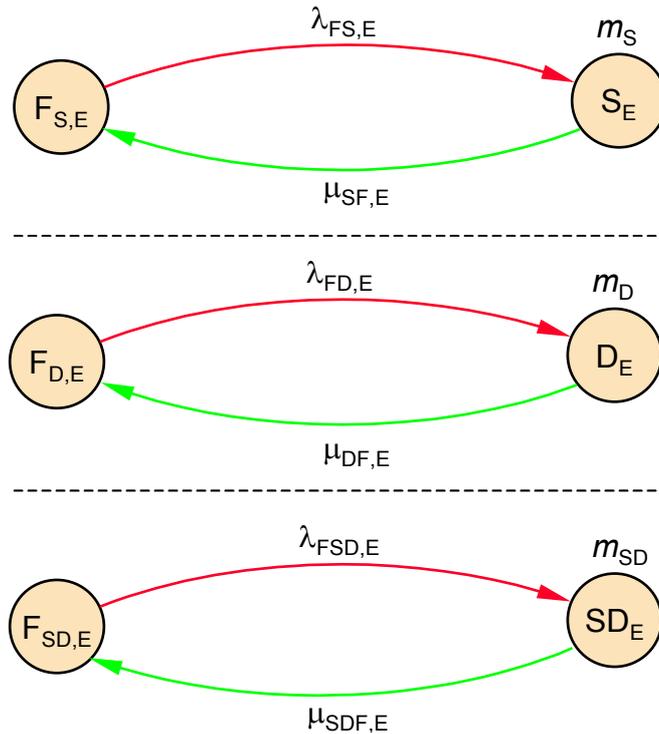


Bild 2.22 Dreiteiliges Handover-Ersatzmodell für den Multiservice-Teilnehmer

In Bild 2.22 sind die Teilmodelle für die Zustände S, D und SD des MS-Teilnehmers dargestellt. In den folgenden 4 Gleichungen ist die Ableitung der Raten $\lambda_{FX,E}$ und $\mu_{XF,E}$ aus der Zustandswahrscheinlichkeit $\pi_{X,MS}$ und den Raten $\mu_{XY,MS}$ des entsprechenden Zustands X im MS-Teilnehmer-Verkehrsmodell beschrieben. Für diese Zustände des MS-Teilnehmers wird in den Gleichungen die Variable X verwendet.

$$X \in \{S, D, SD\} \wedge Y \in \{F, S, D, SD\} \quad (2.95)$$

$$\bar{T}_{X,E} \stackrel{!}{=} \bar{T}_{X,MS} \wedge \pi_{X,E} \stackrel{!}{=} \pi_{X,MS} \quad (2.96)$$

$$\mu_{XF,E} = \sum_{\forall X, Y: X \neq Y} \mu_{XY,MS} \quad (2.97)$$

$$\lambda_{FX,E} = \frac{\pi_{X,MS}}{1 - \pi_{X,MS}} \mu_{XF,E} \quad (2.98)$$

Die Zustände der Zustandsvariablen X sind in Gleichung (2.95) definiert. Die Zustandvariable Y in Gleichung (2.95) enthält alle Zustände des MS-Teilnehmers. In den Zuständen X des MS-Teilnehmers müssen Verbindungen im Falle eines Handovers an die übernehmende Basisstation weitergegeben werden, damit es nicht zu einem Verbindungsabbruch kommt. Der mathematische Zusammenhang zwischen den Raten im Verkehrsmodell des MS-Teilnehmers μ_{XY} und den für die Berechnung der Handover-Wahrscheinlichkeiten und der Handover-Raten erforderlichen Zustandsübergangsraten im dreiteiligen Ersatzmodell, sind über die mittleren Aufenthaltszeiten und die Zustandswahrscheinlichkeiten gegeben. Die mittlere Aufenthaltszeit $\bar{T}_{X,E}$ für einen Zustand X_E im Ersatzmodell wird gleich der Aufenthaltszeit $\bar{T}_{X,MS}$ des entsprechenden Zustands X_{MS} im MS-Verkehrsmodell gesetzt (erster Teil Gleichung (2.96)). In den Zustandsübergangsraten μ ausgedrückt, erhält man die Bestimmungsgleichung (2.97). Die Raten $\mu_{XF,E}$ für das Verlassen des Zustandes X_E im Ersatzmodell sind gleich der Summe der Raten für das Verlassen des Zustands X_{MS} im MS-Verkehrsmodell. Die Zustandsübergangsraten $\lambda_{XF,E}$ für das Eintreten des Zustands X_E im Ersatzmodell wird aus dem zweiten Teil der Bestimmungsgleichung (2.96) gewonnen, der die Beziehungen zwischen den Zustandswahrscheinlichkeiten im Ersatzmodell und den Zustandswahrscheinlichkeiten im MS-Verkehrsmodell beschreibt. Zusammen mit den bereits ermittelten Raten $\mu_{XF,E}$ sind die Raten $\lambda_{XF,E}$ zu wählen, damit die Zustandswahrscheinlichkeiten $\pi_{X,E}$ im Ersatzmodell gleich den Zustandswahrscheinlichkeiten $\pi_{X,MS}$ im MS-Verkehrsmodell werden. Mit diesen beiden für jeden der drei Zustände sind die erforderlich Raten für die Berechnung der Handover-Parameter für den MS-Teilnehmer mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Das Vorgehen wird im folgenden Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben.

2.2.2.2 Berechnung der Handover-Raten für den MS-Teilnehmer

Mit den oben ermittelten Ersatzraten $\mu_{XF,E}$ und $\lambda_{XF,E}$ werden die Faktoren für die Erhöhung der Enderate von Verbindungen durch Handover $\mu_{H,X, \text{norm}}$, die Handover-Wahrscheinlichkeiten $p_{n,X}$ $p_{h,X}$ und die normierte Handover-Raten $\lambda_{HX, \text{norm}}$ für die Zustände $X=S$, $X=D$ und $X=SD$ wie folgt ermittelt:

1. Ermittlung der Verhältnisse $\tau_{HX, \text{norm}}$ nach Gleichung (2.94),
2. Bestimmung des Multiplikators $\mu_{BH, \text{norm}}$ für die Verbindungsenderaten nach Gleichung (2.92), oder aus der Kennlinie in Bild 2.21,

3. Berechnen der Handover-Wahrscheinlichkeit nach $p_{h,X}$ nach Gleichung (2.82), oder aus den Kennlinien in Bild 2.17,
4. Berechnen der Handover-Wahrscheinlichkeit nach $p_{h,X}$ nach Gleichung (2.78), oder aus den Kennlinien in Bild 2.15,
5. Berechnen der approximierten Handover-Raten $\lambda_{H,X,norm,appr}$ aus den Handover-Wahrscheinlichkeiten nach Gleichung (2.84), oder aus den Kennlinien in Bild 2.18.

Falls eine exakte Ermittlung erforderlich ist, ist die Berechnung mit Gleichung (2.83) nur möglich, wenn die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U bekannt ist. Durch die gegenseitige Abhängigkeit der beiden Größen ist für eine exakte Ermittlung eine wiederholte Berechnung von $\lambda_{H,X,norm,appr}$ und p_U in einer Iterationsschleife erforderlich.

2.3 Dienstgüte und die Anforderungen an ein Mobilfunksystem

Die Dienstgüte eines Nachrichtensystems lässt sich nach [9] in fünf Bereiche aufteilen.

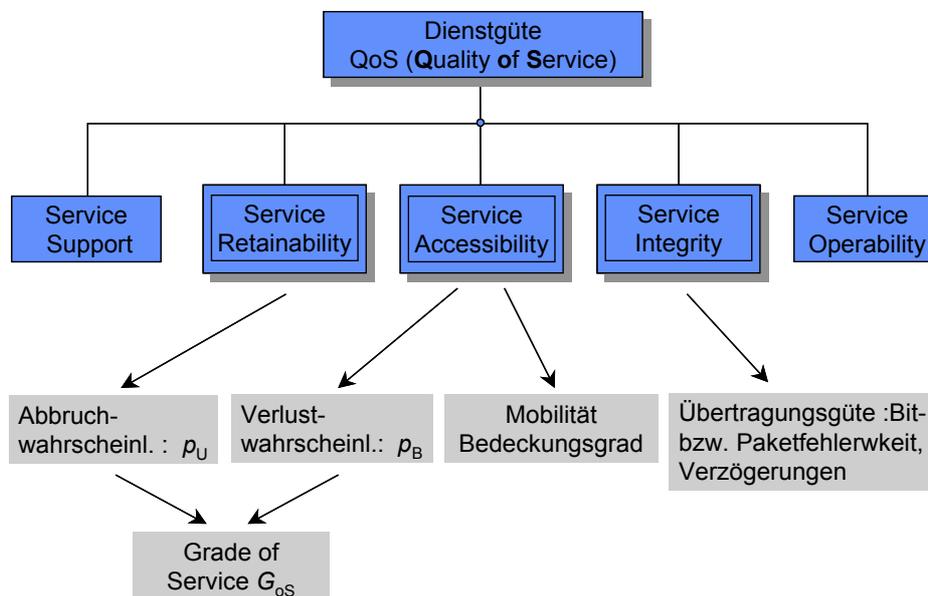


Bild 2.23 Zusammensetzung der Dienstgüte und die verwendeten Parameter zu ihrer Beschreibung

Die Kriterien 'Service Support' und 'Service Operability' betreffen hauptsächlich die Schichten oberhalb der Vermittlungsschicht (network layer) nach dem OSI-Referenzmodells und

werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Die drei Teilbereiche ‘Service Retainability’, ‘Service Accessibility’ und ‘Service Integrity’ beurteilen die Transportdienste des Nachrichtensystems. Die zugehörigen Messgrößen für die Güte sind in Bild 2.22 hellgrau unterlegt. Die Messgrößen und die Parameter des Nachrichtensystems, die sie entscheidend beeinflussen, werden im folgenden erläutert.

2.3.1 Parameter zur Beurteilung der Verkehrsgüte (G_{oS})

Die Verkehrsgüte beurteilt die Verfügbarkeit der angebotenen Dienste eines Systems. Es fließt die Wahrscheinlichkeit für das Nichtzustandekommen einer gewünschten Verbindung (Verlustwahrscheinlichkeit) und die Wahrscheinlichkeit für einen vom System verursachten Abbruch einer Verbindung ein. Ein Abbruch wird vom Teilnehmer als sehr viel unangenehmer empfunden als ein Nichtzustandekommen einer Verbindung. Diese unterschiedliche Bewertung durch den Teilnehmer spiegelt sich bei der Definition der Verkehrsgüte (‘Grade of Service’)

$$G_{oS} = \underline{\alpha}_B \cdot \underline{p}_B + \underline{\alpha}_U \cdot \underline{p}_U \quad \text{und} \quad \alpha_{U,i} \underset{\forall i \neq j}{>} \alpha_{B,j} \quad (2.99)$$

wider. Sie ist die gewichtete Summe aus den Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeiten \underline{p}_B mit den Gewichten $\underline{\alpha}_B$ und den Abbruchwahrscheinlichkeiten \underline{p}_U mit den Gewichten $\underline{\alpha}_U$. Der Unterstrich in Gleichung (2.99) kennzeichnet die Größen als Vektoren. Der Vektor \underline{p}_B enthält alle Verlustwahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Verbindungsaufbauanforderungen. Beim MS-Teilnehmer sind es 6 mögliche Aufbauanforderungen, bei denen sich bei einem erfolgreichem Aufbau der Verbindung die Anzahl der belegten Kanäle erhöht. Dies ist der Fall für den Neuaufbau einer Sprachverbindung, einer Datenverbindung oder der kombinierten Sprach-/datenverbindung. Des weiteren ist dies der Fall für die Zustandswechsel von einer Sprachverbindung zu einer Datenverbindung, von einer Sprachverbindung zu einer kombinierten Sprach-/datenverbindung oder für den Wechsel von einer Datenverbindung zu einer kombinierten Sprach-/datenverbindung .

Der Verlustwahrscheinlichkeitsvektor \underline{p}_B und der Gewichtvektor $\underline{\alpha}_B$ enthalten in diesem Fall jeweils 6 Elemente. Mit den Elementen in $\underline{\alpha}_B$ lassen sich die Verluste der unterschiedlichen Arten von Verbindungsaufbauanforderungen untereinander und im Vergleich zu den möglichen Arten von Verbindungsabbrüchen durch den Teilnehmer gewichten. Diese Aussagen über die Möglichkeit der Gewichtung gelten analog für den Gewichtvektor α_U für die möglichen Arten von Verbindungsabbrüchen.

Bei einem Sprachdienst-Teilnehmer vereinfacht sich Gleichung (2.99) zu der aus der Literatur bekannten Gleichung:

$$G_{oS} = p_B + \alpha_U \cdot p_U \quad \text{und} \quad \alpha_U > 1 \quad (2.100)$$

Hier wird die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit mit dem Faktor 1 und die Abbruchwahrscheinlichkeit mit dem Faktor $\alpha_u > 1$ gewichtet.

Ein in den ETSI Standards verwendeter Wert ist $\alpha_U = 10$. Für die Dimensionierung heutiger Kommunikationssysteme wird eine Verkehrsgüte von $G_{oS} = 0.01$ gefordert. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Verbindungsaufbauverlust- und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit sind in den nächsten Abschnitten kurz beschrieben.

2.3.1.1 Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit p_B

Das Kriterium *Service Accessibility* bewertet die Verfügbarkeit eines Dienstes zum Zeitpunkt der Anforderung durch den Teilnehmer. Die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit p_B beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Ablehnung einer Dienstanforderung aufgrund der Tatsache, dass kein freier Übertragungskanal vorhanden ist.

$$p_B = f_B(m, D_T, r_z, T_{\text{par}}, \text{Handover}, \text{Zugriff}) \quad (2.101)$$

f_B	Funktion für die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von (...)
m	Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle
D_T	Teilnehmerdichte im Versorgungsgebiet
r_z	Funkzellenradius
T_{par}	Teilnehmer-Verkehrsmodellparameter, die das Verhalten und die von den Teilnehmern benutzten Dienste beschreiben
Handover	Einfluss von Handover (z.B. Anzahl für Handover reservierter Kanäle)
Zugriff	Kanalzugriffsverfahren

Der Begriff Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit ist für den Multiservice-Teilnehmer zu eng gefasst, deshalb wird im Zusammenhang mit Multiservice-Teilnehmern der Begriff Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit verwendet. Die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit ist abhängig von der Teilnehmerdichte D_T und den Teilnehmerparametern T_{par} , der Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle und dem verwendeten Zugriffsverfahren. Die Teilnehmer-Parameter beschreiben das Verhalten des Teilnehmers in

bezug auf die zeitliche Inanspruchnahme der angebotenen Dienste und seine räumliche Mobilität. Das Teilnehmerverhalten und der damit verbundene Bedarf an Netzwerkressourcen sind durch stochastische Prozesse beschreibbar. Die verwendeten Teilnehmertypen sind in Abschnitt 2.1 modelliert. Die Ankunftsabstände der Handover-Anfragen und die vorzeitige Beendigung einer Verbindung durch das Verlassen der Zelle durch den Teilnehmer haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit p_B beim Verbindungsaufbau.

2.3.1.2 Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U

Service Retainability bewertet die Fähigkeit des Systems, einen begonnenen Telekommunikationsdienst während der durch den Teilnehmer gewünschten Zeit zu erbringen. Ein Hauptgrund für einen vorzeitigen Abbruch einer Verbindung ist das Fehlschlagen der erforderlichen Übergabe der Verbindung (aufgrund der unzureichenden Übertragungsqualität der Verbindung) an eine benachbarte Basisstation (intercell handover). Die Verbindung kann aufrecht erhalten werden, wenn die Ausbreitungsbedingungen eine Verbindung zu einer benachbarten Basisstation ermöglichen und diese Basisstation die erforderliche Anzahl an nicht belegten Übertragungskanälen besitzt. Wenn diese beiden Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kommt es zu einem Abbruch der Verbindung. Die Wahrscheinlichkeit für den Abbruch einer bestehenden Verbindung wird durch die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U beschrieben. Sie hängt von den selben Parametern wie die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit ab.

$$p_U = f_U(m, D_T, r_z, T_{\text{par}}, \text{Handover}, \text{Zugriff}) \quad (2.102)$$

2.3.2 Parameter zur Beurteilung der Übertragungsqualität

Service Integrity erfordert eine bestimmte Qualität einer Telekommunikationsverbindung. Dazu müssen Grenzwerte für die Paketfehlerwahrscheinlichkeit eingehalten werden. Für Dienste mit Realzeitcharakter (Sprache, Videokonferenz) sind zusätzlich Grenzwerte für die Verzögerungszeiten (delay) und deren Schwankungen (delay jitter) einzuhalten.

2.3.2.1 Paketfehlerwahrscheinlichkeit p_P

Die Paketfehlerwahrscheinlichkeit hängt vom Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ am Empfängereingang und den nachfolgenden Verfahren zur Demodulation, Codierung und Fehlerkorrektur ab. Da die Untersuchung der Einflüsse dieser Verfahren den Rahmen dieser Arbeit

sprengen würde, wird eine geforderte maximale Paketfehlerwahrscheinlichkeit durch ein minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ am Empfänger berücksichtigt. Diese Abbildung von ρ auf die Paketfehlerwahrscheinlichkeit enthält alle Einflüsse der Verfahren, die zwischen dem Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ am Empfängereingang und der Schnittstelle zur Anwendung des Teilnehmers liegen.

$$p_P = f_P(\rho, \text{Modulation, Codierung, ARQ}) \quad (2.103)$$

$f_P(\dots)$	Funktion für die Paketfehlerwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von (...)
ρ	Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (signal to interference plus noise ratio: SINR) am Empfänger

Das notwendige SINR ρ_{\min} am Empfängereingang erhält man durch Einsetzen der maximal zulässigen Paketfehlerwahrscheinlichkeit $p_{P,\max}$ in die Umkehrfunktion

$$\rho_{\min} = f_P^{-1}(p_{P,\max}, \text{Modulation, Codierung, ARQ}) \quad (2.104)$$

Dieses minimal erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} bestimmt zusammen mit der zulässigen Sendeleistung S_S die möglichen Zellradien $r_{z,\max}$ der Funkzellen. Die Bestimmung der maximalen Radien wird in Abschnitt 5.2.2.4 vorgenommen.

2.3.2.2 Verzögerungszeit T_V und Verzögerungszeitschwankung ΔT_V

Zukünftige Realzeit-Anwendungen wie z.B. Videotelefonie, Telemetrieanwendungen, Bewegtbildübertragung stellen höhere Anforderungen an die Verzögerungszeit T_V als herkömmliche Telefongespräche. Die Verzögerungen entstehen durch Signalverarbeitung, Signallaufzeiten, Zwischenspeicherung von Datenpaketen und Paketwiederholung (ARQ). Die Verzögerungszeit T_V und die Verzögerungszeitschwankungen ΔT_V sind Funktionen folgender Größen:

$$T_V = f_V(t_0, m, D_T, r_z, T_{\text{par}}, \text{Codierung, ARQ, Zugriff}) \quad (2.105)$$

f_V	Funktion für die durch das Nachrichtenübertragungssystem verursachte (mittlere) Verzögerungszeit von Datenpaketen
t_0	Signallaufzeit

Für Zugriffsverfahren, in denen der Übertragungskanal nicht exklusiv während der gesamten Verbindungsdauer einem Teilnehmer zugeordnet ist (zB. PRMA, ATM), kommt es aufgrund der zeitlich schwankenden Verkehrslast im System außerdem zu einem zugriffsabhängigen

Anteil an den Verzögerungsschwankungen ΔT_V . Dadurch gehen die Parameter m , D_T , r_z , T_{par} ein.

$$\Delta T_V = f_{\Delta V}(\Delta t_0, m, D_T, r_z, T_{\text{par}}, \text{ARQ}, \text{Zugriff}) \quad (2.106)$$

- $f_{\Delta V}$ Funktion für den Mittelwert der durch das Nachrichtenübertragungssystem verursachten Verzögerungsschwankungen von Datenpaketen
- Δt_0 Schwankungen in der Signallaufzeit durch zeitvariante Signalwege aufgrund der Teilnehmermobilität

Die Erläuterung der Parameter in Gleichung (2.105) und (2.106), die hier nicht erklärt sind, ist in Abschnitt 2.3.1.1 zu finden. Für eine ausreichende Qualität sind gewisse Grenzwerte einzuhalten. Diese Grenzwerte sind von der Anwendung abhängig. Sie sind bei den Zugriffsverfahren, die in Kapitel 4 dieser Arbeit untersucht werden, ohne Bedeutung. Bei der Verwendung von Zugriffsverfahren, bei denen die Verzögerungszeiten und ihre Schwankungen von der Verkehrslast abhängig sind (z.B. bei ATM), gehen diese anwendungsabhängigen Grenzwerte neben dem G_{oS} (Gleichung (2.99)) auch in die Dimensionierung ein.

Kapitel 3

Rahmenbedingungen für Mobilfunksysteme

In Mobilfunksystemen werden Funksignale zur Übertragung von Informationen verwendet, die von der Sendeantenne abgestrahlt werden. Die Funksignale werden aufgrund ihrer räumlichen Ausbreitung (Freiraumausbreitung) durch Hindernisse auf der direkten Verbindung zwischen Sender und Empfänger (Abschattung) und durch Mehrwegeempfang gedämpft. Durch den Mehrwegeempfang, der durch Reflexionen am Erdboden oder an Gebäuden verursacht wird, kommt es bei bewegtem Empfänger zu einer zeitliche Variation der Empfangsleistung (Fading). Zur Dimensionierung von Mobilfunksystemen werden diese Einflüsse in einen gemittelten umgebungsabhängigen Dämpfungsverlauf zusammengefasst (siehe 3.1). Zwei weitere wichtige Einflussfaktoren auf die empfangene Signalqualität sind das Auftreten von thermischem Rauschen und die Störung des Signals durch die Gleichkanalinterferenz anderer Teilnehmer. Dadurch ist eine digitale Informationsübertragung mit ausreichender Übertragungsqualität, d.h. bei einer eingehaltenen mittleren Bit- bzw. Paketfehlerwahrscheinlichkeit, nur bis zu der Entfernung von der Basisstation möglich, bei der ein minimal erforderliches Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) nicht unterschritten wird. Diese Entfernung wird in dieser Arbeit durch den Funkzellenradius $r_{z,SINR}$ beschrieben. Bei dieser Entfernung der Mobilstation von der Basisstation wird spätestens die Verbindung an die Basisstation der angrenzenden Funkzelle weitergereicht. Dieser Vorgang wird als *Handover* bezeichnet.

Zur Informationsübertragung wird für die Zeit der Übertragung eine gewisse Frequenzbandbreite belegt. Durch die Eigenschaft der räumlichen Ausbreitung und der Dämpfung der Funksignale aufgrund der Ausbreitung der Funkwellen, wird zusätzlich ein bestimmter Raum “belegt”. Es gibt vier Prinzipien, um Funksignale zu trennen:

1. *FDM*: Frequency Division Multiplex trennt die Signale durch Verwendung unterschiedlicher Frequenzbereiche (Trägerfrequenzen)
2. *TDM*: Time Division Multiplex trennt die Signale durch Verwendung unterschiedlicher Zeitbereiche (Zeitschlitze in einem sich wiederholenden Zeitrahmen)
3. *SDM*: Space Division Multiplex trennt die Signale durch Verwendung unterschiedlicher räumlicher Bereiche (z.B. Bildung von Sendesektoren durch die Verwendung gerichteter Antennen)
4. *CDM*: Code Division Multiplex trennt die Signale durch Verwendung unterschiedlicher Code Sequenzen

In dieser Arbeit werden beispielhaft Systeme mit einer Kombination von FDM und TDM beschrieben. Das bei FDM/TDM aus den drei Komponenten Frequenz, Zeit und Raum „belegte“ Tripel muss sich für eine ungestörte Übertragung in mindestens einem Element von den anderen verwendeten Tripeln unterscheiden. Die Komponente Raum wird durch Verwendung von Funkzellenclustern erreicht. Ein *Funkzellencluster* wird durch eine Menge von benachbarten Basisstationen gebildet, die disjunkte Mengen von Trägerfrequenzen besitzen. Damit ist eine Wiederverwendung der gleichen Frequenzen im nächsten Zellcluster möglich (siehe Bild 3.5). Die detaillierte Beschreibung der betrachteten Multiplexverfahren erfolgt in Abschnitt 3.3.

Die begrenzte Ressource Frequenz ist durch die hohen Lizenzgebühren (8 Milliarden Euro für die UMTS Lizenzen pro Netzbetreiber) eine Größe von zunehmender Bedeutung bei der Optimierung und Dimensionierung von Mobilfunksystemen geworden.

3.1 Signalausbreitung

Die empfangene Signalleistung S_E in dbm (Empfangspegel) ist gleich der Summe der Sendeleistung S_S in dBm (Sendepiegel) und den Antennengewinnen der Sende- und Empfangsantenne G_S und G_E vermindert um die Ausbreitungsdämpfung ($L^{(dB)} > 0$) in dB:

$$S_E^{(dBm)} = S_S^{(dBm)} + G_E^{(dB)} + G_S^{(dB)} - L^{(dB)} \quad (3.1)$$

Bei allen nachfolgenden Ausdrücken, sofern nicht anders angegeben, sind die Dämpfungen mit der Maßeinheit dB einzusetzen.

Die Ausbreitungsdämpfung L besteht aus zwei Anteilen.

$$L = L_0 + L_A \quad (3.2)$$

L_0 berücksichtigt den Anteil der Freiraumausbreitung und L_A die von der Freiraumausbreitung abweichenden Ausbreitungsbedingungen wie Reflexionen und zusätzliche Dämpfungseinflüsse.

Die Dämpfung der Freiraumausbreitung $L_0(d)$ eines Signals mit der Wellenlänge λ bei einer Entfernung d vom Sender ist:

$$L_0(d) = \gamma_0 \cdot \lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad \text{mit } \gamma_0 = 20 \text{ dB.} \quad (3.3)$$

Die Dämpfung des Sendesignals beträgt bei Freiraumausbreitung 20 dB pro Abstandsdekade. Die Empfangsleistung in landmobilen Funksystemen ist aufgrund von Empfängerbewegung und Mehrwegeempfang zeitvariant [24]. Diese zeitliche Änderung wird als Schwund (engl. fading) bezeichnet. Für die Dimensionierung von Mobilfunksystemen werden diese Schwankungen und die Dämpfungen durch Hindernisse im direkten Ausbreitungspfad durch die umgebungsabhängige Ausbreitungsdämpfung $L(d)$ berücksichtigt. Neben dem Abstand d zwischen Sender und Empfänger und der Wellenlänge λ ist die Höhe der Dämpfung von der Größe der Elevation ε abhängig. Sie ist der Winkel zwischen der Horizontalen und der Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger und ist damit vom Abstand zwischen Sender und Empfänger und der Höhendifferenz zwischen den Antennen abhängig.

Der Dämpfungsverlauf kann durch eine Kurve, bestehend aus Geradenstücken mit unterschiedlichen Steigungen γ_j , angenähert werden. Ein Beispiel einer allgemeinen Dämpfungskurve ist in Bild 3.1 dargestellt.

Die Dämpfung lässt sich durch folgende Gleichung für die Bereiche j angeben:

$$L(d) = \left\{ L(d_j) + \gamma_j \lg\left(\frac{d}{d_j}\right) \quad \text{für } d_j \leq d \leq d_{j+1} \wedge \right. \\ \left. 1 \leq j \leq n_{\text{Ab}} \right\} . \quad (3.4)$$

Die Größe $L(d_j)$ ist die Dämpfung des Funksignals in dB an der Stelle d_j . $L(d_j)$ und γ_j werden durch Messungen ermittelt. Der ganzzahlige Wert n_{Ab} gibt die Anzahl der Kennlinienabschnitte an.

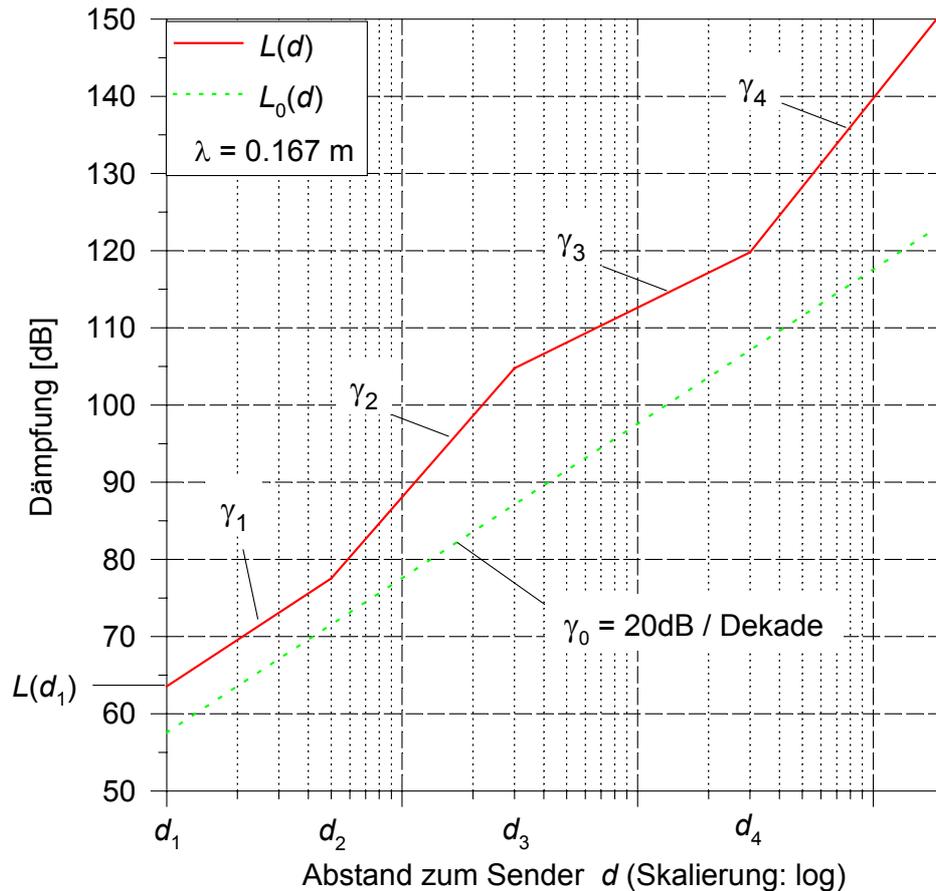


Bild 3.1 Dämpfung der Signalleistung in vier Gebieten mit unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen

Für einen stetigen Verlauf der Dämpfung, wie er in Bild 3.1 dargestellt ist, sind die Dämpfungswerte $L(d_j)$ an den Bereichsgrenzen wie folgt:

$$L(d_j) = \begin{cases} L(d_1) & \text{für } j = 1 \\ L(d_1) + \sum_{i=2}^j \left[\gamma_{i-1} \lg \left(\frac{d_i}{d_{i-1}} \right) \right] & \text{für } 2 \leq j \leq n_{\text{Ab}} \end{cases} \quad (3.5)$$

Eine stetige Kennlinie ist durch die Abstände d_j vom Sender, den Anfangswert der Dämpfung $L(d_1)$ an der Stelle d_1 und die Steigungen γ_j in den einzelnen Bereichen vollständig definiert. Durch Einsetzen von Gleichung (3.5) in Gleichung (3.4) erhält man:

$$L(d) = \left\{ \begin{array}{l} L(d_1) + \gamma_1 \lg\left(\frac{d}{d_1}\right) \quad \text{für } d_1 \leq d \leq d_2 \\ L(d_1) + \sum_{i=2}^j \left[\gamma_{i-1} \lg\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right) \right] + \gamma_j \lg\left(\frac{d}{d_j}\right) \\ \quad \text{für } d_j \leq d \leq d_{j+1} \wedge 2 \leq j \leq n_{\text{Ab}} \end{array} \right\}. \quad (3.6)$$

In Bild 3.2 ist neben den Näherungskurven die Fading-Kurve abhängig von der Höhe Senders über Grund $h_{S,i}$ dargestellt. Die Fading-Kurve erhält man durch Anwenden eines Reflektionsmodells (ray tracing model) in Bild 3.3. Es berücksichtigt neben dem direkten Pfad einen an der Erdoberfläche reflektierten Strahl.

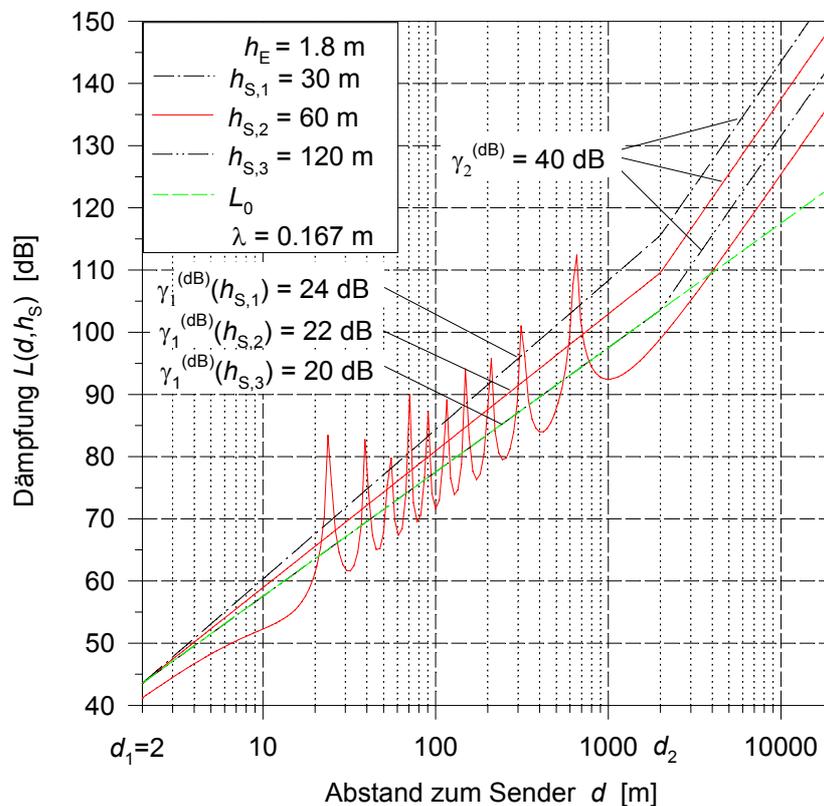


Bild 3.2 Dämpfung des Mobilfunkkanals in Vorstadtgebieten für drei verschiedene Antennenhöhen des Senders über Grund

Bei den im folgenden dargestellten Dämpfungsverläufen beträgt die Höhe der Empfängerantenne $h_E = 1.8$ Meter. Die Höhe der Sendeantenne $h_{S,i}$ beträgt 30, 60 oder 120 Meter.

Die unterste Gerade mit der Steigung 20 dB pro Dekade ist die Dämpfung bei Freiraumausbreitung. Die Näherungskurve mit $\gamma_1=22$ dB verläuft im Bereich bis 2 km ungefähr in der Mitte zwischen den Maxima und Minima der Fading-Kurve. In der Praxis können die Maxima jedoch noch viel höher liegen. Für den Bereich größer 2 km liegt die Näherungsgerade ca. 10 dB über der Fading-Kurve. Dadurch sind zusätzliche Dämpfungseinflüsse, hervorgerufen zum Beispiel durch Bäume, berücksichtigt.

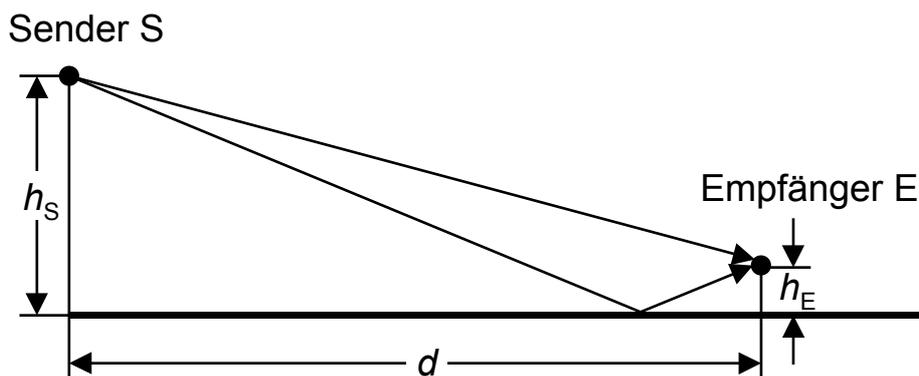


Bild 3.3 2-Strahlen-Modell zur Berechnung der Empfangsleistung bei einem reflektierten Pfad

Damit ist der Dämpfungsverlauf in einem Vorstadtgebiet nach [20] durch drei Bereiche mit unterschiedlichen Dämpfungskonstanten beschrieben.

Bereiche j	Abstand d vom Sender [m]	Höhe h_s der Sendeantenne über Grund [m]	Dämpfung / Abstandsdekade $\gamma_i(h_s)$ [dB]
1	$2 \leq d < 2 \cdot 10^3$	30	24
		60	22
		120	20
2	$d \geq 2 \cdot 10^3$	vernachlässigbar	40

Tabelle 3.1 Dämpfungskonstanten in einem Vorstadtgebiet bei einer Empfängerhöhe von 1.8 m und unterschiedlichen Höhen der Sendeantenne

Die Einteilung der Bereiche erfolgt in Meilen. Bei der folgenden Beschreibung der Kennlinien wurden für eine Meile näherungsweise 2 km (anstatt 1.852 km) angenommen. Im ersten Bereich bis d_1 gleich 2 m wird Freiraumausbreitung angenommen. Daraus folgt der Startwert

$L(d_1) = L_0(d_1)$. Im zweiten Bereich bis zu einer Entfernung von 2 km ist die Dämpfungskonstante von der Elevation und dadurch von der Höhe des Senders h_S über Grund abhängig. Ab einer Entfernung von 2 km ist der Einfluss der Höhe des Senders vernachlässigbar. Die Dämpfung ist in diesem Bereich 40 dB pro Abstandsdekade. In der folgende Tabelle sind die Dämpfungen in den einzelnen Bereichen zusammengefasst. Der Einfluss der Funkumgebung und die Elevationsabhängigkeit der Antennencharakteristik ist in den Ausbreitungskonstanten γ_j berücksichtigt. Nicht berücksichtigt ist die Signalabschattung durch Hindernisse. Die Gleichung für die Dämpfung ist nach Gleichung (3.6)

$$L(d) = \left\{ \begin{array}{ll} L_0(d_1) + \gamma_1 \lg\left(\frac{d}{d_1}\right) & \text{für } d_1 \leq d \leq d_2 \\ L_0(d_1) + \gamma_1 \lg\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \gamma_2 \lg\left(\frac{d}{d_2}\right) & \text{für } d_2 \leq d \end{array} \right. \quad (3.7)$$

3.2 Definition des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses

Das Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) ρ ist der Quotient aus Signalleistung und Störleistung am Empfänger.

$$\rho = \frac{S_E}{N} = \frac{S_E}{N_R + N_I} \quad (3.8)$$

S_E	Nutzsignal-Empfangsleistung
N	Störleistung
N_R	Rauschleistung
N_I	Empfangene Interferenzleistung

Die Störleistung ist die Summe von Rauschleistung N_R und Interferenzleistung N_I , da die beiden Prozesse unkorreliert sind. Die Rauschleistung ist die Rauschleistungsdichte multipliziert mit der Nutzsignalbandbreite. Die Rauschleistungsdichte hängt von den Eigenschaften des Übertragungskanals, der Antenne und der Güte des Empfängers ab. Zusammengefasst werden diese Komponenten in der effektiven Rauschtemperatur des Empfängers T_{eff} . Sie ist für ein System definiert als

$$T_{\text{eff}} = \frac{N_0}{k} \quad (3.9)$$

Die *effektive Rauschtemperatur* ist dabei die Summe der Rauschtemperatur der Antenne und der effektiven Rauschtemperatur des Empfängereingangs. Die Rauschleistung ist

$$N_R = kT_{\text{eff}}B \quad . \quad (3.10)$$

k	Boltzmann-Konstante (= $1.38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K = -228.6 dBWs/K)
T_{eff}	Effektive Rauschtemperatur des Empfängers
B	Bandbreite des Nutzsymbols

Das Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnis (SNR) ist nach Ersetzen der Empfangsleistung durch Gleichung (3.1)

$$\rho_R = \frac{S_E}{kT_{\text{eff}}B} = \frac{S_S G_S G_E}{kT_{\text{eff}}BL} \quad . \quad (3.11)$$

Die Größen S_S , G_S , G_E und L sind in Gleichung (3.11) nicht in dB einzusetzen.

Die Definitionsgleichung für das SINR in Gleichung (3.8) lässt sich durch Kehrwertbildung und Multiplikation von Zähler und Nenner mit dem Faktor $1/S_E$ wie folgt schreiben. Dabei ist zu beachten, dass die Werte für das SNR und SIR nicht in logarithmierter Form (mit der Einheit dB) eingesetzt werden dürfen, sondern als dimensionslose Faktoren.

$$\rho^{-1} = \frac{N_R}{S_E} + \frac{N_I}{S_E} = \rho_R^{-1} + \rho_I^{-1} \quad (3.12)$$

Die obige Gleichung in den Einheiten dB lautet:

$$\rho^{(\text{dB})} = -10\text{dB} \cdot \lg \left(10^{-[\rho_R^{(\text{dB})}/10]} + 10^{-[\rho_I^{(\text{dB})}/10]} \right) \quad . \quad (3.13)$$

Gleichung (3.13) wird zur Erklärung der Kurvenschar für das SINR in Abhängigkeit vom Funkzellenradius r_z in Bild 3.12 benötigt.

Ein ausreichendes SINR ρ_{min} ist von entscheidender Bedeutung für die Übertragungsgüte einer Verbindung und deshalb eine wichtige Größe bei der Dimensionierung der Funkzellengröße r_z eines Mobilfunksystems (Kapitel 5).

3.3 Nutzung der Ressourcen Frequenz, Zeit und Raum

Für die Zukunft ist eine starke Zunahme der Anzahl von Mobilfunkteilnehmer mit einem Bedarf an höheren Datenraten zu erwarten. Die höheren Datenraten sind für neue Dienste wie Videotelefonie, Internet-Zugang, Filetransfer erforderlich. Dadurch wird die effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite bei der Auslegung von Mobilfunknetzen zunehmend wichtiger.

In der vorliegenden Arbeit wird bei der Dimensionierung und den Leistungsuntersuchungen von Mobilfunknetzen eine Kombination von Frequenz-, Zeit-, und Raummultiplex zugrunde gelegt. Die Abkürzung lautet FDM/TDM/SDM. Diese Multiplexverfahren lassen sich wie folgt genauer charakterisieren:

Frequenzmultiplex (FDM – Frequency Division Multiplex)

Die Signale werden unterschiedlichen Trägerfrequenzen aufmoduliert und können durch Bandpassfilterung am Empfänger wieder voneinander getrennt werden.

Zeitmultiplex (TDM - Time Division Multiplex)

Die Zeit wird in Zeitrahmen aufgeteilt. Diese sind ihrerseits wieder in Zeitschlitze unterteilt. In diesen Zeitschlitzen übertragen die Teilnehmer ihre Datenpakete auf der gleichen Trägerfrequenz. Der Empfänger des Datenpaketes ist auf die Rahmenstruktur synchronisiert und empfängt in einem Rahmen während des ihm zugewiesenen Zeitschlitzes sein Datenpaket. Durch die bekannte Zuordnung zwischen Zeitschlitz und Sender ist keine zusätzliche Adressinformation im Datenpaket notwendig.

Raummultiplex (SDM - Space Division Multiplex)

Durch die Eigenschaft der Ausbreitungsdämpfung von elektromagnetischen Wellen nimmt die mögliche Empfangsleistung mit dem Abstand vom Sender ab. Diese Tatsache ermöglicht die Wiederverwendung einer Trägerfrequenz in Abständen D . Die Größe des Abstandes D hängt von dem minimal erforderlichen Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis (SIR) ab (Abschnitt 3.3.2). In der Literatur wird unter Raummultiplex die Aufteilung des Raumes in Raumwinkel durch gerichtete Antennen (phased array) verstanden. Durch diese weitere Aufteilung der üblichen Zellenstruktur in Sektoren ist ein zusätzlicher Gewinn an Verkehrskapazität bei gleichem Bandbreitenbedarf möglich [8]. Die Bezeichnung für das zugehörige

Zugriffverfahren ist SDMA (Space Division Multiple Access). Um den Umfang dieser Arbeit nicht zu sprengen, werden die Auswirkungen dieses Zugriffsverfahrens auf die optimale Dimensionierung nicht untersucht.

Bild 3.4 zeigt die Kombination der Ressourcen Frequenz, Zeit und Raum. Ein Quader symbolisiert ein Signal das im Zeitschlitz j im Frequenzband ν der Frequenzgruppe u gesendet wird. Die vertikale Ausdehnung gibt die Reichweite (Größe einer Funkzelle) wieder.

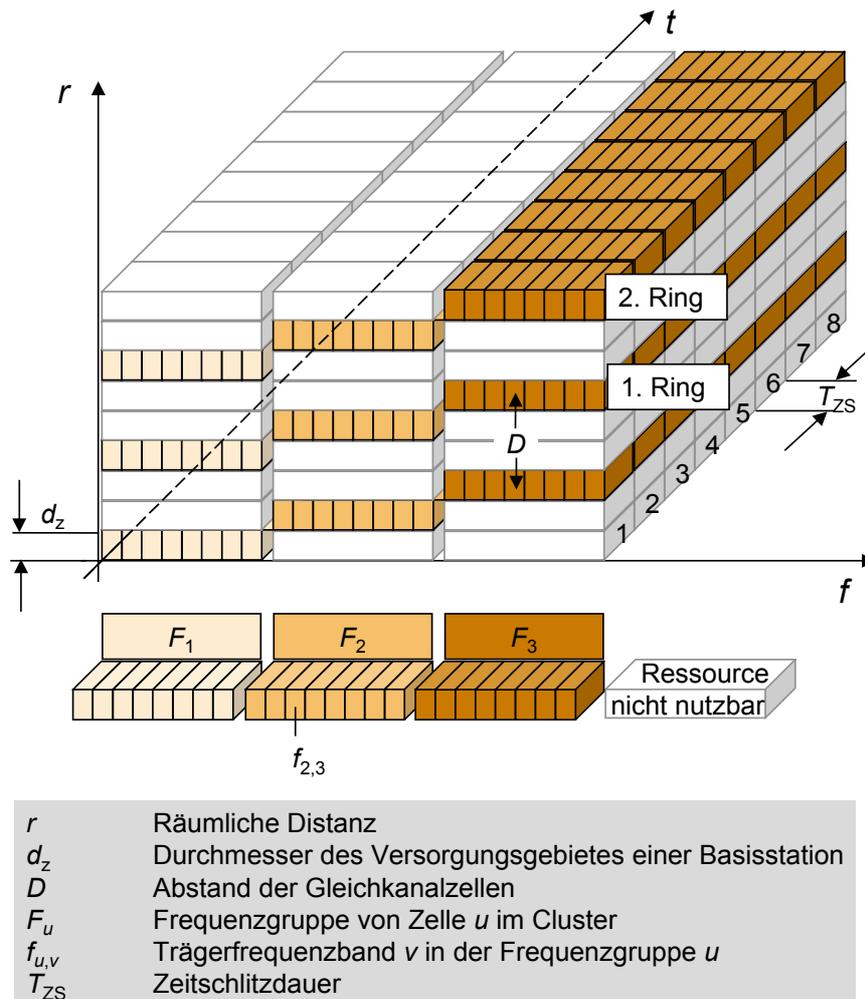


Bild 3.4: Kombination von Frequenz-, Zeit- und Raummultiplex; Frequenzwiederverwendung durch Clusterbildung

Es kann im gleichen Zeitschlitz gesendet werden, wenn unterschiedliche Trägerfrequenzen verwendet werden. Im gleichen Zeitschlitz und auf derselben Trägerfrequenz kann gesendet werden, wenn ein ausreichend großer Abstand D zum störenden Sender garantiert ist. Dieser Fall ist durch zwei vertikal übereinander angeordnete gleichfarbige Quader mit dem Abstand D dargestellt. Der Empfänger belegt das gleiche Tripel aus Frequenz, Zeitschlitz und Raum

wie der Sender. Die größtmögliche Interferenz ergibt sich (worst case), wenn jeweils ein störender Sender in der benachbarten Gleichkanalzelle und in jeder der weiter entfernten Gleichkanalzellen sendet. Zu einer betrachteten Zelle werden die Zellen als Gleichkanalzellen bezeichnet, in denen im gleichen Zeitschlitz auf der gleichen Frequenz gesendet werden kann. Der Abstand D muss mindestens so groß sein, dass durch die Ausbreitungsdämpfung der Interferenzsignale ein ausreichendes SIR beim Empfänger gegeben ist.

In dem dazwischen liegenden Gebiet müssen andere Trägerfrequenzen verwendet werden (siehe Bild 3.7). Die feste Zuordnung der Frequenzen zu den Basistationen (Zellen) wird als Fixed Channel Assignment (FCA) bezeichnet. Dagegen ist bei den Verfahren, die zur Klasse des Dynamic Channel Assignments (DCA) gehören, die Zuordnung dynamisch und kann sich an die zeitlichen Änderungen der Teilnehmerdichten anpassen. Es wird bei Systemen eingesetzt, die aufgrund der Interferenzsituation (zB. in Gebäuden) keine Frequenzplanung erlauben. Ein standardisiertes, weit verbreitetes System ist DECT (Digital Enhanced Cordless Communications) [5]. Die Untersuchung solcher Systeme erfolgt mit Hilfe von Simulationen [1], da die Vielzahl der möglichen Zustände nicht mehr analytisch erfasst und analysiert werden kann. Hinzu kommen die Einflüsse des Protokolls, die analytisch nicht modellierbar sind. Da sich die vorliegende Arbeit auf analytische Berechnungsverfahren beschränkt, werden dynamische Kanalzugriffsverfahren, die nur bei ungleicher räumlicher Verteilung der Benutzer größere Verkehrskapazitäten erlauben, nicht behandelt.

3.3.1 Frequenz-, Zeit- und Raummultiplex

Unter Raummultiplex wird im Rahmen dieser Arbeit die Wiederverwendung einer Frequenz in einem bestimmten Abstand verstanden. Bei fester Kanalzuweisung werden im Rahmen der Frequenzplanung Zellcluster gebildet. Bild 3.5 zeigt eine Zellenstruktur mit Clustern, bestehend aus $N_C = 3$ Zellen. Als Cluster wird eine Gruppe von benachbarten Zellen bezeichnet, deren Trägerfrequenzmengen disjunkt sind. Für alle Kombinationen von Trägerfrequenzmengen F_i und F_j beliebiger Zellen i und j eines Cluster gilt

$$F_i \cap F_j = \emptyset \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, N_C\} \wedge i \neq j \quad . \quad (3.14)$$

In einer Zelle u sind die verwendeten Trägerfrequenzen $f_{u,v}$ ($v \in \{1, 2, \dots, n_{f,u}\}$) während des Betriebs des Mobilfunknetzes fest. Nur diese Trägerfrequenzen können von der Basisstation und den mit ihr verbundenen Teilnehmern in dieser Zelle benutzt werden. Wenn für jede

Basisstation $n_{\text{Tr,BS}}$ Frequenzen mit der Bandbreite B_{Tr} vorgesehen sind, ist für das Mobilfunksystem die benötigte Gesamtbandbreite

$$B_{\text{ges}} = \frac{1}{r_{f,\text{Tr}}} N_{\text{C}} \cdot n_{\text{Tr,BS}} \cdot B_{\text{Tr}} \quad (3.15)$$

erforderlich. N_{C} ist die Anzahl der Zellen (Basisstationen), die ein Cluster bilden (in Bild 3.5 ist $N_{\text{C}} = 3$). Der Faktor $r_{f,\text{Tr}}$ gibt das Verhältnis zwischen nutzbarer Bandbreite und der Gesamtbandbreite (Summe der Trägerbandbreiten + Schutzbänder) an.

Bei zusätzlichem Einsatz eines Zeitmultiplexverfahrens mit n_{ZS} Zeitschlitzen pro Zeitrahmen ergibt sich eine Gesamtzahl von verfügbaren Kanälen pro Basisstation von

$$m_{\text{BS}} = n_{\text{Tr,BS}} \cdot n_{\text{ZS}} \quad (3.16)$$

Dabei sind die Multiplexverfahren zusätzlich durch die Lage der Kanäle für die beiden Übertragungsrichtungen einer Vollduplex-Verbindung charakterisiert. Es wird zwischen FDD (Frequency Division Duplex) und TDD (Time Division Duplex) unterschieden.

3.3.1.1 Frequency Division Duplex (FDD)

Bild 3.5 zeigt die Realisierung von Duplex-Verbindungen mit FDD (Frequency Division Duplex). Bei FDD werden für die Übertragungsrichtungen Basisstation \rightarrow Mobilstation (BS \rightarrow MS: downlink) und Mobilstation \rightarrow Basisstation (MS \rightarrow BS: uplink) Trägerfrequenzen in unterschiedlichen Frequenzbereichen verwendet. Der Abstand der Trägerfrequenzen für uplink und downlink ist konstant Δf_{FDD} . Zudem sind die Zeiten für den Beginn der Zeitrahmen auf den Trägerfrequenzen für den uplink und downlink um $\Delta T_{\text{FDD}} (\approx T_{\text{R}}/2)$ zeitversetzt, um bei Vollduplex-Verbindungen einen möglichst großen Abstand zwischen Empfangs- und Sendezeitschlitz zu haben (gleichgemusterte Zeitschlitze in Bild 3.5). Dadurch ist ausreichend Zeit zum Umschalten zwischen den beiden Betriebsarten Senden und Empfangen gegeben.

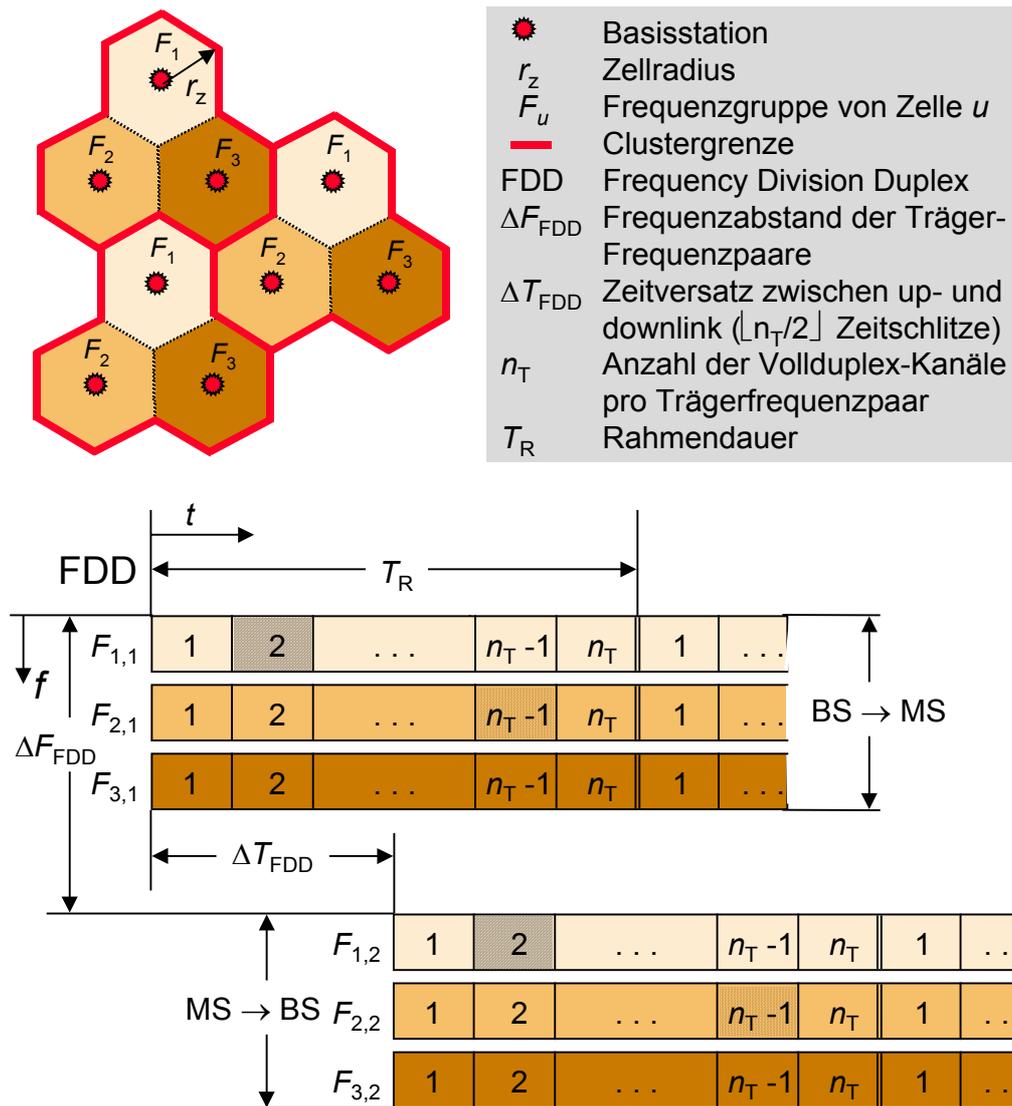


Bild 3.5: Frequenz/Zeit/Raum-Multiplexstruktur mit FDD (Frequency Division Duplex)

Die Zuordnung von uplink und downlink mit FDD wird in den europäischen Mobilfunksystemen GSM 900 und DCS 1800 verwendet [15].

3.3.1.2 Time-Division-Duplex (TDD)

Bei *Time Division Duplex* sind uplink und downlink einer Duplex-Verbindung ebenfalls um eine halbe Dauer eines Zeitrahmens versetzt, liegen aber im Gegensatz zum oben beschriebenen FDD auf der gleichen Trägerfrequenz. In Bild 3.6 sind die zu einer Duplex-Verbindung gehörenden Zeitschlitze mit dem gleichen Muster gefüllt.

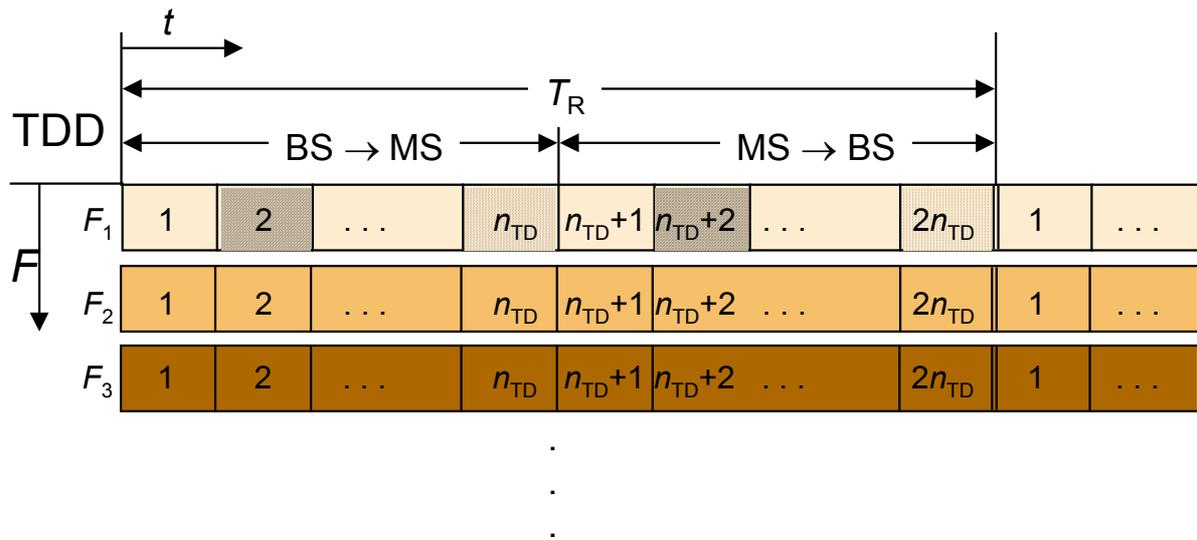


Bild 3.6: Frequenz/Zeit/Raum-Multiplexstruktur mit TDD (Time Division Duplex)

Diese feste zeitliche Zuordnung der zusammengehörenden Kanäle von uplink und downlink einer Duplex-Verbindung hat Vorteile bei der Kanalbelegung. Es ist dadurch gewährleistet, dass nach dem Finden eines freien Kommunikationskanals der zugehörige Duplexkanal auch frei ist. Ist diese feste zeitliche Zuordnung nicht gegeben, muss der zugehörige Kanal für die Informationsübertragung in der Gegenrichtung zuerst noch gesucht werden.

Die Höhe der Gleichkanalinterferenzen hervorgerufen durch die Frequenzwiederverwendung (Bild 3.5) ist vom Abstand der Gleichkanalzellen abhängig. Der auf den Zellradius r_z normierte Abstand wird durch die Clustergröße N_C bestimmt. Eine untere Schranke (worst case) für das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis (SIR) ρ_I wird im folgenden Abschnitt hergeleitet.

3.3.2 Gleichkanalinterferenz bei Frequenzwiederverwendung durch die Bildung von Zellclustern

Ein Cluster enthält alle Funkzellen mit N_C unterschiedlichen Trägerfrequenzgruppen F_u (im obigen Bild mit F_1 bis F_3 bezeichnet). Durch die Anzahl der verwendeten Frequenzgruppen N_C ist der Typ des Clusters festgelegt. Ein Cluster vom Typ N_C enthält N_C Zellen mit jeweils einer Basisstation im Zentrum. Eine Basisstation u verwendet dazu bestimmte Trägerfrequenzen $f_{u,v} \in F_u$. Eine zweidimensionale, periodische Wiederholung der Cluster ist nur für bestimmte Werte von N_C möglich. Die Anzahl N_C ist definiert durch die ganzzahligen Größen I und J nach der folgenden Beziehung

$$N_C = I^2 + I \cdot J + J^2 \quad \text{für } I \geq J \quad \wedge \quad I, J \in \{\mathbf{N}_0\} \quad (3.17)$$

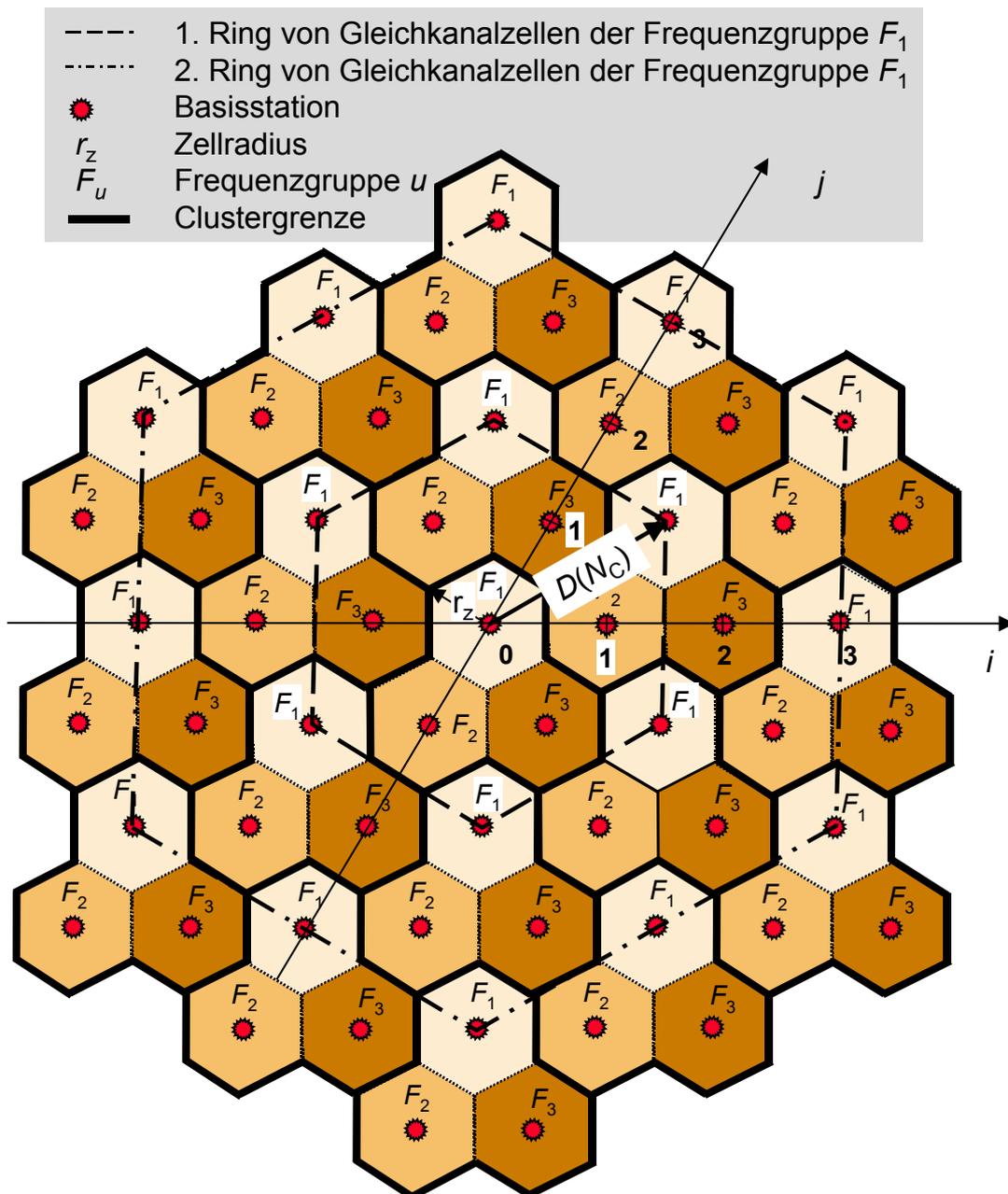


Bild 3.7: Frequenzwiederholung bei Verwendung eines Dreier-Clusters ($I=J=1$, $N_C=3$)

Die ganzzahligen Werte I und J sind die Differenzen der ganzzahligen Koordinaten zweier benachbarter Gleichkanalzellen in Richtung i und j . Die Trägerfrequenzgruppe F_u in der Zelle u mit den dimensionslosen ganzzahligen Koordinaten (i, j) wiederholt sich somit in der Zelle mit den Koordinaten $(i+Ij+J)$. I und J definieren die Frequenzwiederholperiode innerhalb des

Funkgebietes. In Bild 3.7 ist die Clustergröße mit der kleinsten Frequenzwiederholperiode $I=1$ und $J=1$ dargestellt.

Für I und J gleich eins erhält man $N_C=3$. Es ist die kleinste Clustergröße (= kleinster realisierbarer Wert für N_C), der eine Frequenzwiederverwendung erlaubt. Bild 3.7 zeigt ein Gebiet, das mit Dreier-Clustern bedeckt ist. Die Cluster Grenzen sind durch dicke Linien gekennzeichnet. Das Cluster besteht in diesem Beispiel aus drei Funkzellen mit den Zellradien r_z . Die Zellradien sind so zu wählen, dass das minimale Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) ρ_{\min} für die Teilnehmer an den Zellgrenzen auch bei maximaler Teilnehmeraktivität ausreichend groß ist (Abschnitt 5.2.2.4).

Der Abstand D zwischen zwei benachbarten Gleichkanalzellen ist

$$D(r_z, N_C) = \sqrt{\left([I + J/2] \cdot r_z \cdot \sqrt{3}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} J \cdot r_z\right)^2} = \sqrt{3N_C} \cdot r_z \quad . \quad (3.18)$$

Durch die starke Ausbreitungsdämpfung mit mindestens (20 dB/Dekade) kann der Beitrag der weiter entfernten Gleichkanalzellen (2. Ring in Bild 3.7) vernachlässigt werden. Dies zeigt die im folgenden vorgenommene konservative Abschätzung der Interferenzleistung.

3.3.2.1 Interferenzsituation an der Basisstation (uplink)

Die Interferenzsituation einer empfangenden Basisstation mit maximaler Interferenzleistung (worst case) ist in Bild 3.8 dargestellt. Unabhängig von der Clustergröße N_C sind in den nächst liegenden Gleichkanalzellen maximal sechs Störer möglich (die Beiträge weiter entfernter Störer werden vernachlässigt). Das minimale Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis (SIR) $\rho_{1,\min}$ erhält man für den Fall, dass sich die betrachtete Mobilstation am Rand seiner Funkzelle befindet und somit der Abstand zur Berechnung der empfangenen Signalleistung S_E gleich r_z ist. Für die Abstände der Gleichkanalstörer zur betrachteten Basisstation gilt für alle Clustergrößen N_C die Abschätzung

$$d_{MS,i}(N_C) \geq D(N_C) - r_z \quad i = 1 \dots 6 \quad . \quad (3.19)$$

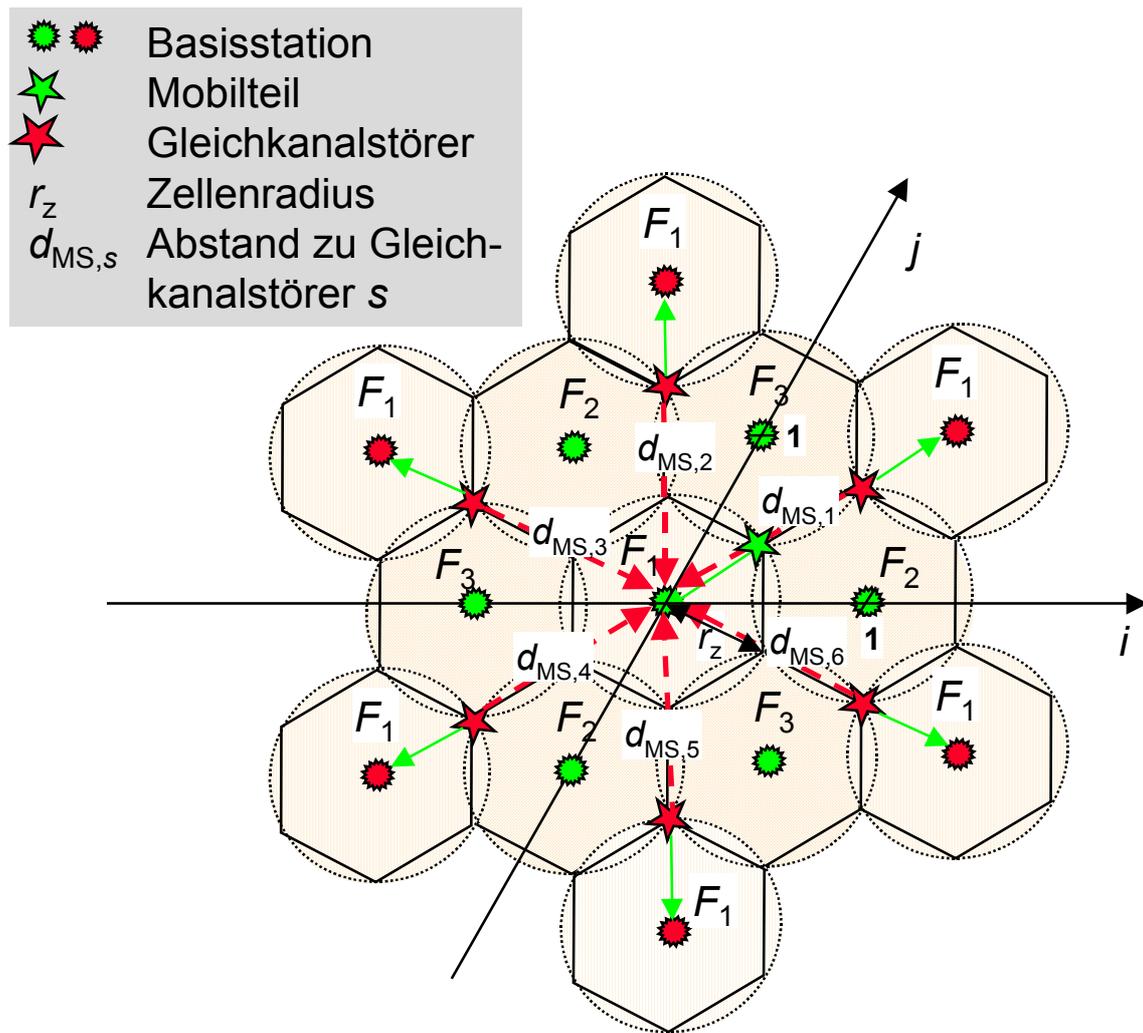


Bild 3.8 Interferenzsituation einer Basisstation (uplink) in einem Dreier-Cluster, in der die maximal mögliche Interferenzleistung empfangen wird (worst case)

3.3.2.2 Interferenzsituation an der Mobilstation (downlink)

Die Interferenzsituation, bei der das minimale SIR bei der Mobilstation auftritt, ist im folgenden Bild dargestellt.

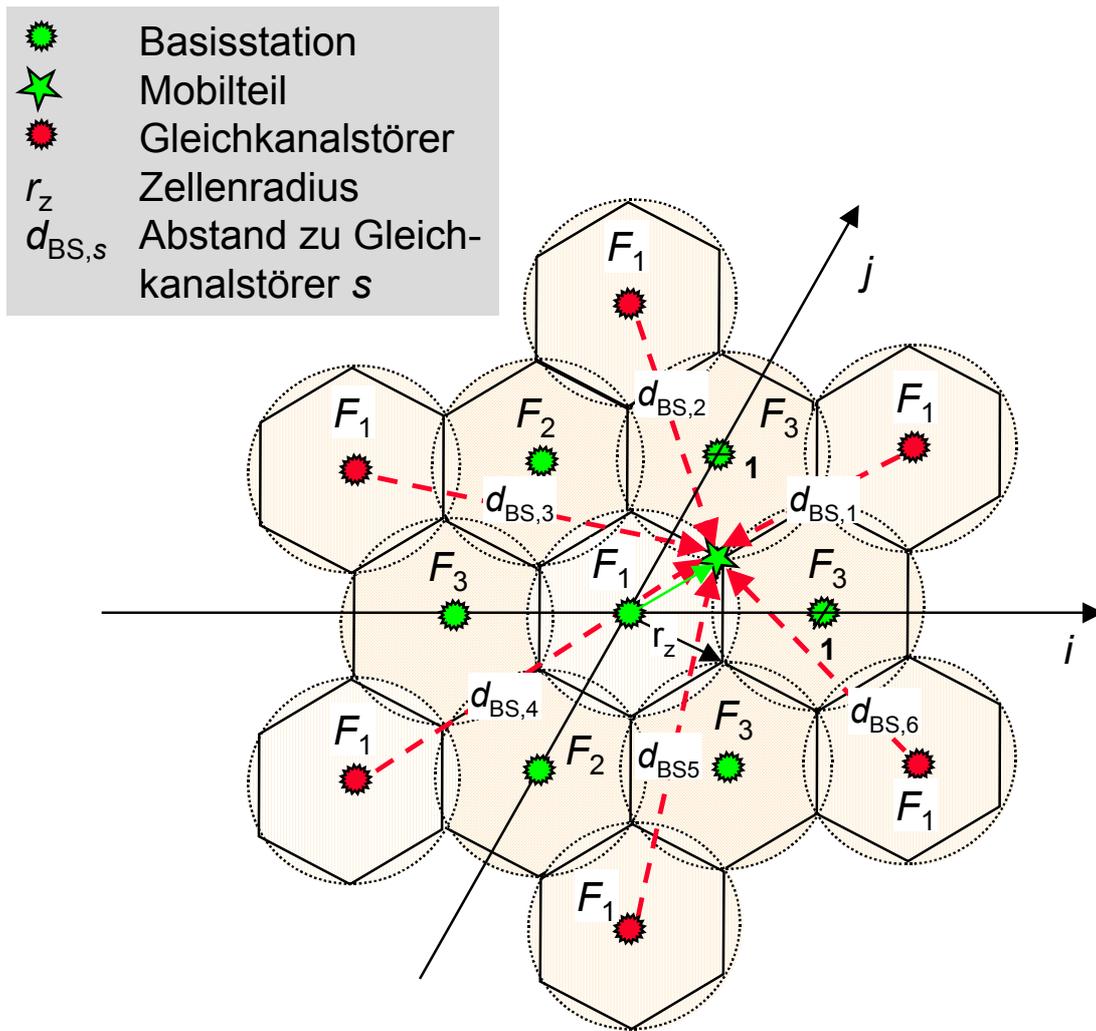


Bild 3.9 Interferenzsituation einer Mobilstation (downlink) in einem Dreier-Cluster, in der die maximal mögliche Interferenzleistung empfangen wird (worst case).

Für die Interferenzsituation bei den Mobilstationen (Bild 3.9) gelten für alle Clustergrößen N_C folgende Abschätzungen für die Abstände zu den störenden Basisstationen (Gleichkanalstörern)

$$\begin{aligned}
 d_{BS,i}(N_C) &\geq D(N_C) - r_z & i = 1,2,6 \\
 d_{BS,i}(N_C) &\geq D(N_C) & i = 3,4,5
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Aus dem Vergleich der Gleichungen (3.19) und (3.20) ist ersichtlich, dass aufgrund kleinerer Abstände der Störer die maximale Interferenzleistung (worst case) an der Basisstation größer ist als an der Mobilstation.

3.3.2.3 Minimales Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis (SIR) einer Duplex-Verbindung

Für eine ausreichende Übertragungsqualität einer Duplex-Verbindung ist für beide Übertragungsrichtungen (up- und downlink) ein minimales SIR $\rho_{I,\min}$ notwendig. Aus dem Vergleich der Längen in den Gleichungen (3.19) und (3.20) ist zu ersehen, dass die maximale Interferenzleistung bei der Basisstation größer ist als bei der Mobilstation. Aus diesem Grund wird im weiteren das Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) bei der Basisstation (uplink) für die Qualität der Duplex-Verbindung herangezogen. Das so ermittelte SINR ist eine untere Schranke für die in der Praxis auftretenden Werte. Es kann durch eine mögliche Leistungsregelung für die einzelnen Verbindungen noch verbessert werden.

Die stochastischen Interferenzsignalprozesse der Störer können als unkorreliert angenommen werden. Dadurch ist die Gesamtinterferenzleistung die Summe der Einzelleistungen. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich ein SIR von

$$\rho_I = S_E - 10 \lg \left(\sum_{s=1}^6 \left[\frac{N_{I,s}}{\text{mW}} \right] \right) \quad [\text{dB}]. \quad (3.21)$$

Das SIR ist die Differenz aus der an der Basisstation empfangenen Nutzsignalleistung S_E und der Summe der Interferenzleistungen in dB.

Bei Annahme gleicher Sendeleistung, gleichen Antennengewinnen und Ausbreitungsbedingungen für alle Teilnehmer und Basisstationen ergibt sich nach Einsetzen von Gleichung (3.1) und (3.2) in Gleichung (3.21)

$$\rho_I(d_S, d_I) = L(d_I) - L(d_S) - Z_I \quad \text{mit} \quad Z_I = 10 \text{dB} \cdot \lg(6) . \quad (3.22)$$

Unter den obigen Voraussetzungen ist das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis ρ_I nur noch von den Ausbreitungsbedingungen des Nutzsignals und der Störsignale abhängig. Durch den Summand Z_I wird berücksichtigt, dass im ungünstigsten Fall sechs Störer aktiv sein können (siehe Bild 3.8).

Berechnet wird im folgenden das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis (SIR) für einen Dämpfungsverlauf nach Bild 3.1. Dieser ist vom Abstand d der Mobilstation zur betrachteten Basisstation abhängig. Für den allgemeinen Fall, dass der Sender des Nutzsignals sich im Ab-

stand d_S im Bereich j und die Störer im Abstand d_I im Bereich k befinden, ist das SIR am Empfänger

$$\rho_I(d_S, d_I) = L(d_k) + \gamma_k \lg\left(\frac{d_I}{d_k}\right) - L(d_j) - \gamma_j \lg\left(\frac{d_S}{d_j}\right) - Z_I \quad (3.23)$$

für $d_j \leq d_S \leq d_{j+1} \wedge d_k \leq d_I \leq d_{k+1}$

Gleichung (3.23) eignet sich auch zur Berechnung, wenn die Dämpfungsfunktion an den Stellen d_i nicht stetig ist. Für stetige Dämpfungsfunktionen ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung (3.6) in Gleichung (3.22) eine Funktion, die nur von den Dämpfungskonstanten der zwischen Nutzsendersender und Störer liegenden Bereiche abhängig ist. Das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis ist

$$\rho_I(d_S, d_I) = \left\{ \begin{array}{ll} \gamma_j \lg\left(\frac{d_I}{d_S}\right) - Z_I & \text{für } k = j \\ \sum_{i=j+1}^k \left[\gamma_{i-1} \lg\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right) \right] + \gamma_k \lg\left(\frac{d_I}{d_k}\right) - \gamma_j \lg\left(\frac{d_S}{d_j}\right) - Z_I & \text{für } k > j \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

für $d_j \leq d_S \leq d_{j+1} \wedge d_k \leq d_I \leq d_{k+1}$

Der minimale Abstand der Störer d_I wird nach Gleichung (3.19)

$$d_I = (\sqrt{3N_C} - 1) \cdot r_z \quad (3.25)$$

abgeschätzt. Dabei wurde $D(N_C)$ nach Gleichung (3.18) eingesetzt. Für das minimale SIR einer Duplex-Verbindung erhält man nach Einsetzen des Zusammenhangs für d_I in Gleichung (3.23)

$$\rho_I(r_z, N_C) = L(d_k) + \gamma_k \lg\left(\frac{[\sqrt{3N_C} - 1] \cdot r_z}{d_k}\right) - L(d_j) - \gamma_j \lg\left(\frac{r_z}{d_j}\right) - Z_I \quad (3.26)$$

für $d_j \leq d_S = r_z \leq d_{j+1} \wedge d_k \leq d_I = [\sqrt{3N_C} - 1] \cdot r_z \leq d_{k+1}$

Für den Fall, dass der Nutzsendersender und die Gleichkanalstörer im gleichen Bereich j liegen ($k = j$), vereinfacht sich obige Gleichung zu

$$\rho_I(r_z, N_C) = \gamma_j \lg(\sqrt{3N_C} - 1) - Z_I \quad (3.27)$$

für $d_j \leq d_S = r_z \leq d_{j+1} \wedge d_j \leq d_I = \lfloor \sqrt{3N_C} - 1 \rfloor \cdot r_z \leq d_{j+1}$

Aus Gleichung (3.27) ist ersichtlich, dass das SIR unabhängig vom Zellradius r_z ist, wenn der betrachtete Nutzsendersender und die Gleichkanalstörer im gleichen Abstandsbereich j auf der Dämpfungskennlinie liegen.

Der erste Schritt zur Berechnung von $\rho_I(r_z, N_C)$ nach Gleichung (3.26) ist die Bestimmung des Abstandsbereichs j , in dem der Sender mit dem Abstand r_z liegt und des Abstandsbereichs k in der Dämpfungskennlinie, in dem die Gleichkanalstörer mit der Entfernung $d_I = (\sqrt{3N_C} - 1) \cdot r_z$ liegen. In Bild 3.10 ist eine Dämpfungskennlinie des Vorstadtbereichs mit dem ersten Bereich von $d_1=2$ m bis $d_2=2$ km und einem zweiten Bereich ab d_2 dargestellt..

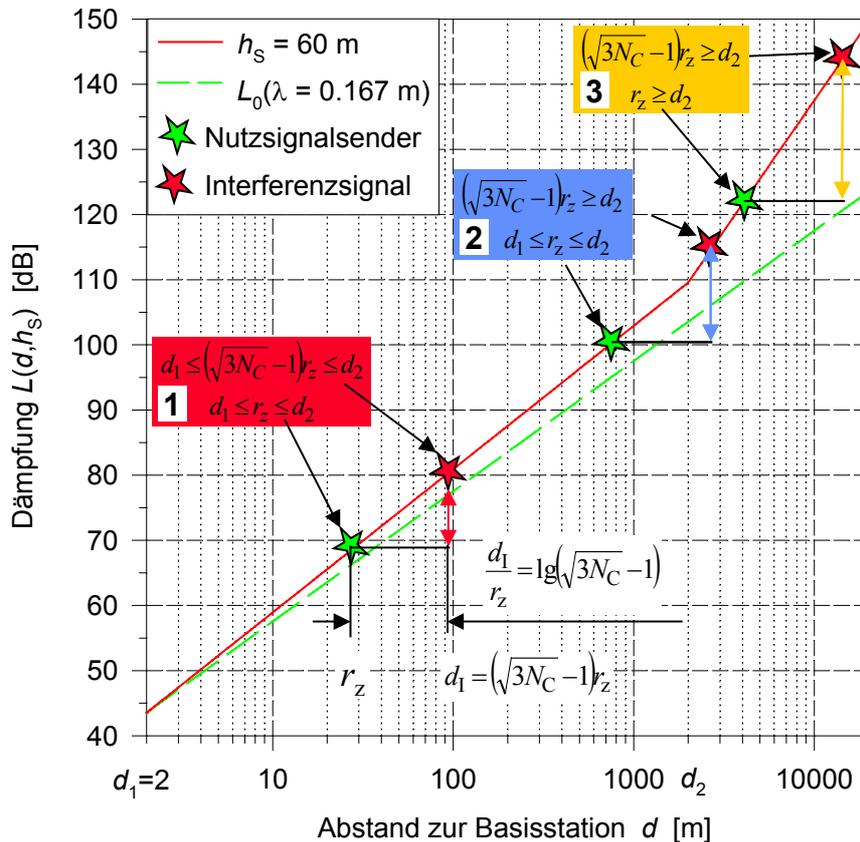


Bild 3.10 Drei unterschiedliche Konstellationen in Bezug auf die Lage des Nutzsendersenders und der Gleichkanalstörer auf der Dämpfungskennlinie für $N_C=7$

Für das SIR in Abhängigkeit vom Funkzellenradius r_z und der Clustergröße N_C erhält man dann drei unterschiedliche Kennlinienbereiche.

Die unterschiedlichen Bereiche der Kennlinie ergeben sich aus dem Dämpfungsbereich in dem der Nutzsendersender liegt und dem Bereich, in dem der Störer liegt. In Bild 3.10 sind die drei möglichen Fälle dargestellt.

Für Zellradien $r_z \leq d_2 / (\sqrt{3N_C} - 1)$ liegen der Nutzsendersender und der Gleichkanalstörer im ersten Kennlinienbereich. Für $d_2 / (\sqrt{3N_C} - 1) \leq r_z \leq d_2$ liegt der Nutzsendersender im Bereich eins und der Gleichkanalstörer im Bereich zwei. Für Zellradien r_z größer d_2 liegen beide im Bereich zwei. Durch Einsetzen von r_z für den Abstand des Nutzsendersenders d_S und $d_1 = (\sqrt{3N_C} - 1) \cdot r_z$ für den Abstand des Gleichkanalstörers in Gleichung (3.24) erhält man die Beziehung für das SIR eines zellularen Mobilfunksystems in einem Vorstadtgebiet.

$$\rho_1(N_C, r_z, h_S) = \left\{ \begin{array}{ll} \gamma_1(h_S) \cdot \lg(\sqrt{3 \cdot N_C} - 1) & \text{für } d_1 < r_z \leq \frac{d_1}{\sqrt{3 \cdot N_C} - 1} \\ \gamma_2 \cdot \lg(\sqrt{3 \cdot N_C} - 1) + [\gamma_2 - \gamma_1(h_S)] \cdot \lg\left(\frac{r_z}{d_2}\right) - Z_1 & \text{für } \frac{d_1}{\sqrt{3 \cdot N_C} - 1} \leq r_z \leq d_2 \\ \gamma_2 \cdot \lg(\sqrt{3 \cdot N_C} - 1) - Z_1 & \text{für } r_z \geq d_1 \end{array} \right. \quad (3.28)$$

- r_z Radius der Funkzelle,
- N_C Clustergröße
- d Abstand von der empfangenden Basisstation (von der Zellmitte),
- d_1 Beginn der Kennlinie für einen Abstand von > 2 Meter von der Basisstation,
- d_2 Beginn von Kennlinienbereich 2 (Abstand > 2 km),
- h_S Höhe der Basisstationsantenne über Grund,
- $\gamma_1(h_S)$ Dämpfungskonstanten für den Bereich 1 in dB
- γ_2 Dämpfungskonstanten für den Bereich 2 in dB (siehe Tabelle 3.1),
- $Z_1 = 10 \text{ dB} \cdot \lg(6)$ berücksichtigt die maximale Anzahl von sechs Gleichkanalstörern.

Für Zellradien r_z kleiner $d_2 / (\sqrt{3N_C} - 1)$ und größer d_2 ist das SIR unabhängig vom Radius der Funkzelle. Sie ist nur von der Clustergröße N_C und der Ausbreitungskonstanten γ_i in diesem Bereich abhängig. Bei logarithmischer Abszisse steigt das SIR im dazwischen liegenden

Bereich linear mit dem Funkzellenradius r_z an. Die Steigung ist gleich der Differenz der Dämpfungskonstanten von Bereich 1 und 2.

Für den Dämpfungsverlauf in einem Vorstadtgebiet in Bild 3.10 ist im ersten Bereich bis 2 km ein Dämpfungsanstieg von $\gamma_1(h_{S,2}) = 22$ dB pro Abstandsdekade (Antennenhöhe der Basisstation $h_{S,2} = 60$ m) und im Bereich ab 2 km $\gamma_2 = 40$ dB pro Abstandsdekade angenommen [20]. Für diesen Dämpfungsverlauf verhält sich das SIR $\rho_1(r_z, N_C)$ wie in Bild 3.11 dargestellt.

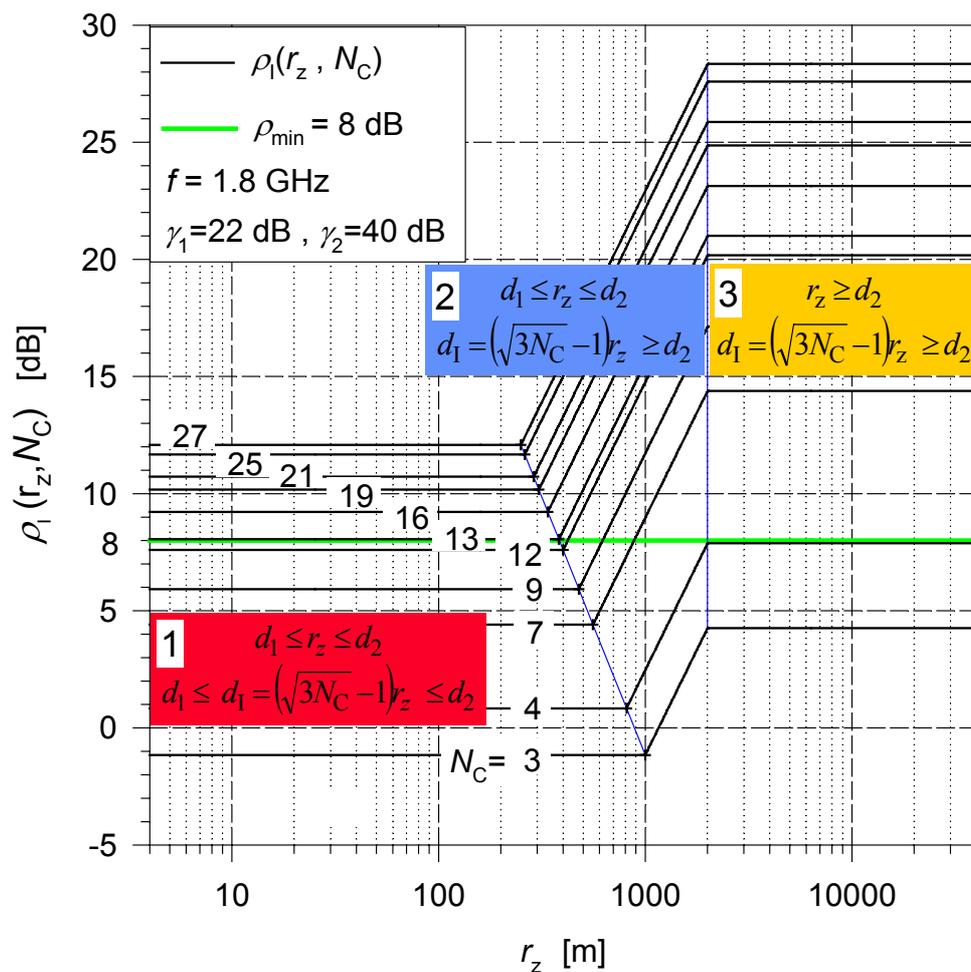


Bild 3.11 SIR in Abhängigkeit von der gewählten Clustergröße N_C und dem Zellradius r_z in einem Vorstadtgebiet

Die Nummerierung der Kennlinienbereiche bezieht sich auf die drei unterschiedlichen Konstellationen der Positionen von Nutzsendersender und Störsender in Bezug auf die Dämpfungskennlinienbereiche, wie sie in Bild 3.10 eingezeichnet sind.

Mit zunehmender Anzahl der Zellen N_C pro Cluster steigt das SIR aufgrund der abnehmenden Interferenzleistung an.

Die geeigneten Clustergrößen werden durch das geforderte $\rho_{l,\min}$ bestimmt. Im obigem Bild ist ein $\rho_{l,\min}$ von 8 dB eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass für Kleinzellensysteme (Radien kleiner ca. 500 m), aufgrund der geringeren Ausbreitungsdämpfung $\gamma(h_s)$ im Bereich unter zwei Kilometer, Cluster mit großer Zellenanzahl ($N_C \geq 9$) verwendet werden müssen. Bei der Verwendung von Zellradien größer als ca. ein Kilometer reicht dagegen ein Cluster mit sieben Zellen aus. Diese Ergebnisse sind untere Schranken für das auftretende SIR, wie sie im ungünstigsten Fall bei dem angenommenen Dämpfungsverlauf auftreten. Durch eine Leistungsregelung der Sendeleistungen für die einzelnen Übertragungskanäle bei den Mobilfunkteilnehmern und Basisstationen lassen sich diese Werte in der Regel verbessern. Das Ergebnis ist als Mittelwertanalyse zu verstehen. Das SINR an Orten mit extremen Signalauslöschungen kann auch schlechter ausfallen. Dies ist in der Regel jedoch nur kurzzeitig der Fall, da durch sogenanntes frequency hopping Signalausfälle für längere Zeit vermieden werden. Unter *frequency hopping* wird das schnelle Wechseln der Trägerfrequenz während der Dauer einer Verbindung verstanden.

3.3.3 Minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ bei Frequenzplanung

Bei der Berechnung des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses (SINR) in Mobilfunksystemen mit fester Kanaluweisung kommen die Gleichungen im zuvor beschriebenen Abschnitt zur Anwendung. Durch Einsetzen von Gleichung (3.22) und Gleichung (3.11) in die Gleichung für das SINR in der Einheit dB (Gleichung (3.13)) erhält man

$$\rho = -L(d_S) - 10 \lg \left(\frac{kT_{\text{eff}} B_{\text{Tr}}}{S_S G_S G_E} + \frac{Z_1}{10^{\lfloor L(d_1)/10 \rfloor}} \right) \quad \text{mit } Z_1 = 6. \quad (3.29)$$

Aus der obigen Gleichung ist zu erkennen, dass das SINR bei schwacher Dämpfung des Interferenzsignals im wesentlichen gleich dem SIR ist. Bei starker Dämpfung wird das SINR dagegen vom Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnis (SNR) bestimmt.

Für die Dämpfungskennlinie im Vorstadtbereich (Bild 3.2) ergibt sich in Abhängigkeit von der Zellgröße und der Clustergröße (Zellenanzahl pro Cluster) N_C für das SINR folgender Verlauf:

$$\rho(N_C, r_z, S_S) = -L(r_z) - 10 \lg \left(\frac{kT_{\text{eff}} B}{S_S G_S G_E} + \frac{Z_1}{10^{\lfloor L(\lfloor \sqrt{N_C} - 1 \rfloor r_z)/10 \rfloor}} \right) \quad \text{mit } Z_1 = 6 \quad [\text{dB}] \quad (3.30)$$

Der Verlauf des SINR $\rho(N_C, r_z, S_S)$ ist in Bild 3.12 dargestellt. In den Bereichen 1 und 2 verlaufen die Kennlinien für das Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho(N_C, r_z, S_S)$ näherungsweise gleich wie die gestrichelt eingezeichneten Kennlinien für das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis $\rho_i(N_C, r_z, S_S)$. Der Anstieg im Bereich 2 resultiert aus der abnehmenden Interferenzleistung aufgrund der stärkeren Dämpfung für $d_1 > d_2$. Erst wenn der Nutzsignalsender am Zellenrand (worst case) sich im Bereich erhöhter Dämpfung befindet ($r_z > d_2$), macht sich in diesem Fall die Rauschleistung bemerkbar. Der starke Abfall der empfangenen Nutzleistung und damit des Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnisses $\rho_R(N_C, r_z, S_S)$ resultiert aus der hohen Dämpfung im Bereich 2 der Dämpfungskennlinie mit 40 dB/Abstanddekade. Das SNR ist die mit 40 dB/Dekade fallende Gerade am rechten Bildrand. Eine Erhöhung der Sendeleistung und/oder der Antennengewinne verschiebt die Gerade in Richtung der Ordinate um die entsprechenden Werte nach oben.

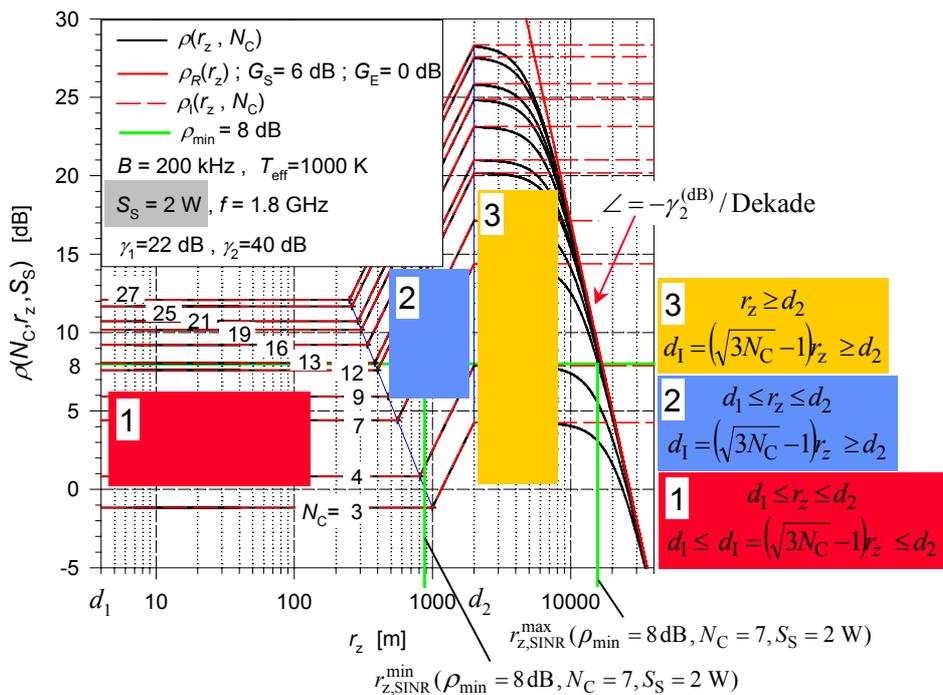


Bild 3.12 SINR in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und des Zellradius r_z in Vorstadtgebieten

Zur Gewährleistung einer bestimmten Übertragungsgüte (Abschnitt 2.3.2) ist ein minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} erforderlich. Am Beispiel in Bild 3.12 ist $\rho_{\min} = 8 \text{ dB}$ angenommen. Aus dem Diagramm kann der Bereich für die zulässigen Zellradien in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C ermittelt werden. Eine minimale Clustergröße von $N_C = 7$ Zellen ist erforderlich, um aufgrund der Gleichkanalinterferenz ein ρ_{\min} von 8 dB zu garantieren.

Bei $S_S=2W$ Sendeleistung sind Zellenradien von bis zu 16 km möglich. Der minimale Radius von $r_{z,SINR}^{\min} \approx 900$ m ist durch die Interferenzleistung bestimmt. Die Ursache für den Anstieg des SINR im Bereich 2 ist die Tatsache, dass im Bereich dieser Zellenradien der Nutzsignal-sender im Bereich niedriger Dämpfung liegt ($r_z < d_2$), aber die Störsender mit dem minimal möglichen Abstand d_1 im Bereich hoher Dämpfung liegen. Dadurch sinkt das SINR (worst case), wenn der Zellenradius verringert wird (Bild 3.10). Der Radius r_z darf nicht kleiner als $r_{z,SINR}^{\min}$ gewählt werden, da sonst aufgrund der zu hohen Interferenzleistung das minimale SINR nicht garantiert werden kann. Der maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,SINR}^{\max}$ ist durch die Abnahme der empfangenen Nutzleistung S_E aufgrund des hohen Dämpfungsfaktors für $r_z > d_2$ begrenzt. Diese beiden Radien $r_{z,SINR}^{\max}$ und $r_{z,SINR}^{\min}$ legen die maximale bzw. minimale Zellengröße aufgrund der geforderten Übertragungsgüte fest. Sie bestimmen zusammen mit dem maximalen Radius $r_{z,v}$, welcher von der geforderten Verkehrsgüte G_{oS} (Abschnitt 5.2.2.4) abhängig ist, die maximale Zellengrößen $r_{z,max}$, bei der die geforderte Dienstgüte QoS eingehalten wird.

Kapitel 4

Analyse von Zugriffsverfahren unter Berücksichtigung von Handover

Beim Funkkanal handelt es sich um ein von vielen Teilnehmern in einer Zelle gemeinsam genutztes Übertragungsmedium [4]. Das Übertragungsmedium wird durch die Multiplexverfahren, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben sind, in getrennte Übertragungskanäle aufgeteilt. Die Verfahren, mit denen die Teilnehmer eines Mobilfunksystems auf diese Kanäle zugreifen, werden als *Vielfachzugriffsverfahren* bezeichnet. Die statistischen Eigenschaften der Zugriffsverfahren werden im folgenden durch Markoff-Modelle modelliert. Damit lassen sich die Leistungsparameter der Verfahren wie Verbindungsaufbauverlust- und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeiten beim Zugriff ermitteln. Aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Teilnehmerverkehrsmodell auf der Verbindungsebene wird das Verkehrsmodell für eine Basisstation abgeleitet.

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen wird beispielhaft die Vorgehensweise anhand von FDMA/TDMA beschrieben. Durch die in Kapitel 2 beschriebenen generischen Teilnehmer-Verkehrsmodelle und die Transformationsverfahren von der Aktivitäts- auf die Verbindungsebene sind die Voraussetzungen zur Untersuchung anderer Zugriffsverfahren wie PRMA (Packet Reservation Multiple Access) und CDMA (Code Division Multiple Access) geschaffen. Bei CDMA ist bei der Systemdimensionierung zusätzlich die Kopplung zwischen der Verkehrslast und dem Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis zu berücksichtigen.

Beschreibung des Protokolls bei FDMA/TDMA

Bei *Zugriffsverfahren mit statischer Kanalzuteilung* (FDMA/TDMA) werden vor dem Verbindungsaufbau die erforderlichen Kommunikationskanäle beim System angefordert. Dies

erfolgt über separate Signalisierungskanäle (out band signalling) oder über einen freien Datenkanal (in band signalling). Bei den folgenden Modellen werden diese als blockierungs- und kollisionsfrei angenommen. Ist die angeforderte Anzahl an Kommunikationskanälen im System frei, wird dies der Mobilstation mitgeteilt. Diese Kanäle werden dann von der Mobilstation im nächsten Zeitrahmen für die gesamte Dauer der Verbindung belegt und werden von der betreffenden Verbindung exklusiv genutzt. In Sprachpausen bzw. in Pausen bei einer Datenübertragung bleibt die Übertragungskapazität des Kanals ungenutzt. Eine Nutzung der Kanäle in den Übertragungspausen durch andere Teilnehmer ist bei diesem Verfahren nicht möglich. Bei einem Multiservice-Teilnehmer wird für jeden benutzten Telekommunikationsdienst eine eigene Verbindung aufgebaut, die wiederum mehr als einen Übertragungskanal belegen kann (Multi Rate Slot Bundling).

Zugriffsverfahren mit statischer Kanalzuteilung sind gekennzeichnet durch das exklusive Belegen von Kanälen durch eine Verbindung während ihrer gesamten Dauer. Eine Verbindung zu einer Basisstation wird entweder durch den Teilnehmer selbst beendet, endet durch die Übergabe der Verbindung an eine andere Basisstation (Handover), oder es kommt zu einem Verbindungsabbruch durch einen nicht möglichen oder nicht erfolgreichen Handover. Bild 4.1 zeigt die Schritte der Verkehrsanalyse von Zugriffsverfahren.

Kurzbeschreibung der Berechnungsmethode für die Verkehrskapazitätsanalyse

Aus dem Teilnehmer-Verkehrsmodell (Kapitel 2), das das Verhalten statistisch durch Markoff-Modelle beschreibt, werden die Zustandsübergänge und Raten des Systemmodells abgeleitet. Die Zufallsgröße im Systemmodell ist ein n -tuple, dessen Elemente jeweils die Anzahl der Teilnehmer sind, die einen bestimmten Dienst benutzen. Sie ist die Zustandsgröße des Systems, die für die Analyse des Zugriffsverfahrens maßgebend ist. Beim Sprachdienst-Teilnehmer ist der Zustandsvektor eindimensional, und sein Wert ist gleich der Anzahl der belegten Kanäle. Aus den Wahrscheinlichkeiten dieser Zustände wird der Verkehrsgüteparameter (Grade of Service) gemäß Gleichung (2.99) berechnet. Ein üblicher Wert für die Gewichtsfaktoren in α_B ist der Wert 1 und in α_U der Wert 10. Um die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit (auf ca. 1/10 der Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit) bei einem erforderlichen Handover klein zu halten, ist ein Teil der zur Verfügung stehenden Kanäle exklusiv für Handover zu reservieren. Die Modellierung und Berechnung unter Berücksichtigung von Handover erfolgt in Abschnitt 4.1.2 für den Sprachdienst-Teilnehmer und in Abschnitt 4.2 für den Multiservice-Teilnehmer.

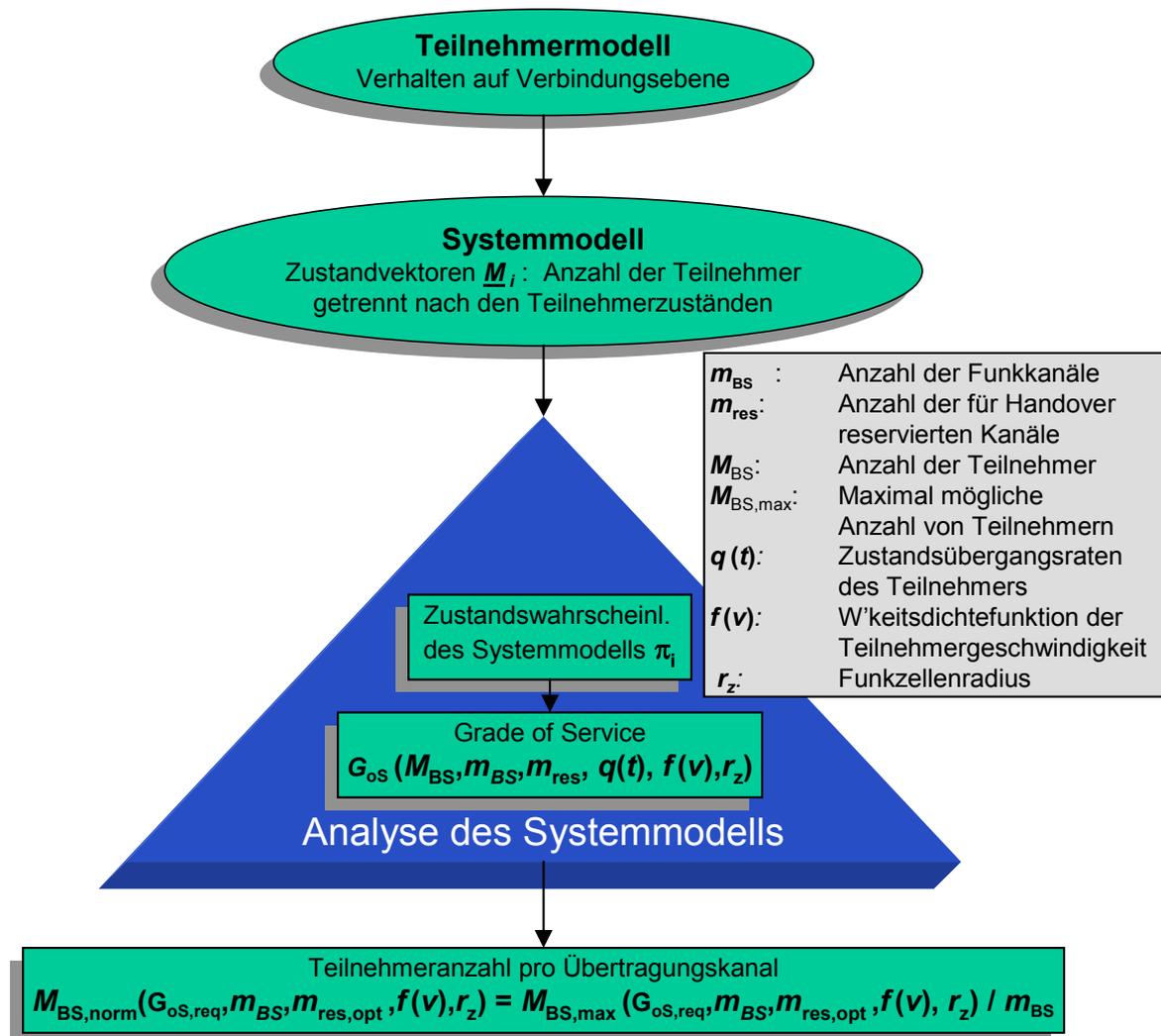


Bild 4.1 Verkehrskapazitätsanalyse von Zugriffsverfahren

Diese Leistungsgrößen des Systems sind abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle m_{BS} , der exklusiv für Handover-Vorgänge reservierten Kanäle m_{res} , der Anzahl der Teilnehmer M_{BS} , der Teilnehmergewindigkeit, dem Teilnehmergehalten und dem Funkzellenradius r_z . Der Funkzellenradius bestimmt die Anzahl der Handover-Vorgänge und beeinflusst so die Dauer der Verbindungen zu einer Basisstation. Das Ergebnis der Analyse ist die maximal mögliche Anzahl von Teilnehmern $M_{BS,norm}$ pro Übertragungskanal unter Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte $G_{oS,req}$, in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Übertragungskanäle m_{BS} in einer Funkzelle mit dem Radius r_z . Von diesen m_{BS} Kanälen ist $m_{res,opt}$ die optimale Anzahl der für Handover reservierten Kanäle. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung v_{mean} im Verhältnis zur Größe des Funkzellenradius. Eine genauere Beschreibung der Analyse erfolgt in den folgenden Abschnitten.

4.1 Verkehrskapazitätsanalyse von TDMA Systemen für Sprachdienst-Teilnehmer

Das Teilnehmerverhalten des klassischen Telefonteilnehmers im Festnetz wird durch einen sogenannten Geburts-/Sterbeprozess hinreichend genau beschrieben. Dieser Prozess wird durch eine eindimensionale Markoff-Kette, die nur Übergänge zwischen Nachbarzuständen besitzt, modelliert. Die Verkehrsgüte (Gleichung (2.100)) ist in diesen Netzen gleich der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit, da die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit für diese Art von Verbindungen vernachlässigt werden kann. Dieses in Bild 4.2 dargestellte Modell kann auch auf Mobilfunksysteme angewendet werden. Der Einfluss von Handover wird aber nicht modelliert. In Abschnitt 4.1.2 wird dieses Modell so modifiziert, dass der Einfluss von Handover und der exklusiv für Handover reservierten Kanäle m_{res} berücksichtigt wird.

4.1.1 Modell ohne Berücksichtigung von Handover

Das folgende Modell (Bild 4.2) findet Anwendung bei der Dimensionierung von Leitungsbündeln im Festnetz.

4.1.1.1 Markoff-Modell zur statistischen Modellierung der Kanalbelegung

Die Zustände sind gekennzeichnet durch die Anzahl der belegten Kanäle. M ist die Anzahl der Benutzer und m die Anzahl der einer Basisstation zur Verfügung stehenden Kanäle. Die Raten λ und μ sind die Raten aus dem Modell des Sprachdienst-Teilnehmerverhaltens auf der Verbindungsebene (Bild 2.3) aus Abschnitt 2.1.1.5.

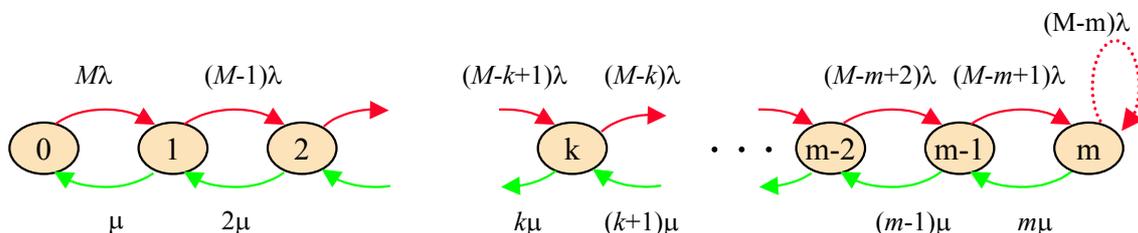
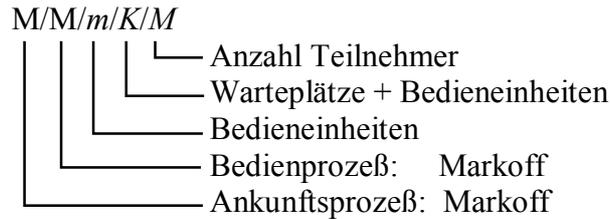


Bild 4.2 $M/M/m/K=m/M$ Verlustsystem (keine Warteplätze) mit $M > m$ Teilnehmern

Mit der folgenden Nomenklatur wird ein solches in der Literatur als Wartesystem bezeichnetes Modell klassifiziert. Im obigen Modell ist die Anzahl der Warteplätze gleich Null.



Die obige Bezeichnung steht für ein System mit Markoff Ankunfts- und Bedienprozessen, die die Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit besitzen. Die Exponentialverteilung ist die einzige kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF), die diese Eigenschaft besitzt. Gedächtnislosigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Vergangenheit einer Zufallsvariablen, deren WDF eine Exponentialverteilung (Gleichung (2.1) und (2.2)) ist, auf die zukünftige Entwicklung keinen Einfluss hat (*memoryless* property). Dies bedeutet auch, dass die zukünftige Entwicklung unabhängig ist von der Dauer des jetzigen Zustandes. Die Anzahl der Teilnehmer ist unendlich, so dass die Ankunftsrate λ unabhängig von der Anzahl der gerade bedienten Teilnehmer (= Anzahl der belegten Kanäle) ist. Es handelt sich um ein reines Verlustsystem, da keine Warteplätze vorhanden sind.

Die Raten für die Zustandsübergänge von k zu $k+1$ belegten Übertragungskanälen ist das Produkt aus der Rate für die Belegung eines Kanals durch einen Teilnehmer λ , multipliziert mit der Anzahl der Teilnehmer in der Funkzelle ($M-k$), die noch keinen Kanal belegen.

Die Raten für die Zustandsübergänge von k belegten zu $k-1$ belegten Übertragungskanälen ist das Produkt aus der Rate für die Freigabe eines Kanals durch einen Teilnehmer μ multipliziert mit der Anzahl der Teilnehmer k in der Funkzelle, die einen Kanal belegen.

4.1.1.2 Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten π_k

Die Zustandswahrscheinlichkeiten der Markoff-Kette in Bild 4.2 für das stationäre, statistische Gleichgewicht des Systems erhält man aus Gleichgewichtsbedingungen für die Zustände k . Im stationären, statistischen Gleichgewicht eines Zustands k ist die Summe der Raten für das Verlassen des Zustandes (erster Term in Gleichung (4.1)) gleich der Summe der Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge in diesen Zustand (zweiter Term in Gleichung (4.1)). Eine weitere Gleichung zur Bestimmung der m Zustandswahrscheinlichkeiten ist die Normierungsgleichung. Durch sie wird die Summe aller Zustandswahrscheinlichkeiten eins.

$$\begin{aligned}
-\pi_k \cdot \sum_{\forall i, i \neq k} q_{k,i} + \sum_{\forall i, i \neq k} \pi_i \cdot q_{i,k} &= 0 \quad \text{für } k = 1, 2 \dots m-1 \\
\sum_{\forall i} \pi_i &= 1
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Durch die Anwendung von Gleichung (4.1) auf die Markoff-Kette in Bild 4.2 ergeben sich folgende Wahrscheinlichkeiten für die Kanalbelegungen

$$\Pi_k = \begin{cases} \binom{M}{k} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \Pi_0 & \text{für } 1 \leq k \leq m \\ \left(1 + \sum_{i=1}^m \left[\binom{M}{i} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i\right]\right)^{-1} & \text{für } k = 0 \end{cases} \tag{4.2}$$

Die Zustandswahrscheinlichkeiten in Gleichung (4.2) sind hier gleich der WDF für die Anzahl der belegten Kanäle. Sie wird in der Literatur [17] als Engset-Verteilung ohne Wartepplätze bezeichnet. Aus der Zustandswahrscheinlichkeit, dass alle m zur Verfügung stehenden Kanäle belegt sind, ergibt sich die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit. Sie wird im folgenden definiert.

4.1.1.3 Berechnung der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ruf abgewiesen wird, wird als *Verlust- oder Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit* p_B bezeichnet. Sie ist definiert als

$$p_B = \frac{p(\text{alle Kanäle belegt, Ruf trifft ein})}{p(\text{Ruf trifft ein})} \tag{4.3}$$

Durch die statistische Unabhängigkeit des Teilnehmerverhaltens vom Zustand des Systems ist die Verbundwahrscheinlichkeit im Zähler gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten. Die Gleichung für die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit vereinfacht sich zu

$$p_B = \frac{p(\text{alle Kanäle belegt}) \cdot p(\text{Ruf trifft ein})}{p(\text{Ruf trifft ein})} = p(\text{alle Kanäle belegt}) \tag{4.4}$$

Aus dem Markoff-Modell in Bild 4.2 ist ersichtlich, dass nur im Zustand m (alle m Kanäle belegt) kein freier Kanal für den Aufbau einer Verbindung zur Verfügung steht und der Anruf vom System abgewiesen wird. Die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit ist somit

$$p_B(m, M) = \Pi_m = \binom{M}{m} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m \cdot \Pi_0 \quad \text{mit} \quad \Pi_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^m \binom{M}{i} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right]^{-1} \quad (4.5)$$

In Bild 4.3 ist eine Kurvenschar für die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Teilnehmer pro Übertragungskanal M_{norm} dargestellt.

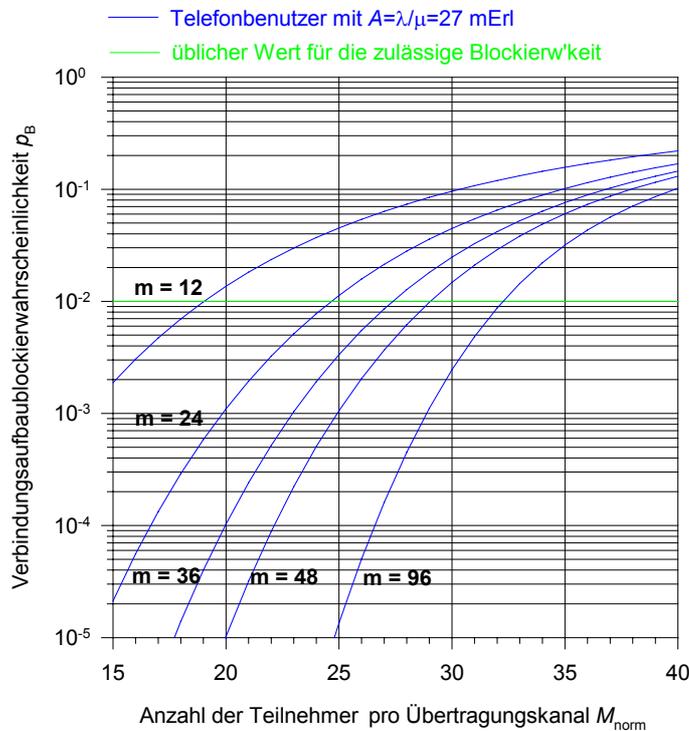


Bild 4.3 Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit für ein M/M/m/K/M Verlustsystem (Engset-Verteilung ohne Warteplätze: $K=M$) mit m Bedieneinheiten

Es wurde ein Sprachdienst-Teilnehmer mit dem mittleren zeitlichen Abstand zwischen zwei Gesprächen (Ankunftsabstand) von $T_A=2,5$ h und einer mittleren Gesprächsdauer (Bedienzeit) von $T_B=4$ min angenommen. Dies entspricht einem Verkehrsangebot $A=26,7$ mErl (milli Erlang). Der Scharparameter der Kurven ist die Anzahl der Übertragungskanäle m , die einer Basisstation zur Verfügung stehen. Der für die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit übliche Wert von 1% ist als horizontale Linie markiert. Es wird deutlich, dass bei Einhaltung der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit von 1% für eine Basisstation mit $m=12$ Übertragungskanälen 19 Teilnehmer pro Übertragungskanal zulässig sind. Dagegen sind für eine Basisstation mit 96 Kanäle zur Verfügung stehenden Kanälen 32 Teilnehmer pro Übertragungskanal möglich. Das Anwachsen der Teilnehmeranzahl pro Übertragungskanal mit zunehmender Anzahl an Kanälen im System wird als *Bündelungsgewinn* bezeichnet. Das folgende Bild 4.4 zeigt die Anzahl von Teilnehmern pro Übertragungskanal M_{norm} , die unter Einhaltung der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit möglich ist.

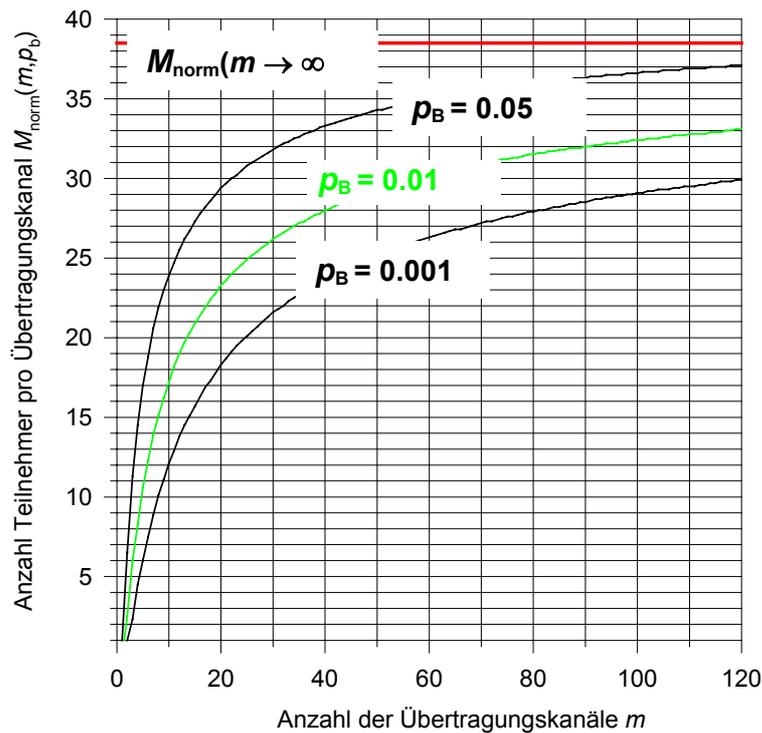


Bild 4.4 Zulässige Anzahl von Teilnehmern (mit $T_A=2,5$ h und $T_B=4$ min) pro Übertragungskanal M_{norm} in einem System mit m Kanälen ohne Warteplätze bei der zulässigen Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B

Diese Kurven berechnen sich aus der Kurvenschar für die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit, durch Ermitteln der Werte M_{norm} an den Schnittpunkten der Kurven mit dem Parameter m und der Horizontalen bei p_B (Linie für $p_B=0.01$ in Bild 4.3). Eine geschlossene analytische Lösung existiert nicht. Dieses Modell und die gewonnenen Ergebnisse kann auch für die Dimensionierung von Mobilfunksystemen angewandt werden, wenn die mittlere Gesprächsdauer T_B klein gegenüber der mittleren Verweildauer der Teilnehmer in einer Funkzelle ist. Ansonsten sind die Auswirkungen von Handover auf die Teilnehmernennkapazität einer Basisstation bei der Dimensionierung zu berücksichtigen.

4.1.2 Verkehrsmodell unter Berücksichtigung von Handover

Bei den heutigen Mobilfunksystemen wird eine Verbindung beim Verlassen einer Funkzelle an die Nachbarfunkzelle weitergereicht (Handover). Dies ist jedoch nur möglich, wenn in der Nachbarfunkzelle die Mindestanzahl der zur Fortführung der Verbindung erforderlichen Übertragungskanäle 'frei' sind. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu einem Verbindungsabbruch. Ein Verbindungsabbruch wird vom Teilnehmer störender empfunden als eine Verbindungsaufbaublockierung. Der Faktor α_u in der Bestimmungsgleichung für die Verkehrsgüte G_{OS}

(Gleichung (2.100)) berücksichtigt diese unterschiedliche Bewertung durch den Teilnehmer. Bei dem verwendeten Modell im vorhergehenden Abschnitt konnte dieser störende Einfluss auf die Verkehrsgüte nicht berücksichtigt werden. Bei dem nachfolgend vorgestellten Modell ist diese Analyse möglich. Zudem wird eine Optimierung durchgeführt mit der es - unter minimalen Einsatz von Netzressourcen - möglich ist, die geforderte Verkehrsgüte G_{oS} zu gewährleisten.

Diese Optimierung unter Einhaltung einer geforderten Verkehrsgüte G_{oS} (der Maximalwert darf nicht überschritten werden) wird über die Anzahl exklusiv für den Handover von Verbindungen reservierter Kanäle m_{res} erreicht. Für *Handover reservierte Kanäle* dürfen nur für diesen Zweck belegt werden. Für den Neuaufbau von Verbindungen durch die Teilnehmer stehen diese nicht zur Verfügung.

Das verwendete Markoff-Modell in Bild 4.5 enthält als Zustandgröße die Anzahl der belegten Kanäle k . Diese können Werte zwischen Null und der Gesamtanzahl von Übertragungskanälen m , die einer Basisstation zur Verfügung stehen, annehmen. Die Übergangsraten zwischen den Zuständen (Pfeilbeschriftungen) sind bestimmt durch die Raten, die das Teilnehmerverhalten und die Einflüsse der Handover-Vorgänge abbilden.

- λ_A : Ankunftsrate des Teilnehmers,
- λ_H : Mittlere Rate für die von einem Teilnehmer bei einer Basisstation verursachten Handover-Vorgänge,
- λ_{AH} : Gesamtankunftsrate = Summe der Ankunftsrate λ_A + Handover-Rate λ_H des Teilnehmers,
- μ_{BH} : Gesamtenderate der Verbindungen; Beendigung der Verbindung durch den Teilnehmer oder durch sein Verlassen der Funkzelle (Handover).

Die Definition der Raten und ihre Abhängigkeit vom Teilnehmerverhalten und dem Funkzellenradius ist in Abschnitt 2.2 detailliert beschrieben.

Weitere Parameter dieses Modells sind im folgenden beschrieben:

- m, m_{BS} : Gesamtanzahl von Übertragungskanälen einer Basisstation,
- M : Anzahl von Teilnehmern in einer Funkzelle,
- m_{res} : Anzahl der exklusiv für Handover reservierten Übertragungskanäle einer Basisstation,

$m_0 = m - m_{\text{res}}$: bis zu dieser Anzahl von Übertragungskanälen einer Basisstation stehen die freien Kanäle sowohl für neue Verbindungen als auch für Verbindungen, die durch Handover zur Basisstation kommen, zur Verfügung.

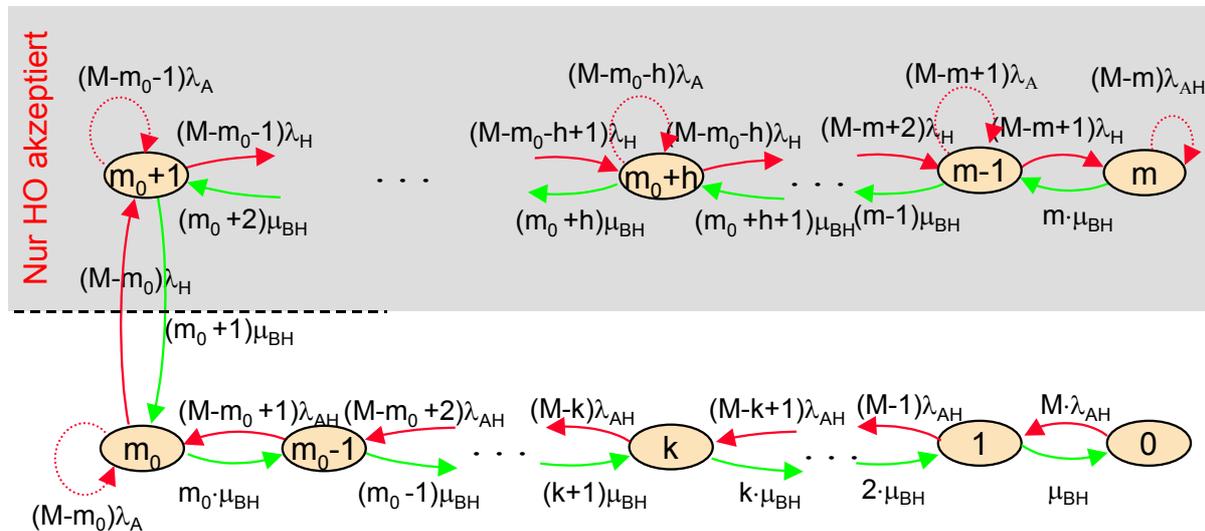


Bild 4.5 Markoff-Modell für ein Mobilfunksystem mit TDMA-Zugriffsverfahren unter Berücksichtigung von Handover

Bis zu einer Belegung von m_0 Kanälen im System werden die freien Kanäle sowohl durch neue vom Teilnehmer initiierte Verbindungen als auch durch die von einer Nachbarbasisstation aufgrund von Handover übergebenen Verbindungen belegt. Dies sind die Kanalbelegungszustände im unteren Teil der Markoff-Kette mit den Indices 0 bis m_0 . In den Belegungszuständen m_0+1 bis $m-1$ sind die freien Kanäle für den Handover von Verbindungen reserviert. Die Übergangsraten zum Nachbarzustand $k+1$ ($k > m_0$), in dem ein weiterer Kanal belegt ist, ergibt sich aus der Definition der Handover-Rate λ_H (Definition von λ_H siehe Gleichung (2.83)). Sie sind proportional zur Handover-Rate λ_H eines Teilnehmers und der Anzahl der Teilnehmer, die im Zustand k des Systems ohne Verbindung sind.

4.1.2.1 Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten π_k

Die Zustandswahrscheinlichkeiten für das stationäre statistische Gleichgewicht lassen sich rekursiv aus den Gleichgewichtsbedingungen wie folgt ermitteln. Die effizienteste Berechnungsmethode ist die Ermittlung der unnormierten Zustandswahrscheinlichkeiten mit der Annahme von $\pi_0 = 1$.

$$\pi_{k,\text{unnorm}} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{für } k = 0 \\ \frac{(M-k+1)\lambda_{\text{AH}}}{k \cdot \mu_{\text{BH}}} \cdot \pi_{k-1} & \text{für } 1 \leq k \leq m_0 \\ \frac{(M-k+1)\lambda_{\text{H}}}{k \cdot \mu_{\text{BH}}} \cdot \pi_{k-1} & \text{für } m_0 < k \leq m \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Anschließend werden die Zustandswahrscheinlichkeiten in Gleichung (4.7) so normiert, dass deren Summe 1 ergibt.

$$\pi_k = \left\{ \begin{array}{ll} \left(1 + \sum_{i=1}^m [\pi_{k,\text{unnorm}}] \right)^{-1} & \text{für } k = 0 \\ \frac{\pi_{k,\text{unnorm}}}{\Pi_0} & \text{für } 1 \leq k \leq m \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

Die Berechnung einer Zustandswahrscheinlichkeit mit Hilfe der im folgenden beschriebenen geschlossenen Form benötigt die gleiche Anzahl von Rechenoperationen wie sie für die Berechnung aller Wahrscheinlichkeiten mit der rekursiven Lösung in Gleichung (4.6) und (4.7) erforderlich sind.

In Gleichung (4.8) wird in der ersten Zeile die Wahrscheinlichkeit π_0 berechnet. Sie ist für die Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten für die Zustände $k > 0$ erforderlich.

$$\pi_k = \left\{ \begin{array}{ll} \left(1 + \sum_{i=1}^{m_0} \left[\binom{M}{i} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{AH}}}{\mu_{\text{BH}}} \right)^i \right] + \sum_{i=m_0+1}^m \left[\frac{\binom{M-m_0}{i-m_0}}{\binom{i}{m_0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{H}}}{\mu_{\text{BH}}} \right)^i \right] \right)^{-1} & \text{für } k = 0 \\ \binom{M}{k} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{AH}}}{\mu_{\text{BH}}} \right)^k \cdot \pi_0 & \text{für } 1 \leq k \leq m_0 \\ \binom{M}{k} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{AH}}}{\mu_{\text{BH}}} \right)^{m_0} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{H}}}{\mu_{\text{BH}}} \right)^{k-m_0} \cdot \pi_0 & \text{für } m_0 < k \leq m \end{array} \right\}$$

(4.8)

Mit Hilfe dieser Wahrscheinlichkeiten lassen sich die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit aufgrund fehlender Netzressourcen p_U bestimmen.

4.1.2.2 Berechnung der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B

Der Versuch des Aufbaus einer neuen Verbindung von Teilnehmern innerhalb der Funkzelle dieser Basisstation mit der Rate λ_A , wird in den Belegungszuständen m_0 bis m der Basisstation von der Basisstation abgewiesen. In diesen Zuständen werden die noch $m-k$ freien, exklusiv für Handover reservierten Kanäle nur Verbindungen zugeteilt, die durch Handover zu der Basisstation kommen. Die Summe dieser Zustandswahrscheinlichkeiten (Gleichung (4.9)) ist die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit für einen Teilnehmer in der Funkzelle dieser Basisstation.

$$p_B(m, M, m_0, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) = \sum_{i=m_0}^m \pi_i(m, M, m_0, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) \quad \text{mit } m_0 = m - m_{\text{res}} \quad (4.9)$$

- λ_A : Ankunftsrate des Teilnehmers,
- λ_H : Mittlere Rate die für von einem Teilnehmer bei einer Basisstation verursachten Handover-Vorgänge,
- λ_{AH} : Gesamtankunftsrate = Summe der Ankunftsrate λ_A des Teilnehmers und der Handover-Rate λ_H ,
- μ_{BH} : Gesamtenderate der Verbindungen; Beendigung der Verbindung durch den Teilnehmer oder durch das Verlassen der Funkzelle,

Die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B ist in Bild 4.5 durch die gestrichelten Pfeile, die am gleichen Zustand beginnen und enden, symbolisiert. Es erfolgt keine Zustandsänderung.

4.1.2.3 Berechnung der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U

Im Zustand m , in dem alle verfügbaren Kanäle einer Basisstation belegt sind, stehen auch für Handover-Vorgänge keine freien Kanäle zur Verfügung, so dass ein erforderlicher Handover zu dieser Basisstation aufgrund fehlender freier Kommunikationskanäle nicht möglich ist. Es kommt zu einem Verbindungsabbruch. Die Wahrscheinlichkeit p_U für einen Verbindungsab-

bruch aufgrund des Fehlens eines freien Übertragungskanals zur Übernahme einer Verbindung ist nach [12]

$$p_U(m, M, m_0, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) = \frac{\rho_n}{1 - \rho_n(1 - \pi_m)} \pi_m \quad \text{mit } m_0 = m - m_{\text{res}} \quad . \quad (4.10)$$

Aufgrund der wechselseitigen Abhängigkeit der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U und der Zustandswahrscheinlichkeit π_m über die Handover-Ankunftsrate λ_H (Gleichung (2.83)), ist zur exakten Berechnung der Wahrscheinlichkeit p_U ein iterativer Algorithmus erforderlich. Dies kann vermieden werden durch Anwendung der Näherungslösung für die Handover-Rate λ_H nach Gleichung (2.84). In dieser Gleichung besteht im Gegensatz zu Gleichung (2.83) keine Abhängigkeit von der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U . Der Fehler $E_{\text{MBS, norm, appr}}$, der sich durch die Anwendung der Näherungslösung für die Handover-Rate λ_H bei der Berechnung der zulässigen Teilnehmeranzahl pro Kommunikationskanal $M_{\text{BS, norm}}$ ergibt, ist bei der Beschreibung der Berechnung von $M_{\text{BS, norm}}$ in Abhängigkeit von Zellenradius r_z dargestellt (Bild 4.12).

4.1.2.4 Berechnung der Verkehrsgüte G_{oS}

Für die Verkehrsgüte G_{oS} nach Gleichung (2.100) erhält man nach dem Einsetzen der Verbindungsaufbaublockier- und der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit nach Gleichung (4.9) und (4.10):

$$G_{oS}(m, M, m_0, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) = \sum_{i=m_0}^m \pi_i(m, M, m_{\text{res}}, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) + \alpha_U \frac{\rho_n}{1 - \rho_n(1 - \pi_m)} \pi_m(m, M, m_{\text{res}}, \lambda_A, \lambda_H, \mu_{BH}) \quad . \quad (4.11)$$

Dabei ist die Größe α_U der Gewichtungsfaktor zur Gewichtung der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U im Verhältnis zur Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B . Sie wird i.d.R $\alpha_U = 10$ gewählt. Dieser Wert wird auch in dieser Arbeit verwendet. Das folgende Bild 4.6 zeigt grafisch die Zusammensetzung der Verkehrsgüte G_{oS} als Summe aus der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und der mit α_U gewichteten Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U . Beide Größen sind von der Anzahl der exklusiv für Handover reservierten Kanäle m_{res} abhängig.

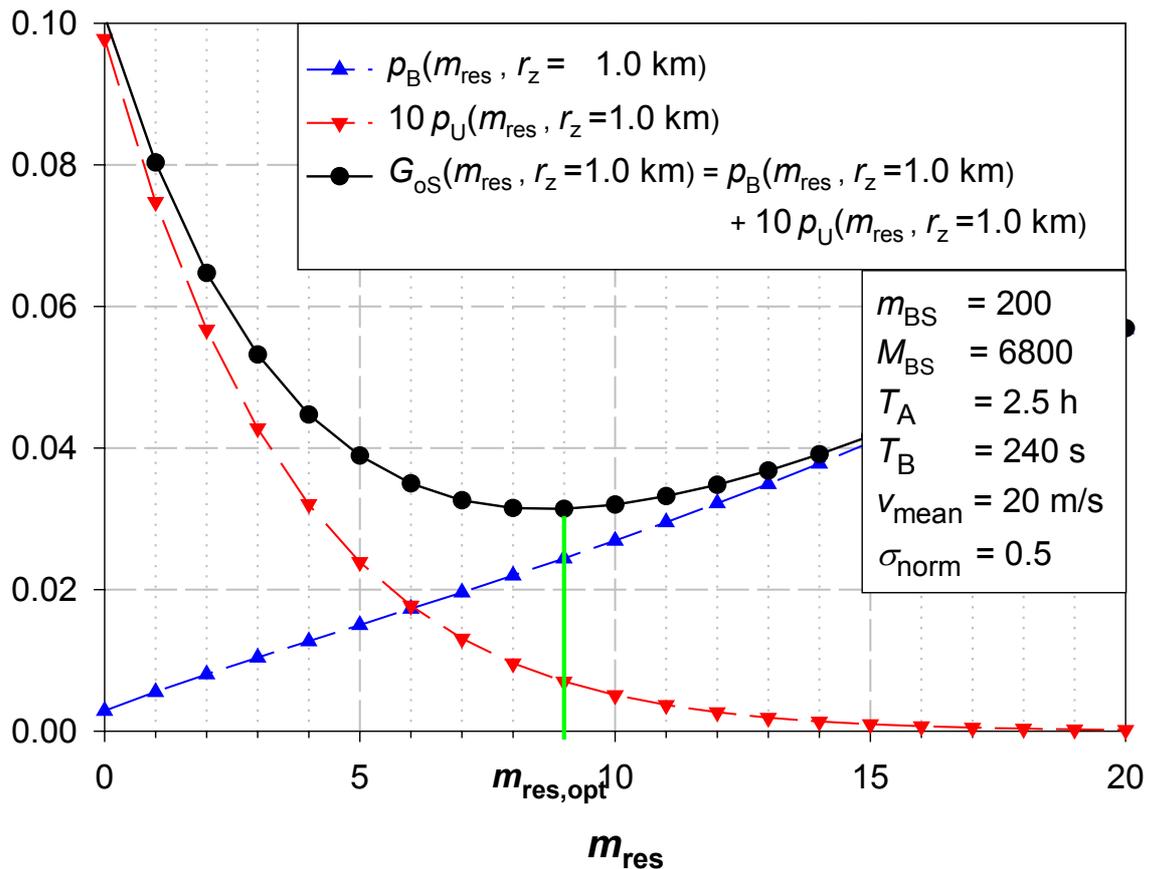


Bild 4.6 Ermitteln der Verkehrsgüte G_{oS} aus der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U

Die zunehmende Anzahl exklusiv für Handover reservierter Kanäle m_{res} bewirken ein Sinken der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U . Der Betrag der Steigung der Kurve verringert sich aber mit zunehmenden Werten m_{res} . Die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B steigt dagegen näherungsweise linear mit zunehmender Anzahl von für Handover reservierten Kanälen m_{res} , da die exklusiv für HO reservierten Kanäle für den Aufbau neuer Verbindungen (Anrufe) nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit nimmt zu.

4.1.2.5 Bestimmung der optimalen Anzahl der für Handover reservierten Kanäle $m_{res,opt}$

Die Differenzgleichungen zur Bestimmung des optimalen Werts $m_{res,opt}$ bei dem der Wert für die Verkehrsgüte G_{oS} minimal wird, lautet:

$m_{\text{res, opt}}$:

$$\left| \frac{\Delta G_{oS}}{\Delta m_{\text{res}}} \right|_{m_{\text{res, opt}}} \stackrel{!}{=} \min_{\forall m_{\text{res}}} \left(\frac{\Delta G_{oS}(m_{\text{res}})}{\Delta m_{\text{res}}} \right) \wedge \frac{\Delta G_{oS}}{\Delta m_{\text{res}}} \Big|_{m_{\text{res, opt}}} \leq 0 \wedge \frac{\Delta^2 G_{oS}}{\Delta^2 m_{\text{res}}} \Big|_{m_{\text{res, opt}}} \stackrel{!}{>} 0 \quad (4.12)$$

Sie sind abgeleitet aus den Gleichungen zur Extremwert-Bestimmung von Funktionen mit kontinuierlichen Variablen (Bedingungen für 1-te und 2-te Ableitung). Mit $\Delta m_{\text{res}} = 1$ vereinfacht sich die obige Gleichung zu

$m_{\text{res, opt}}$:

$$\left| G_{oS}(m_{\text{res, opt}}) - G_{oS}(m_{\text{res, opt}} - 1) \right| \stackrel{!}{=} \min_{\forall m_{\text{res}}} \left(G_{oS}(m_{\text{res}}) - G_{oS}(m_{\text{res}} - 1) \right) \quad (4.13)$$

$$\wedge G_{oS}(m_{\text{res, opt}}) - G_{oS}(m_{\text{res, opt}} - 1) \leq 0 \wedge \frac{\Delta^2 G_{oS}}{\Delta^2 m_{\text{res}}} \Big|_{m_{\text{res, opt}}} \stackrel{!}{>} 0$$

Die Differenzgleichung 2-ter Ordnung ist wie folgt zu verstehen:

$$\frac{\Delta^2 G_{oS}}{\Delta^2 m_{\text{res}}} = \Delta G_{oS}(m_{\text{res}}) - \Delta G_{oS}(m_{\text{res}} - 1) \quad (4.14)$$

$$\text{mit } \Delta G_{oS}(m_{\text{res}}) = G_{oS}(m_{\text{res}}) - G_{oS}(m_{\text{res}} - 1)$$

Die beiden ersten Bedingungen in Gleichung (4.13) sagen aus, dass an der Stelle $m_{\text{res, opt}}$ der Betrag der Differenzgleichung 1-ter Ordnung der Funktion $G_{oS}(m_{\text{res}})$ minimal und der Absolutwert negativ sein muss. Die 3. Bedingung, dass der Wert der Differenzgleichung 2-ter Ordnung an der Stelle $m_{\text{res, opt}}$ positiv ist, gewährleistet, dass es sich um ein Minimum handelt. Die Berechnung von $m_{\text{res, opt}}$ nach Gleichung (4.13) kann auch über einen vereinfachten Algorithmus erfolgen:

Die Anzahl der für Handover reservierten Kanäle wird solange erhöht bis sich $G_{oS}(m_{\text{res}})$ nicht mehr verringert. Bei diesem Wert $\Delta G_{oS}(m_{\text{res, stop}})$ ist $m_{\text{res, stop}} = m_{\text{res, opt}} + 1$.

Der optimale Anzahl für Handover reservierter Kanäle ist somit $m_{\text{res, opt}} = m_{\text{res, stop}} - 1$.

Durch die Anwendung von Gleichung (4.12) auf die gewichtete Summe aus der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und der Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U (Gleichung (2.100)) ergibt sich für $m_{\text{res,opt}}$ mit $\Delta m_{\text{res}} = 1$ folgende Gleichung:

$$m_{\text{res,opt}} : \left| \Delta p_B \right|_{m_{\text{res,opt}}} + \alpha_U \cdot \left| \Delta p_U \right|_{m_{\text{res,opt}}} \stackrel{!}{=} \min_{\forall m_{\text{res}}} \left(\frac{\Delta G_{oS}(m_{\text{res}})}{\Delta m_{\text{res}}} \right) \quad (4.15)$$

$$\wedge \frac{\Delta G_{oS}}{\Delta m_{\text{res}}} \Big|_{m_{\text{res,opt}}} < 0 \quad \wedge \quad \frac{\Delta^2 G_{oS}}{\Delta^2 m_{\text{res}}} \Big|_{m_{\text{res,opt}}} \stackrel{!}{>} 0$$

Gleichung (4.15) zeigt, dass der optimale Wert $m_{\text{res,opt}}$ an der Stelle erreicht wird, wo durch die Erhöhung der Anzahl der reservierten Kanäle die Abnahme der mit α_U gewichteten Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U gleich oder größer ist als die Zunahme der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B . Dieser Zusammenhang ist auch in Bild 4.6 ersichtlich.

4.1.2.6 Abhängigkeit der Verkehrsgüte G_{oS} von dem Funkzellenradius r_z

Die Verkehrsgüte G_{oS} wird hauptsächlich von den folgenden 4 Einflussfaktoren bestimmt:

- Teilnehmerverhalten (Gesprächsabstände, Gesprächsdauern und Teilnehmerbewegung),
- Anzahl der Teilnehmer in der Funkzelle M_{BS} ,
- Funkzellenradius r_z ,
- Anzahl der Übertragungskanäle der Basisstation m_{res} .

In Bild 4.7 ist für eine konstante Anzahl von $M_{BS} = 6800$ Sprachdienst-Teilnehmer in einer Funkzelle die Abhängigkeit der Verkehrsgüte $G_{oS}(m_{\text{res}}, r_z)$ von der Anzahl der für Handover reservierten Kanäle und von dem Funkzellenradius r_z dargestellt. Die Anzahl der Übertragungskanäle ist $m_{BS} = 200$. Jeder Teilnehmer erzeugt ein Verkehrsangebot von $A_{TIn} = 27$ mErl. Das Gesamtverkehrsangebot für die Basisstation mit $m_{BS} = 200$ Duplexkanälen beträgt somit 183 Erl.

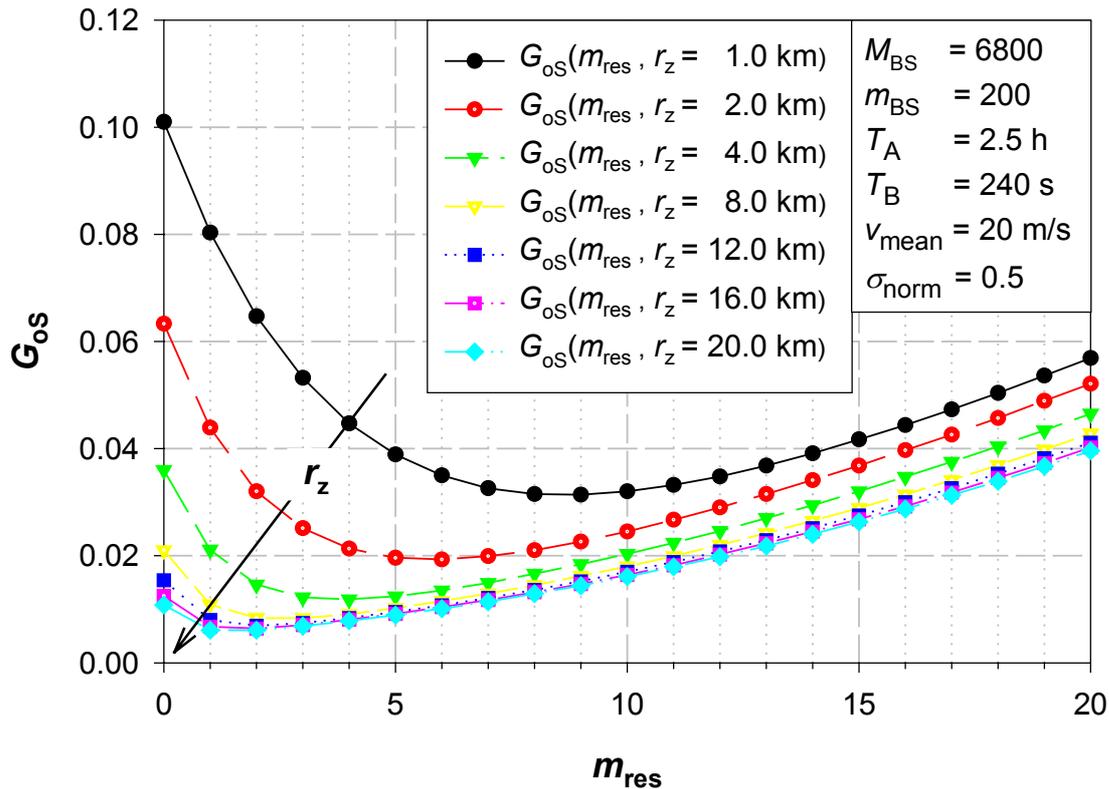


Bild 4.7 Abhängigkeit der Verkehrsgüte G_{oS} vom Funkzellenradius r_z bei konstanter Teilnehmeranzahl $M_{BS}=6800$ mit einem Verkehrsangebot von $A_{TIn}=27$ mErl pro Sprachdienst-Teilnehmer

Der Wert der Verkehrsgüte G_{oS} wird mit zunehmendem Radius r_z kleiner (bessere Verkehrsgüte). Das Minimum der Kurven wandert gleichzeitig zu kleineren Werten m_{res} . Dieses Verhalten resultiert aus der Abnahme der Handover-Rate λ_H mit zunehmendem Funkzellenradius. Dadurch nimmt die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_u ab und es müssen somit weniger Kanäle m_{res} für Handover reserviert werden.

4.1.2.7 Die maximal mögliche Teilnehmeranzahl pro Übertragungskanal

$$M_{BS,norm}$$

Im folgenden Bild 4.8 ist der Funkzellenradius konstant $r_z=2$ km und die Anzahl von Duplex-übertragungskanälen der Basisstation $m_{BS} = 200$. Es zeigt sich sehr deutlich die Abhängigkeit der Verkehrsgüte von der Anzahl der für Handover exklusiv reservierten Kanäle m_{res} und der Anzahl der Sprachdienst-Teilnehmer $M_{BS,norm}$ pro Übertragungskanal in der Funkzelle der Basisstation. Bei der Dimensionierung von Mobilfunksystemen ist die geforderte Verkehrsgüte $G_{oS,soll}$ einzuhalten. In Bild 4.8 ist diese durch eine horizontale durchgezogene Linie symbo-

lisiert. Das Ziel einer optimalen Dimensionierung ist die Ermittlung der maximal möglichen Teilnehmeranzahl pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ unter Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte $G_{oS,soll}$. An der Kurve für $M_{BS,norm} = 33$ ist zu erkennen, dass die geforderte Verkehrsgüte $G_{oS,soll} = 0.01$ eingehalten werden kann, wenn die Anzahl der für Handover reservierten Übertragungskanäle m_{res} optimal gewählt wird. In diesem Beispiel ist $m_{res,opt} = 5$. $M_{BS,norm}$ könnte theoretisch sogar noch etwas erhöht werden.

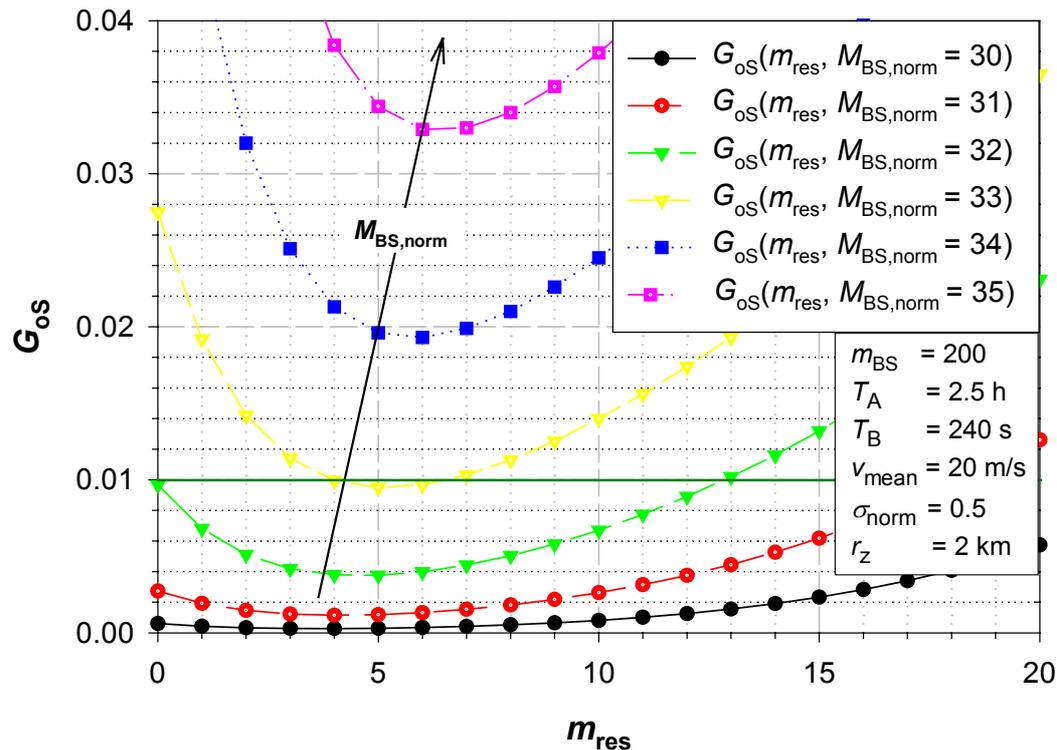


Bild 4.8 Abhängigkeit der Verkehrsgüte G_{oS} von der Anzahl der für Handover reservierten Kanäle m_{res} und der Anzahl der Sprachdienst-Teilnehmer pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ bei einem Funkzellenradius von $r_z = 2$ km

Diese maximal mögliche Anzahl von Sprachdienst-Teilnehmern pro Übertragungskanal wird durch eine Nullstellensuche der Funktion

$$G_{oS}(M_{BS,norm}, m_{BS}, m_{res,opt}, r_z) - G_{oS,soll} = 0 \quad (4.16)$$

ermittelt. Innerhalb der Iterationsschleife wird dabei für jeden vom Iterationsalgorithmus gewählten Wert für $M_{BS,norm}$ die optimale Anzahl der reservierten Kanäle ermittelt. Für diese optimale Anzahl $m_{res,opt}$ wird dann die zu erwartende Verkehrsgüte $G_{oS}(M_{BS,norm}, m_{BS}, m_{res,opt})$ berechnet und die Abweichung von der geforderten Verkehrsgüte ermittelt. Der Folgewert für

den nächsten Iterationsschritt wird anhand der Abweichung bestimmt. Diese Annäherung an den geforderten Wert wird so lange fortgeführt bis die Abweichung unter einer vorzugebenen Toleranzschwelle liegt (Abbruchbedingung der Iteration). In Bild 4.9 sind die so ermittelten Werte für die maximal mögliche Anzahl von Mobilfunkteilnehmern pro Übertragungskanal $M_{BS, norm}$ in der Funkzelle dargestellt. Es zeigt sich deutlich die Abhängigkeit von der Anzahl der der Basisstation zur Verfügung stehenden Kanäle m_{BS} und dem Funkzellenradius r_Z .

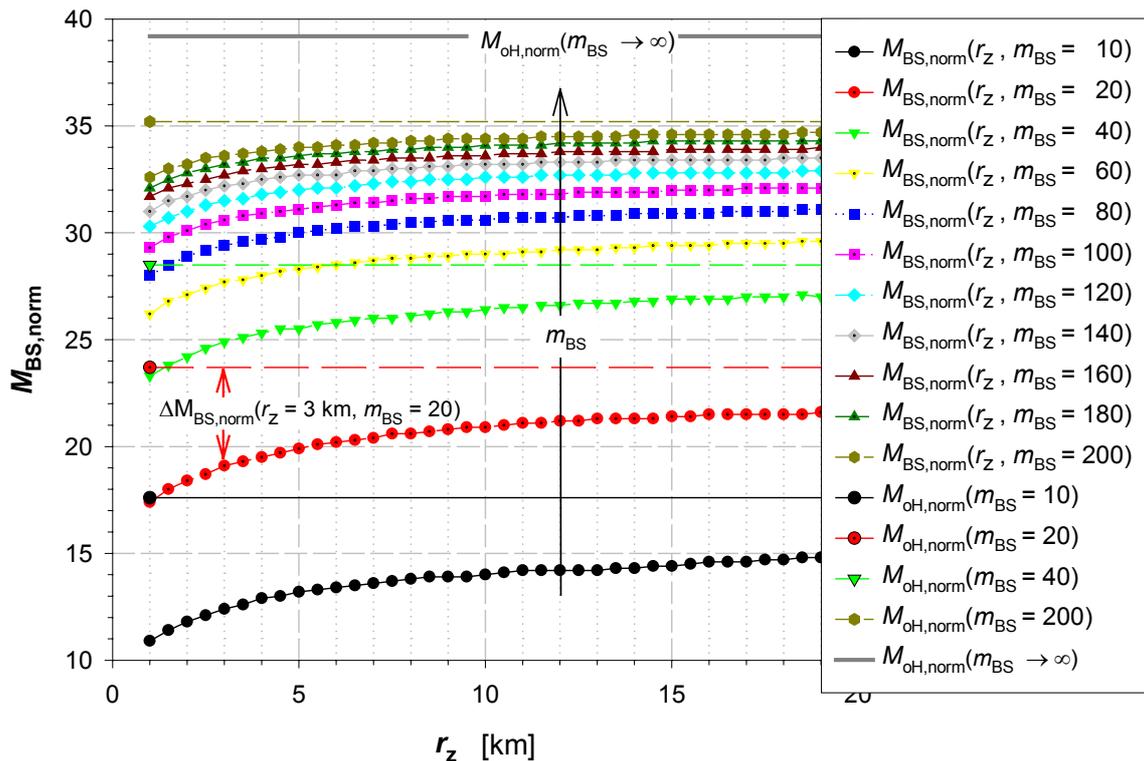


Bild 4.9 Zulässige Teilnehmeranzahl pro Funkkanal mit Berücksichtigung von Handover $M_{BS, norm}$ und ohne Berücksichtigung von Handover $M_{oH, norm}$

Zusätzlich sind die horizontal verlaufenden Geraden $M_{oH, norm}$ für die Anzahl von Teilnehmern ohne Berücksichtigung von Handover eingezeichnet. Bei kleinen Werten m_{BS} und kleinen Funkzellenradien r_Z ist durch Handover eine deutliche Reduktion der möglichen Verkehrskapazität gegenüber dem Fall ohne Handover zu erkennen. Dadurch wird die Notwendigkeit deutlich, den Einfluss von Handover bei der Dimensionierung von Mobilfunksystemen zu berücksichtigen. Ohne Berücksichtigung würde eine ernsthafte Unterdimensionierung erfolgen, was zu einer Nichteinhaltung der geforderten Verkehrsgüte führen würde. Das folgende Bild 4.10 verdeutlicht dies nochmals.

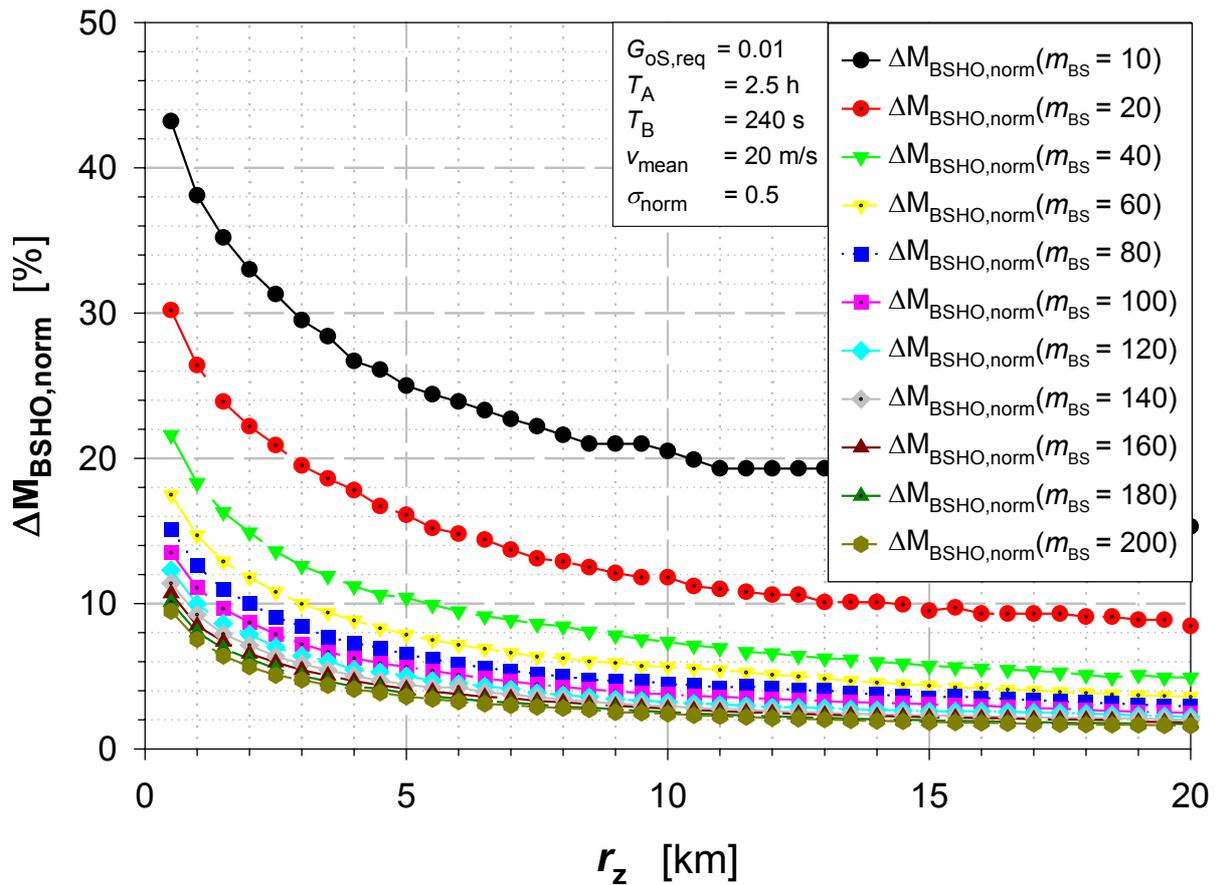


Bild 4.10 Verlust an Teilnehmernennkapazität pro Übertragungskanal durch Handover $\Delta M_{BS,norm}$ (entspricht der normierten Distanz der Kurven mit und ohne Handover in Bild 4.9)

Der Verlust ist definiert als

$$\Delta M_{BSHO,norm}(m_{BS}, r_z) = \frac{M_{BS,norm}(m_{BS}, r_z) - M_{oH,norm}(m_{BS}, r_z)}{M_{BS,norm}(m_{BS}, r_z)} \quad (4.17)$$

Er gibt an, wie viel Prozent mehr an Sprachdienst-Teilnehmern ohne den Einfluss Handover mit der gleichen Anzahl an Übertragungskanälen versorgt werden könnten. Für kleine Radien r_z und eine kleine Anzahl an Übertragungskanälen m_{BS} ist der Verlust beträchtlich. Er verringert sich aber, wenn der Basisstation eine größere Anzahl an Übertragungskanälen ($m_{BS} > 60$) zur Verfügung steht. Der Einfluss von Handover auf die Verkehrskapazität nimmt mit zunehmendem Radius ab ist aber nicht vernachlässigbar, da dies zu einer Unterdimensionierung führen würde. Zudem gelten die Ergebnisse nur unter der Annahme, dass die optimale Anzahl an Kanälen $m_{res,opt}$ für Handover reserviert wurde. Wäre dies nicht der Fall, wäre der Verlust

an Verkehrskapazität durch den Einfluss von Handover noch größer. Die optimalen Werte sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.1.2.8 Die optimale Anzahl exklusiv für Handover reservierter Übertragungs-kanäle $m_{res,opt}$

In Bild 4.11 sind die optimalen Werte $m_{res,opt}$ in Abhängigkeit von den Funkzellenradien und der Anzahl der der Basisstation zur Verfügung stehenden Übertragungschanäle für die Anzahl der exklusiv für Handover reservierten Kanäle dargestellt.

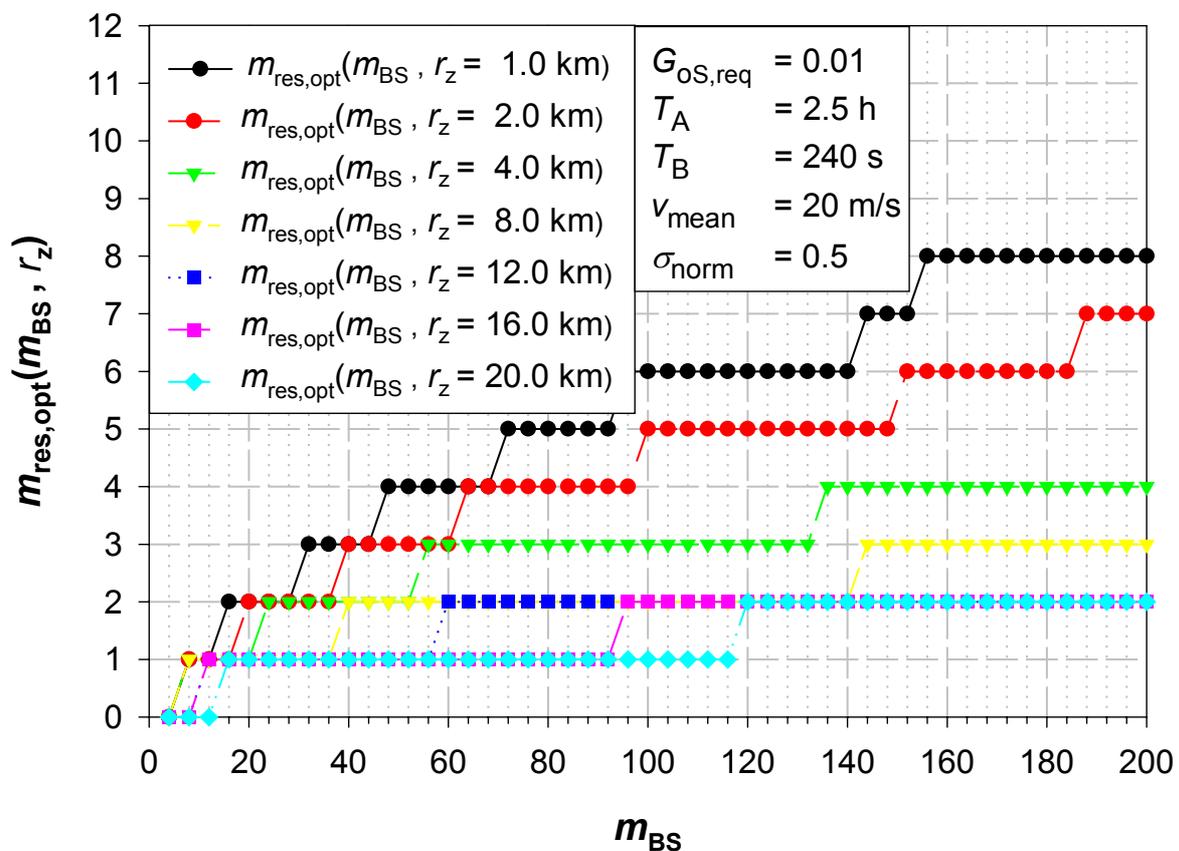


Bild 4.11 Optimale Anzahl exklusiv für Handover reservierter Kanäle $m_{res,opt}$

Für abnehmende Funkzellenradien muss bei einer optimalen Dimensionierung eine größere Anzahl von Kanälen $m_{res,opt}$ für Handover reserviert werden, um die zunehmende Anzahl von Handovern bei kleineren Funkzellenradien erfolgreich durchführen zu können. Bei zunehmender Anzahl der zur Verfügung stehenden Übertragungschanäle m_{BS} erhöht sich die Anzahl der Mobilfunkteilnehmer M_{BS} , die durch die Basisstation versorgt werden können. Deshalb sind bei zunehmenden Werten m_{BS} auch mehr für Handover reservierte Kanäle vorzusehen.

Der relative Anteil an für Handover reservierten Kanälen bezogen auf die Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle m_{BS} nimmt jedoch ab.

Der Handover-Einfluss lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Der Anteil an für Handover benötigten Ressourcen nimmt mit abnehmendem Funkzellenradius stark zu.

Der Anteil an für Handover benötigten Ressourcen nimmt mit zunehmender Anzahl von Übertragungskanälen m_{BS} ab.

Designregel: Es sind bei kleinen Funkzellenradien wenn möglich Basisstationen mit einer großen Anzahl von Übertragungskanälen m_{BS} einzusetzen (Bild 4.10), um den Anteil der für Handover reservierten Kanäle zu minimieren.

4.1.2.9 Näherungslösung ohne Iteration der Handover-Rate λ_H

Bei der Berechnung der Verkehrsgüte ist für die Berechnung der Handover-Rate die durch Gleichung (2.84) wider gegebene Näherungslösung möglich. Dadurch lassen sich rechenzeitintensive Iterationen vermeiden. In Bild 4.12 ist der relative Fehler $E_{\text{appr}|M_{BS,\text{norm}}}$ bei Verwendung der Näherungslösung für die Handover-Rate λ_H bei der Berechnung der Anzahl der möglichen Sprachdienst-Teilnehmer pro Übertragungskanal $M_{BS,\text{norm}}$ dargestellt. Die Aussage in Gleichung (2.85) für die Abweichung $\Delta\lambda_H$ zeigt, dass die Abweichung kleiner als die Verkehrsgüte ist, kann auf Größe $M_{BS,\text{norm}}$ übertragen werden. Die Verwendung ist bei der Dimensionierung der Anzahl der erforderlichen Kanäle der Basisstation bei der Versorgung von Multiservice-Teilnehmern von entscheidender Bedeutung für die erforderlichen Rechenzeiten. Ohne diese Näherungslösung könnten in vielen Fällen die Berechnungen nicht auf handelsüblichen PC's ausgeführt werden.

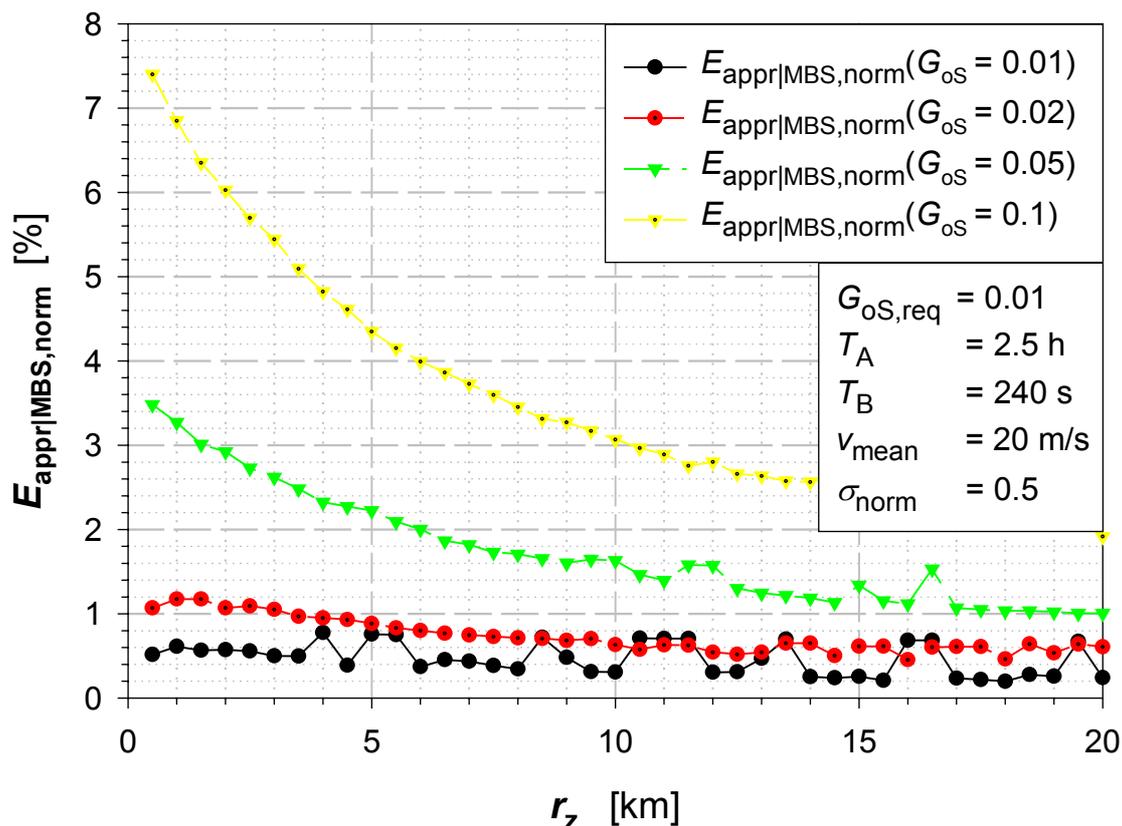


Bild 4.12 Relativer Fehler $E_{\text{appr|MBS,norm}}$, der bei Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode (ohne Iteration von λ_{H}) bei der zulässigen Teilnehmeranzahl pro Funkkanal $M_{\text{BS,norm}}$ auftritt

4.2 Verkehrskapazitätsanalyse von TDMA Systemen für Multiservice-Teilnehmer

MS-Teilnehmer stellen erhöhte Anforderungen an die Ressourcen eines Mobilfunksystems. Dadurch sind die Analyseverfahren und Ergebnisse des Sprachdienst-Teilnehmers nicht übertragbar. Im folgenden Abschnitt wird das Zugriffsverfahren des MS-Teilnehmers mit Hilfe von mehrdimensionalen Markoff-Modellen untersucht. Durch eine Dimensionalität von 3, hervorgerufen durch die 4 Zustände des betrachteten MS-Teilnehmers, ist die Anwendbarkeit des Verfahrens auf heutigen PC's bis zu einer Anzahl von ca. $m_{\text{BS}}=100$ Übertragungskanälen möglich. Für höhere Werte (ab 100) ist ein Näherungsverfahren entwickelt, dessen Rechenzeiten in der Größenordnung der Verfahren für den Sprachdienst-Teilnehmer liegen und somit für die in der Praxis vorkommenden Werte keine Begrenzung darstellen. Die Ergebnisse am

Ende des Abschnitts zeigen die Verkehrskapazität für ein System für MS-Teilnehmer und die optimal gewählte Anzahl der für Handover reservierten Kanäle. Zudem werden die möglichen Kapazitäten an MS-Teilnehmern und Sprachdienst-Teilnehmern verglichen. Dabei wurde für beide die gleiche nominelle Verkehrslast in Form des gleichen mittleren Kanalbedarfs angenommen.

4.2.1 Verkehrsmodell und Verkehrskapazitätsanalyse unter Berücksichtigung von Handover

Das Teilnehmerverkehrsmodell des MS-Teilnehmers bestimmt zusammen mit den spezifischen Eigenschaften des Zugriffsverfahrens das Verkehrsmodell des Mobilfunksystems, das MS-Teilnehmer mit Mobilfunkdiensten versorgt.

4.2.1.1 Verkehrsmodell des Multiservice-Teilnehmers und seine mathematische Beschreibung

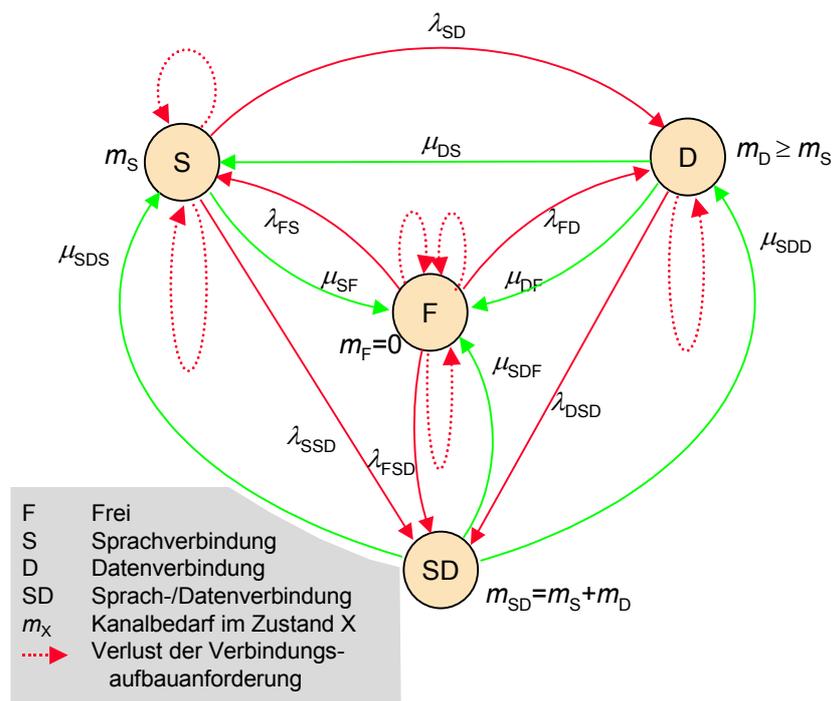


Bild 4.13 Markoff-Modell eines Multiservice-Teilnehmers

Das Teilnehmerverkehrsmodell des MS-Teilnehmers aus Kapitel 2 (Bild 2.4) wird in Bild 4.13 nochmals dargestellt. Dadurch sind die Zusammenhänge zwischen dem im folgenden in Kurzform als Systemverkehrsmodell bezeichneten Verkehrsmodell einer Basisstation des Mobilfunksystems und dem Teilnehmerverkehrsmodell leichter verständlich.

Das Verkehrsmodell des MS-Teilnehmers lässt sich mathematisch durch folgende Größen beschreiben:

1. durch den 4-dimensionalen Zustandsvektor

$$\underline{k}_T = [k_{SD}, k_D, k_S, k_F] \quad \text{mit} \quad k_{SD}, k_D, k_S, k_F \in \{1\} \wedge |\underline{k}_T| = 1 \quad , \quad (4.18)$$

2. den Zustandsübergangsvektor in den Zuständen $X=SD, D, S$ oder F

$$\Delta \underline{k}_T(v) = [\Delta k_{SD}(v), \Delta k_D(v), \Delta k_S(v), \Delta k_F(v)]$$

$$\text{für} \left(\begin{array}{l} \Delta k_X|_{k_X=1} = -1 \wedge k_Y = 1 \wedge k_Z = 0 \\ \forall Y \neq X \quad \forall X \neq Y \end{array} \right) \quad , \quad (4.19)$$

3. den Kanalbedarfsvektor in den Zuständen $X=SD, D, S$ oder F

$$\underline{m}_T(\underline{k}_T) = [m_{SD}, m_D, m_S, m_F] \quad \text{für} \left(\begin{array}{l} m_X \neq 0 \wedge m_Y = 0 \\ \forall Y \neq X \end{array} \right) \vee$$

$$\left(\begin{array}{l} m_X = 0 \wedge m_Y = 0 \\ X=F \quad \forall Y \neq X \end{array} \right) \quad , \quad (4.20)$$

4. die Zustandsübergangsmatrix des MS-Teilnehmers, in der die Übergänge mit ihren Raten zwischen den einzelnen Zuständen beschrieben sind,

Zustandsübergänge des MS-Teilnehmers			
Zustandsübergang v	Ausgangszustand $\underline{k}_{T,A}(v)$	Zustandsübergangsvektor $\Delta \underline{k}_T(v)$	Zustandsübergangsraten $q_T(v)$
	[SD, D, S, F]		
1	[0, 0, 0, 1]	[0, 0, 1, -1]	λ_{FS}
2	[0, 0, 1, 0]	[0, 0, -1, 1]	μ_{SF}
3	[0, 0, 0, 1]	[0, 1, 0, -1]	λ_{FD}
4	[0, 1, 0, 0]	[0, -1, 0, 1]	μ_{DF}
5	[0, 0, 0, 1]	[1, 0, 0, -1]	λ_{FSD}
6	[1, 0, 0, 0]	[-1, 0, 0, 1]	μ_{SDF}
7	[0, 0, 1, 0]	[0, 1, -1, 0]	λ_{SD}
8	[0, 1, 0, 0]	[0, -1, 1, 0]	μ_{DS}
9	[0, 0, 1, 0]	[1, 0, -1, 0]	λ_{SSD}
10	[1, 0, 0, 0]	[-1, 0, 1, 0]	μ_{SDS}
11	[0, 1, 0, 0]	[1, -1, 0, 0]	λ_{DSD}
12	[1, 0, 0, 0]	[-1, 1, 0, 0]	μ_{SDD}

Tabelle 4.1 Definition der Zustandsübergänge des MS-Teilnehmers

5. den Kanalbedarf für die Zustandsübergänge v :

$$\Delta m_T(v) = \underline{m}_T \cdot \Delta \underline{k}_T^T(v) \quad . \quad (4.21)$$

4.2.1.2 Verkehrsmodell einer Basisstation und seine mathematische Beschreibung

Das Verkehrsmodell der Basisstation bildet einen 4-dimensionalen Zustandsraum. Ein Zustand i ist definiert durch den Zustandsvektor

$$\underline{M}_i = [M_{SD}(i), M_D(i), M_S(i), M_F(i)] \quad \text{mit} \quad M_F(i) = M_{BS} - \sum_{\forall X \neq F} M_X(i) \quad . \quad (4.22)$$

Die Vektorelemente $M_X(i)$ sind die Anzahl der MS-Teilnehmer, die sich im Zustand X befinden (Abschnitt 4.2.1.1). Mit *aktiv* werden alle MS-Teilnehmer bezeichnet die mindestens einen Übertragungskanal belegen. Die Anzahl der aktiven Teilnehmer in der Funkzelle einer Basisstation, die sich im Zustand i befindet, ist

$$M_{Akt}(i) = \sum_{\forall X \neq F} M_X(i) \quad . \quad (4.23)$$

Die Anzahl M_{akt} ist die Summe aller MS-Teilnehmer, die sich nicht im Zustand ‚Frei‘ befinden. Die Teilnehmer im Zustand ‚Frei‘ belegen keinen Übertragungskanal, der Kanalbedarf m_F ist in diesem Zustand gleich Null.

Die Anzahl der belegten Übertragungskanäle einer Basisstation im Zustand i , der durch den Zustandsvektor \underline{M}_i beschrieben wird, ist

$$m_{BS,i} = \underline{M}_i \cdot \underline{m}_T^T \quad . \quad (4.24)$$

Die Größe \underline{m}_T^T ist der transponierte Kanalbedarfsvektor des MS-Teilnehmers aus Gleichung (4.20).

4.2.1.3 Verfahren zur Generierung des Zustandsraums des Verkehrsmodells und der Erstellung der Basis für die Zustandsübergangsmatrix

Der *Zustandsraum* besteht aus der Menge $\{\underline{M}_k\}$ der möglichen Zustände, in denen sich eine Basisstation in Bezug auf die Kanalbelegung befinden kann. Die Anzahl der möglichen Zustände wird bestimmt durch die Anzahl der Zustände im Teilnehmerverkehrsmodell und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle m_{BS} . Die Abhängigkeit von der Größe m_{BS} wird an den erforderlichen Rechenzeiten ersichtlich. Die Elemente der Zustandsübergangsmatrix sind definiert durch den Anfangszustand, den Folgezustand und der Zustandsübergangsrate.

Auslöser für Zustandsübergänge im Verkehrsmodell der Basisstation sind Zustandsübergänge bei den Teilnehmern in der Funkzelle der betrachteten Basisstation.

Im folgenden ist die Erzeugung des Zustandsraums (Bild 4.14) und der Zustandsübergangsmatrix beschrieben.

Berechnung des Folgezustands

Beginnend mit dem Initialzustand

$$\underline{M}_i = [0,0,0,0] \quad , \quad (4.25)$$

werden die Folgezustände \underline{M}_j erzeugt aus dem Ausgangszustand \underline{M}_i und durch einen Zustandsübergang v im Verkehrsmodell eines MS-Teilnehmers:

$$\underline{M}_j(v) = \underline{M}_i + \Delta \underline{k}_T(v) \quad . \quad (4.26)$$

Die Anzahl der MS-Teilnehmer im Zustand M_F wird durch den Startwert in Gleichung (4.25) auf $M_{Fj} = -M_{akt}(j)$ gesetzt. Zu einem späteren Zeitpunkt bei der Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten für eine bekannte Anzahl von Teilnehmern M_{BS} in der Funkzelle wird zu allen Werten M_{Fj} die Anzahl M_{BS} hinzuaddiert. Durch diese Vorgehensweise kann der nach Gleichung (4.25) und (4.26) generierte Zustandsraum für Berechnungen mit verschiedenen Werten für die Teilnehmeranzahl M_{BS} verwendet werden. Das Bild 4.14 zeigt an einem sehr einfachen Beispiel den Zustandsraum des Verkehrsmodells für $m_{BS} = 4$ Kanäle.

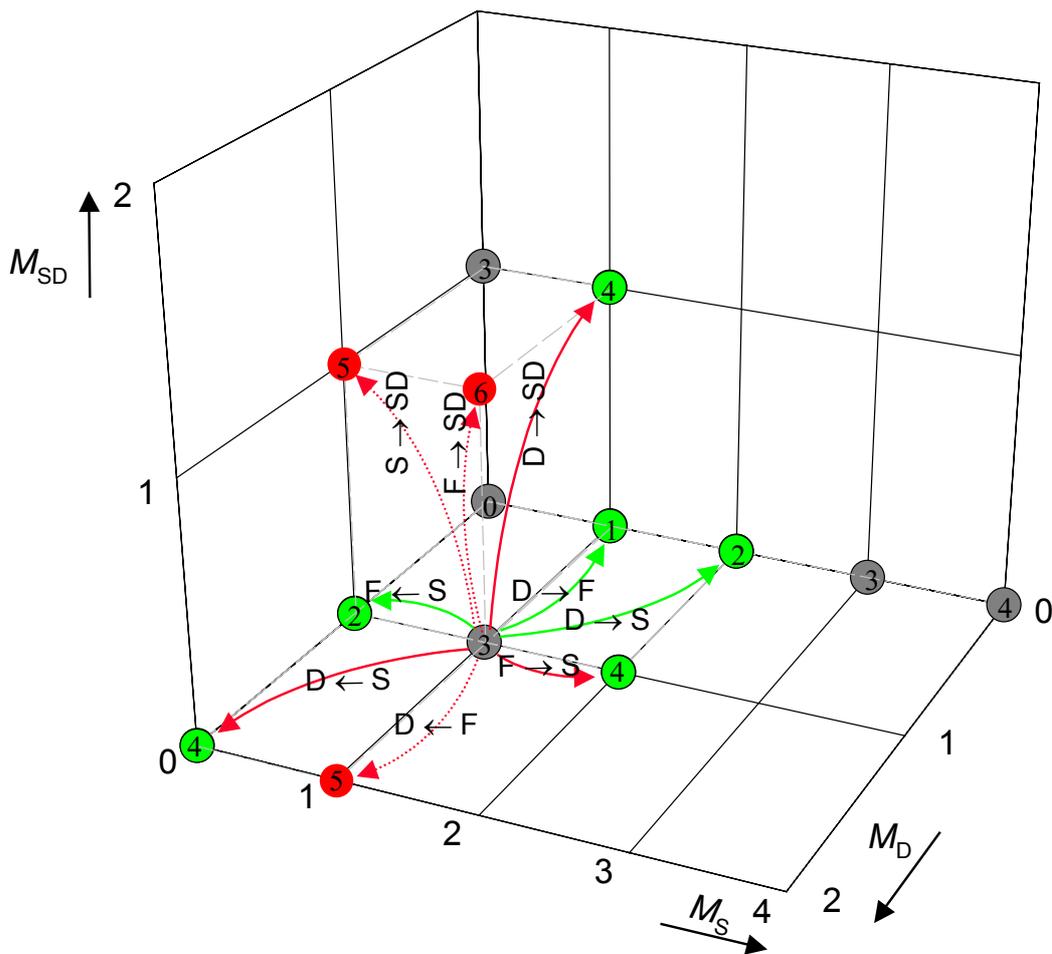


Bild 4.14 Beispiel eines Verkehrsmodells einer Basisstation mit $m_{BS}=4$ Übertragungs-kanälen

Nach der Berechnung des Zustands wird überprüft, ob dieser Zustand von der Basisstation erreicht werden kann und ob es sich um einen Zustandsübergang zu einem bereits berechneten Zustand im Zustandsraum handelt. Der Folgezustand \underline{M}_j ist nur unter der Bedingung zulässig, dass die Anzahl der Teilnehmer in den aktiven Zuständen SD, D, oder S nicht kleiner Null ist, und die Anzahl der im Zustand \underline{M}_j belegten Kanäle kleiner oder höchstens gleich der maximalen Anzahl der der Basisstation zur Verfügung stehenden Kanäle m_{BS} ist:

$$M_{j,X} \geq 0 \quad \wedge \quad m_{BS,j} \leq m_{BS} \quad \forall X \neq F \quad (4.27)$$

Die möglichen Zustände $\{\underline{M}_k\}$ sind in Bild 4.14 grün gefärbt. Nicht mögliche Zustände sind rot eingefärbt. Sie umgeben den Zustandsraum. Die roten Pfeile sind Belegungsversuche, die im Fall eines Verbindungsneuaufbauversuchs oder eines Handovers abgewiesen werden.

Im ersten Fall bestimmt ihre Anzahl die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit, im Falle des Handovers die Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit.

Erweiterung des Zustandsraums

Wenn die Bedingung in Gleichung (4.27) erfüllt ist, wird der bereits berechnete Zustandsraum $\{\underline{M}_k\}(i)$ nach dem Zustand \underline{M}_j durchsucht. Wenn der Zustand noch nicht vorhanden ist, wird der Zustandsraum um diesen Zustand erweitert, ansonsten bleibt er unverändert.

$$\{\underline{M}_k\}(j) = \begin{cases} \{\underline{M}_k\}(i) + \underline{M}_j(v) & \text{für } \underline{M}_j(v) \notin \{\underline{M}_k\}(i) \\ \{\underline{M}_k\}(i) & \text{für } \underline{M}_j(v) \in \{\underline{M}_k\}(i) \end{cases} \quad (4.28)$$

Erstellung der Basismatrix für die Zustandsübergangsmatrix

Wenn im Zustand \underline{M}_j die Bedingung aus Gleichung (4.27) erfüllt ist und somit ein zulässiger Zustand und auch ein zulässiger Zustandsübergang vorliegt, wird dieser Zustandsübergang als weiteres Vektorelement $u+1$ in der Basismatrix T_{BS} gespeichert. In dieser Basismatrix enthält das Element $u+1$ folgende Information:

$$T_{BS,u+1} = [i, j, v] . \quad (4.29)$$

Beschreibung des Algorithmus zur generischen Erzeugung des Zustandsraums und der Basismatrix

Die Basismatrix (Gleichung (4.29)) enthält den Index i des Ausgangszustands, den Index j des Folgezustands im Verkehrsmodell der Basisstation und den Index v des Zustandsübergangs im MS-Teilnehmerverkehrsmodell, das diesen Zustandsübergang bei der Basisstation ausgelöst hat. Diese Matrix wird als *Basismatrix zur Zustandsübergangsmatrix* bezeichnet, weil sie nicht die endgültigen Zustandsübergangsraten enthält, die von den gewählten Teilnehmerraten, dem Funkzellenradius und der Anzahl der Teilnehmer in der Funkzelle bestimmt ist, sondern nur die Basisinformation, um diese Raten zu ermitteln. Die generische Art des Inhalts ermöglicht es, für die unterschiedlichsten Parameter die zugehörigen Zustandsübergangsraten zu bestimmen, ohne die Übergänge im Zustandsraumes jedes mal neu bestimmen zu müssen. Erst durch diesen rechenzeitoptimierten Algorithmus ist es möglich, die Analysen für eine Vielzahl unterschiedlicher Parameterkombinationen, wie sie in Abschnitt 0 dargestellt sind, auf einem heute käuflichen PC (Taktfrequenz 1.8 GHz) durchzuführen. Im folgenden wird der Algorithmus kurz zusammengefasst.

Der sukzessive Aufbau des Zustandsraums beginnt mit dem Berechnen der Folgezustände des Ausgangszustands \underline{M}_0 (Gleichung (4.25)) für alle Zustandsübergänge ν des MS-Teilnehmers. Dadurch entstehen mit Hilfe von Gleichung (4.26) und der Zulässigkeitsbedingung in Gleichung (4.27) drei mögliche Folgezustände mit den Indizes 1 bis 3. Um diese drei neuen zulässigen Zustände wird der Zustandsraum $\{\underline{M}_k\}(i)$ nach Gleichung (4.28) erweitert. Zudem werden die Zustandsübergänge in der Basismatrix gespeichert. Danach wird im nun auf 4 Zustände angewachsenen Zustandsraum zum Zustand mit dem Index $i=2$ übergegangen und die zuvor beschriebenen Operationen für alle Zustandsübergänge ν des Teilnehmerverkehrsmodells durchgeführt. Danach für den Zustand mit dem Index $i=3$ u.s.w.. Der Berechnungsalgorithmus endet wenn alle möglichen Zustände i und alle möglichen Zustandsübergänge i nach j gefunden sind. Dies ist der Fall, wenn

$$\underline{M}_i = \underline{M}_{k_{\max}} \wedge \left(\underline{M}_j(\nu) \in \{\underline{M}_k\} \vee m_{\text{BS},j(\nu)} > m_{\text{BS}} \right) \quad (4.30)$$

gilt. D.h., beim gewählten Ausgangszustand i wurde der zuletzt berechnete Zustand mit dem Index k_{\max} erreicht und in diesem Zustand i wird kein neuer Zustand j generiert. Die Ursache dafür ist, dass für alle Zustandsübergänge ν der Folgezustand $\underline{M}_j(\nu)$ kein zulässiger Zustand ist (Gleichung (4.27) nicht erfüllt) oder die Zustände bereits zum existierenden Zustandsraum $\{\underline{M}_k\}(i)$ gehören.

Das Ergebnis der Generierung ist eine Basismatrix für die Zustandsübergänge im Verkehrsmodell einer Basisstation für die folgenden spezifischen Parameter:

m_{BS} : Anzahl der einer Basisstation zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle

\underline{m}_T : Kanalbedarfsvektor des Teilnehmers nach Gleichung (4.20)

$\Delta \underline{k}_T(\nu)$: Zustandsübergangsvektoren des Teilnehmers nach Gleichung (4.19).

Diese Basismatrix und die Matrix mit den zugehörigen Zustandsvektoren wird abgespeichert. Sie wird vor der Erzeugung der Zustandsübergangsmatrix für ein bestimmtes Szenario geladen und die Werte für die Raten anhand der spezifischen Parameter berechnet und anschließend an der betreffenden Stelle eingesetzt. Dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.2.1.4 Bestimmung der Zustandsübergangsraten für einen vorgegebenen Satz an Parametern.

Die Zustandsübergangsraten sind von folgenden Parametern abhängig:

M_{BS} : Anzahl der MS-Teilnehmer in der Funkzelle der Basisstation

$q_T(v)$:	Zustandsübergangsraten der MS-Teilnehmer
$p_n(\tau_{H,norm}, \rho_{norm})$:	Wahrscheinlichkeit für einen Handover für einen Teilnehmer, der seinen Verbindungsaufbau bei dieser Basisstation initiiert hat
$p_h(\tau_{H,norm}, \rho_{norm})$:	Wahrscheinlichkeit für Handover eines Teilnehmers, der zuvor bereits durch Handover zu der betrachteten Basisstation gekommen ist
$\mu_{BH,norm}(\tau_{H,norm})$:	Faktor, um den sich die Verbindungsenderate bei der Basisstation - hervorgerufen durch Handover - veränderte
v_{mean} :	mittlere Teilnehmergewindigkeit
ρ_{norm} :	Streuung in der Teilnehmergewindigkeit (Parameter der WDF)

Zur Erzeugung der Zustandsübergangsmatrix für das Verkehrsmodell der Basisstation sind die Berechnungsschritte im folgenden beschreiben.

Laden des Zustandsraums (der Menge aller Zustandsvektoren $\{\underline{M}_k\}$) und der Basiszustandsübergangsmatrix T_{BS} , die für das Verkehrsmodell mit den Werten m_{BS} , \underline{m}_T und $\Delta \underline{k}_T(v)$ zuvor berechnet wurden (gemäß Abschnitt 4.2.1.3)

Berechnung der Anzahl der nicht aktiven Teilnehmer in den Zuständen des Zustandsraums

Für alle Zustände k ist in den Zustandsvektoren M_k in den Elementen $M_{k,X=F}$ die Anzahl M_{BS} zu addieren. Dort stand bisher die Anzahl der aktiven Teilnehmer $M_{akt}(j)$ in der Funkzelle mit negativem Vorzeichen. Nach der Addition von M_{BS} stehen dort die Anzahl der Teilnehmer, die keine Telekommunikationsverbindung aufgebaut haben.

Bestimmung der Handover-Wahrscheinlichkeiten und Handover-Raten

Die im folgenden beschriebenen Berechnungen basieren auf den Gleichungen in Abschnitt 2.2.2, in dem das neu entwickelte Handover-Modell für den MS-Teilnehmer beschrieben ist. Für die folgenden Berechnungen sind 2 Arten von Zustandsübergängen ν im Teilnehmerverkehrsmodell und damit bei den Zustandsübergangsvektoren in Gleichung (4.19) für Handover zu unterscheiden:

Fall 1: Für Zustandsübergänge ν mit $\Delta k_{TX=F}(\nu) = +1$: Zustandsübergänge in den Zustand „F“

Berechnung der Ersatzraten $\mu_{XF,E}$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.97)

Berechnung des Faktors $\tau_{HX,norm}$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.94)

Berechnung der Handover-Wahrscheinlichkeiten $p_{n,X}(\tau_{HX,norm})$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.82)

Berechnung der Handover-Wahrscheinlichkeiten $p_{h,X}(\tau_{HX,norm})$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.78)

Berechnung der Handover-Wahrscheinlichkeiten $\mu_{BH,X,norm}$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.92)

Fall 2: Für Zustandsübergänge ν mit $\Delta k_{TX=F}(\nu) = -1$: Zustandsübergänge ausgehend von Zustand „F“

Berechnung der Handoverrate $\lambda_{HX,norm}(\tau_{HX,norm})$ für $X=SD,D,S$ nach Gleichung (2.84)

Bestimmung der Zustandsübergangsraten im Verkehrsmodell der Basisstation

Für die folgenden Berechnungen sind 3 Arten von Zustandsübergängen ν im Teilnehmerverkehrsmodell und damit bei den Zustandsübergangsvektoren in Gleichung (4.19) für Handover zu unterscheiden. Die Gleichungen sind für Zustandsübergänge von \underline{M}_i nach \underline{M}_j beschrieben. Der den Zustandsübergang im Verkehrsmodell der Basisstation auslösende Zustandsübergang im MS-Teilnehmerverkehrsmodell wird mit ν bezeichnet.

Fall 1: Für Zustandsübergänge ν mit $\Delta k_{TX=F}(\nu) = +1$: Zustandsübergänge in den Zustand „F“

$$q_i(\nu) = M_X(i) \cdot \mu_{BH,X,norm} \cdot q_T(\nu) \quad \text{mit } X \in \{SD, D, S\} \wedge \Delta k_{TX}(\nu) = -1 \quad (4.31)$$

Fall 2: Für Zustandsübergänge ν mit $\Delta k_{TX=F}(\nu) = -1$: Zustandsübergänge ausgehend von Zustand „F“

$$q_i(\nu) = \begin{cases} M_F(i) \cdot (1 + \lambda_{H,X,\text{norm}}) \cdot q_T(\nu) & \text{für } m_{BS,i} + \Delta m_T(\nu) < (m_{BS,i} - m_{\text{res}}) \\ M_F(i) \cdot \lambda_{H,X,\text{norm}} \cdot q_T(\nu) & \text{für } m_{BS,i} + \Delta m_T(\nu) \geq (m_{BS,i} - m_{\text{res}}) \end{cases} \quad (4.32)$$

mit $X \in \{\text{SD}, \text{D}, \text{S}\} \wedge \Delta k_{TX}(\nu) = +1$

Fall 3: Für Zustandsübergänge ν mit $\Delta k_{TX=F}(\nu) = 0$: Zustandsübergänge, die weder von Zustand „F“ ausgehen noch in ihm enden

$$q_i(\nu) = \begin{cases} M_X(i) \cdot q_T(\nu) & \text{für } m_{BS,i} + \Delta m_T(\nu) < (m_{BS,i} - m_{\text{res}}) \\ 0 & \text{für } m_{BS,i} + \Delta m_T(\nu) \geq (m_{BS,i} - m_{\text{res}}) \end{cases} \quad (4.33)$$

mit $X \in \{\text{SD}, \text{D}, \text{S}\} \wedge \Delta k_{TX}(\nu) = -1$

Durch Einsetzen der berechneten Raten erhält man aus der Basismatrix die folgende Matrix:

$$S_{BS} = [i, j, q_{i,j}]. \quad (4.34)$$

Eine Zeile der Matrix S_{BS} enthält den Index des Ausgangszustands \underline{M}_i , den Zustandsindex j für den Folgezustand \underline{M}_j und die Zustandsübergangsrates $q_{i,j}$. Die Zustandsübergangsmatrix ist in der Regel „dünn“ besetzt (engl.: sparse). Die Speicherung von S_{BS} ist aus Gründen des Speicherplatzbedarfs in dieser Form empfehlenswert und Algorithmen zur Lösung von spärlich besetzten Matrizen anzuwenden.

Berechnen der Wahrscheinlichkeiten der Zustände im Verkehrsmodell der Basisstation

Für die Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen zur Ermittlung der Zustandswahrscheinlichkeiten für die Basisstation sind in die Diagonalelemente die Summe der Raten der Zustandsübergänge, die den Zustand \underline{M}_i verlassen, einzusetzen.

$$q_{i,i} = \sum_{\forall i \neq j} q_{j,i} \quad (4.35)$$

In der Zustandsübergangsmatrix Q in Gleichung besitzen die Spalten die Indizes i und die Zeilen die Indizes j . Die Zeile k von Q multipliziert mit dem unbekanntem Zustandvektor $\underline{\pi}$ ist die Gleichgewichtsbedingung für den Zustand $j=k$.

Da von den n Bestimmungsgleichungen für die n Zustände nur $n-1$ linear unabhängig sind, ist eine (hier ist es Zeile n) von ihnen durch die Normierungsbedingung für die Zustandswahrscheinlichkeiten zu ersetzen.

$$\begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & & q_{1,n} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & & & q_{2,n} \\ \vdots & & \ddots & & \\ q_{n-1,1} & & & q_{n-1,n-1} & q_{n-1,n} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \vdots \\ \pi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

Durch Lösen des linearen Gleichungssystem (4.36) sind die Zustandswahrscheinlichkeiten bestimmbar. Aus den Zustandswahrscheinlichkeiten π_k werden im folgenden Abschnitt die Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeiten $p_B(v)$ und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit $p_U(v)$ für die verschiedenen Zustandsübergänge v im Teilnehmermodell berechnet.

4.2.1.5 Ermittlung der Verkehrsgüte und der Teilnehmerverkehrskapazität für MS-Teilnehmer

Die Verkehrsgüte G_{oS} berechnet sich gemäß Gleichung (2.99) aus den Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeiten $p_B(v)$, den Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeiten $p_U(v)$ und den Gewichtsvektoren $\underline{\alpha}_B(v)$ und $\underline{\alpha}_U(v)$. Zur Bestimmung der Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeiten $p_B(v)$ werden alle Zustandsübergänge i,j im Zustandsraum gesucht für die nicht die ausreichende Anzahl von Übertragungskanälen $\Delta m_T(v)$ zur Verfügung steht. Dabei stehen die m_{res} für Handover reservierten Übertragungskanäle für den Aufbau neuer Verbindungen nicht zur Verfügung. Der Quotient in der Summe von Gleichung (4.37) berücksichtigt die bedingte Verzweigungswahrscheinlichkeit für einen Zustandsübergang v , wenn sich der Teilnehmer im Zustand k_T befindet.

$$p_B(v) = \sum_{\forall i,j | \Delta m_T(v) > m_{BS} - m_{res} - m_{BS,i}} \pi_i \left(\frac{q_T(v)}{\sum_{\substack{\forall u, \Delta k_{TX}(v) = -1 \wedge \\ \Delta k_{TX}(u) = -1}} q_T(u)} \right) \quad (4.37)$$

$$p_U(v) = \sum_{\forall i,j | \Delta m_T(v) > m_{BS} - m_{BS,i}} \pi_i \left(\frac{q_T(v)}{\sum_{\substack{\forall u, \Delta k_{TX}(v) = -1 \wedge \\ \Delta k_{TX}(u) = -1}} q_T(u)} \right) \left(\frac{p_n(v)}{1 - p_h(v)} \right) \quad (4.38)$$

Zu einer Verbindungsunterbrechung kommt es, wenn die Anzahl der im Zustand i freien, nicht belegten Übertragungskanäle $m_{BS} - m_{BS,i}$ kleiner ist als der Kanalbedarf $\Delta m_T(v)$. Der rechtsstehende Quotient in der Summe von Gleichung (4.38) berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit für einen erforderlichen Handover.

Die Berechnungen werden für alle Zustandsübergänge v im Teilnehmer-Verkehrsmodell durchgeführt und anschließend die Verkehrsgüte nach Gleichung (2.99) berechnet. Für die Berechnung der Teilnehmer-Verkehrsnennkapazität und die Optimierung der Anzahl der für Handover reservierten Kanäle können die gleichen Berechnungsverfahren wie für den Sprachdienst-Teilnehmer angewandt werden. Sie sind in Abschnitt 4.1.2 beschrieben.

4.2.1.6 Überprüfung des Algorithmus zur Verkehrskapazitätsanalyse einer Basisstation für MS-Teilnehmer

Zur Überprüfung der Ergebnisse und des Verhaltens wurden Teilnehmerraten in einem Bereich von 10^{-6} bis $7.3 \cdot 10^{-2}$ variiert. Die ermittelten Ergebnisse an den Rändern des Variationsbereichs wurden mit den mit Hilfe des Singleservice-Teilnehmerverkehrsmodells berechneten Werten verglichen.

Das *Singleservice-Teilnehmerverkehrsmodell* ermöglicht es, die Teilnehmerkapazität nicht nur für den Kanalbedarf $m_T = 1$, wie es mit dem Sprachdienst-Teilnehmermodell möglich ist, zu ermitteln, sondern für beliebige Werte aus der Menge der natürlichen Zahlen $|\mathbb{N}|$.

Die Teilnehmerraten werden so variiert, dass der mittlere Kanalbedarf m_T des Teilnehmers immer konstant auf $m_{BS,mean} = 0.073$ bleibt. In Bild 4.15 wurde die Rate λ_{FD} so erhöht, dass die Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands „D“ beim MS-Teilnehmers sich von $1.5 \cdot 10^{-4}$ auf $3.5 \cdot 10^{-2}$ erhöht. Gleichzeitig wurde die Rate λ_{FS} so zurückgefahren, dass die Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands „S“ von $7.3 \cdot 10^{-4}$ auf $3.5 \cdot 10^{-2}$ zurück geht. Die nominelle Last bleibt dabei konstant. Die Zustandswahrscheinlichkeit des Zustands „SD“ von ca $1 \cdot 10^{-5}$ ist vernachlässigbar.

An den Stellen, an denen zwei der drei Zustandswahrscheinlichkeiten $X=SD, D, S$ jeweils Null sind, liegt die Abweichung unter 1%. Dies wird auch in den rot eingekreisten Bereichen in Bild 4.18 sichtbar. Dort sind die Zustandswahrscheinlichkeiten $X=SD$ nahezu Null. Die Kurven starten näherungsweise bei dem Punkt der Sprachdienst-Teilnehmer und enden bei den Datendienst-Teilnehmern. Beim Übergang von nur sprachdienstbenutzenden Teilnehmern zu

nur datendienstbenutzenden Teilnehmern sinkt die zulässige Anzahl von Teilnehmern pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ stetig, obgleich das Verkehrsangebot konstant bleibt.

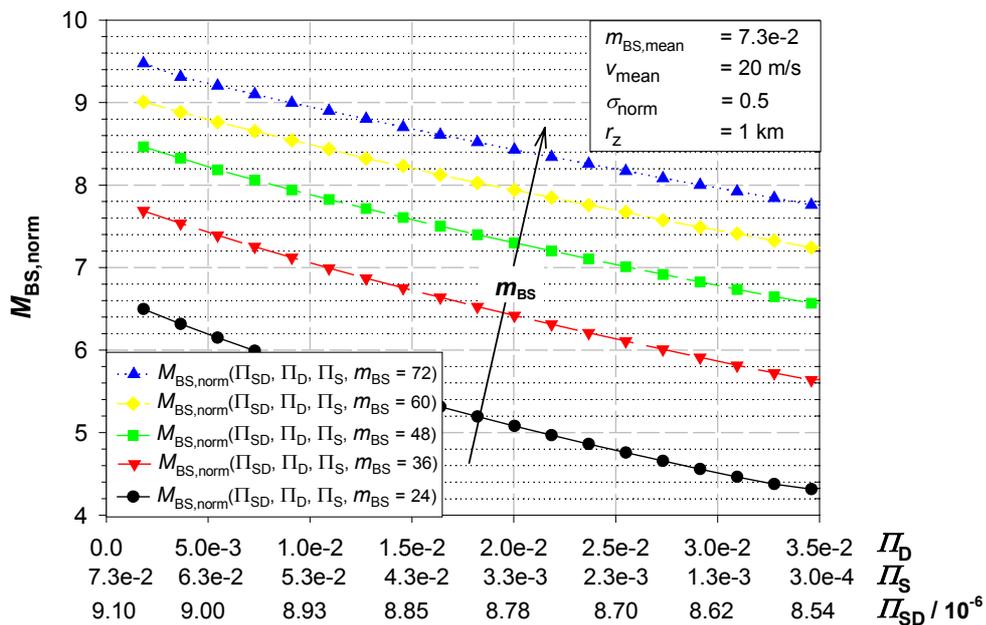


Bild 4.15 Zulässige Anzahl von MS-Teilnehmern pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ für unterschiedliche Sets an Übergangsraten aber bei konstantem Verkehrsangebot pro Teilnehmer

Dies verdeutlicht die Verringerung der Verkehrskapazität durch Teilnehmer, die Dienste benutzen, die mehr als einen Übertragungskanal belegen (Multiservice-Benutzer). Beim Vergleich eines Multiservice- Teilnehmers und eines Sprachdienst-Teilnehmers in Abschnitt 4.2.3 wird dies nochmals deutlich.

Die optimale Anzahl an für Handover zu reservierenden Kanälen hat dagegen nur eine leichte Tendenz zu größeren Werten bei einem Übergang von den nur sprachdienstbenutzenden Singleservice-Teilnehmern zu den nur datendienstbenutzenden Singleservice-Teilnehmern.

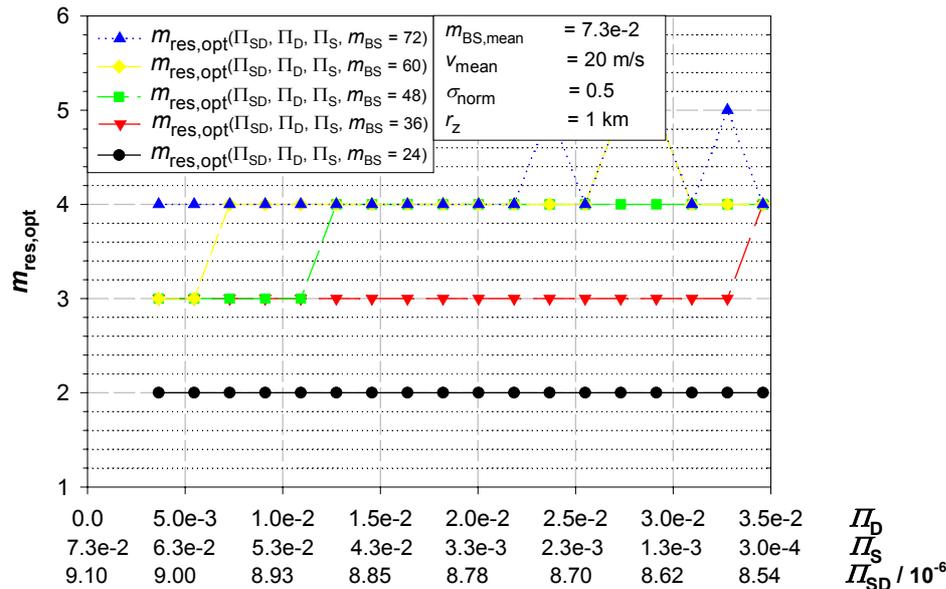


Bild 4.16 Optimale Anzahl der für Handover reservierten Kanäle $m_{res,opt}$ bei Variation der Teilnehmer-Zustandsübergangsraten bei konstantem Verkehrsangebot pro Teilnehmer

4.2.2 Näherungsverfahren zur Analyse von Systemen mit einer großen Anzahl von Übertragungskanälen m_{BS}

Die Verkehrsanalyse von Systemen für Multiservice-Teilnehmer ist mit heutigen PC's bis zu einer Anzahl von $m_{BS} \approx 100$ Übertragungskanälen möglich. Der begrenzende Faktor für die Genauigkeit der Ergebnisse ist die verwendete Anzahl an Digitalstellen bei Additionen und Subtraktionen. Die zweite Begrenzung ist die Rechenleistung, die bei Implementierung der Algorithmen in einer Interpreter-Programmsprache für die mehreren zehntausend Unbekannte umfassenden linearen Gleichungssysteme, zu Rechenzeiten von Stunden führen kann. Dies war die Motivation für das nachfolgend beschriebene, einfach anzuwendende Näherungsverfahren.

4.2.2.1 Beschreibung des Ersatzmodells

Das Ersatzmodell besteht aus drei Teilmodellen. Das oberste Teilmodell beschreibt näherungsweise den MS-Teilnehmer als Singleservice-Teilnehmer für den Sprachdienst mit dem Kanalbedarf $m_S = 1$. Im mittleren Teilmodell wird der MS-Teilnehmer näherungsweise als Singleservice-Teilnehmer für den Datendienst mit dem Kanalbedarf von $m_D = 2$ Übertra-

gungskanälen modelliert und im untersten Teilmodell als Singleservice-Teilnehmer für die Kombination Sprach-/Datendienst mit $m_{SD} = 3$ Übertragungskanälen.

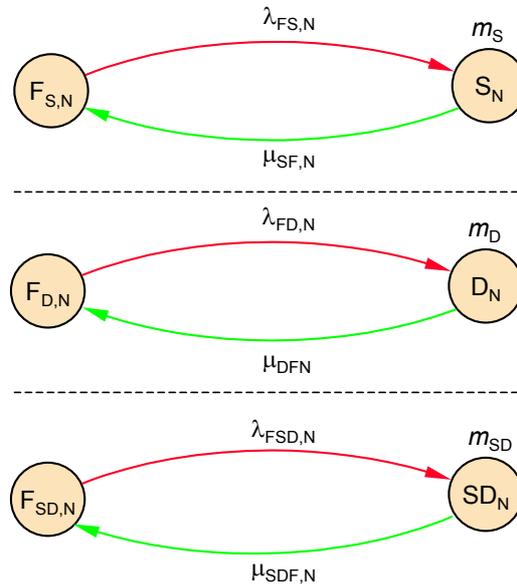


Bild 4.17 Ersatzverkehrsmodell einer Basisstation zur vereinfachten Bestimmung der Verkehrskapazität einer Basisstation für MS-Teilnehmer

Über die drei charakteristischen Größen mittlere Verweilzeit T_F des MS-Teilnehmers im Zustand „F“, seinen mittleren Kanalbedarf und den Kanalbedarf in den einzelnen Zuständen werden die Raten in den drei Ersatz-Teilmodellen bestimmt.

4.2.2.2 Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Die ersten drei Bestimmungsgleichung resultieren aus der Annahme, dass die mittleren Verweilzeiten $\bar{T}_{X,F,N}$ im Zustand $F_{X,N}$ in allen drei Ersatzmodellen gleich der mittleren Verweilzeit $\bar{T}_{F,MS}$ in dem MS-Teilnehmerverkehrsmodell sind. Die drei noch fehlenden Bestimmungsgleichungen werden in jedem der drei Ersatzmodelle X so bestimmt, dass der mittlere Kanalbedarf $\bar{m}_{X,N}$ gleich dem mittleren Kanalbedarf \bar{m}_{MS} des MS-Teilnehmers ist. Der mittlere Kanalbedarf eines Teilnehmers ist in Gleichung (2.10) definiert. Die Bestimmungsgleichungen sind im folgenden definiert.

1. Der Kanalbedarf in den drei Ersatzmodellen mit $X = SD, D$ und S wird jeweils gleich dem Kanalbedarf des MS-Teilnehmers im Zustand X gewählt.

$$m_{X,N} = m_{X,MS} \quad \text{für } X \in \{SD, D, S\} \quad (4.39)$$

2. Durch Gleichsetzen der mittleren Aufenthaltsdauern in den Zuständen $F_{X,N}$ der Ersatzmodelle mit der mittleren Aufenthaltsdauer im Zustand „F“ des MS-Verkehrsmodells lassen sich die Raten durch folgende Beziehung berechnen:

$$\lambda_{F,X,N} = \sum_{\forall Y \neq F} q_{MS,F,Y} \quad (4.40)$$

3. Die Raten $\mu_{X,F,N}$ sind durch

$$\mu_{X,F,N} = \frac{m_X - \overline{m_T}}{m_T} \lambda_{F,X,N} \quad (4.41)$$

bestimmt. Die Größe m_X ist der Kanalbedarf im Zustand X der MS-Teilnehmers.

Mit den auf diese Weise bestimmten Raten wird mit dem Singleservice-Modell für jedes Ersatzmodell X die Teilnehmer-Verkehrsnennkapazität $M_{BS,X,norm,appr}$ und die optimale Anzahl $m_{res,X,norm}$ der für Handover zu reservierenden Kanäle ermittelt.

Einem *Singleservice-Teilnehmermodell* steht nur ein Dienst zur Verfügung. Dieser Dienst kann mehr als einen Übertragungskanal belegen. Die Anzahl ist aber während der Dauer der Verbindung konstant. Dieses Verkehrsmodell ist eine Verallgemeinerung des Sprachdienst-Teilnehmer-Verkehrsmodells (Bild 4.5) auf $m_s \geq 1$ Kanäle.

Abschließend werden die Teilergebnisse gewichtet addiert. Für die Gewichtung der einzelnen Werte $M_{BS,X,norm}$ und $m_{res,X,norm}$ werden die Zustandswahrscheinlichkeit der Zustände im MS-Teilnehmermodell π_X linear und die Anzahl der belegten Kanäle $m_{T,X}$ mit der Potenz von 2 berücksichtigt. Die Elemente des unnormierten Gewichtsvektors für X sind

$$W_{X,unnorm} = \pi_X \cdot (m_{T,X})^2 \quad , \quad (4.42)$$

$$W_X = \frac{W_{X,unnorm}}{\sum_{\forall X} W_{X,unnorm}} \quad \text{für } X \in \{SD, D, S\} \quad . \quad (4.43)$$

Der Näherungswert für die Teilnehmer-Verkehrskapazität der Basisstation ist das Skalarprodukt aus dem Ergebnisvektor $\underline{M}_{BS,norm,appr}$ und dem Gewichtsvektor \underline{W}

$$M_{BS,norm,appr} = \underline{M}_{BS,norm,appr} \cdot \underline{W}^T \quad . \quad (4.44)$$

Den Näherungswert für die optimale Anzahl der für Handover reservierten Kanäle erhält man durch die gleiche Gewichtung der Teilergebnisse $\underline{m}_{res.,opt,appr}$.

$$m_{res,opt,appr} = \underline{m}_{res,opt,appr} \cdot \underline{W}^T \quad (4.45)$$

Eine lineare Gewichtung liefert im Gegensatz zu der quadratischen Gewichtung der Werte für den Kanalbedarf auch für größere Radien (größer 2 km, Bild 4.18) überhöhte Werte. Dies würde zu einer Unterdimensionierung des Systems führen. Die quadratische Gewichtung wurde gewählt, da sie die Verkehrskapazität in diesem Bereich um ca. 3-4% zu klein angibt, was als Sicherheitszuschlag angesehen werden kann.

4.2.2.3 Abweichungen der Näherungsverfahren

Bild 4.18 zeigt die Abweichungen für den Fall der Teilnehmervariation nach Abschnitt 4.2.1.6.

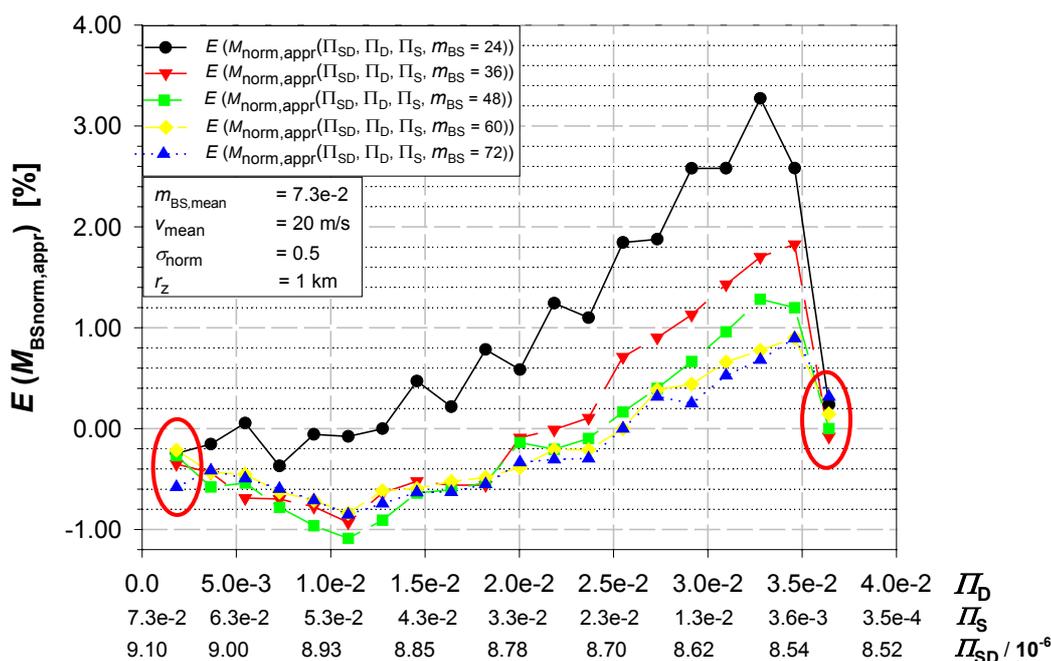


Bild 4.18 Fehler des Verfahrens zur näherungsweise Berechnung von $M_{BS, norm}$ bei Variation der Teilnehmer-Zustandsübergangsraten

Das Ergebnis zeigt eine maximale Abweichung von ca. 0% bis auf 3 Prozent ansteigend mit der Zunahme der Zustandswahrscheinlichkeit für die Datenübertragung mit $m_D = 2$ Übertragungskanälen. Kurz vor Erreichen der maximalen Zustandswahrscheinlichkeit für die Daten-

übertragung und der Wahrscheinlichkeit für den Sprachdienst von nahezu Null am rechten Ende der Kurve, erfolgt ein Zurückgehen der Abweichung auf fast Null.

Die Tests der Teilnehmervariation nach Abschnitt 4.2.1.6 sind aber für sich noch nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden die Abweichungen für einen MS-Teilnehmer ermittelt, bei dem die Wahrscheinlichkeit für die Benutzung aller Dienste gleich ist. Die Zustandsübergangsraten des Teilnehmers sind in Tabelle 4.2 zu finden.

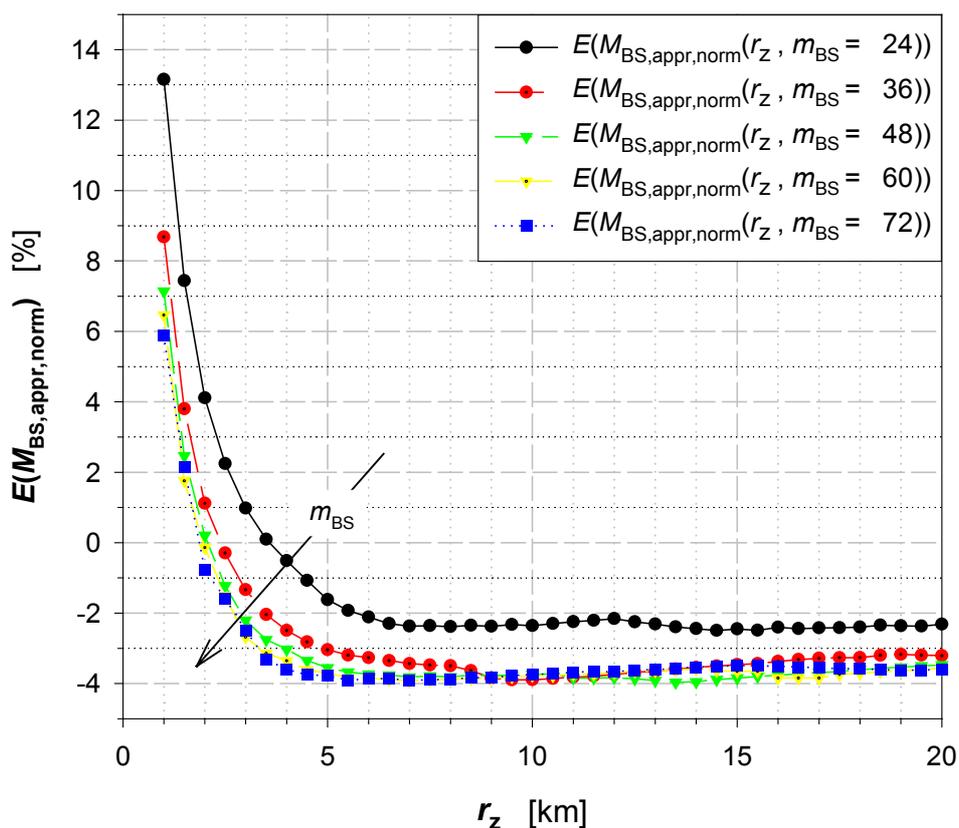


Bild 4.19 Abweichung des Verfahrens zur näherungsweise Berechnung der MS-Teilnehmerkapazität $M_{BS,norm}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl m_{BS} von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation

Das Näherungsverfahren zeigt für Funkzellenradien größer 2 km und bereits für Werte $m_{BS} \geq 36$ gute bis sehr gute Ergebnisse. Für kleinere Radien bis ca $m_{BS}=100$ sollten die Ergebnisse mit dem exakten Verfahren und mit dem Näherungsverfahren berechnet und die Abweichungen aus der Differenz der Ergebnisse ermittelt werden. Diese Abweichungen können dann zur Korrektur der Ergebnisse für größere Werte m_{BS} herangezogen werden, um die Genauigkeit in diesem Bereich zu verbessern.

4.2.3 Ergebnisse der Verkehrskapazitätsanalyse einer Basisstation für MS-Teilnehmer

Den analysierten Szenarien liegen die folgenden Parameter für den MS-Teilnehmer zu Grunde. Für die geforderte Verkehrsgüte $G_{oS,req}$ ist 0.01 ein üblicher Wert.

$G_{oS,req}$	WDF der Teilnehmergeschwindigkeit	v_{mean}	ρ_{norm}
0.01	Normalverteilung	20 m/s	0.5

Zustandsübergangsraten im MS-Teilnehmerverkehrsmodell											
λ_{FS}	μ_{SF}	λ_{FD}	μ_{DF}	λ_{FSD}	μ_{SDF}	λ_{SD}	μ_{DS}	λ_{SSD}	μ_{SDS}	λ_{DSD}	μ_{SDD}
$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 4.2 Gewählte Teilnehmer-Parameter des MS-Teilnehmers

In Bild 4.20 ist die Teilnehmer-Verkehrskapazität pro Kanal $M_{BS,X,norm}$ für die obigen Parameter dargestellt.

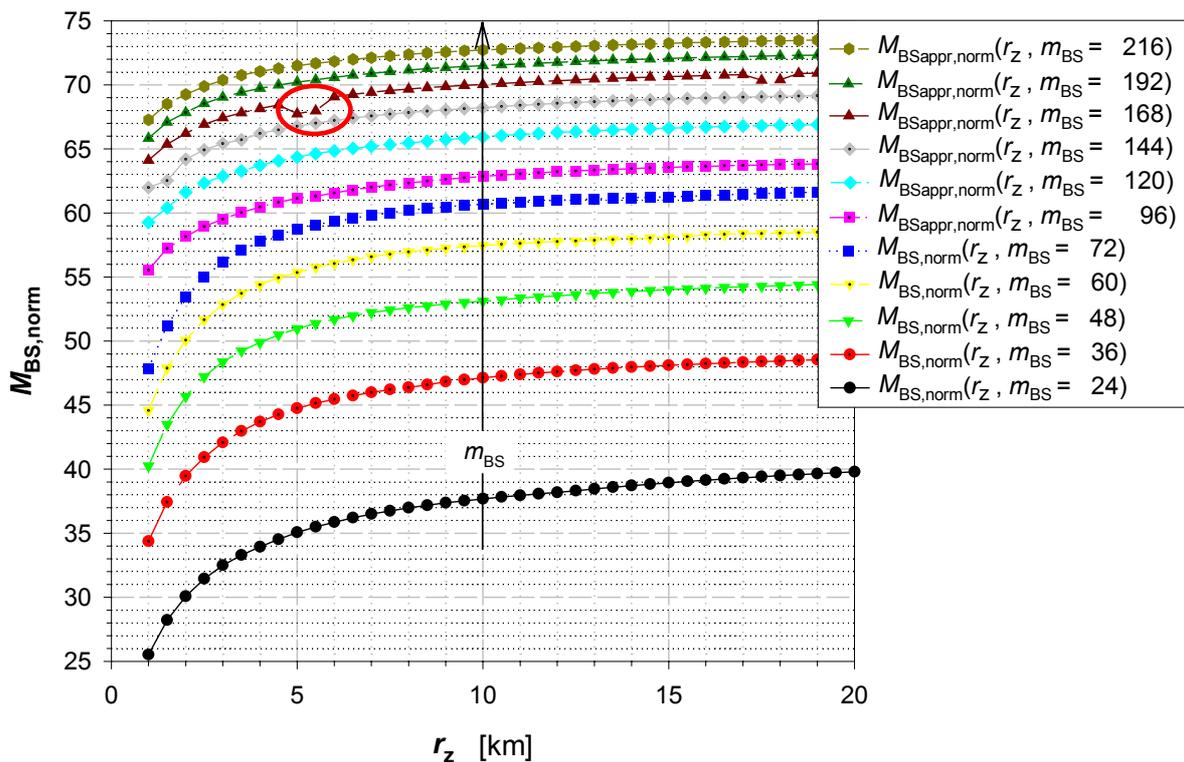


Bild 4.20 Zulässige Anzahl von MS-Teilnehmern pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl m_{BS} von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation

Der leichte Einbruch ist durch die schnelle Reduktion der optimalen Anzahl der reservierten Kanäle von 4 auf 2 (Bild 4.21) zu begründen. Die Wahl einer zu geringen Anzahl von reservierten Kanälen um ± 1 kann in Ausnahmefällen durch eine groß gewählte Abbruchschranke des iterativen Berechnungsverfahrens hervorgerufen werden. Die Abweichung von 1–2 % ist aber gering.

Die Kurven in Bild 4.20 sind von $m_{BS}=24$ bis 72 mit dem exakten Verfahren und von $m_{BS}=96$ bis 216 mit dem approximativen Verfahren berechnet. An diesen Kurven bestätigen sich die positiven Abweichungen bei Radien kleiner 2 km. Die Kurven sinken beim approximativen Verfahren nicht weit genug ab. Hier ist eine Korrektur nach unten erforderlich. Die Kurven haben einen ähnlichen Verlauf wie die Kurven des Sprachdienst-Teilnehmers (Bild 4.9). Für kleinere Radien allerdings sinken die Kurven beim MS-Teilnehmer jedoch sehr viel stärker ab. Dies zeigt, dass für den MS-Teilnehmer für Handover mehr Ressourcen erforderlich sind.

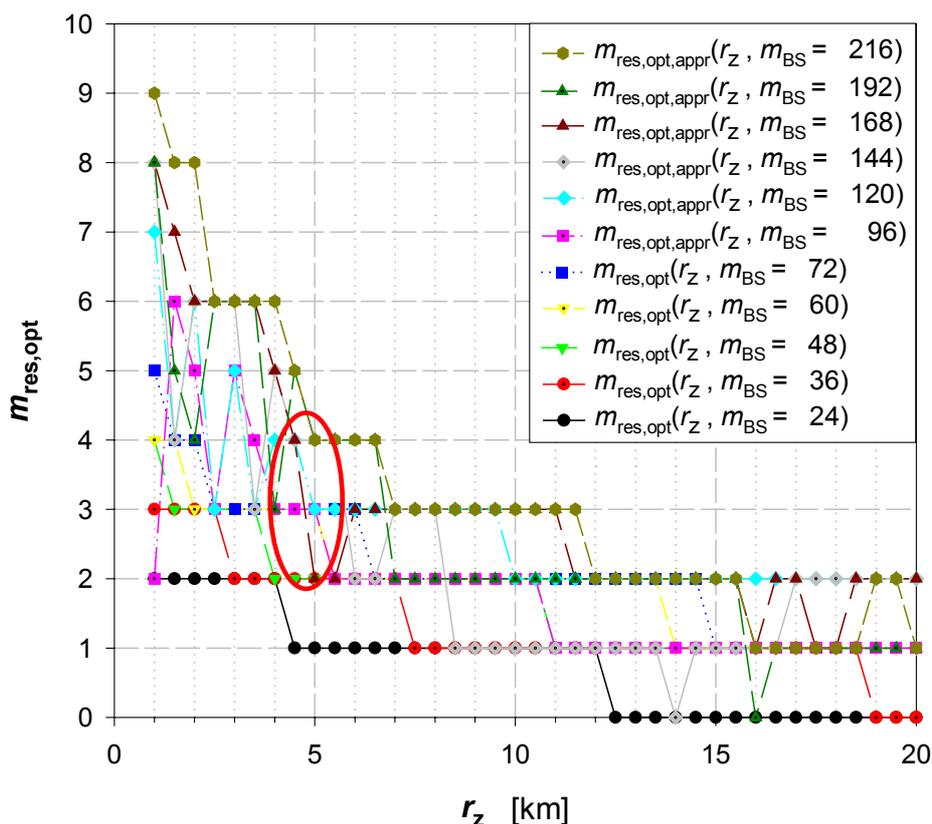


Bild 4.21 Optimale Anzahl für Handover reservierter $m_{res,opt}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation m_{BS}

In Bild 4.22 sind die Abweichungen bei der Verkehrskapazität zwischen dem Sprachdienst-Teilnehmer und dem MS-Teilnehmer deutlich erkennbar. Der rote Kreis zeigt die Auswirkungen einer um 1 zu niedrigen Anzahl für Handover reservierter Kanäle. Die für $r_z < 4\text{km}$ stark ansteigenden Kurven sind mit den exakten Analyseverfahren berechnet. Sie zeigen den starken Verlust an Teilnehmer-Kapazität für die MS-Teilnehmer. Das unterstreicht die Bedeutung des neu entwickelten Verfahrens zur Verkehrskapazitätsanalyse für den MS-Teilnehmer unter Berücksichtigung von Handover.

Bei der Anzahl der für Handover reservierten Kanäle für den MS-Teilnehmer ist der Bedarf an reservierten Kanälen nur leicht erhöht. Durch die geringere Teilnehmerkapazität ist aber der Anteil pro Teilnehmer erhöht.

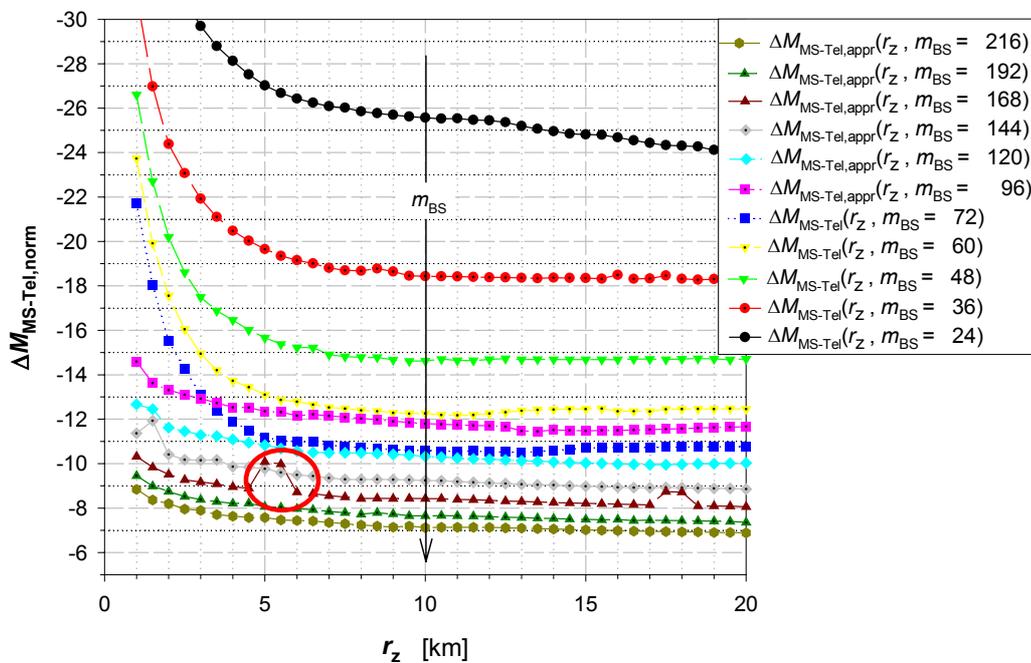


Bild 4.22 Abweichung der Teilnehmernennkapazität für den MS-Teilnehmer im Vergleich zu einem Sprachdienst-Teilnehmer mit dem Kanalbedarf $m_s = 1$ und dem gleichen mittleren Verkehrsangebot pro Teilnehmer

Die Werte $M_{\text{BSnorm}}(r_z, m_{\text{BS}})$ werden bei der Optimierung in Kapitel 5 in das Modul Zugriffsverfahren eingelesen.

Kapitel 5

Optimale Dimensionierung von Mobilfunksystemen

Das Ziel einer optimalen Dimensionierung von Mobilfunksystemen ist das Erreichen eines möglichst günstigen Verhältnisses von Gewinn zu eingesetztem Kapital unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit (Elektromagnetische Verträglichkeit, Störungen im Landschaftsbild durch Sendemasten). Den im folgenden beschriebenen Modulen der Optimierungsalgorithmen liegen zellulare Mobilfunksysteme zugrunde. Das entwickelte Modell und die Optimierungsalgorithmen sind aber durch das zugrunde liegende modulare Optimierungsmodell und durch die geeignete Wahl der Schnittstellen allgemein anwendbar. Für andere Systeme [26], die anstatt FDMA/TDMA z.B. Wide Band Code Division Multiple Access (WCDMA) [11] als Zugriffsverfahren verwenden, sind die betreffenden Module für die optimale Dimensionierung anzupassen [19].

Die Optimierung erfolgt in zwei Schritten (siehe Bild 5.1), die in Kapiteln 5.2 und 5.2.4 beschrieben sind. Im ersten Optimierungsvorgang wird der Funkzellenradius maximiert, so dass die zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie die zur Verfügung stehende Gesamtbandbreite B_{ges} und die erlaubte Sendeleistung optimal genutzt werden. Dabei wird das System so ausgelegt, dass die Übertragungsqualität (maximal zulässige Bit Error Rate BER oder Paketfehlerwahrscheinlichkeit p_p) am Rand der Funkzelle noch eingehalten wird. Die Verkehrsgüte G_{oS} wird bis zur vorgegebenen Teilnehmerdichte D_T gewährleistet. Als Ergebnis dieser Optimierung der Systemgrößen erhält man den maximalen Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(B_{\text{ges}}, D_T)$ in Abhängigkeit von der dem Mobilfunksystem zur Verfügung stehenden Bandbreite B_{ges} und einer vorgegebenen Dichte D_T von Mobilfunkteilnehmern. Durch die Teilnehmer-Parameter werden die für die Dimensionierung relevanten Bereiche des Teilnehmerverhaltens beschrieben.

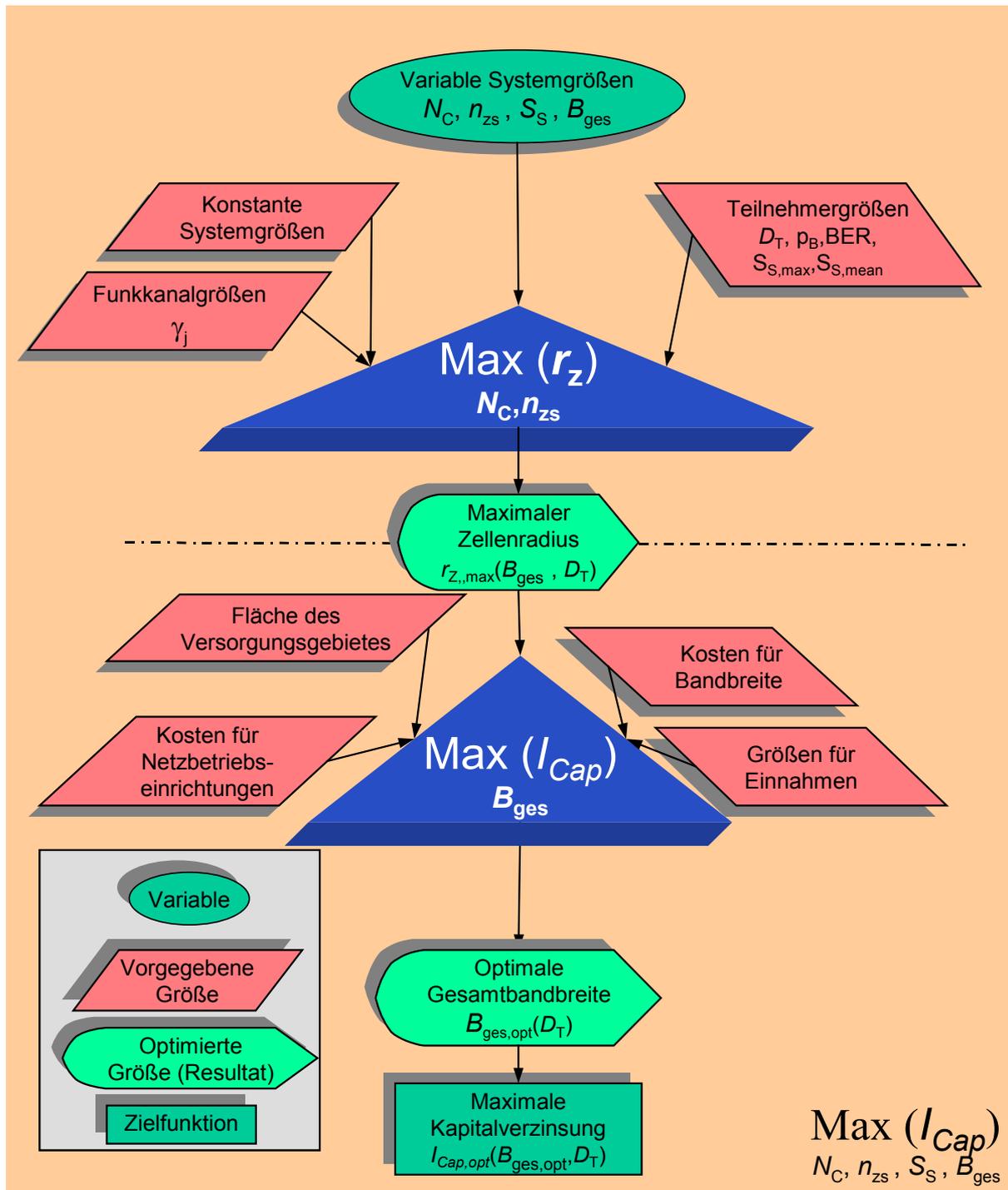


Bild 5.1 Algorithmus zur optimalen Dimensionierung von Mobilfunksystemen

Wie groß die Gesamtbandbreite B_{ges} für das System gewählt werden soll, hängt von den Kosten für diese in Relation zu den anderen Kosten und dem erforderlichen Kapital ab. Die für eine bestimmte Teilnehmerdichte D_T kostenoptimale Bandbreite $B_{ges,opt}(D_T)$ wird im zweiten Teil der Optimierung in Kapitel 5.2.4 bestimmt.

5.1 Maximierung des Gewinns

Der Gewinn P (profit), der durch ein Mobilfunksystem erzielt wird, ergibt sich aus den Einnahmen E abzüglich der aufgewendeten Kosten für Bandbreite K_B und der Kosten für die Bereitstellung des Netzes K_N . Der Gewinn P wird hier vereinfacht als die Differenz aus den Einnahmen, den Investitionskosten und den laufenden Kosten über den betrachteten Zeitraum (z.B. 1 Jahr) angenommen. Die Funktion für den Gewinn

$$P = E - (K_B + K_N) \quad (5.1)$$

enthält die einzelnen Faktoren für alle Kosten, die im betrachteten Zeitperiode anfallen. Die einmaligen Investitionskosten sind als Abschreibungskosten in der Zeitperiode in den Kosten berücksichtigt.

Pro Teilnehmer werden im Mittel Einnahmen in der Höhe γ_M im betrachteten Zeitraum angenommen. Der Faktor γ_M enthält die um die laufenden Kosten (Kundenbetreuung, Mobilfunkgerät-Subvention, ...) und Steuern bereinigten Einnahmen pro Teilnehmer im betrachteten Zeitraum. Die mit dem System erzielten Einnahmen sind

$$E = \gamma_M D_T F_N \quad (5.2)$$

Sie ergeben sich aus den mittleren Einnahmen pro Teilnehmer multipliziert mit der Anzahl der Teilnehmer im System. Die Anzahl ist gleich der Teilnehmerdichte D_T , multipliziert mit der Gesamtversorgungsfläche F_N .

Die Kosten für das Mobilfunksystem setzen sich aus den Abschreibungskosten

$$K_B = (C_B + \gamma_B B_{\text{ges}} F_N) / \tau_B \quad (5.3)$$

für die Bandbreite, die zur Verfügung gestellt wird (Lizenzgebühren, Kosten für die Sender in Abhängigkeit von der Bandbreite) und den Abschreibungskosten für den Aufbau und Betrieb des Netzes zusammen.

$$K_N = (C_N + \gamma_N F_N + \gamma_{BS} n_{BS}) / \tau_N \quad (5.4)$$

Diese Kosten K_N gliedern sich in die Abschreibungskosten für das Gesamtnetz, die unabhängig von der Anzahl der Basisstationen anfallen (Verwaltung, Netzmanagement, Datenbank-

system, ...) und den Abschreibungskosten für die Basisstationen γ_{BS} n_{BS} auf. Dabei wird mit n_{BS} die Anzahl der Basisstationen bezeichnet. Alle anderen laufenden Kosten sind, um die Ausdrücke überschaubar zu halten, bei den Nettoeinnahmen pro Teilnehmer γ_M bereits berücksichtigt. Eingesetzt in Gleichung (5.1) ergibt sich folgende Gewinnfunktion:

$$P(B_{ges}, D_T, F_N, r_z(B_{ges}, D_T), \gamma_M, C_B, \gamma_B, C_N, \gamma_N, \gamma_{BS}) = \gamma_M D_T F_N - \left[(C_N + \gamma_N F_N + \gamma_{BS} \cdot n_{BS}) / \tau_N + (C_B + \gamma_B B_{ges} F_N) / \tau_B \right] \text{ mit } n_{BS} = \frac{F_N}{F_{BS}} \quad (5.5)$$

Gegebene Größen:

γ_M	Um die laufenden Kosten und Steuern bereinigte Einnahmen pro Teilnehmer im Betrachtungszeitraum
D_T	Teilnehmerdichte im Versorgungsgebiet
F_N	Gesamtfläche des Versorgungsgebiets [km^2]
C_N	Investitionskosten für die zentralen Netzeinrichtungen
γ_N	Investitionskosten für zentrale Einrichtungen des Netzes pro Flächeneinheit [$1/\text{km}^2$]
γ_{BS}	Investitionskosten pro Basisstation
C_B	Fixkosten für das belegte Frequenzspektrum
γ_B	Einmalige Lizenzkosten pro Bandbreiteneinheit und Fläche [$1/(\text{km}^2 \text{ Hz})$]
τ_E	Abschreibungszeitraum für Betriebseinrichtungen
τ_B	Abschreibungszeitraum für Frequenzspektrum (= Gültigkeitsdauer der Lizenz)

Optimierungsgrößen:

B_{ges}	Gesamtbandbreite [Hz]
r_z	Funkzellenradius $\leq r_{z,max}(B_{ges}, D_T)$

Abgeleitete Größen:

n_{BS}	Anzahl der Basisstation des Mobilfunknetzes um die Fläche F_N zu versorgen (= F_N / F_{BS})
F_{BS}	Versorgungsfläche einer Basisstation [km^2] (siehe Gleichung (5.6))

Die Versorgungsfläche einer Basisstation ist bei Annahme eines Sechsecks mit dem Umkreisradius r_z :

$$F_{BS} = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_z^2 \quad (5.6)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5.6) in Gleichung (5.5) erhält man die Gewinnfunktion in Abhängigkeit von den Kostenfaktoren und den Optimierungsgrößen r_z und B_{ges} (Gleichung (5.7)). In der ersten runden Klammer ist die Abhängigkeit des Gewinns von der Größe des Funkzellenradius ersichtlich.

$$P(B_{ges}, D_T, F_N, r_z(B_{ges}, D_T), \gamma_M, C_B, \gamma_B, C_N, \gamma_N, \gamma_{BS}) = \gamma_M D_T F_N - \left[\left(C_N + \gamma_N F_N + \frac{2 \gamma_{BS} F_N}{3\sqrt{3} r_{z,max}^2(B_{ges}, D_T)} \right) / \tau_N + (C_B + \gamma_B B_{ges} F_N) / \tau_B \right] \quad (5.7)$$

mit $r_{z,min}(B_{ges}, D_T) \leq r_z \leq r_{z,max}(B_{ges}, D_T)$

Zur Beurteilung für die Wirtschaftlichkeit eines Mobilfunksystems ist nicht nur die Höhe des Gewinns maßgebend sondern das Verhältnis aus Gewinn und eingesetztem Kapital. Die sogenannte *Kapitalverzinsung* I_{cap} und ihre Optimierung wird in Abschnitt 5.3 bei der Optimierung der Gesamtbandbreite beschrieben.

5.1.1 Diskussion der Gewinnfunktion

Die obige Funktion (Gleichung (5.7)) enthält im Hinblick auf eine Optimierung zweierlei Arten von Faktoren, zum einen die fixen Parameter und zum anderen die Parameter, die in gewissen Grenzen frei gewählt werden können. Für diese freien Parameter werden im Hinblick auf die Gewinnmaximierung die optimalen Werte bestimmt.

5.1.1.1 Einfluss der gegebenen Größen auf die Gewinnfunktion

Die Faktoren γ_M und D_T bestimmen die Höhe der Einnahmen pro Flächeneinheit

Auf der Seite der Einnahmen ist ein hoher Wert für das Produkt aus der Teilnehmerdichte D_T und den Einnahmen pro Teilnehmer γ_M anzustreben. Durch ein attraktives Produktportfolio (Mehrwertdienste, Komplettanbieter an TK-Diensten), gutes Marketing, hohe Dienstgüte und guten Kundenservice können sowohl die Einnahmen pro Teilnehmer γ_M , als auch die Teilnehmerdichte D_T bis zur Grenze des Mobilfunkkundenpotentials erhöht werden. Dies verursacht aber auf der anderen Seite auch Mehrkosten. Auch für diesen Bereich gibt es ein Optimum. Die Optimierung von γ_M ist jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit.

Fläche des Versorgungsgebietes F_N

Die Gesamtbedeckungsfläche F_N ist im Bereich hoher Teilnehmerdichte möglichst groß zu wählen, damit die von der Fläche unabhängigen Fixkosten C_B für die Bereitstellung der Bandbreite und die Kosten für die zentralen Netzeinrichtungen pro Fläche minimal werden. Die Fläche F_N ist im allgemeinen jedoch nicht oder nur in gewissen Grenzen frei wählbar. Die Grenzen sind durch andere Faktoren wie Vorschriften des Gesetzgebers oder durch den gewünschten hohen Grad an Erreichbarkeit des Kunden vorgegeben. Sie kann somit für eine Optimierung als konstant betrachtet werden.

Kostenfaktoren für die Bandbreite C_B und γ_B

Diese Kostenfaktoren werden in Deutschland durch öffentlich rechtliche Behörden vorgegeben oder im Rahmen einer Versteigerung des Frequenzbandes ermittelt. Der konstante Faktor C_B ist der Fixkostenanteil (Zuteilungsgebühr) und somit unabhängig von der Breite des zuge teilten Frequenzbandes und der Größe des zugeteilten Versorgungsgebietes. Für die Berechnungen wurde ein deutschlandweites Netz angenommen. Der Kostenfaktor γ_B ist bestimmend für die vom belegten Spektrum und von der Größe des Versorgungsgebiets abhängigen Kosten.

Kostenfaktoren für die Netzbetriebseinrichtungen C_N , γ_N und γ_{BS}

Für die Optimierung sind die Kostenfaktoren C_N , γ_N und γ_{BS} fest vorgegebene Größen. Die Netzbetriebseinrichtungen sind so zu wählen, dass die Gesamtkosten (Investitionskosten + Betriebskosten + Kosten für die Bandbreite) unter Einhaltung der geforderten Dienstgüte insgesamt minimal werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Optimierung der Systemgrößen sind diese Werte dann als Konstanten einzusetzen.

5.1.1.2 Einfluß der variablen Größen r_z und B_{ges} auf die Gewinnfunktion

Funkzellengröße r_z

Die Größe des letzten Summanden in Gleichung (5.7) gibt die Kosten für die Basisstationen pro Flächeneinheit wieder. Dieser Kostenanteil fällt mit dem Faktor $(r_z)^{-2}$. Der Funkzellenradius r_z ist deshalb aus Kostengründen bei vorgegebener Gesamtbandbreite B_{ges} zu maximieren. In Abschnitt 5.2 wird gezeigt, wie die obere Schranke für den Funkzellenradius $r_{z,max}(B_{ges}, D_T)$ von den Systemparametern abhängt. Anschließend wird der Algorithmus beschrieben, der die Parameter des Mobilfunksystems so wählt, dass bei gegebener Bandbreite B_{ges} und Teilneh-

merdichte D_T der maximal mögliche Funkzellenradius unter Einhaltung der Dienstgüteanforderungen realisiert werden kann. Bei optimaler Wahl der Systemparameter ist der Funkzellenradius $r_z = r_{z,\max}(B_{\text{ges}}, D_T)$. Diese Maximierung ist der erste Schritt der Kostenoptimierung. Das Erreichen der jeweils maximalen Funkzellengröße ist gleichbedeutend mit einer Minimierung der Anzahl der benötigten Basisstationen. Dies optimiert wie oben gezeigt die Kosten und leistet zudem einen Beitrag zur Minimierung der Beeinträchtigung des Landschafts- oder Stadt-bildes.

Gesamtbandbreite B_{ges}

Bandbreite stellt eine knappe, nicht vermehrbare Ressource dar, die von einer übergeordneten Stelle vergeben wird. In Deutschland ist für die Lizenzvergabe die Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation (RPT) zuständig. Die Frequenzbänder für Mobilfunksysteme werden an den Meistbietenden versteigert. Damit wird die belegte Bandbreite ein bedeutender Kostenfaktor. Auf der anderen Seite ermöglicht eine große Gesamtbandbreite große Funkzellen und hohe Teilnehmerdichten. Dies ist durch Abhängigkeit des maximal möglichen Funkzellenradius $r_{z,\max}(B_{\text{ges}}, D_T)$ von der Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_T repräsentiert. Eine Kostenoptimierung bezüglich der Gesamtbandbreite B_{ges} wird in Abschnitt 5.2.4 durchgeführt.

5.2 Verfahren zur Maximierung des Funkzellenradius

Bild 5.2 zeigt die drei grundsätzlichen Fälle für die Begrenzung des möglichen Funkzellenradius in einem Mobilfunksystem.

Im Fall α) begrenzt die vorhandene Verkehrskapazität der Basisstation die Größe der Funkzelle. Bei einer vorgegebenen Teilnehmerdichte kann eine Basisstation unter Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte keine größeren Gebiete mit Telekommunikationsdiensten versorgen. Das zur Garantie der Übertragungsqualität erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) ρ_{\min} würde aber eine Ausdehnung des Funkzellenradius auf $r_{z,\text{SINR}}$ erlauben. Das ungenutzte Potential an SINR, das zur Bereitstellung der geforderten Übertragungsgüte nicht benötigt wird, kann über ein höherstufiges Modulationsverfahren oder eine Kanalcodierung mit größerer Coderate R_{Code} in Übertragungskapazität “umgewandelt” werden. Dabei nimmt der Radius $r_{z,\text{SINR}}$ durch das höhere erforderliche SINR ab, der maximale Radius zur Einhaltung der Verkehrsgüte $r_{z,v}$ nimmt aber zu, da mehr Teilnehmer durch die gestiegene Anzahl an Funkkanälen pro Basisstation m_{BS} versorgt werden können..

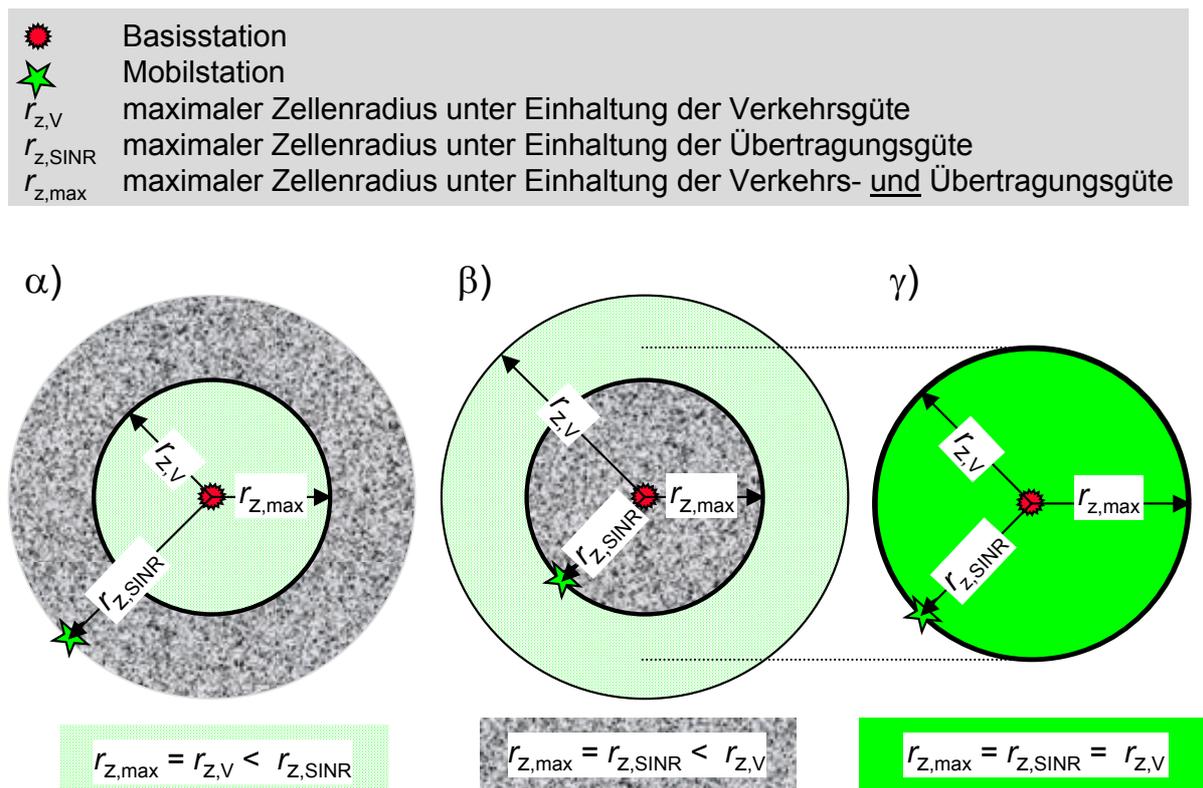


Bild 5.2 Drei mögliche Fälle nach der Dimensionierung eines Funksystems:
 α) kapazitätsbegrenzt, β) leistungs- bzw. störleistungsbegrenzt und im Fall γ) nach einer optimale Dimensionierung

Im Fall β) wurde ein Modulationsverfahren eingesetzt, das ein zu hohes SINR benötigt, oder einen zu geringen Teil der Datenrate für die Kanalcodierung verwendet, so dass ein Überschuss an Übertragungs- und somit Verkehrskapazität vorhanden ist. Der Funkzellenradius ist hier aufgrund des geforderten SINR begrenzt. In diesem Fall muss ein Übertragungsverfahren eingesetzt werden, das mit einem geringeren SINR auskommt, aber dadurch weniger Übertragungskapazität bereitstellt.

Der Fall γ) zeigt die Verhältnisse nach einer optimalen Dimensionierung wie sie im folgenden beschrieben ist. Die Anzahl der Modulationsstufen M_{Mod} und die Coderate R_{Code} der zugehörigen Kanalcodierung werden so gewählt, dass bei einem vorgegebenen Teilnehmerszenario, den gegebenen Eigenschaften des Funkkanals, der insgesamt zur Verfügung stehenden Bandbreite und dem ausgewählten Zugriffsverfahren weder in der Verkehrskapazität noch in der Übertragungsgüte ungenutztes Potential vorhanden ist. Eine optimale Einstellung dieser Systemgrößen wird über die Suche nach der optimalen Anzahl von Zeitschlitzten $n_{zs,opt}$ erreicht (Bild 5.3).

Ein weiterer Parameter aus dem Bereich der Frequenzplanung ist die Clustergröße N_C , die optimal im Hinblick auf die Maximierung des Zellenradius zu bestimmen ist. Ihre Erhöhung bedeutet einerseits weniger Trägerfrequenzen und somit weniger Funkkanäle, die einer Basisstation zur Verfügung stehen, andererseits eine Verbesserung des SINR. Eine optimale Wahl der oben beschriebenen Parameter hat zur Folge, dass die beiden Radien für die Einhaltung der Verkehrs- und der Übertragungsgüte zusammenfallen und somit der maximal mögliche Funkzellenradius erzielt wird (Bild 5.2, Fall γ).

Die Parameter für die Auslegung eines Funksystems sind optimal gewählt, wenn die Versorgung eines möglichst großen Gebiets mit Mobilfunkdiensten durch eine Basisstation unter Garantie der Dienstgüteanforderungen erreicht wird. Unterschieden werden die beiden Dienstgüteanforderungen Übertragungsgüte und Verkehrsgüte. Die Übertragungsgüte und die Verkehrsgüte sind in Abschnitt 2.3 definiert.

Der beschriebene Algorithmus zur optimalen Wahl der Systemgrößen N_C und n_{zs} ermöglicht es, durch eine Basisstation ein möglichst großes Gebiet abzudecken. Das folgende Bild zeigt die gegebenen Systemgrößen und jene Systemgrößen, die durch das Optimierungsprogramm optimal gewählt werden. Diese Werte bestimmen den maximal möglichen Funkzellenradius $r_{z,max}$. Die Optimierung erfolgt durch die Ermittlung der minimalen und maximalen Zellenradien $r_{z,min}(N_C, n_{zs})$ bzw. $r_{z,max}(N_C, n_{zs})$ für den realisierbaren Bereich der Clustergrößen N_C und für einen bestimmten Bereich der Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} . Die anderen Parameter sind fest vorgegebenen. Abschließend wird das Maximum der zweidimensionalen Funktion $r_{z,max}(N_C, n_{zs})$ ermittelt und die zugehörigen, optimalen Werte für die Systemgrößen N_C und n_{zs} bestimmt (siehe Bild 5.3). Ihre Bestimmung wird in Abschnitt 5.2.3 vorgenommen.

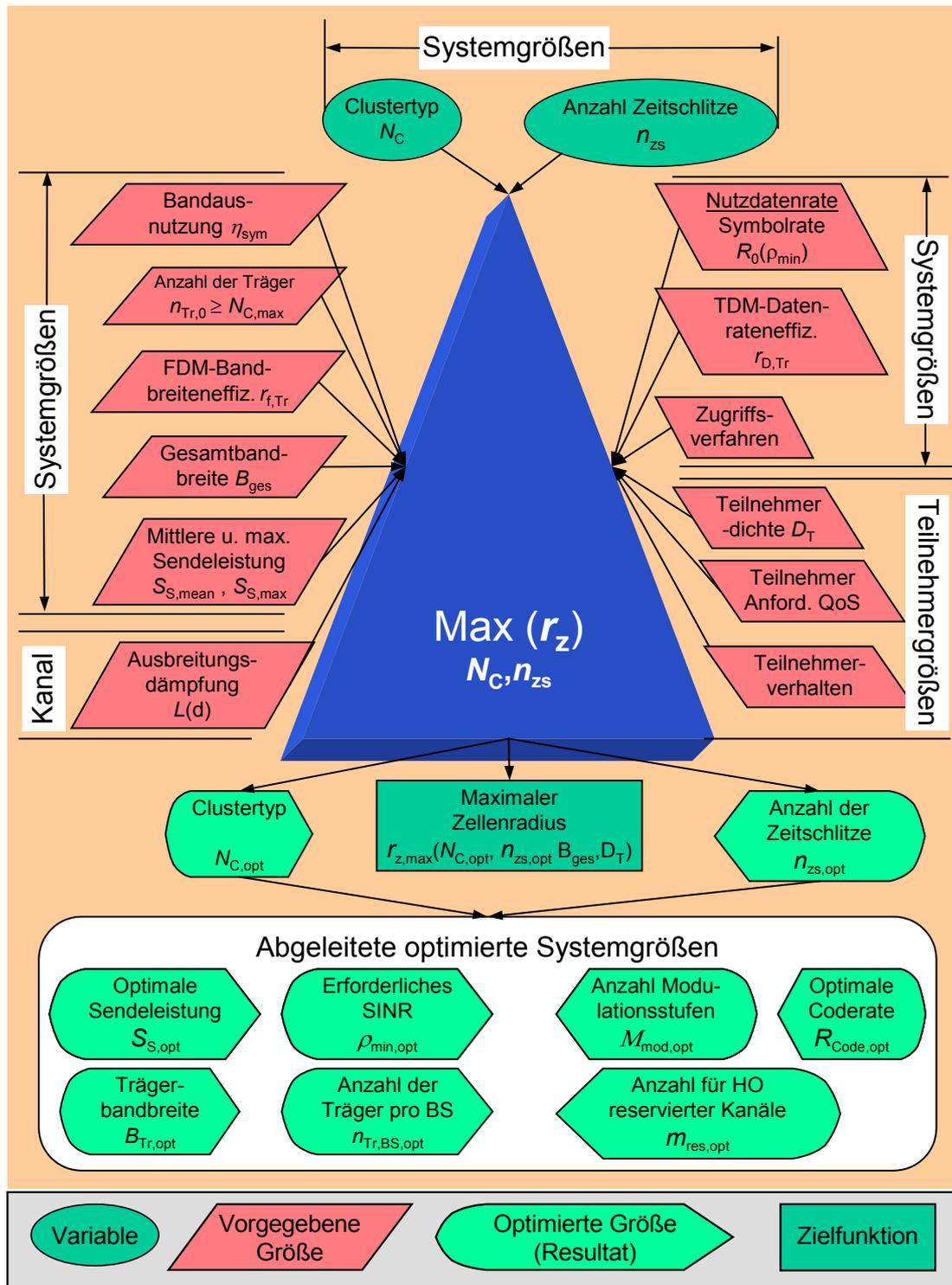


Bild 5.3 Eingangsparameter und die mit dem Algorithmus “MAX_RZ_DIM” optimierten Systemgrößen

Feste Systemgrößen bei der Maximierung des Funkzellenradius r_z

Teilnehmergrößen und konstante Systemgrößen

Die vorgegebenen festen Parameter sind die Teilnehmer-Parameter, die das Teilnehmerverhalten in Bezug auf die Benutzung der Telekommunikationsdienste und ihrer Mobilität beschreiben und die Teilnehmerdichte D_T . Sie bestimmen die Verkehrslast für das System. Zusammen mit dem Modulation-, Codier- und Zugriffsverfahren bestimmen sie die Verkehrskapazität des Systems.

Signalausbreitungsgrößen

Auf der anderen Seite stehen die Parameter wie Ausbreitungsdämpfung, Sendeleistung und der zugeteilte Frequenzbereich für das betrachtete System. Sie beeinflussen zusammen mit der Modulation und Kanalcodierung die Übertragungsgüte des Telekommunikationsdienstes. Die zur Verfügung stehende Bandbreite hat aber zudem über die Modulation und Codierung Einfluss auf die Übertragungskapazität des Systems.

Variable Systemgrößen bei der Maximierung des Funkzellenradius r_z

Variablen im Sinne des Optimierungsalgorithmus sind die Clustergröße N_C und die Anzahl der Zeitschlitz n_{zs} , die eine Variation der Übertragungskapazität bei gleicher Trägerbandbreite bedeuten. Sie wird erreicht durch Veränderung der Anzahl der Modulationsstufen M_{Mod} und/oder der Coderate bei der Kanalcodierung R_{code} .

Zur Optimierung der maximalen Versorgungsfläche einer Basisstation (maximaler Zellradius $r_{z,max}$) wird die optimale Clustergröße $N_{C,opt}$ und die optimale Anzahl von Zeitschlitz $n_{zs,opt}$ gesucht. Die anderen zu optimierenden Parameter in Bild 5.3 lassen sich dann mit Hilfe von $N_{C,opt}$ und $n_{zs,opt}$ berechnen.

Durch die Durchführung der Optimierungen mit unterschiedlichen festen Parametern kann deren Einfluss auf die Werte der optimierten Systemauslegung bestimmt werden. Ein wichtiger für diese Optimierung fester Parameter ist die Gesamtbandbreite B_{ges} . Dazu wird die im folgenden genauer beschriebene Optimierung zur Maximierung des Zellenradius für verschiedene Werte von B_{ges} und Teilnehmerdichten D_T durchgeführt. In Abschnitt 5.2.4 wird dann die Optimierung von B_{ges} beschrieben.

5.2.1 Die Einflussgrößen und die Komponenten eines Mobilfunksystems im Überblick

Die Aufgabe von Mobilfunksystemen ist die Bereitstellung von Telekommunikationsdiensten für mobile Teilnehmer. Dies erfordert eine Informationsübertragung mittels Funksignalen. Die in Kapitel 3 beschriebenen Randbedingungen wie Eigenschaften des Übertragungskanals, begrenzte Sendeleistung und zur Verfügung stehende Bandbreite bilden zusammen mit den Anforderungen durch den Teilnehmer den Ausgangspunkt des Systemdesigns eines Mobilfunksystems. Die für die Optimierung bedeutenden Komponenten sind:

das verwendete Multiplexverfahren, die Modulation/Kanalcodierung, die Signalausbreitung, die Frequenzplanung und das Kanalzugriffsverfahren. Die Komponenten und die Beziehungen zwischen ihnen sind in Bild 5.4 dargestellt.

die zur Verfügung stehende Bandbreite ist so aufzuteilen, dass sie von allen Teilnehmern des Mobilfunksystems gemeinsam genutzt werden kann. Die gemeinsame Nutzung der Gesamtbandbreite durch die Teilnehmer erfolgt durch die Kombination von Frequenz- und Zeitmultiplex, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben ist. Dadurch erhält man n_{Tr} Trägerfrequenzen und n_{zs} Zeitschlitze, die in Verbindung mit der Frequenzplanung m_{BS} Vollduplex-Kommunikationskanäle pro Basisstation ergeben. Diese Kommunikationskanäle stehen dem Zugriffsverfahren zur Bereitstellung der Kommunikationsdienste für die Teilnehmer innerhalb des Versorgungsgebietes zur Verfügung. Mit den m_{BS} Kanälen können unter Garantie der geforderten Verkehrsgüte (Abschnitt 2.3) maximal M_{BS} Teilnehmer versorgt werden. Diese maximale Anzahl von Teilnehmern pro Basisstation bestimmt zusammen mit der Teilnehmerdichte D_T das maximale Versorgungsgebiet einer Basisstation und somit den maximalen Funkzellenradius $r_{z,v,max}(N_C, n_{zs})$. Dieser ist von der gewählten Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} in der FDM/TDM-Struktur und der gewählten Clustergröße N_C bei der Frequenzplanung (Abschnitt 3.3.2) abhängig.

Die andere Begrenzung für die Funkzellengröße ist die Garantie einer geforderten Übertragungsgüte (Bit- bzw. Paketfehlerwahrscheinlichkeit). Sie ist im wesentlichen bestimmt durch das Modulationsverfahren und die Kanalcodierung im Zusammenhang mit den Eigenschaften des Funkkanals. Die Bereitstellung von n_{Tr} Trägerfrequenzen und n_{zs} Zeitschlitzen durch das Multiplexverfahren erfordert von der Modulation/Kanalcodierungseinheit die Bereitstellung einer Datenrate in Abhängigkeit von diesen beiden Größen.

$\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ voraus. Dieser geforderte Störabstand bestimmt zusammen mit den Kanaleigenschaften, der maximalen Sendeleistung S_S , der Rauschleistung und der Gleichkanalinterferenz den maximalen Funkzellenradius $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{zs})$, für den die Übertragungsgüte garantiert werden kann. Die mathematische Abbildung der fünf Komponenten (abgehobene Rechtecke in Bild 5.4) und deren Zusammenwirken ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.2.2 Mathematische Beschreibung der Komponenten

Für eine optimale Dimensionierung werden alle wichtigen Komponenten eines Mobilfunksystems berücksichtigt. Die Zusammenhänge und die Parameter zwischen den Bereichen sind in Bild 5.4 dargestellt. Die Komponenten, die bei der Optimierung berücksichtigt werden, sind Frequenzplanung (FCA), Zugriffs- und Multiplexverfahren, Modulation/Kanalcodierung und die Signalausbreitung.

5.2.2.1 Überblick über die Komponenten und deren Schnittstellen

Multiplexverfahren

Zuerst wird im Modul *Multiplexverfahren* die angestrebte Anzahl von $n_{\text{Tr},0}$ Trägerfrequenzen im System auf die N_C Basisstationen innerhalb eines Clusters aufgeteilt. Anschließend wird die Bandbreite der Träger $B_{\text{Tr}}(N_C)$ in Abhängigkeit von der verwendeten Clustergröße N_C berechnet. Die Nutzdatenrate pro Zeitschlitz wird gleich der minimalen Datenrate des Teilnehmers gesetzt. Die minimale Anzahl $n_{zs,\text{min}}$ von Zeitschlitzen pro TDM-Rahmen wird so gewählt, dass der maximale Datenratenbedarf durch Belegen eines TDM-Rahmens möglich ist (pro Teilnehmer nur eine Empfangs- und Sendeeinheit erforderlich). Mit dem maximalen Störabstand aus dem Modul *Signalausbreitung* werden über die Kennlinie Datenrate-zu-Symbolrate R_0 die maximal möglichen Werte für die Anzahl der Zeitschlitze $n_{zs,\text{max}}(N_C)$ pro TDM-Rahmen ermittelt.

Modulation/Kanalcodierung

Mit Hilfe der Trägerbandbreiten $B_{\text{Tr}}(N_C)$, der erforderlichen Nutzdatenrate $R_{D,\text{min}}$ und den Bereichen für die Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C werden im Modul *Modulation/Kanalcodierung* die erforderlichen Verhältnisse von Datenrate-zu-Symbolrate $R_0(N_C, n_{zs})$ ermittelt. Mit diesen Verhältnissen wird über die für das Modulationsverfahren charakteristische Kennlinie $\rho_{\min}(R_0)$ der erforderliche Störabstand $\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ bestimmt.

Signalausbreitung

Der Störabstand bestimmt im Modul *Signalausbreitung* zusammen mit der maximalen Sendeleistung, der Dämpfungskennlinie der Signalausbreitung und der Gleichkanalinterferenz die maximal möglichen Radien $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{zs})$, bei denen die Übertragungsqualität garantiert werden kann.

Frequenzplanung

Im linken Pfad in Bild 5.4 werden im Modul *Frequenzplanung* die maximale Anzahl $m_{\text{BS}}(N_C, n_{zs})$ von Vollduplex-Kommunikationskanälen pro Basisstation aus der Anzahl der Trägerfrequenzen $n_{\text{Tr}}(N_C)$ und der Anzahl n_{zs} der Zeitschlitze pro TDM-Rahmen ermittelt. In diesem Modul werden zusätzlich die normierten Abstände $D(N_C)$ zwischen den Gleichkanalzellen berechnet. Sie bestimmen das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis.

Kanalzugriffsverfahren

Das Modul *Kanalzugriffsverfahren* berechnet die maximale Funkzellengröße $r_{z,\text{V,max}}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit von den Teilnehmeranforderungen und der Teilnehmerdichte D_T . Dabei wird eine zweidimensionale Funktion $M_{\text{BS,norm}}(m_{\text{BS}}, r_z, G_{\text{oS}})$ zur mathematischen Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Zugriffsverfahrens (Kapitel 4) verwendet. Sie gibt die Anzahl der Benutzer pro Kommunikationskanal an, die von einer Basisstation mit den angebotenen Telekommunikationsdiensten unter Einhaltung der Verkehrsgüte G_{oS} versorgt werden können, wenn der Basisstation insgesamt m_{BS} Kommunikationskanäle zur Verfügung stehen und die Funkzellengröße r_z beträgt. Die Abhängigkeit der Teilnehmeranzahl pro Kanal von der Funkzellengröße resultiert aus dem Einfluss der Handover-Vorgänge auf die Leistungsfähigkeit der Zugriffsverfahren.

Aus den beiden Funktionen für die maximalen Radien zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte und der Verkehrsgüte, $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{zs})$ und $r_{z,\text{V,max}}(N_C, n_{zs})$, wird durch Bilden des Minimums der maximal mögliche Radius $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{zs})$ für die untersuchten Clustergrößen N_C und den Wertebereich der Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} , ermittelt. Aus der so gewonnenen Funktion für den maximalen Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{zs})$ wird das Maximum $r_{z,\text{max}}$ gesucht. Die Werte für die Clustergröße und die Anzahl der Zeitschlitze, an denen die Funktion maximal wird, ist $N_{C,\text{opt}}$ und $n_{zs,\text{opt}}$. Durch Einsetzen dieser Werte in die anderen Funktionen mit den Variablen N_C und n_{zs} , erhält man dann die optimalen Werte für die anderen Systemparameter (Bild 5.3).

5.2.2.2 Multiplexverfahren – FDM/TDM/FDD

Der für das System vorgesehene Frequenzbereich wird durch die Kombination von Frequenz- und Zeitmultiplex in Kommunikationskanäle (physikalische Kanäle) aufgeteilt. Dabei bilden jeweils zwei Kanäle in gleichen Zeitschlitz - aber auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen - ein FDD-Paar (Frequency-Division-Duplex-Paar). Eine genaue Beschreibung dieser Multiplexstruktur ist in Abschnitt 5.2.2.2 gegeben. Das Optimierungsverfahren kann auch bei Time-Division-Duplex angewandt werden, wenn anstatt n_{TrBS} zweimal n_{TrBS} für die Anzahl der Trägerfrequenzduplex-Paare pro Basisstation eingesetzt wird und beim Zugriffsverfahren berücksichtigt wird, dass jeder Teilnehmer Vielfache von zwei Zeitschlitz (Time-Division-Duplex-Paare) verwendet.

Festlegung der Anzahl $n_{\text{Tr,BS}}$ der Trägerfrequenzen pro Basisstation und ihrer Bandbreite B_{Tr}

Bei der Dimensionierung wird die Bandbreite $B_{\text{Tr},0}$ für die Träger vorgegeben. Die mögliche Anzahl der Trägerfrequenzen wird durch Aufteilen der für die Trägerfrequenzen nutzbaren Gesamtbandbreite $B_{\text{ges}} \cdot r_{\text{f,Tr}}$ in Trägerfrequenzbereiche mit der Bandbreite $B_{\text{Tr},0}$ nach Gleichung (5.8) ermittelt. Der Faktor $r_{\text{f,Tr}}$ gibt das Verhältnis zwischen nutzbarer Bandbreite und der Gesamtbandbreite (Summe der Trägerbandbreiten + Schutzbänder) an. Die Funktion ‘rnd’ ist die Rundung auf die nächste ganze Zahl. Die gewünschte Trägerbandbreite $B_{\text{Tr},0}$ sollte bei der Dimensionierung so gewählt werden, dass durch das Modulationsverfahren in Verbindung mit der Kanalcodierung die Nutzdatenrate (nach dem Kanalcodierer) pro Zeitschlitz $R_{\text{D,min}}$ auch bei möglichst kleinem SINR zur Verfügung steht. Die Anzahl der Trägerfrequenzen ergibt sich mit diesem Ansatz zu

$$n_{\text{Tr},0}(N_C) = \max \left(\text{rnd} \left(\frac{B_{\text{ges}} \cdot r_{\text{f,Tr}}}{B_{\text{Tr},0}} \right), N_C \right) , \quad (5.8)$$

und ist mindestens gleich der Clustergröße N_C . Dadurch ist gewährleistet, dass unabhängig von der Clustergröße jeder Basisstation mindestens ein Träger zur Verfügung steht.

Die Trägerfrequenzen werden auf die Basisstationen, die zu einem Cluster gehören, aufgeteilt. Für die Anzahl n_{TrBS} der Trägerfrequenzen pro Basisstation erhält man

$$n_{\text{Tr,BS}}(N_C) = \text{rnd} \left(\frac{n_{\text{Tr},0}(N_C)}{N_C} \right) \quad \text{rnd : ganzzahliges Runden} \quad (5.9)$$

Bild 5.2 zeigt die Anzahl der Träger pro Basisstation $n_{\text{TrBS}}(N_C)$ in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C .

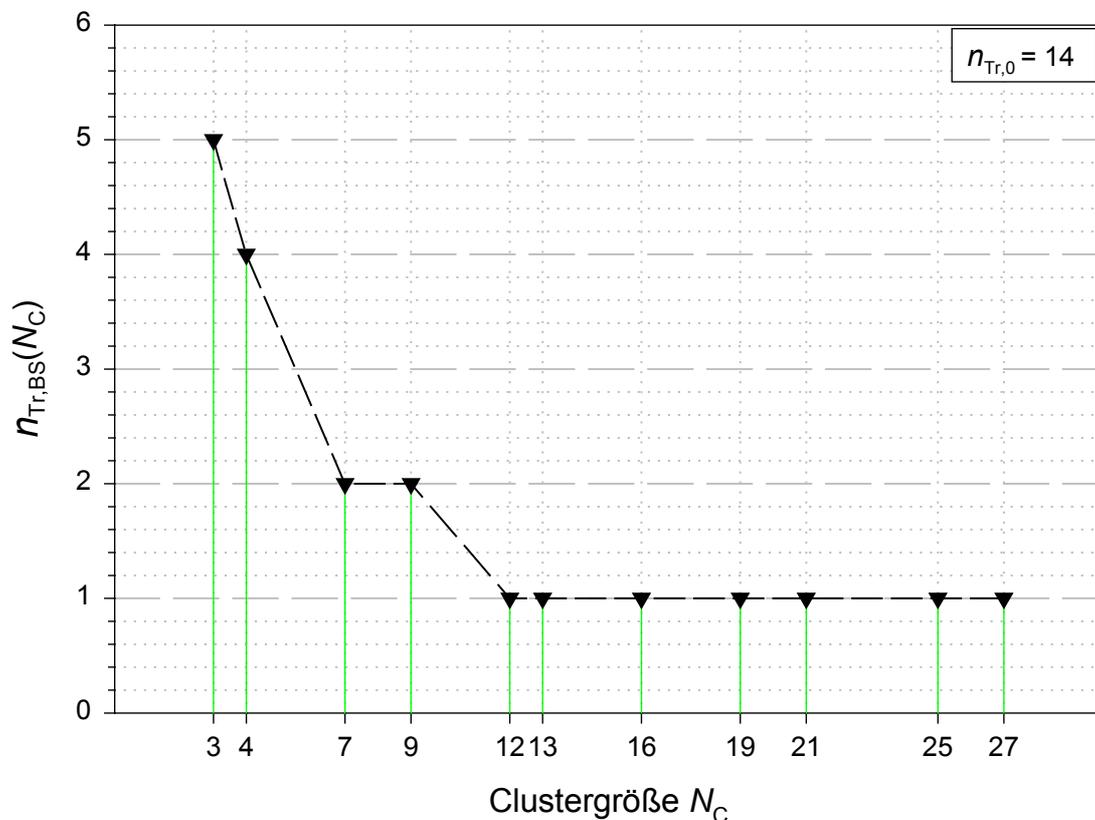


Bild 5.5 Anzahl $n_{\text{TrBS}}(N_C)$ der Trägerfrequenzen pro Basisstation in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C bei einer Gesamtbandbreite von $B_{\text{ges}}=3$ MHz und einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{\text{Tr},0}=200$ kHz

Die Anzahl der Träger ist für Werte $n_{\text{TrBS}}(N_C) \geq N_C$ näherungsweise umgekehrt proportional zur Clustergröße N_C .

Die Gesamtanzahl der Träger muss mindestens gleich der Clustergröße N_C sein. Die tatsächliche Anzahl von Trägern ist das Produkt aus N_C und n_{TrBS} . Die tatsächliche Anzahl von Trägern im System ist dann

$$n_{\text{Tr}}(N_C) = N_C \cdot n_{\text{TrBS}} = N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{\text{Tr},0}(N_C)}{N_C}\right) \quad (5.10)$$

Die *Nutzbandbreite* B_{Tr} eines Trägers ergibt sich aus der für das System zur Verfügung stehenden Gesamtbandbreite B_{ges} (= Bandbreite pro Cluster), dem Verhältnis von Nutzband- zur

Gesamtträgerbandbreite $r_{f,Tr}$, der Anzahl der Basisstationen pro Cluster N_C und der Anzahl der Träger pro Basisstation.

$$B_{Tr}(N_C) = \frac{r_{f,Tr} B_{ges}}{N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{Tr,0}(N_C)}{N_C}\right)} \quad (5.11)$$

Durch die Einschränkung der Anzahl $n_{Tr,BS}$ der Träger pro Basisstation auf ganzzahlige Werte bei vollständiger Belegung der Gesamtbandbreite B_{ges} ergibt sich eine Bandbreite der Träger, die von der Clustergröße abhängig ist.

Für die normierte Abweichung $\Delta B_{Tr}(N_C)$ der Bandbreite der Träger von der vorgegebenen Bandbreite der Träger $B_{Tr,0}$ gilt die Abschätzung

$$\Delta B_{Tr,norm}(N_C) = \left| \frac{B_{Tr}(N_C) - r_{f,Tr} B_{Tr,0}}{r_{f,Tr} B_{Tr,0}} \right| \quad (5.12)$$

$$\Delta B_{Tr,norm}(N_C) = \left\{ \begin{array}{ll} \leq \frac{N_C}{2 n_{Tr,0}(N_C) - N_C} & \text{für } n_{Tr,BS} > 1 \\ = \left| \frac{B_{ges} / N_C}{B_{Tr,0}} - 1 \right| & \text{für } n_{Tr,BS} = 1 \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

Dabei wurde der Einfluss der Rundung aus Gleichung (5.8) im oberen Teil von Gleichung (5.13) vernachlässigt, da dieser Einfluss um eine Größenordnung kleiner ist als der Einfluss der Rundung aus Gleichung (5.10).

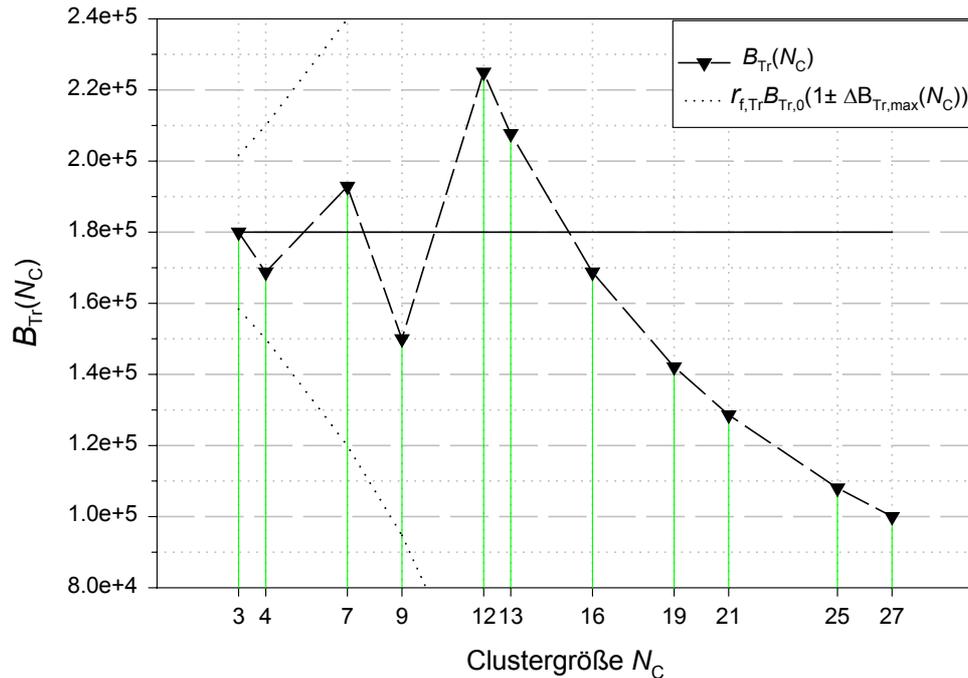


Bild 5.6 Bandbreite der Trägersignale in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C bei einer Gesamtbandbreite von $B_{ges}=3$ MHz und einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{Tr,0}=200$ kHz

Der maximale Schwankungsbereich wird in Bild 5.6 durch die gestrichelten Linien begrenzt. In der Praxis sind die vorgegebene Bandbreite $B_{Tr,0}$ und die verwendbaren Bandbreiten $B_{Tr}(N_C)$ in der gleichen Größenordnung, so dass für alle Clustergrößen N_C das gleiche Kanalmodell verwendet werden kann. Die quantitativen Unterschiede werden in den Berechnungen berücksichtigt. Die Gesamtbandbreite B_{ges} ist für alle Clustergrößen gleich, und somit sind die Ergebnisse für die verschiedenen Clustergrößen vergleichbar.

Die Anzahl der Trägerfrequenzen pro Basisstation ist für die Frequenzplanung (FCA) und die Trägerbandbreite B_{Tr} zur Bestimmung der Rauschleistung für die Signalausbreitung eine wichtige Einflussgröße.

Bestimmung der minimal erforderlichen Anzahl von Zeitschlitten $n_{zs,min}$

Die minimale Anzahl von Zeitschlitten ist so gewählt, dass die maximale Datenrate der Teilnehmer mit einem Sender und einem Empfänger pro Teilnehmer erreicht werden kann. Bei Belegung eines TDM-Rahmen muss dem Teilnehmer mindestens seine maximale Datenrate $R_{D,max}$ zur Verfügung stehen. Daraus ergibt sich eine minimale Anzahl von Zeitschlitten pro TDM-Rahmen von

$$n_{\text{zs}, \min} = \left\lceil \frac{R_{\text{D}, \max}}{R_{\text{D}, \min}} \right\rceil \cdot \quad (5.14)$$

Zusammen mit der maximal erforderlichen Anzahl $n_{\text{zs}, \max}(N_C)$ aus Gleichung (5.15) lassen sich die Bereiche $[n_{\text{zs}}(N_C)]$ für die Anzahl der Zeitschlitzte in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C angeben.

Bestimmung der maximal möglichen Anzahl von Zeitschlitzten $n_{\text{zs}, \max}(N_C)$ in Abhängigkeit der Clustergröße

Die maximal mögliche Anzahl von Zeitschlitzten für eine Clustergröße N_C ist von dem Maximalwert des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses $\rho_{\max}(N_C)$ abhängig. Sie werden im Modul *Modulation/Kanalcodierung* aus der Kennlinie $\rho(N_C, r_z)$ (Bild 5.15) ermittelt. Die Maximalwerte ergeben durch die Multiplikation mit dem Bandausnutzungsfaktor η_{sym} die Werte für die normierten, maximalen Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisse $\rho_{\text{norm}, \max}(N_C)$. Aus der Kennlinie, die das Verhältnis von Informationsdatenrate zu Symbolrate in Abhängigkeit vom normierten, Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (Bild 5.10) darstellt, lassen sich damit die maximal erreichbaren Verhältnisse $R_{0, \max}(\rho_{\text{norm}, \max}, M_{\text{Mod}}, b)$ bestimmen.

Aus $R_{0, \max}(\rho_{\text{norm}, \max}, M_{\text{Mod}}, b)$ ergibt sich die maximal mögliche Anzahl von Zeitschlitzten $n_{\text{zs}}^{(\max)}(N_C)$ durch Umstellen von Gleichung (5.28) und dem im Modul *Modulation/Codierung* ermittelten Wert $R_{0,1}(N_C)$.

$$n_{\text{zs}, \max}(N_C) = \frac{R_0(\rho_{\max}(N_C))}{R_{0,1}(N_C)} \quad \text{mit} \quad R_{0,1}(N_C) = \frac{\frac{R_{\text{D}, \min}}{r_{\text{D}, \text{ges}}} N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{\text{Tr},0}(N_C)}{N_C}\right)}{\eta_{\text{sym}} r_{\text{f}, \text{Tr}} B_{\text{ges}}} \quad (5.15)$$

Dieser Wert ist das Verhältnis R_0 , das für die Realisierung von Zeiträumen mit einem Zeitschlitz erforderlich ist. Höhere Werte für die Anzahl der Zeitschlitzte als $n_{\text{zs}, \max}(N_C)$, sind aufgrund des vorhandenen maximalen SINR nicht realisierbar. Bild 5.7 zeigt die maximal erreichbare Anzahl von Zeitschlitzten. Sie steigen aufgrund des zunehmenden maximalen SINR mit der Clustergröße N_C an, wobei sich der Anstieg abschwächt. Der Einbruch für $N_C=25$ resultiert aus der geringen Bandbreite von 180 kHz, die sich bei der Aufteilung der Gesamtbandbreite B_{ges} für diese Clustergröße ergibt.

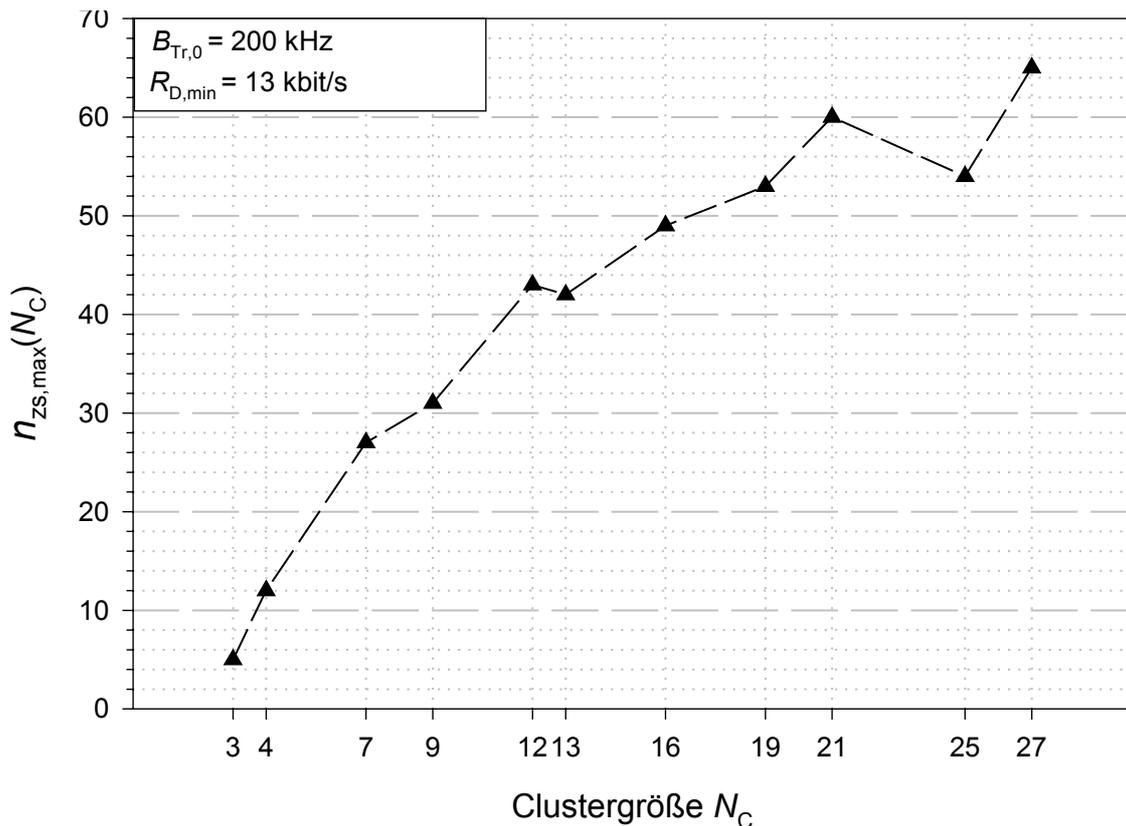


Bild 5.7 Anzahl der maximal realisierbaren Zeitschlitz in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C , einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{Tr,0}=200$ kHz und bei einer Datenrate von $R_{D,min}=13$ kbit/s pro Zeitschlitz

Diese Werte bestimmen zusammen mit der Anzahl der Trägerfrequenzen die Anzahl der Kommunikationskanäle $m_{BS}(N_C, n_{zs}(N_C))$ pro Basisstation. Die Berechnung erfolgt im Modul *FCA*. Für alle Werte n_{zs} kann mit Hilfe von Gleichung (5.28) in Abschnitt 5.2.2.2 das erforderliche $R_0(N_C, n_{zs})$ ermittelt werden. Die Bestimmung der erforderlichen Datenraten pro Trägerfrequenz, die dafür notwendigen Verhältnisse von Datenrate/Symbolrate $R_0(N_C, n_{zs})$ und das dazu erforderlichen Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho_{min}(N_C, n_{zs})$ wird im folgenden Abschnitt 5.2.2.3 durchgeführt.

5.2.2.3 Modulation und Kanalcodierung

Der Einfluss von Modulation und Codierung auf die möglichen Übertragungsraten in Abhängigkeit vom Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ist das Bindeglied zwischen der Dimensionierung aufgrund der geforderten Übertragungsgüte und der einzuhaltenden Verkehrsgüte. Durch die Anwendung des R_0 -Kriteriums [18] können für den entsprechenden Funkkanal (z.B. Fast-Fading-Kanal) und für ein bestimmtes Modulationsverfahren optimale Parameter für eine ma-

ximale Bedeckung ermittelt werden. Das R_0 -Kriterium gibt für realisierbare Decodierverfahren (d.h. zum Beispiel Blockcodes mit in der Praxis verwendbaren Blocklängen) eine obere Schranke für das Verhältnis von Informationsdatenrate (Bitrate) zu Symbolrate [18] an. Bei ihr kann eine beliebig kleine Restfehlerwahrscheinlichkeit mit endlichen Blocklängen erzielt werden. Im Gegensatz zur Kanalkapazität C zur Beurteilung der Übertragungseigenschaften des Kanals, sind bei der Anwendung des R_0 -Kriteriums Aussagen über Null verschiedene Fehlerwahrscheinlichkeiten bei endlichen Codelängen möglich.

In [18] werden für unterschiedliche Kanalmodelle und Kanalcodierverfahren Aussagen über den Fehlerexponenten gemacht, der bei Blockcodes neben der Blocklänge für die Restfehlerwahrscheinlichkeit die bestimmende Größe ist. Im Bereich der Faltungscodes wird R_0 als cut-off-Rate bezeichnet [28].

Das Verhältnis R_0 ist abhängig von dem Quotienten aus Symbolenergie und Rauschleistungsdichte E_{sym}/N_0 und der Anzahl der Modulationsstufen. Die Dimensionierung ist dadurch nicht nur für eine bestimmte Art der Kanalcodierung gültig, sondern gibt nach Gleichung (5.16) allgemein die zu verwendende Coderate durch

$$R_{\text{Code}} = \frac{R_0}{\text{ld}(M_{\text{Mod}})} \quad \text{mit} \quad \text{ld}(\cdot) = \log_2(\cdot) \quad (5.16)$$

vor. Mit der Größe M_{Mod} wird die Anzahl der Modulationsstufen bezeichnet.

Das Verhältnis R_0 von Informationsbitrate zu Symbolrate in Abhängigkeit vom Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{min}

Das Verhältnis der Symbolenergie zu Rauschleistungsdichte E_{sym}/N_0 kann bei der Annahme eines idealen Empfangsfilters (matched filter) und der Annahme, dass die Interferenzleistung näherungsweise als weißes Rauschen angenommen werden kann, durch das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{min} ersetzt werden. Mit den Beziehungen aus [10] ist

$$E_{\text{sym}} / N_0 = \rho_{\text{min}} / \eta_{\text{sym}} = \rho_{\text{norm}} \cdot \quad (5.17)$$

Die Kennlinien für R_0 für einen Fast-Fading-Kanal - bei Verwendung von MDPSK mit Soft-decision-Decodierung - lauten nach [14] unter Verwendung von Gleichung (5.17):

$$R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b) = \text{ld}(M_{\text{Mod}}) - \text{ld} \left(\sum_{i=0}^{M_{\text{Mod}}-1} \frac{1}{1 + v_{\xi} \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot i}{M_{\text{Mod}}} \right)} \right) \quad (5.18)$$

$$\text{mit } v_{\xi} = \frac{\xi^2 (\rho_{\min, \text{norm}})^2}{1 + 2(\rho_{\min, \text{norm}}) + (1 - \xi^2)(\rho_{\min, \text{norm}})^2} \quad \text{und } \xi = J_0(2\pi b)$$

Der Parameter ξ ist abhängig vom Produkt aus Fading-Bandbreite B_{Fad} und der Symboldauer T_{sym} . Dieses Produkt b ist ein Maß für die zeitlichen Abstände der Fadingeinbrüche (“Fading-Geschwindigkeit”) in Relation zur Symboldauer. Die Fading-Bandbreite wird durch die maximale Dopplerfrequenz abgeschätzt. Sie ist bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit v und einer Trägerfrequenz f_{Tr} :

$$B_{\text{Fad}} = \frac{v}{c} f_{\text{Tr}} \quad c: \text{ Lichtgeschwindigkeit} \quad (5.19)$$

Die Symboldauer T_{sym} ist das Reziproke der Symbolrate, welche das Produkt aus Bandausnutzung η_{sym} und Trägerbandbreite B_{Tr} ist. Wenn man für die Fading-Bandbreite und die Symboldauer die Beziehungen einsetzt ist

$$b = B_{\text{Fad}} T_{\text{sym}} = \frac{v}{c} \cdot \frac{f_{\text{Tr}}}{\eta_{\text{sym}} B_{\text{Tr}}} \quad (5.20)$$

Das folgende Bild zeigt die cut-off-Rate $R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ für die Symbolrate $\eta_{\text{sym}} \cdot B_{\text{Tr}} = 27$ kbit/s und eine Trägermittenfrequenz von $f_{\text{Tr}} = 1800$ MHz. Die Geschwindigkeit beträgt $v_0 = 0$ m/s und $v_1 = 30$ m/s. Für $v = 0$ m/s beträgt die relative “Fading-Geschwindigkeit” $b(v_0) = 0$, für $v_{30} = 30$ m/s beträgt sie $b(v_1) = 0.667 \cdot 10^{-3}$. Das folgende Bild 5.8 zeigt den Verlauf für diese Geschwindigkeiten. Es zeigt auf, dass der Einfluss der “Fading-Geschwindigkeit” auf das Verhältnis R_0 für gebräuchliche Werte für die Anzahl der Modulationsstufen und Werte E_s/N_0 gering ist. Bei Verwendung üblicher Symbolraten (> 27 kbit/s) wird der Einfluss noch geringer.

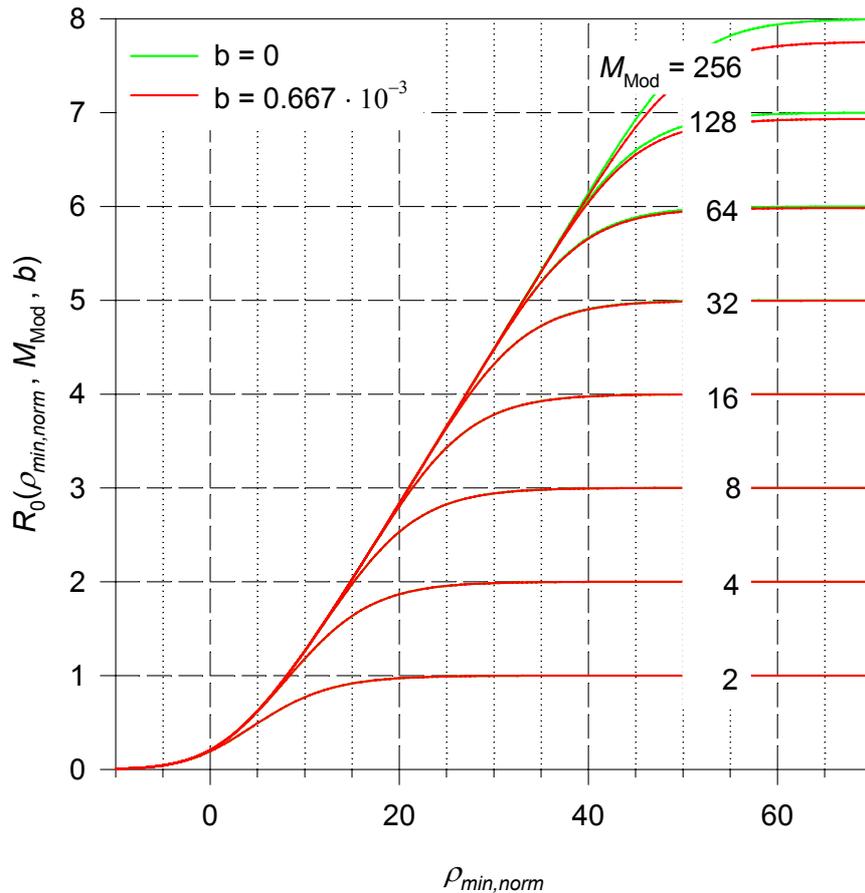


Bild 5.8 Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ für einen Slow- ($b=0$) und einen Fast-Fading-Kanal ($b=0.667 \cdot 10^{-3}$) bei MDPSK und Soft-Decision-Decodierung

Um jedoch im Optimierungsprozeß nicht überprüfen zu müssen, ob die Bedingungen für einen Slow-Fading-Kanal ($b=0$) erfüllt sind, ist es empfehlenswert in allen Fällen Gleichung (5.18) zu verwenden.

Einfluss der Fadinggeschwindigkeit auf die asymptotischen Grenzwerte der Kurvenschar $R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$

Der größte Einfluss der relativen “Fading-Geschwindigkeit” b besteht in der Verringerung der asymptotischen Grenzwerte, die für den Slow-Fading-Kanal gleich $\text{Id}(M_{\text{Mod}})$ sind.

$$R_{0\text{asyp}}(M_{\text{Mod}}) = \lim_{\rho_{\min, \text{norm}} \rightarrow \infty} (R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)) \leq \text{Id}(M_{\text{Mod}}) \quad (5.21)$$

Nach der Durchführung des Grenzübergangs für Gleichung (5.18) erhält man für die asymptotischen Grenzwerte

$$R_{0\text{asympt}}(b, M_{\text{Mod}}) = \text{ld}(M_{\text{Mod}}) - \text{ld} \left(\sum_{i=0}^{M_{\text{Mod}}-1} \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot i}{M_{\text{Mod}}} \right)} \right) \quad \text{mit } \xi = J_0(2\pi b) \quad (5.22)$$

Das untere Bild 5.9 zeigt den Einfluss der relativen "Fading-Geschwindigkeit" b (Gleichung (5.20)) auf die maximal asymptotisch erreichbaren Grenzwerte für R_0 .

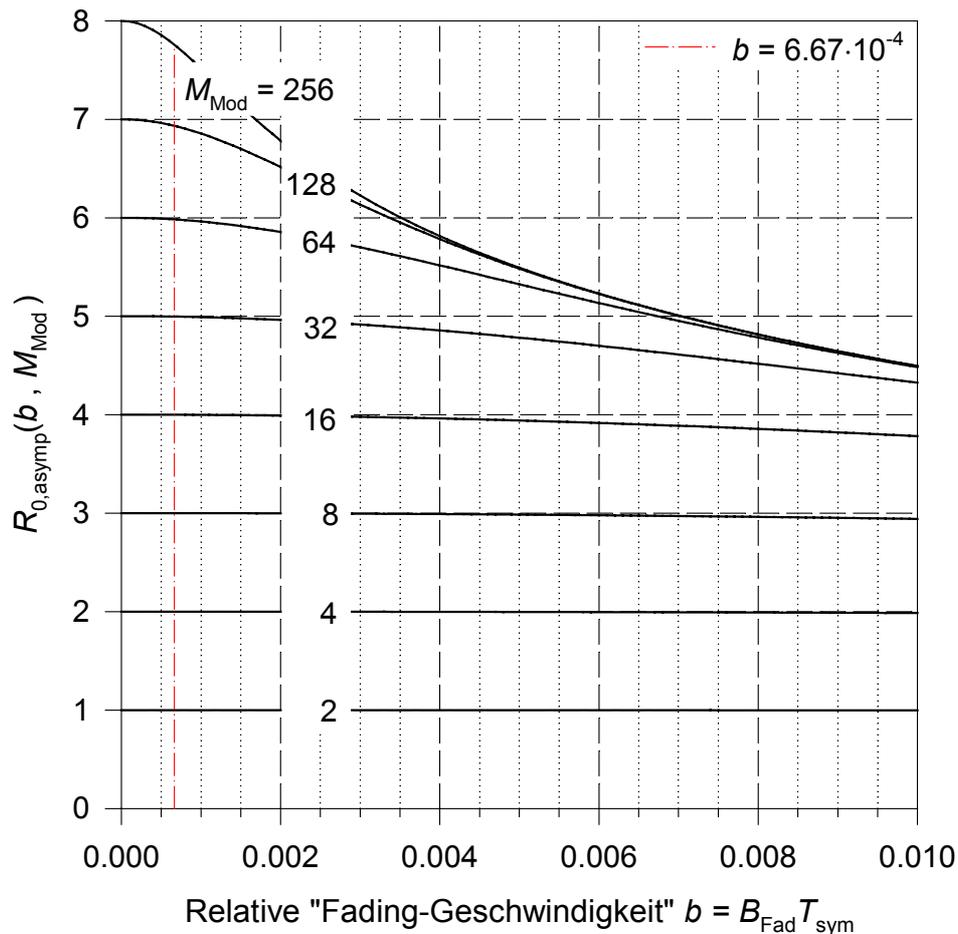


Bild 5.9 Maximal erreichbares Verhältnis (für $\rho_{\min}/\eta_{\text{sym}} \rightarrow \infty$) von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_{0\text{asympt}}(b, M_{\text{Mod}})$ für einen Fast-Fading-Kanal bei MDPSK und Soft-Decision-Decodierung

Der Einfluss der Fading-Geschwindigkeit auf $R_{0\text{asympt}}$ ist für eine Anzahl von Modulationsstufen kleiner 16 vernachlässigbar. Für eine zunehmende Anzahl von Modulationsstufen verstärkt sich der Einfluss. Für eine 256-stufige Modulation ist ab $b \approx 0.006$ kein Gewinn gegenüber der Modulation mit 128 Stufen mehr erzielbar. Die in der Praxis vorkommenden relativen "Fading-Geschwindigkeiten" b liegen im Bereich von 0 bis 0.002, so dass bis zu einer

Anzahl von 256 Modulationsstufen Gewinne erzielt werden können. Dazu sind allerdings Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisse von mehr als 40 dB (bei $\eta_{\text{sym}}=1$) erforderlich (siehe Bild 5.8).

Abilden der Kurvenschar $R_0(\rho_{\text{min,norm}}, M_{\text{Mod}})$ in eine Funktion $R_{0,\text{res}}(\rho_{\text{min,norm}})$ durch einen definierten Übergang zu höheren Modulationsstufen

Die Kennlinie $R_{0,\text{res}}(\rho_{\text{norm}}, b, \Delta R_0)$ (durchgezogene Linie) ergibt sich aus der Kurvenschar $R_0(\rho_{\text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ durch Übergang zur jeweils nächst höheren Modulationsstufenanzahl an der Stelle, an der durch den Übergang ein Gewinn von ΔR_0 erzielt wird. ΔR_0 ist so zu wählen, dass der Gewinn bei der Übertragungsdatenrate den Mehraufwand der höherstufigen Modulation rechtfertigt.

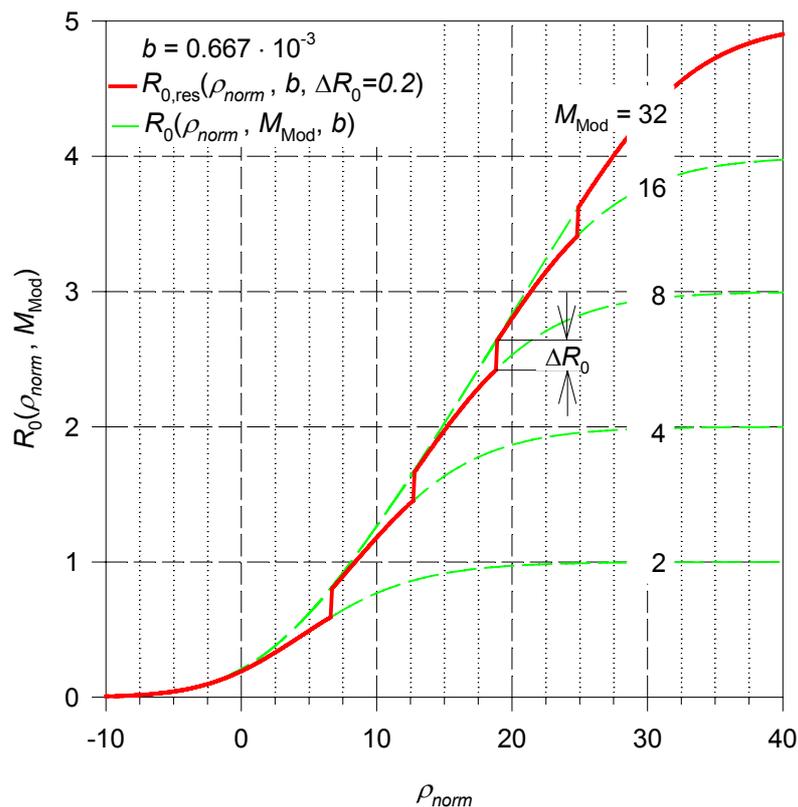


Bild 5.10 Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_{0,\text{res}}(\rho_{\text{min,norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ bei einem Übergang auf die nächst höhere Modulationsstufenanzahl bei einem Gewinn von $\Delta R_0 = 0.2$

Die Wahl der Größe ΔR_0 ist vom technischen Aufwand, der nötig ist, um die angegebenen Kennlinien für die höheren Modulationsstufenanzahlen zu erreichen, abhängig. Durch die Wahl sehr kleiner Werte ΔR_0 liegt R_0 für alle Werte ρ_{norm} nahe am Optimum. Dafür wird aber schon bei kleinen Werten ρ_{norm} auf höherstufige Modulationsverfahren übergegangen.

Bestimmung des erforderlichen Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses ρ_{min} für ein gegebenes Verhältnis R_0

Die bei einer Trägerbandbreite B_{Tr} mögliche Datenrate ist

$$R_{\text{D,R}} = R_0 \eta_{\text{sym}} B_{\text{Tr}} \quad . \quad (5.23)$$

Sie ist bestimmt durch die Trägerbandbreite, die Bandbreitenausnutzung η_{sym} der Modulation und den Faktor R_0 , der die mögliche Informationsbitrate (ohne den Anteil für die Fehlerkorrektur der Kanalcodierung) pro übertragenem Symbol angibt. Die Faktor R_0 ist vom verwendeten Modulationsverfahren und dem Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ abhängig.

$$R_{\text{D,R}}(N_C) = R_0 \eta_{\text{sym}} r_{\text{f,Tr}} \frac{B_{\text{ges}}}{N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{\text{Tr},0}}{N_C}\right)} \quad (5.24)$$

Unter Berücksichtigung der Anteile für Rahmensynchronisation und Schutzzeiten r_{Rsyn} , der Anteile für Zeitschlitzsynchronisation r_{zssyn} und der Anteile für Signalisierungsinformation r_{zssig} erhält man aus der Datenrate pro Rahmen $R_{\text{D,R}}$ die Nutzdatenrate pro Zeitschlitz:

$$R_{\text{D,zs}} = r_{\text{Dges}} \frac{R_{\text{D,R}}}{n_{\text{zs}}} \quad \text{mit} \quad r_{\text{Dges}} = \frac{1}{1 + r_{\text{zssyn}} + r_{\text{zssig}} + \frac{r_{\text{Rsyn}}}{n_{\text{zs}}}} \quad \text{und} \quad \begin{aligned} r_{\text{zssyn}} &= \frac{n_{\text{zssyn}}}{n_{\text{T}}} \\ r_{\text{zssig}} &= \frac{n_{\text{zssig}}}{n_{\text{T}}} \\ r_{\text{Rsyn}} &= \frac{n_{\text{Rsyn}}}{n_{\text{T}}} \end{aligned} \quad . \quad (5.25)$$

Die Größe r_{Dges} ist das Verhältnis der Anzahl der Teilnehmerinformationsdatenrate zur Datenrate eines gesamten Rahmens. Sie berechnet sich aus der Anzahl der Bits für Rahmen- und Zeitschlitzsynchronisation n_{Rsyn} und n_{zssyn} , der Bits für die Signalisierung n_{zssig} und der Bits an Nutzinformation pro Zeitschlitz n_{T} . Durch Einsetzen von Gleichung (5.24) in Gleichung(5.25) erhält man die Nutzdatenrate pro Zeitschlitz in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite, den

Einflussgrößen der Modulation/Codierung, der Multiplexstruktur und der gewählten Clustergröße N_C .

$$R_{D,zs}(N_C, n_{zs}) = r_{D,ges} \eta_{sym} r_{f,Tr} R_0 \frac{B_{ges}}{N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{Tr,0}(N_C)}{N_C}\right) \cdot n_{zs}} \quad (5.26)$$

Eine sinnvolle Dimensionierung der Nutzdatenrate pro Zeitschlitz ist, diese gleich der minimalen Datenrate $R_{D,min}$, die ein Teilnehmer benötigt, zu wählen.

$$R_{D,zs}(N_C, n_{zs}, \rho_{min}, M_{Mod}) = R_{D,min} \quad (5.27)$$

Dadurch erhält man als Anforderung für die Modulation/Codierung folgende Anforderung für das Verhältnis R_0 in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der gewünschten Zeitschlitze n_{zs}

$$R_0(N_C, n_{zs}) = n_{zs} R_{0,1}(N_C) \text{ mit } R_{0,1}(N_C) = \frac{\frac{R_{D,min}}{r_{D,ges}} N_C \cdot \text{rnd}\left(\frac{n_{Tr,0}(N_C)}{N_C}\right)}{\eta_{sym} r_{f,Tr} B_{ges}} \quad (5.28)$$

und $n_{zs} \in \check{N}$

Die Größe $R_{0,1}(N_C)$ ist das Verhältnis der erforderlichen Datenrate zur Symbolrate, das bei einer Clustergröße N_C zur Realisierung eines Zeitschlitzes pro TDM-Rahmen nötig ist. Durch Belegen eines Zeitschlitzes steht einem Teilnehmer die Datenrate $R_{D,min}$ zur Verfügung. Das benötigte R_0 ist gleich dem Produkt aus der Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} und dem Wert $R_{0,1}$.

Für die Optimierung ist bei Vorgabe einer bestimmten Anzahl von Zeitschlitzen n_{zs} ein $R_0(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit von N_C nach Gleichung (5.28) erforderlich. Gesucht ist das notwendige Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho_{min}(n_{zs}, M_{Mod})$ und die Anzahl der Modulationsstufen $M_M(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit von der Anzahl der zu realisierenden Zeitschlitze pro TDM-Rahmen. Dies erfordert eine Invertierung der Kennlinien $R_0(\rho_{norm}, b, \Delta R_0)$ in Bild 5.10. Die invertierte Kennlinie $\rho_{norm}(R_0, b, \Delta R_0)$ ist in Bild 5.11 dargestellt.

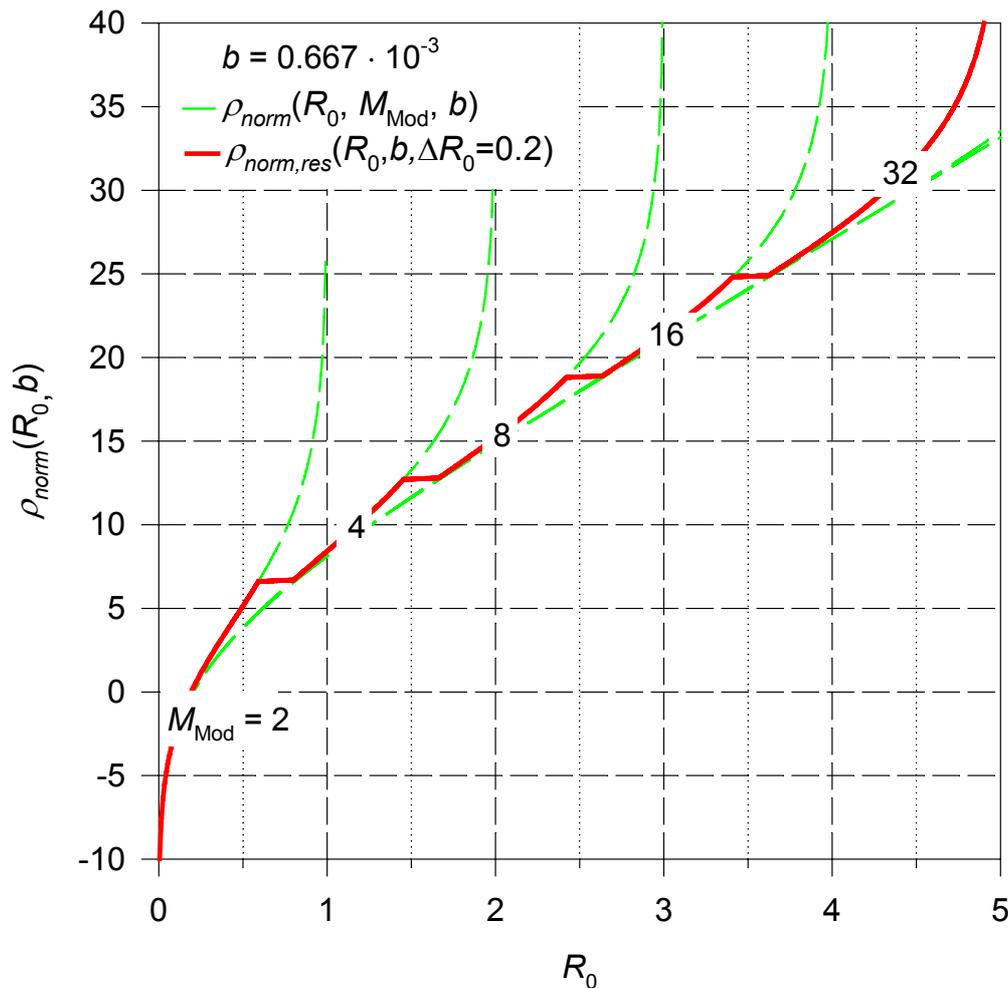


Bild 5.11 Erforderliches normiertes Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{norm} in Abhängigkeit vom gewünschten Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate R_0

Das Verhältnis von Symbolenergie und Rauschleistungsdichte ρ_{norm} und das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{min} sind über die Bandausnutzung η_{sym} verknüpft. Das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses $\rho_{\text{min}}(N_C, n_{\text{zs}})$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Zeitschlitz n_{zs} und der Clustergröße N_C ist

$$\rho_{\text{min}}(N_C, n_{\text{zs}}) = \eta_{\text{sym}} \cdot \rho_{\text{norm}}(N_C, n_{\text{zs}}) \quad (5.29)$$

Die Clustergröße N_C (= Anzahl der Frequenzgruppen) bestimmt zusammen mit der vom Netzplaner festgelegten Anzahl der Träger pro Basisstation n_{zs} die Bandbreite B_{Tr} eines Trägersignals. Durch die Aufteilung der Gesamtbandbreite B_{ges} auf die N_C Zellen eines Clusters ist die Trägerbandbreite B_{Tr} umgekehrt proportional zu N_C . Die mit N_C abnehmende Trägerbandbreite macht höhere Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisse erforderlich, um durch den

Einsatz höherstufiger Modulationsverfahren die notwendige Datenrate wieder zu erreichen. Dieser Zusammenhang wird durch das R_0 -Kriterium (Bild 5.11) beschrieben.

Bild 5.12 zeigt das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis am Beispiel eines GSM-Systems bei einer Trägermittenfrequenz von 1800 MHz (DCS 1800). Dabei wird für den Zusammenhang zwischen Datenrate und erforderlichem Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis das R_0 -Kriterium für einen Fast-Fading-Kanal ($b=0.667 \cdot 10^{-3}$) bei MDPSK und Soft-Decision-Decodierung nach Bild 5.8 verwendet.

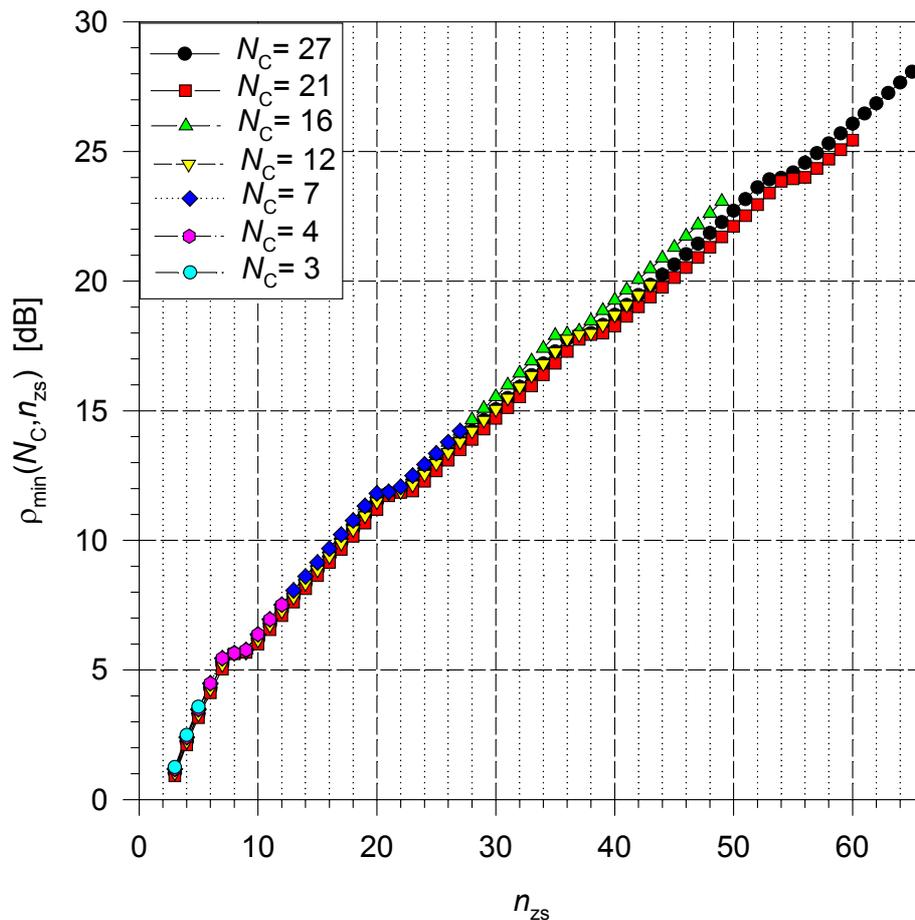


Bild 5.12 Erforderliches Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der gewünschten Kommunikationskanäle (Zeitschlitze) n_{zs} pro Trägerfrequenz bei $B_{\text{ges}}=25\text{MHz}$ und $B_{\text{TR},0}=200\text{kHz}$

Die Kurven in Bild 5.12 besitzen nahezu die gleiche Steigung, da keine starke Abhängigkeit zwischen der Bandbreite B_{Tr} pro Träger (Gleichung (5.11)) und der Clustergrößen N_C besteht (Gleichung (5.11)). Die geringe Abhängigkeit kommt aus der Rundung der Anzahl der Träger

pro Basisstation $n_{\text{Tr,BS}}$ in Gleichung (5.9) auf ganzzahlige Werte. Dadurch ist die Größe $R_{0,1}(N_C)$ und somit auch der Anstieg des erforderlichen SINR $\rho_{\min}(N_C, n_{\text{zs}})$ nur schwach von der Clustergröße N_C abhängig. Aus Gleichung (5.11) ist ersichtlich, dass die Abhängigkeit umso geringer ist je größer die Gesamtanzahl der Träger $n_{\text{Tr,0}}$ ist, da der relative Einfluss der Rundung auf die Trägerbandbreite B_{Tr} geringer wird. Das Ende der Kurven $\rho_{\min}(N_C, n_{\text{zs}})$ wird durch die maximal möglichen Werte für die Anzahl $n_{\text{zs}}^{(\max)}(N_C)$ (Gleichung (5.15)) der Zeitschlitze pro TDM-Rahmen in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C bestimmt. Für große Cluster sind aufgrund der geringen Interferenz große Werte für die maximalen Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisse möglich. Dies ermöglicht wiederum eine große Anzahl von Modulationsstufen M_{Mod} und somit hohe Werte für R_0 und hohe realisierbare Maximalwerte für die Anzahl der Zeitschlitze.

Die verwendeten Werte für die Anzahl der Modulationsstufen zur Realisierung von n_{zs} Zeitschlitzen pro TDM-Rahmen ist für sieben (aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Werte dazwischen ausgelassen) Clustergrößen in Bild 5.13 dargestellt. Es verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen den durch die Ausbreitungsbedingungen gegebenen Signal-zu-Störleistungs-Verhältnissen, den Trägerbandbreiten und den Modulationsstufen. Für Cluster vom Typ $N_C=3$ ist aufgrund der starken Gleichkanalinterferenz keine höhere Modulationsstufenanzahl als 2 möglich. Die Basisstationen besitzen dafür aber $\text{rnd}(113/3)=38$ Trägerfrequenzen. Mit zunehmender Clustergröße N_C nimmt das maximale SINR durch die abnehmende Gleichkanalinterferenzleistung zu, und es wird der Einsatz von Modulationsverfahren mit höherer Modulationsstufenanzahl möglich. Dabei stehen pro Basisstation aber weniger Trägerfrequenzen zur Verfügung. Die Anzahl der Kommunikationskanäle m_{BS} ist das Produkt aus der Anzahl $n_{\text{Tr}}(N_C)$ Träger pro Basisstation und der Anzahl der Zeitschlitze $n_{\text{zs}}(N_C)$. Im allgemeinen gibt es eine Clustergröße N_C , bei der die Anzahl der Kommunikationskanäle m_{BS} maximal wird. Die Berechnung von m_{BS} erfolgt in Abschnitt 5.2.2.5. Auffallend ist, dass je nach Clustergröße N_C früher oder später zu einer höheren Modulationsstufe übergegangen wird. Die Erklärung liegt in der Abhängigkeit der Trägerbandbreite B_{Tr} von der Clustergröße N_C (Gleichung (5.11)).

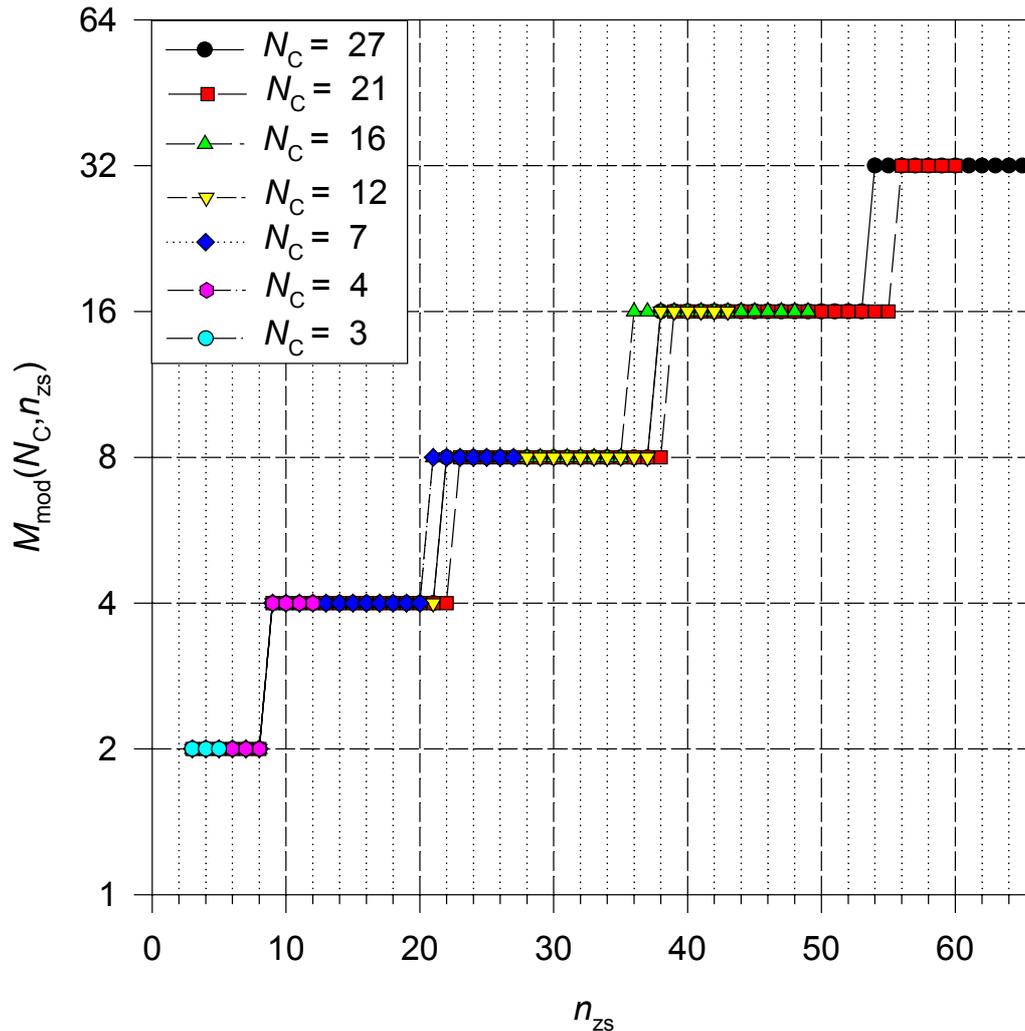


Bild 5.13 Verwendete Anzahl von Modulationsstufen M_{Mod} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der gewünschten Kommunikationskanäle (Zeitslitze) n_{zs} pro Trägerfrequenz

Aus dem hier berechneten SINR $\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ (siehe Bild 5.12) werden im folgenden Abschnitt die maximal möglichen Zellenradien $r_{z, \text{SINR}}(N_C, n_{zs})$ ermittelt.

5.2.2.4 Signalausbreitung

Die Bestimmung des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses $\rho(N_C, r_z, S_S)$ in Abhängigkeit von der Clustergröße, vom Zellenradius r_z und der maximalen Sendeleistung S_S ist in Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Das Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho(N_C, r_z, n_{zs})$ in Bild 5.15 ist zusätzlich von der Anzahl der Zeitslitze pro TDM-Rahmen abhängig. Die Abhängigkeit resultiert aus der Abhängigkeit der Sendeleistung S_S von der Anzahl der Zeitslitze n_{zs} . Sie wird so

gewählt, dass auch bei der Belegung der maximalen Datenrate $R_{D,\max}$ durch einen Benutzer die zulässige, mittlere Sendeleistung

$$S_{S,\text{mean}} = \frac{n_{zS,\text{min}}}{n_{zS}} S_S \quad (5.30)$$

nicht überschritten wird. In diesem Fall belegt er $n_{zS,\text{min}}$ der insgesamt n_{zS} Zeitschlitze während einer Rahmendauer. Für die Strahlenbelastung des Benutzers ist die mittlere Sendeleistung die entscheidende Größe, vorausgesetzt, dass eine festgelegte Maximalleistung $S_{S,\max}$ nicht überschritten wird. Die Sendeleistung S_S ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Zeitschlitze und unter Einhaltung der mittleren und maximalen Sendeleistung

$$S_S = \frac{n_{zS}}{n_{zS,\text{min}}} S_{S,\text{mean}} \quad \wedge \quad S_S \leq S_{S,\max} \quad (5.31)$$

zu wählen. Da beide Bedingungen einzuhalten sind, kann die Sendeleistung S_S mit der Anzahl n_{zS} der Zeitschlitze pro TDM-Rahmen nur soweit erhöht werden bis die maximal zulässige Sendeleistung $S_{S,\max}$ erreicht ist.

Bei der Benutzung von D-Netz Mobilfunkgeräten ist für eine maximale Sendeleistung $S_{S,\max}$ von bis zu 2 Watt kein und bis zu 4 Watt ein Mindestabstand von 3 cm erforderlich [7]. Die mittlere Sendeleistung beträgt 0.25 W. Das folgende Bild 5.14 zeigt die mögliche Sendeleistung S_S in Abhängigkeit von der Anzahl der Zeitschlitze n_{zS} , bei der eine mittlere Sendeleistung von 0.25 W eingehalten wird und eine Maximalleistung von 2 W nicht überschritten wird.

Aus Bild 5.14 ist ersichtlich, dass für die Clustergrößen $N_C = 3$ und 4 die maximale Sendeleistung von 2 W nicht erreicht wird, da die dazu notwendige Anzahl von Zeitschlitzen nicht erreicht wird. Ab $N_C=7$ sind für die Anzahl der Zeitschlitze Werte von 24 und höher realisierbar. Dies erlaubt ein Senden mit der maximalen Sendeleistung von 2 W und dadurch die Versorgung größerer Gebiete durch eine Basisstation.

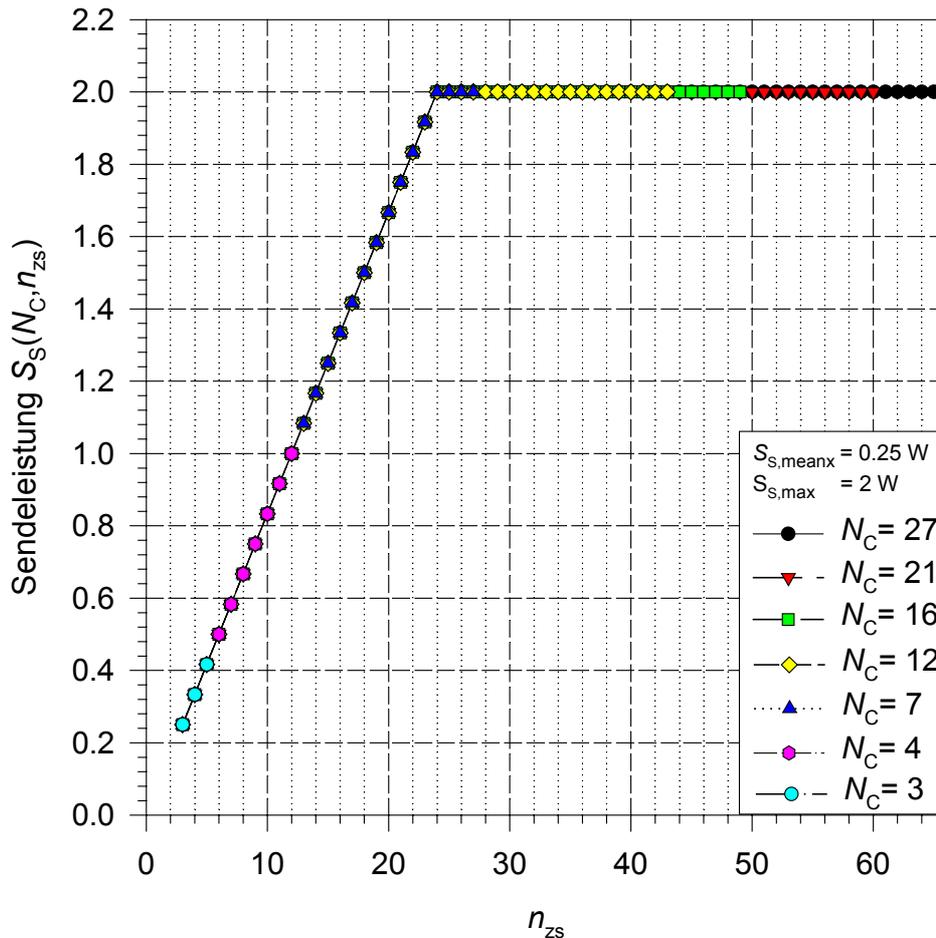


Bild 5.14 Sendeleistung S_S bei Einhaltung der mittleren Sendeleistung $S_{S,\text{mean}} = 0.25 \text{ W}$ und des Grenzwertes für die maximale Sendeleistung von $S_{S,\text{max}} = 2 \text{ W}$

Bild 5.15 zeigt den Verlauf des Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisses $\rho(N_C, n_{ZS}, r_z)$ für ein Vorstadtgebiet. Es ist für vier Clustergrößen jeweils die Kennlinie für die maximal zulässige Sendeleistung bei der minimalen Anzahl von Zeitschlitten $n_{ZS,\text{min}}$ und für die - in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C - maximal mögliche Anzahl von $n_{ZS,\text{max}}(N_C)$ Zeitschlitten dargestellt. Beim Vergleich mit Bild 3.12 in Abschnitt 3.3.3 fällt auf, dass die Kennlinien für die maximale Anzahl von Zeitschlitten am rechten Bildrand bis auf die Kennlinie für $N_C=3$ identisch sind. Dies bedeutet, dass für die Clustergrößen N_C gleich 7, 12 und 27 bei der maximalen Anzahl von Zeitschlitten die zulässige Sendeleistung $S_S=2 \text{ W}$ beträgt und somit von $S_{S,\text{max}}$ begrenzt wird. Für den Fall $N_C=3$ kann die Sendeleistung S_S für die maximale Anzahl von Zeitschlitten $n_{ZS,\text{max}}(3)$ nicht auf 2 W eingestellt werden, da sonst die mittlere Sendeleistung von $S_{S,\text{mean}}=250 \text{ mW}$ überschritten würde. Die gestrichelten Linien sind das Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho(N_C, n_{ZS}, r_z)$ für $n_{ZS} = n_{ZS,\text{min}}=3$. Die zulässige Sendeleistung S_S ist in diesem Fall gleich der mittleren Sendeleistung $S_{S,\text{mean}}$ (Gleichung (5.31)). Der Faktor zwi-

schon dem kleinsten Wert der Sendeleistung für $n_{zs} = n_{zs,\min} = 3$ und dem Maximalwert, der für $n_{zs,\max}(N_C)$ ab $N_C = 7$ erreicht wird, beträgt ca. 9 dB. Durch diese große Differenz ist die Anpassung der Sendeleistung für die Größe der Funkzelle r_z und somit für eine optimale Dimensionierung von großer Bedeutung.

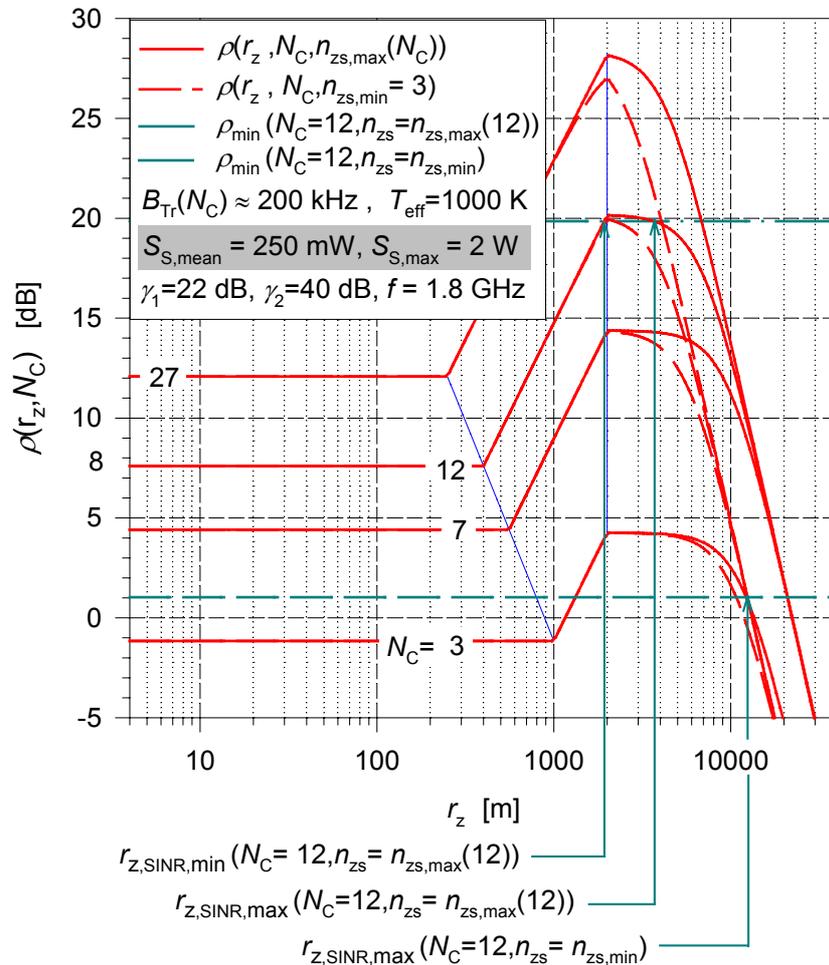


Bild 5.15 Minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C , dem Zellenradius r_z und der minimalen bzw. maximalen Anzahl von Zeitschlitten für ein Vorstadtgebiet

Die Abhängigkeit der maximal möglichen Funkzellenradien $r_{z,\text{SINR}}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit von der gewählten Clustergröße und der Anzahl der gewünschten Zeitschlitten n_{zs} erhält man durch Suchen des größten Wertes r_z für den

$$r_{z,\text{SINR}}(N_C, n_{zs}) : \rho(N_C, n_{zs}, r_z) = \rho_{\min}(N_C, n_{zs}) \quad (5.32)$$

gilt. Grafisch sind es die Schnittpunkte der horizontalen Linien $\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ mit den Kennlinien $\rho(N_C, n_{zs}, r_z)$, die am weitesten rechts liegen. Durch die Bestimmung von $n_{zs,\max}(N_C)$ nach

Gleichung (5.15) ist gewährleistet, dass zu jedem in Abschnitt 5.2.2.2 ermittelten Wertepaar (N_C, n_{zs}) der zugehörige maximale Radius $r_{z, \text{SINR}}(N_C, n_{zs})$ existiert.

Aus der Kennlinie für $N_C=12$ in Bild 5.12 erhält man für das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} für $n_{zs, \min}=3$ einen Wert von ≈ 1 dB und für $n_{zs, \max}(12)=43$ einen Wert von ≈ 20 dB. Diese Werte sind als horizontale Linien in Bild 5.15 eingezeichnet. Mit diesen Werten sind in Bild 5.15 beispielhaft für eine Clustergröße von $N_C=12$ die Funkzellenradien eingezeichnet, die anhand der Kennlinien für die minimale Anzahl von Zeitschlitzten $\rho(N_C=12, n_{zs, \min}(12), r_z)$ und für die Kennlinie für die maximale Anzahl von Zeitschlitzten $\rho(N_C=12, n_{zs, \max}(12), r_z)$ ermittelt wurden. Für die minimale Anzahl von Zeitschlitzten ist der minimale Zellenradius gleich Null und der maximale Zellenradius ungefähr 12 km. Für die maximale Anzahl $n_{zs, \max}(12)=43$ ist nur ein maximaler Zellenradius von $r_{z, \text{SINR}, \max}(N_C=12, n_{zs}=43) \approx 3.7$ km möglich. Der minimale Zellenradius, der nicht unterschritten werden darf, beträgt 1.9 km. Für kleinere Zellenradien ist aufgrund der Interferenz der erforderliche Störabstand nicht gegeben. Die Radien werden für alle Clustergrößen N_C und für die jeweils zugehörigen Werte für die Anzahl der Zeitschlitzte n_{zs} ermittelt.

Das Bild 5.16 zeigt die maximalen und die minimalen Zellradien, die durch die notwendigen Werte für die Signal-zu-Störleistungs-Verhältnisse $\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ in Bild 5.12 bestimmt sind. Der Wert für den gewählten Zellenradius muss im Bereich zwischen dem minimalen Zellenradius $r_{z, \text{SINR}, \min}(N_C, n_{zs})$ und dem maximalen Zellenradius $r_{z, \text{SINR}, \max}(N_C, n_{zs})$ liegen. Nur in diesem Bereich kann die geforderte Übertragungsgüte garantiert werden.

Es zeigt sich, dass für eine zunehmende Anzahl von Zeitschlitzten - was gleichbedeutend ist mit einer zunehmenden Übertragungsrate - der maximal mögliche Zellenradius abnimmt, da für die Verwendung höherstufiger Modulationsverfahren ein höheres Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis $\rho_{\min}(N_C, n_{zs})$ vorhanden sein muss (Bild 5.12). Den Übergang auf die nächst höhere Modulationsstufenanzahl ist an den ansteigenden oder flachen Stellen im Kurvenverlauf in Bild 5.16 zu erkennen. Für die Clustergröße $N_C=3$ ist keine höhere Modulationsstufenanzahl möglich. Für $N_C=4$ wird bei $n_{zs}=7$ auf ein 4-stufiges Verfahren gewechselt.

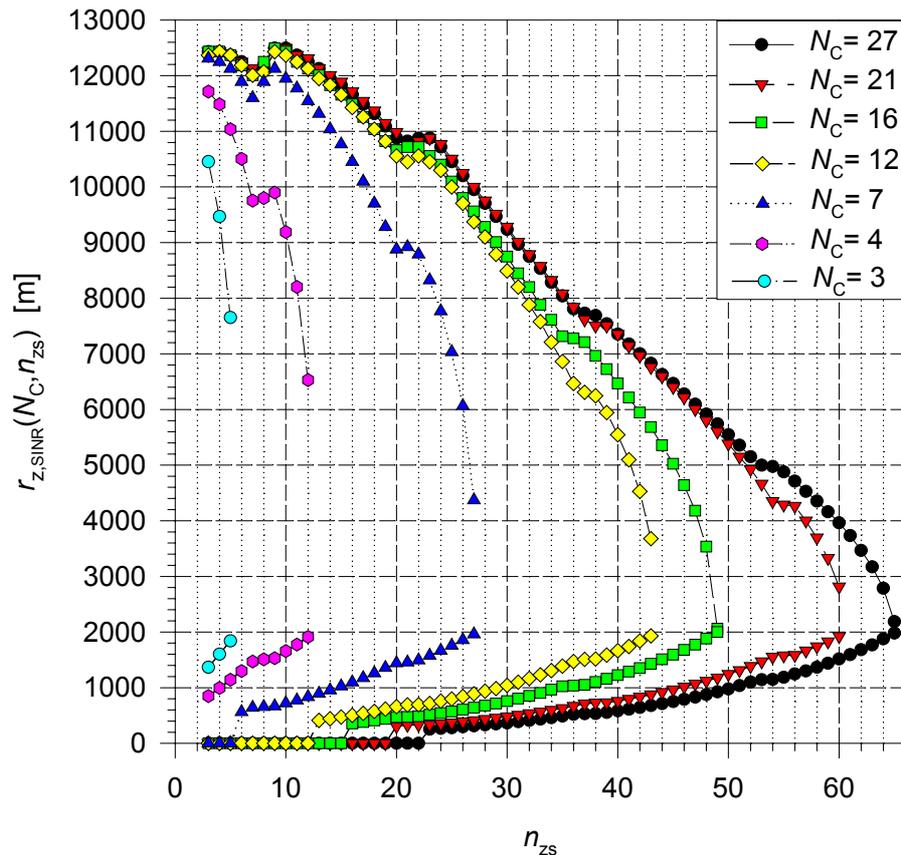


Bild 5.16 Maximaler (obere Kurvenschar) und minimaler (untere Kurvenschar) Zellenradius in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und von der Anzahl der gewünschten Zeitslitze n_{zs} (Kommunikationskanäle pro Trägerfrequenz)

Für die kleinste Anzahl von Zeitslitzen $n_{zs,\min}$ ist für Clustergrößen N_C größer vier der maximale Zellenradius durch das Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnis bestimmt. Der Einfluss der Interferenzleistung ist vernachlässigbar. Für die Clustergrößen N_C gleich drei und vier ist die Interferenzleistung noch so hoch, dass auch für $n_{zs} = n_{zs,\min}$ die maximalen Radien hauptsächlich durch sie bestimmt werden. Die maximal erreichbare Anzahl von Zeitslitzen $n_{zs,\max}(N_C)$ ist im wesentlichen von der Interferenzleistung und damit von der Clustergröße abhängig. Die Berechnung wurde in Abschnitt 5.2.2.2 durchgeführt.

Die Minima aus dem Bereich der möglichen Zellenradien $r_{z,\text{SINR}}(N_C, n_{zs})$ aufgrund der garantierten Übertragungsgüte und aus den Werten $r_{z,v}(N_C, n_{zs})$ aus der Verkehrsanalyse sind die Ausgangswerte für die abschließende Maximumsuche, die in Abschnitt 5.2.3 durchgeführt wird.

5.2.2.5 Frequenzplanung (FCA)

Durch Frequenzplanung und Clusterbildung ist eine Wiederverwendung der gleichen Trägerfrequenz in bestimmten Abständen möglich. Zellen, in denen die gleichen Frequenzen verwendet werden, werden als Gleichkanalzellen bezeichnet. Der auf den Zellenradius normierte Abstand

$$D_{\text{norm}}(N_C) = D(N_C) / r_Z \quad (5.33)$$

zwischen zwei Gleichkanalzellen bestimmt zusammen mit dem Verlauf der Ausbreitungsdämpfung das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis ρ_I . Mit dem Abstand $D(N_C)$ nach Gleichung (3.18) in Kapitel 3 erhält man für den normierten Abstand in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C

$$D_{\text{norm}}(N_C) = \sqrt{3N_C} \quad . \quad (5.34)$$

Mit diesen normierten Abständen wird im Modul Signalausbreitung das Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis ρ berechnet.

Durch die Clusterbildung teilt sich die Gesamtbandbreite B_{ges} auf die einzelnen Basisstationen eines Clusters auf. Die Anzahl der Duplex-Träger $n_{\text{TrBS}}(N_C)$ pro Basisstation und die resultierende Bandbreite $B_{\text{Tr}}(N_C)$ für die Träger in Abhängigkeit von der Clustergröße wurde schon im Multiplex-Modul 'FDM/TDM/FDD' vorweggenommen. Daraus ergibt sich die Anzahl der einer Basisstation zur Verfügung stehenden Duplex-Kanäle m_{BS} aus dem Produkt der Anzahl der Zeitschlitze n_{ZS} multipliziert mit der Anzahl der Träger n_{TrBS} , die einer Basisstation zur Verfügung stehen:

$$m_{\text{BS}}(N_C, n_{\text{ZS}}) = n_{\text{ZS}} \cdot n_{\text{TrBS}}(N_C) \quad . \quad (5.35)$$

Die sich ergebenden maximalen und minimalen Zellenradien in Abhängigkeit von der möglichen Anzahl von Kommunikationskanälen $m_{\text{BS}}(N_C)$ ist in Bild 5.17 dargestellt.

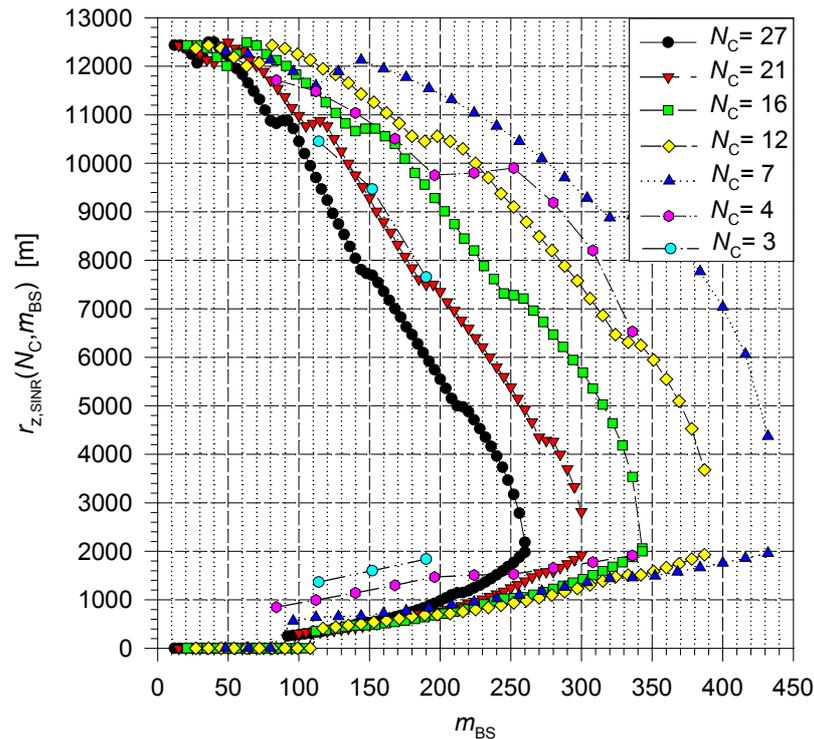


Bild 5.17 Maximaler (obere Kurvenschar) und minimaler (untere Kurvenschar) Zellenradius in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und von der Anzahl der möglichen Kommunikationskanäle m_{BS} pro Basisstation

Beim Vergleich der Kurven für die verschiedenen Clustergrößen N_C ist zu erkennen, dass die Erhöhung von N_C bis zur Clustergröße $N_C=7$ eine Vergrößerung der Zellradien bzw. eine größere Anzahl von Kommunikationskanälen bei gleichem Radius ermöglicht. Die Clustergröße $N_C=7$ ist für die verwendete Gesamtbandbreite, das verwendete Modulationsverfahren, die geforderten Datenraten der Teilnehmer und der Ausbreitungsdämpfung in einem Vorstadtgebiet die optimale Clustergröße. Für eine angestrebte Anzahl von Kommunikationskanälen $m_{BS} < 120$ sind bei der Verwendung größerer Cluster noch geringe Verbesserungen erzielbar.

Die Erklärung für die optimale Clustergröße $N_C=7$ gibt das Bild 5.18, das die maximal erreichbare Anzahl von Kommunikationskanälen in Abhängigkeit von der Clustergröße und die Anzahl der Träger pro Basisstation enthält.

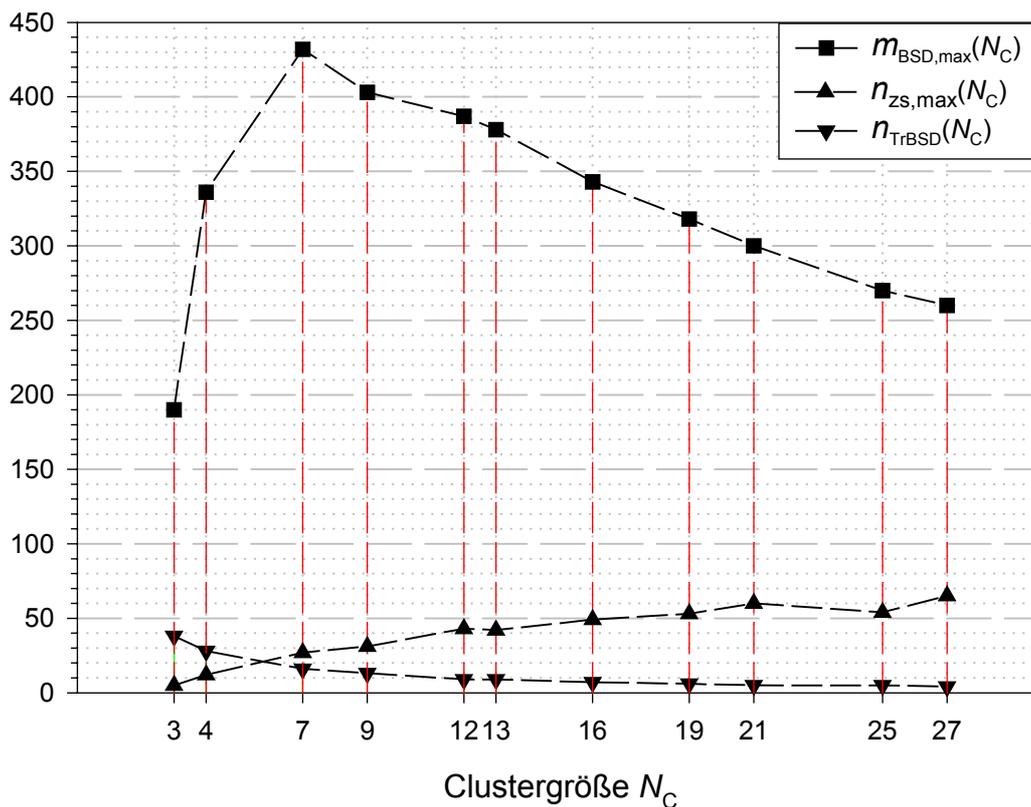


Bild 5.18 Maximale Anzahl von Duplexkanälen $m_{\text{BS,max}}(N_C)$, die maximale Anzahl $n_{\text{zs,max}}(N_C)$ der Zeitschlitz und die Anzahl $n_{\text{Tr,BS}}(N_C)$ der Duplex-Trägerfrequenzen pro Basisstation

Die Anzahl der Träger pro Basisstation nimmt, von Rundungseinflüssen abgesehen, durch die Aufteilung der Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden Träger auf die N_C Basisstationen eines Clusters, umgekehrt proportional mit der Clustergröße N_C ab (Bild 5.5). Durch das zunehmende SIR erhöht sich das maximale Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis mit zunehmender Clustergröße N_C und ermöglicht so größere Werte für die maximale Anzahl $n_{\text{zs,max}}$ von Zeitschlitzten. Der Zunahme wird aber mit größeren Werten für N_C geringer. Ab der Clustergröße $N_C=7$ ist die prozentuale Zunahme der maximal möglichen Anzahl $n_{\text{zs,max}}$ von Zeitschlitzten geringer als die prozentuale Abnahme der Anzahl $n_{\text{Tr,BS}}(N_C)$ der Träger pro Basisstation, so dass das Produkt aus beiden Größen abnimmt. Die Erklärung ist, dass bei einer Dimensionierung mit Clustergrößen N_C kleiner 7 die Übertragungskapazität durch die Interferenz begrenzt wird. Für N_C größer 7 kann der Gewinn an Signal-zu-Störleistung und der damit verbundenen Zunahme der Datenrate den Verlust aufgrund der abnehmenden Anzahl von Trägerfrequenzen pro Basisstation nicht kompensieren. Die Clustergröße $N_C=7$ ist somit für die zugrundeliegende Dämpfungskennlinie eines Vorstadtgebiets optimal.

Die Anzahl der Duplex-Kommunikationskanäle $m_{BS}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit von der Clustergröße und der Anzahl der realisierten Zeitschlitz ist der Eingangsparameter zur Ermittlung der zulässigen Anzahl von Teilnehmern in einer Funkzelle unter Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte G_{oS} . Die zulässige Anzahl von Teilnehmern ist vom verwendeten Kanalzugriffsverfahren abhängig.

5.2.2.6 Einfluss der Kanal-Zugriffsverfahren

Der Einfluss der Zugriffsverfahren ist im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Zur Dimensionierung genügt die pro Kommunikationskanal zulässige Teilnehmeranzahl $M_{BS,norm}(G_{oS}, m_{BS}, r_z)$, bei der die geforderte Verkehrsgüte gerade noch eingehalten wird. Sie beinhaltet sowohl das Teilnehmerverhalten, den Einfluss von Handover als auch die Auswirkungen des Zugriffsverfahrens. Ihre Berechnung erfolgt für den Telefon- und den Multiservice-Teilnehmer in Kapitel 4.

$$M_{BS,norm} = M_{BS} / m_{BS} \quad (5.36)$$

Die zulässige Teilnehmeranzahl M_{BS} , für die die Verkehrsgüte G_{oS} (Grade of Service) garantiert ist, ist

$$M_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}) = M_{BS,norm}(G_{oS}, m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}), r_z) \cdot m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}) \quad (5.37)$$

Die Abhängigkeit der zulässigen Teilnehmeranzahl M_{BS} vom Zellenradius $r_{z,v}$ enthält die Abhängigkeit der Handover-Raten und somit der Verkehrskapazität von der Funkzellengröße.

Die Teilnehmeranzahl in einer Zelle ist die Fläche der Zelle multipliziert mit der Teilnehmersdichte D_T . Daraus ergibt sich für den maximalen Zellenradius $r_{z,v}$ aufgrund des Verkehrs die im allgemeinen nichtlineare Bestimmungsgleichung

$$r_{z,v}(N_C, n_{zs}, B_{ges}, D_T):$$

$$M_{BS,norm}(G_{oS}, m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}), r_{z,v}) \cdot m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}) = M_{BS}(D_T, r_{z,v}) \quad (5.38)$$

$$\text{mit } M_{BS}(D_T, r_{z,v}) = D_T \cdot F_Z = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} D_T \cdot (r_{z,v})^2$$

Sie sagt aus, dass der Zellenradius $r_{z,v}$ nur so groß gewählt werden darf, dass die Anzahl M_{BS} der sich in der Funkzelle befindenden Teilnehmer höchstens gleich der bei Einhaltung der ge-

forderten Verkehrsgüte G_{oS} zulässigen Anzahl M_{BS} sein darf. Die zulässige Anzahl der Teilnehmer M_{BS} ist gleich der zulässigen Anzahl $M_{BS,norm}$ von Teilnehmern pro Kanal multipliziert mit der Anzahl der Kanäle m_{BS} . Die zulässige Anzahl $M_{BS,norm}$ der Teilnehmer pro Kanal ist von den Teilnehmerbeschreibungsgrößen, dem verwendeten Zugriffsverfahren und von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Anzahl von Kommunikationskanälen m_{BS} (Bündelungsgewinn) abhängig. Die Abhängigkeit vom Zellenradius resultiert aus der Abhängigkeit des Einflusses von Handover. Dieser Einfluss hängt sehr stark von dem Verhältnis aus Zellengröße r_z , der mittleren Teilnehmergewindigkeit v_{mean} und der mittleren Dauer einer Verbindung $\overline{T_B}$ (siehe Abschnitt 2.1.1) ab. Die Beschreibung der Ermittlung von $M_{BS,norm}$ aus den Teilnehmerverkehrsmodellen erfolgt in Kapitel 4.

Die grafische Bestimmung der maximalen Zellenradien $r_{z,v}(D_T=10^2/\text{km}^2, G_{oS}=0.01, m_{BS})$ zeigt Bild 5.19. Die Abszissenwerte der Schnittpunkte der Kurve für die Teilnehmeranzahl $M_{BS}(D_T=10^2/\text{km}^2, r_{z,v})$, die sich in einer Funkzelle mit dem Radius $r_{z,v}$ befindet, mit der Kurvenschar $M_{BS}(r_{z,v}, G_{oS}=0.01, m_{BS})$ sind die maximal möglichen Radien $r_{z,v}(D_T=10^2/\text{km}^2, G_{oS}=0.01, m_{BS})$.

Die analytische Berechnung erhält man durch Lösen der nichtlinearen Bestimmungsgleichung

$$r_{z,v}(N_C, n_{zs}, B_{ges}, D_T):$$

$$M_{BS,norm}(G_{oS}, m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}), r_{z,v}) \cdot m_{BS}(N_C, n_{zs}, B_{ges}) - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} D_T \cdot (r_{z,v})^2 = 0 \quad (5.39)$$

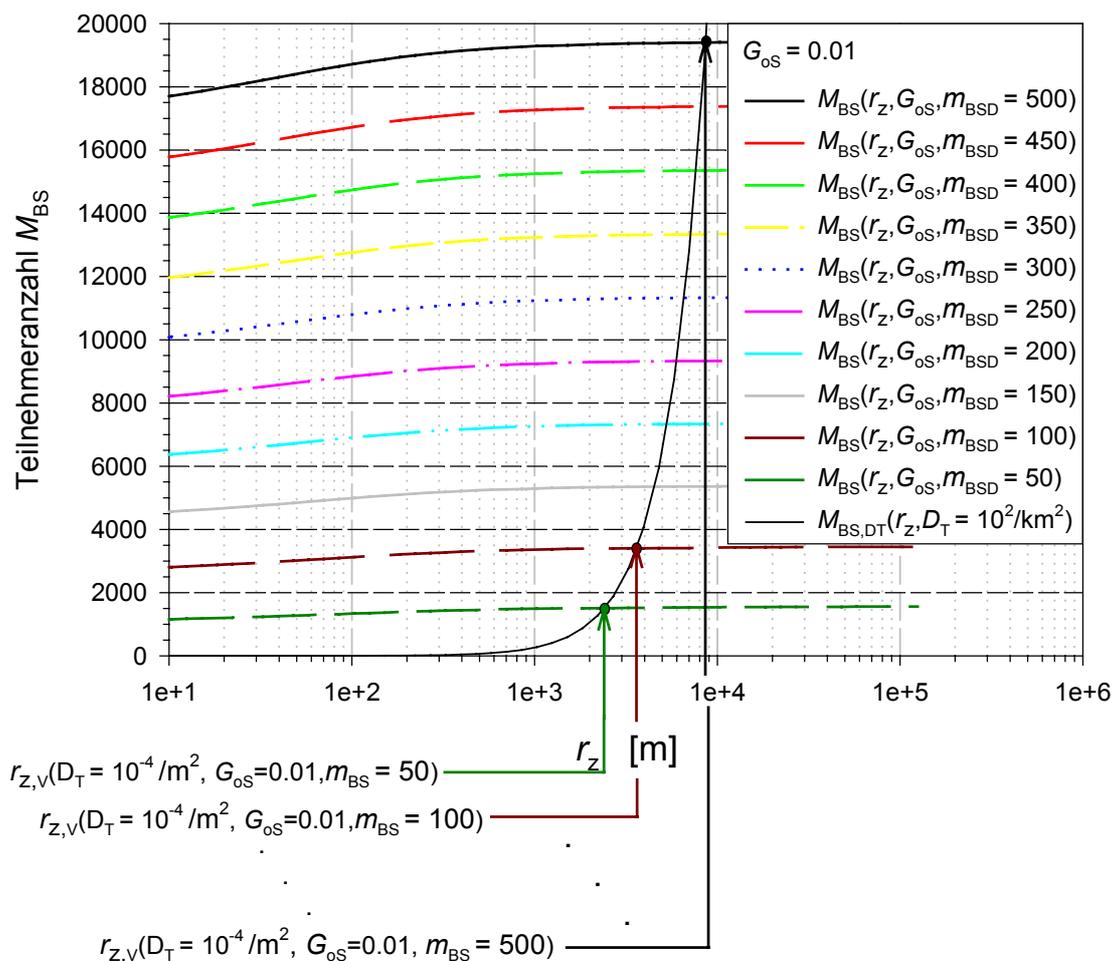


Bild 5.19 Bestimmung der maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(D_T, m_{BS})$ in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T und der Anzahl der Duplex-Kanäle pro Basisstation m_{BS} , für die die geforderte Verkehrsgüte G_{os} garantiert wird

Die Nullstelle der obigen nicht linearen Gleichung sind die Radien $r_{z,v}(N_C, n_{zs}, B_{ges}, D_T)$. Sie sind, neben der Clustergröße N_C und der Anzahl n_{zs} der realisierten Zeitschlitz, von der für das gesamte System eingesetzten Bandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_T abhängig. Die Nullstelle der obigen nicht linearen Gleichung läßt sich mit den bekannten Verfahren der numerischen Mathematik (z.B. regula-falsi) [2] bestimmen. Das mathematische Berechnungs-Tool MatLab [21], das im Rahmen dieser Arbeit für die Berechnungen verwendet wurde, arbeitet mit einer Kombination von bekannten Verfahren. Der maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,v}(N_C, n_{zs}, B_{ges}, D_T)$ wächst aufgrund des Bündelungsgewinns stärker als $\sqrt{m_{BS}}$.

Unter *Bündelungsgewinn* versteht man die Zunahme der zulässigen Anzahl $M_{BS, norm}$ von Teilnehmern pro Kanal mit der den Teilnehmern im Versorgungsgebiet einer Basisstation zur Verfügung stehenden Anzahl von Kanälen m_{BS} .

Verstärkt wird die Zunahme durch die Abnahme der zusätzlichen, durch Handover verursachten Verkehrslast.

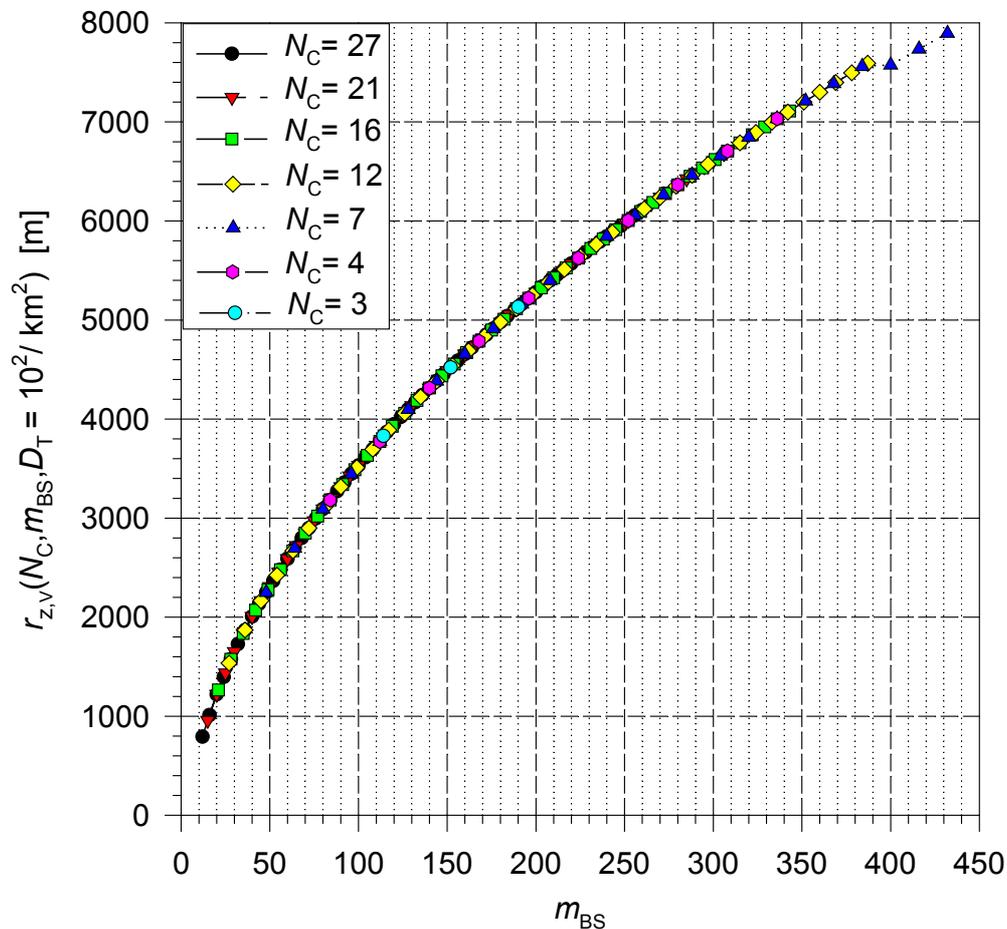


Bild 5.20 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, m_{BS}, B_{\text{ges}}=25\text{MHz}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl der Duplex-Kanäle m_{BS} bei einer Verkehrsnennangebotsdichte $D_A=2.5 \text{ E}/\text{km}^2$

Die Verkehrsnennangebotsdichte

$$D_A = A_T \cdot D_T \quad (5.40)$$

ist der angebotene Verkehr pro Fläche, bei dem die Verkehrsgüte G_{oS} gerade noch eingehalten wird.

Die mittlere Teilnehmergegeschwindigkeit beträgt $v_{\text{mean}}=20 \text{ m/s}$, der mittlere Ankunftsabstand $\overline{T_A} = 5 \cdot 10^3 \text{ s}$ und die mittlere Gesprächsdauer $\overline{T_B} = 125 \text{ s}$. Bild 5.20 bestätigt die Ergebnisse in Bild 5.18 für die maximale Anzahl von Kommunikationskanälen in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C . Für die Clustergröße $N_C=7$ wird die maximale Anzahl von Kanälen erreicht.

Dies ermöglicht die Versorgung der maximalen Anzahl von Teilnehmern bei der gegebenen Gesamtbandbreite B_{ges} . Für die gegebene Verkehrsnennangebotsdichte von $D_A=2.5 \text{ E/km}^2$ ist für die geforderte Verkehrsgüte $G_{\text{os}} = 0.01$ bei Verwendung der Clustergröße $N_C=7$ ein maximales Versorgungsgebiet von nahezu 8 km möglich. Dabei wird von jedem Teilnehmer ein Verkehrsangebot von $A_T=25 \text{ mErl}$ erzeugt.

Im folgenden Bild 5.21 sind die möglichen Radien in Abhängigkeit von der Anzahl der realisierten Zeitschlitz n_{zs} abgebildet.

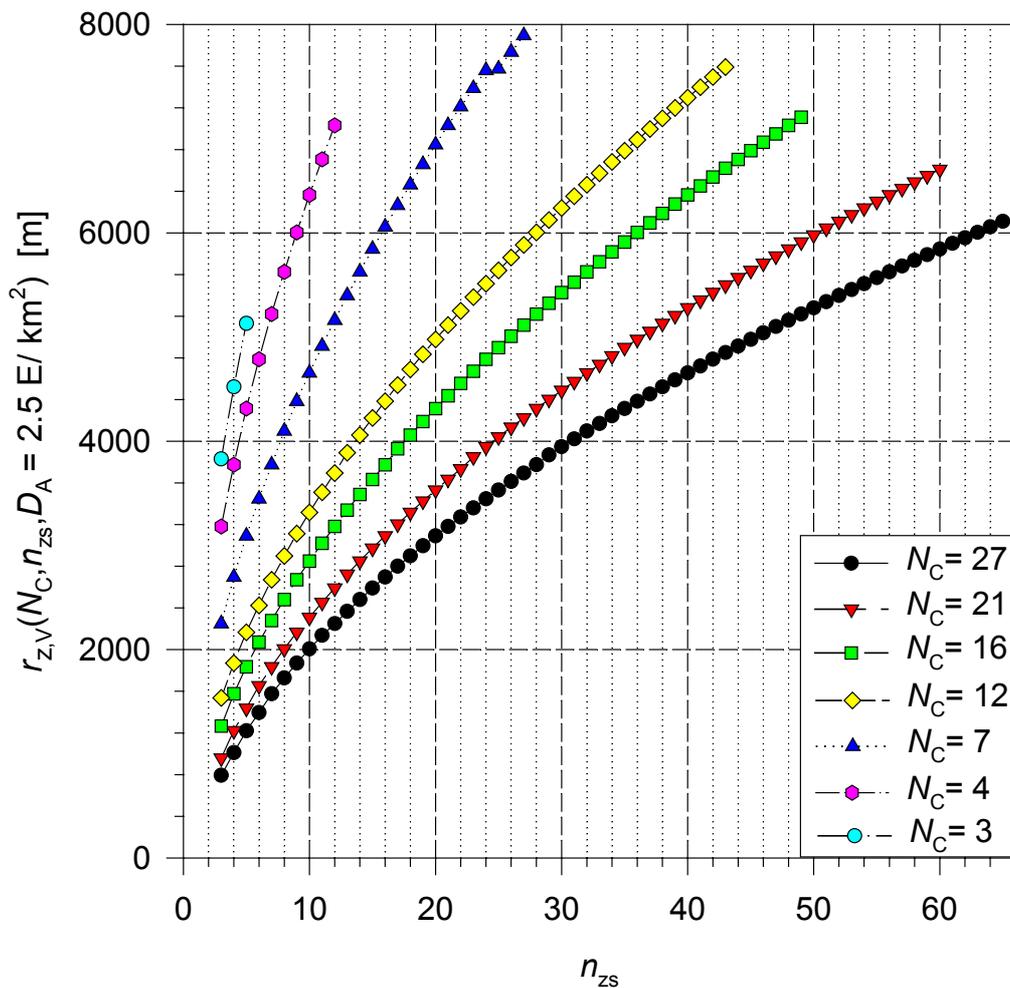


Bild 5.21 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, m_{\text{BS}}, B_{\text{ges}} = 25 \text{ MHz}, D_T = 10^2/\text{km}^2)$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl der Zeitschlitz n_{zs}

Die Darstellung lässt sich durch die Multiplikation der Anzahl der Zeitschlitz mit der Anzahl der Träger in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C in die Darstellung in Bild 5.20 überführen. Diese maximalen Funkzellenradien $r_{z,v}(N_C, n_{zs}, B_{\text{ges}}, D_T)$ in Abhängigkeit der Variablen N_C und n_{zs} garantieren die Verkehrsgüte, aber nicht die geforderte Übertragungsgüte. Diese ga-

rantieren die maximalen und minimalen Radien $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ und $r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ in Bild 5.16. Die maximalen Funkzellenradien, bei denen beide Dienstgüteforderungen erfüllt sind, werden im folgenden Abschnitt ermittelt.

5.2.3 Der maximale Funkzellenradius und die Bestimmung der optimalen, freien Systemgrößen

Der Optimierungsvorgang endet mit der Ermittlung des maximalen Funkzellenradius aus den Radien $r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ und $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte und den Radien $r_{z,\text{V}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ für die geforderte Verkehrsgüte. Mit Hilfe der ermittelten optimalen Werte für die Variablen $N_{C,\text{opt}}$ und $n_{z\text{s,opt}}$ werden in Abschnitt 5.2.3.2 über die entsprechenden Gleichungen oder Kennlinien die anderen Systemparameter (in Bild 5.3 weiß unterlegt) abgeleitet.

5.2.3.1 Ermittlung des maximalen Funkzellenradius

Aus den beiden maximalen Funkzellenradien $r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ und $r_{z,\text{V}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ ist der kleinere zu wählen, damit die geforderte Übertragungsgüte und Verkehrsgüte gewährleistet ist.

Das Ergebnis der Minimumbildung muss aber auch größer als $r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ sein. Gleichung (5.41) beschreibt diesen Zusammenhang mathematisch.

$$r_{z,\text{max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T) = \min(r_{z,\text{SINR,max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}), r_{z,\text{V}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)) \wedge \quad (5.41)$$

$$r_{z,\text{max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T) \geq r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$$

Für den Fall, dass der ermittelte Wert $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ kleiner als $r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ ist, existiert für dieses Wertepaar $(N_C, n_{z\text{s}})$ kein maximaler Radius. Für $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ kleiner $r_{z,\text{SINR,min}}(N_C, n_{z\text{s}}, B_{\text{ges}})$ sind die Forderungen, dass der Radius sowohl kleiner oder höchstens gleich $r_{z,\text{max}}$ sein darf und aber gleichzeitig größer oder gleich $r_{z,\text{SINR,min}}$ sein muss, nicht erfüllbar.

Bild 5.22 zeigt zum einen die Radien, bei denen die geforderte Übertragungsgüte (gleich wie in Bild 5.16) garantiert ist, und zum anderen die maximalen Radien zur Einhaltung der geforderten Verkehrsgüte G_{os} (gleich wie in Bild 5.21).

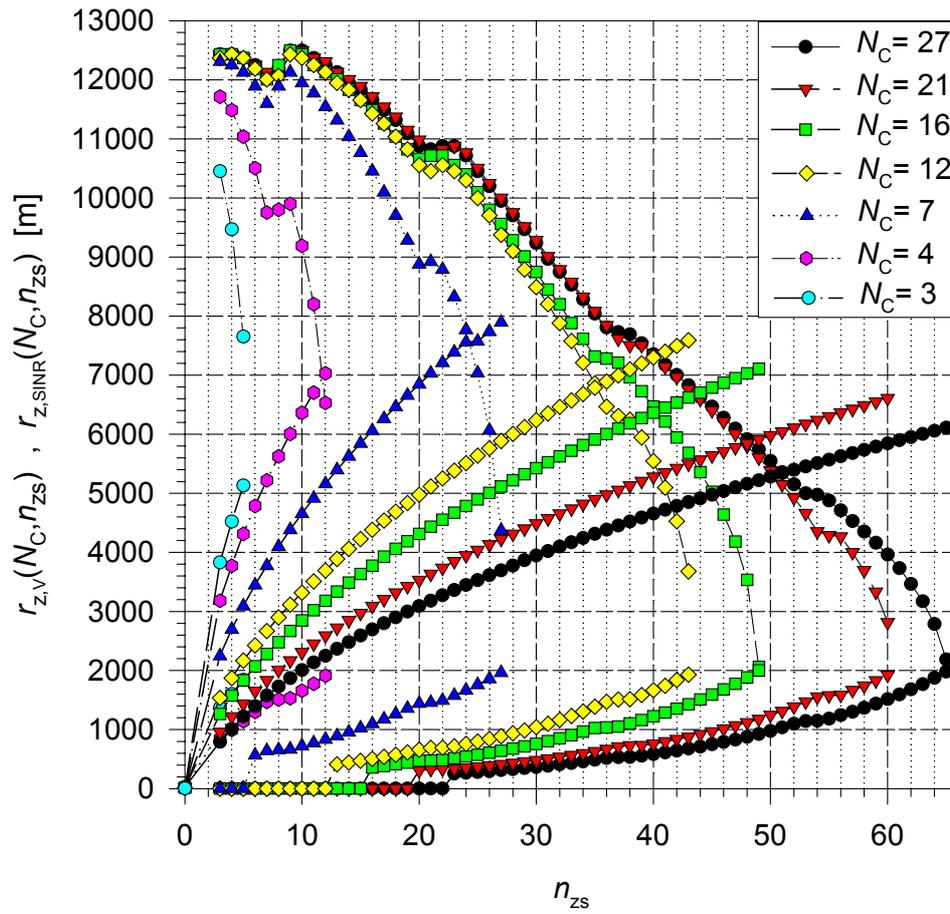


Bild 5.22 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, n_{zs}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ bei einer Verkehrsennangebotsdichte $D_A=2.5 \text{ E}/\text{km}^2$ und die minimalen und maximalen Radien zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte

Die Bestimmung der maximalen Radien $r_{z,\max}(N_C, n_{zs}, B_{\text{ges}}, D_T)$ in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der Zeitschlitz n_{zs} erfolgt durch die Anwendung von Gleichung (5.41) für jedes Wertepaar (N_C, n_{zs}) .

Bild 5.23 enthält das Ergebnis der Anwendung von Gleichung (5.41) auf die Kurven in Bild 5.22. Der maximale Zellenradius $r_{z,\text{opt}} \cong 7.6 \text{ km}$ wird für die Clustergröße $N_{C,\text{opt}}=7$ und bei einer Anzahl von $n_{zs,\text{opt}}=24$ Zeitschlitz erreicht.

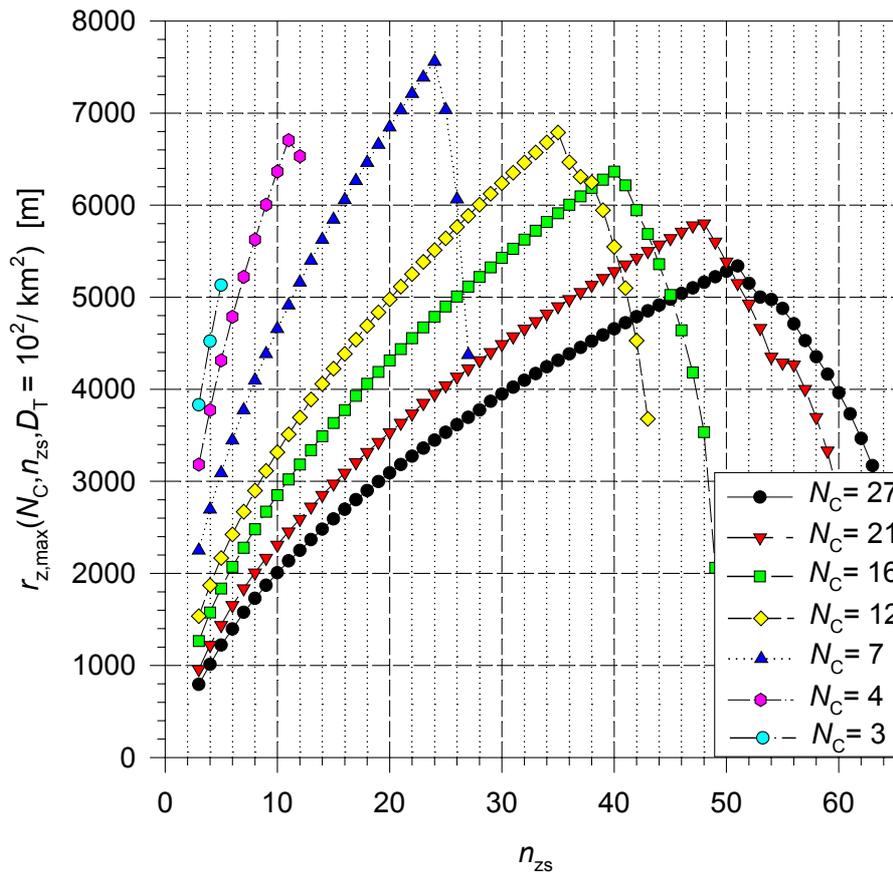


Bild 5.23 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,\max}(N_C, n_{zs}, B_{\text{ges}}=25 \text{ MHz}, D_A=2.5 \text{ E/km}^2 (D_T=10^2/\text{km}^2))$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl n_{zs} der Zeitschlitz

Analytisch wird der maximale Radius $r_{z,\text{opt}}$ durch eine Maximumsuche der zweidimensionalen Funktion $r_{z,\max}(N_C, n_{zs}, B_{\text{ges}}=25 \text{ MHz}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ berechnet.

$$r_{z,\text{opt}}(N_{C,\text{opt}}, n_{zs,\text{opt}}) = \max_{\forall N_C, n_{zs}} (r_{z,\max}(N_C, n_{zs})) \quad (5.42)$$

Dies kann in zwei Schritten erfolgen. Zuerst werden die Maxima für die unterschiedlichen Clustergrößen N_C mit den zugehörigen Werten für die jeweils optimale Anzahl von Zeitschlitz $n_{zs,\text{opt}}(N_C)$ ermittelt, und anschließend aus diesen Werten $r_{z,\text{opt}}(N_C)$ das Maximum $r_{z,\text{opt}}(N_{C,\text{opt}})$ und die optimale Clustergröße $N_{C,\text{opt}}$ bestimmt.

5.2.3.2 Ermittlung der optimalen Systemgrößen (siehe Bild 5.3)

Aus der Bestimmung des maximal erreichbaren Zellenradius sind die optimalen, variablen Systemparameter $N_{C,\text{opt}}$ und $n_{zs,\text{opt}}$ bekannt. Die anderen Systemparameter lassen sich mit den

Gleichungen oder Kennlinien bestimmen, bei denen die optimale Clustergröße $N_{C,\text{opt}}$ und die optimale Anzahl von Zeitschlitzten $n_{\text{zs},\text{opt}}$ die variablen Größen sind.

Optimale Clustergröße $N_{C,\text{opt}}$

Sie ist die Clustergröße N_C , bei der der Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{\text{zs}})$ maximal wird (siehe Abschnitt 5.2.3.1).

Optimale Anzahl von Zeitschlitzten $n_{\text{zs},\text{opt}}$

Die optimale Anzahl $n_{\text{zs},\text{opt}}$ der Zeitschlitzte pro TDM-Rahmen ist der Wert des variablen Systemparameters n_{zs} , bei dem der Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(N_C, n_{\text{zs}})$ maximal wird (siehe Abschnitt 5.2.3.1).

Optimale Trägerfrequenzbandbreite $B_{\text{Tr},\text{opt}}$ und optimale Anzahl von Trägerfrequenzen $n_{\text{Tr},\text{opt}}$

Die optimale Trägerbandbreite $B_{\text{Tr},\text{opt}}$ weicht von der vorgegebenen Bandbreite $B_{\text{Tr},0}$ durch die Verwendung ganzzahliger Werte für die Anzahl der Träger pro Basisstation $n_{\text{Tr},\text{BS}}$ ab. Sie ist

$$B_{\text{Tr},\text{opt}} = B_{\text{Tr}}(N_{C,\text{opt}}) \quad . \quad (5.43)$$

Die Berechnung der Werte für $B_{\text{Tr},\text{opt}}(N_{C,\text{opt}})$ und die Abschätzung der maximalen Abweichungen von $B_{\text{Tr},0}$ werden in Abschnitt 5.2.2.2 beschrieben. Die optimale Anzahl von Trägerfrequenzen ist durch die optimale Wahl der Trägerfrequenzbandbreite $B_{\text{Tr},\text{opt}}$ festgelegt zu

$$n_{\text{Tr},\text{opt}} = \frac{B_{\text{ges}} \cdot r_{f,\text{Tr}}}{B_{\text{Tr},\text{opt}}} \quad . \quad (5.44)$$

Das Ergebnis von Gleichung (5.44) ist ganzzahlig, da die Trägerfrequenzbandbreiten $B_{\text{Tr}}(N_{C,\text{opt}})$ so gewählt wurden, dass sich eine ganzzahlige Anzahl $n_{\text{Tr},\text{BS}}(N_C)$ Trägerfrequenzen pro Basisstation und dadurch auch eine ganzzahlige Gesamtanzahl $n_{\text{Tr}}(N_C)$ Trägerfrequenzen ergibt (Abschnitt 5.2.2.2).

Optimale Sendeleistung $S_{\text{S},\text{opt}}$

Die Sendeleistung S_{S} wird so hoch gewählt (Bild 5.14), dass die mittlere Sendeleistung $S_{\text{S},\text{mean}}$ erreicht und die maximale Sendeleistung $S_{\text{S},\text{max}}$ nicht überschritten wird. Aus Gleichung (5.31) ist die optimale Sendeleistung auf

$$S_{S,\text{opt}} = \frac{n_{zS,\text{opt}}}{n_{zS,\text{min}}} S_{S,\text{mean}} \quad \wedge \quad S_{S,\text{opt}} \leq S_{S,\text{max}} \quad (5.45)$$

einzustellen.

Optimale Anzahl von Modulationsstufen $M_{\text{Mod,opt}}$ und die optimale Coderate R_{Code}

Zur Realisierung der $n_{zS,\text{opt}}$ Zeitschlitze ist nach Gleichung (5.28) ein bestimmtes Verhältnis $R_{0,\text{opt}}$ der Informationsdatenrate zur Symbolrate erforderlich. Dieses Verhältnis $R_{0,\text{opt}}$ bestimmt über die Kennlinie $\rho_{\text{norm,res}}(R_0)$ (Bild 5.11), die das Modulationsverfahren beschreibt, die optimale Anzahl von Modulationsstufen

$$M_{\text{Mod,opt}} = M_{\text{Mod}}(R_{0,\text{opt}}) \quad (5.46)$$

und das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis

$$\rho_{\text{min,opt}} = \eta_{\text{sym}} \cdot \rho_{\text{norm,res}}(R_{0,\text{opt}}) \quad (5.47)$$

Der Faktor η_{sym} ist der Bandausnutzungsfaktor und beschreibt die Anzahl der übertragenen Symbole pro Hz. Die zu verwendende Coderate nach dem R_0 -Kriterium ist nach Gleichung (5.16)

$$R_{\text{Code,opt}} = \frac{R_{0,\text{opt}}}{\text{ld}(M_{\text{Mod,opt}})} \quad \text{ld}(\) = \log_2(\) \quad (5.48)$$

Diese Werte sind die optimalen Parameter für die gegebenen Eingabeparameter, um eine maximale Bedeckung durch eine Basisstation zu erreichen und stellen somit eine kostenoptimale Lösung dar. Wenn die gesamte zur Verfügung stehende Bandbreite B_{ges} variabel ist, kann durch eine übergeordnete Optimierung mit einer Kostenfunktion, die sowohl die Kosten für die Bandbreite als auch die Investitionskosten pro Basisstation enthält, eine Optimierung der Gesamtbandbreite vorgenommen werden. Dazu wird der oben beschriebene Optimierungsvorgang für den maximalen Zellenradius für verschiedene Bandbreiten B_{ges} durchgeführt. Dies wird in Abschnitt 5.3 durchgeführt.

Im folgenden Abschnitt ist die Abhängigkeit des optimalen Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(N_{C,\text{opt}}, n_{zS,\text{opt}}, B_{\text{ges}}, D_T)$ in Bild 5.24 dargestellt und das Ergebnis interpretiert.

5.2.4 Die maximalen Funkzellenradien in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_{T}

Das folgende Bild 5.24 zeigt die Abhängigkeit des optimierten Zellenradius $r_{z,\text{max}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ von der zur Verfügung stehenden Gesamtbandbreite und der B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_{T} .

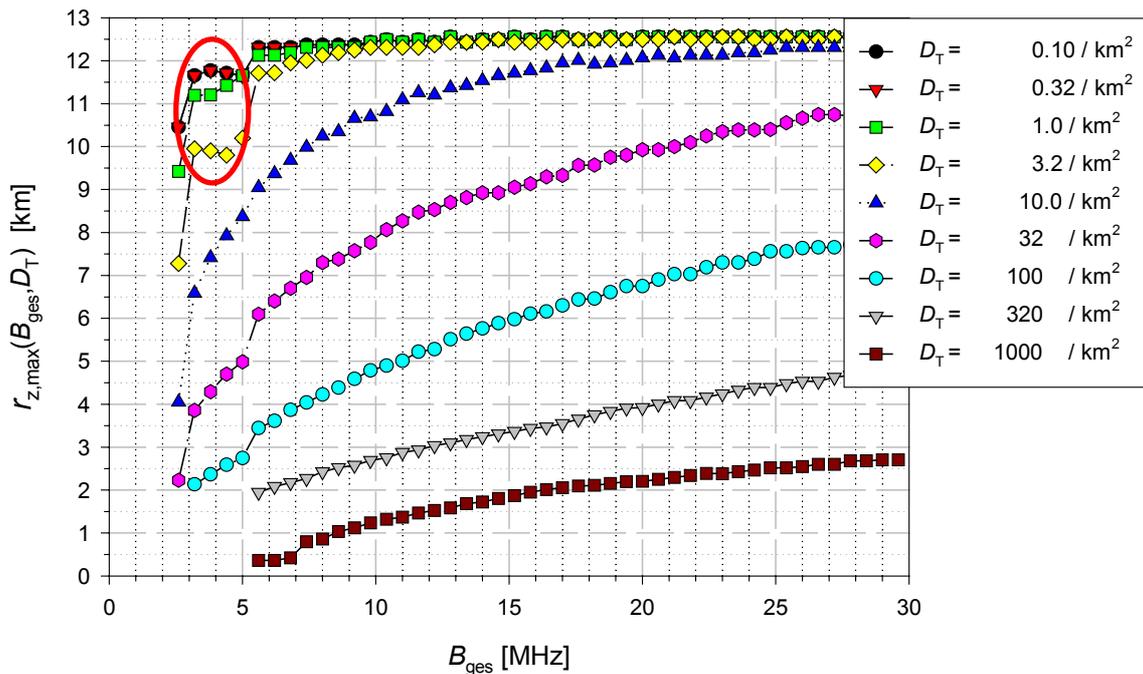


Bild 5.24 Die maximal möglichen Funkzellenradien $r_{z,\text{max}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite B_{ges} des Systems und der Teilnehmerdichte D_{T}

Der Radien $r_{z,\text{max}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ sind die maximal möglichen Radien bei optimaler Einstellung der Systemgrößen wie sie in den Abschnitten davor beschrieben ist. Bei mittleren großen Teilnehmerdichten ($D_{\text{T}} = 10 - 1000 \text{ Tln./km}^2$) - das entspricht einer mittleren bis hohen Verkehrs-Nennangebotsdichte - ist durch den Einsatz von größeren Bandbreiten ein deutlicher Anstieg der Funkzellenradien möglich.

Für kleine Dichten unter 10 Teilnehmern / km² bewirkt eine Erhöhung der Bandbreite nur eine geringfügige Erhöhung (< 10%) der Funkzellenradien. Dieses System stößt in diesem Bereich der großen Radien aufgrund des Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnisses (SNR) an seine Grenzen. Durch Verwendung von mehr Bandbreite ist ein höherer Fehlerkorrekturanteil an der Datenrate möglich, damit wird eine geringfügige Erhöhung der Radien erreicht. Bei der

Kostenanalyse in Abschnitt 5.3 zeigt sich, dass für kleine Teilnehmerdichten auch die kostenoptimale Bandbreite entsprechend klein ist (Bild 5.28).

 : An der rot eingekreisten Stelle in Bild 5.25 sinkt der maximale Funkzellenradius obwohl die Ressource Gesamtbandbreite erhöht wird. Warum? Die Erklärung ist in Bild 5.25 zu finden.

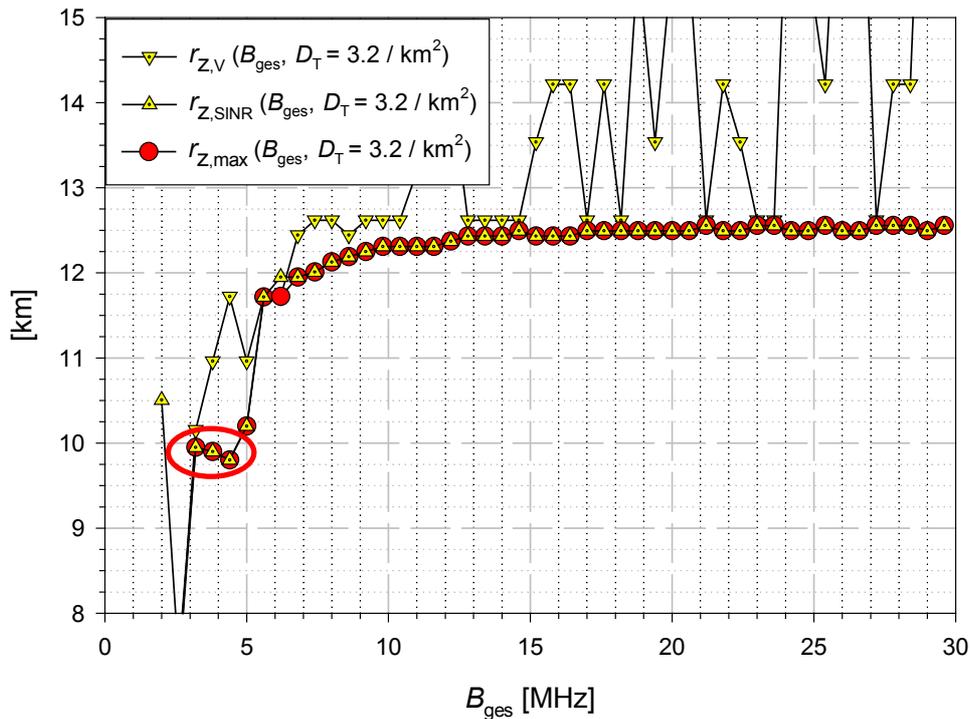


Bild 5.25 Die maximalen möglichen Funkzellenradien aufgrund des geforderten SINR $r_{z,SINR}$ und der geforderten Verkehrsgüte $r_{z,V}$ und der daraus abgeleitete maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,max}$ für $D_T = 3.2/\text{km}^2$

Das Bild zeigt, dass auch in diesem fallenden Bereich der Kennlinie (rot eingekreist) der maximale Funkzellenradius $r_{z,max}$ durch das geforderte Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR) begrenzt ist. Dieses ist in diesem Bereich nahezu konstant (minimal fallend, hier nicht dargestellt). Wäre die Bandbreite konstant, müsste nach der Kennlinie in Bild 5.15 der Radius leicht ansteigen. Durch die Erhöhung der Bandbreite B_{ges} erhöht sich jedoch die empfangene Rauschleistung. Dadurch wandern die abfallenden Flanken der Kurven in Bild 5.15 nach links zu kleineren Radien. Somit wird der maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,SINR}$ trotz leicht fallendem geforderten SINR kleiner und somit auch $r_{z,max}$.

5.3 Optimale Wahl der Gesamtbandbreite

Der maximale Gewinn wird erzielt, wenn die Versorgungsfläche F_{BS} einer Basisstation möglichst groß ist (Gleichung (5.7)). Der kostenoptimale Radius der Funkzellen ist unter Einhaltung der geforderten Dienstgüte gleich dem maximalen Radius $r_{z,\max}(B_{\text{ges}}, D_T)$. Der maximale Funkzellenradius mit den dazugehörigen optimalen Werte für die Clustergröße N_C , die Code-rate der Kanalcodierung in Verbindung mit der Anzahl der Modulationsstufen, die maximale Sendeleistung und die optimale Anzahl der Zeitschlitze pro Zeitrahmen wurde in Abschnitt 5.2 bestimmt. Das folgende Bild 5.26 gibt einen Überblick über die Größen, die in die Gesamtbreitenoptimierung eingehen.

Der maximale Funkzellenradius $r_{z,\max}(B_{\text{ges}}, D_T)$ ist von der Teilnehmerdichte D_T im Versorgungsgebiet und der zur Verfügung stehenden Bandbreite B_{ges} abhängig. Auf die wiederholte Darstellung der Abhängigkeit von $r_{z,\max}$ von der geforderten Dienstgüte und der Vielzahl von gegebenen Systemgrößen (wie sie in Abschnitt 5.2 beschrieben sind) wird in den folgenden Gleichungen aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Nach Einsetzen des maximalen Funkzellenradius $r_{z,\max}(B_{\text{ges}}, D_T)$ (= Ergebnis des 1. Optimierungsschrittes) für r_z erhält man die Gewinnfunktion P nach Gleichung (5.7)

$$P(B_{\text{ges}}, D_T, F_N, r_z(B_{\text{ges}}, D_T), \gamma_M, C_B, \gamma_B, C_N, \gamma_N, \gamma_{BS}) = \gamma_M D_T F_N - \left[\left(C_N + \gamma_N F_N + \frac{2 \gamma_{BS} F_N}{3\sqrt{3} r_{z,\max}^2(B_{\text{ges}}, D_T)} \right) / \tau_N + (C_B + \gamma_B B_{\text{ges}} F_N) / \tau_B \right] \quad (5.49)$$

Die Bedeutung der Kostenfaktoren ist im folgenden Bild 5.26 dargestellt.

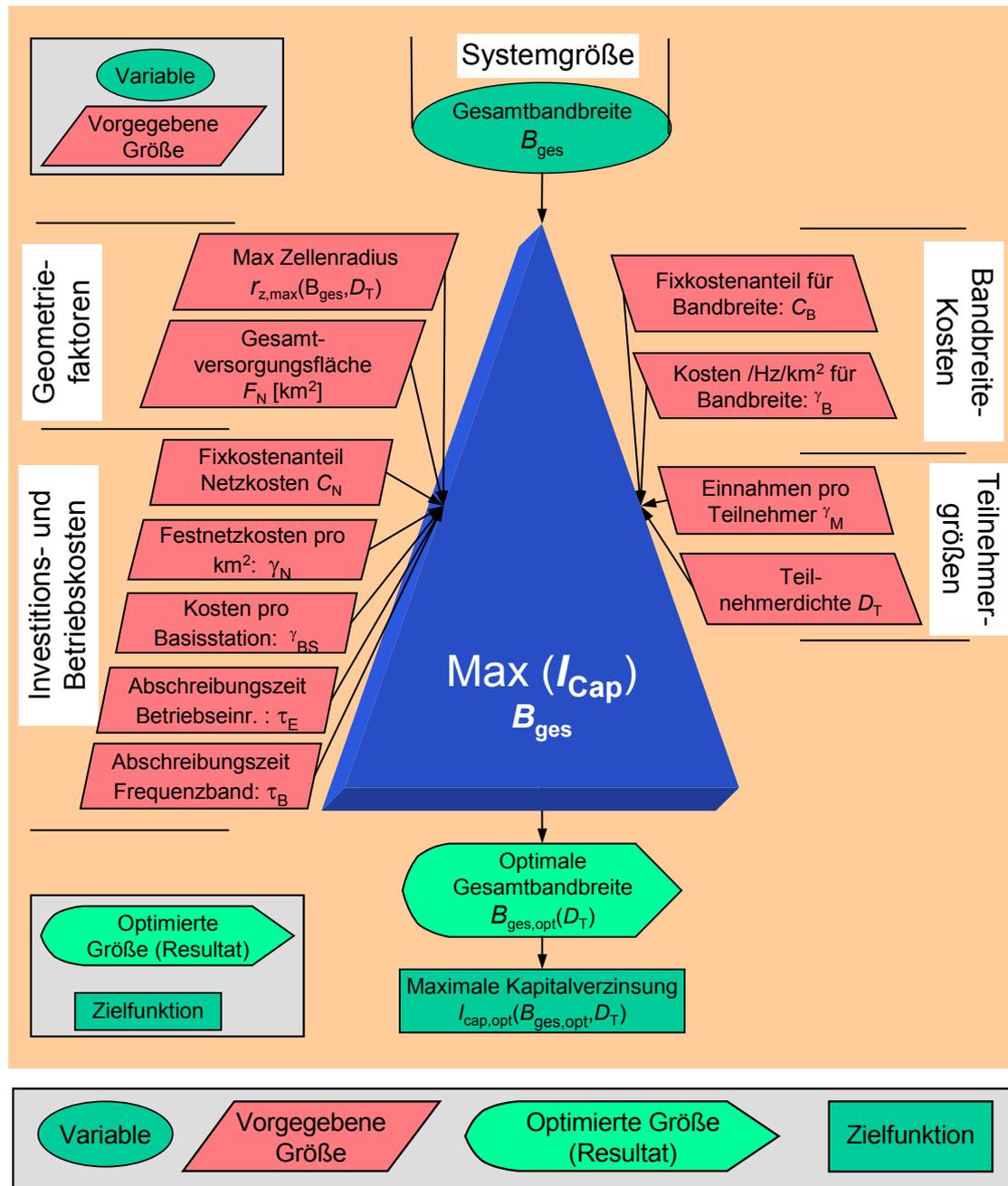


Bild 5.26 Algorithmus zur Bestimmung der kostenoptimalen Gesamtbandbreite $B_{\text{ges,opt}}$

Alle Größen bis auf die Bandbreite B_{ges} und der von B_{ges} abhängige maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,\text{max}}(B_{\text{ges}}, D_T)$ sind für diesen 2. Schritt der Optimierung konstant. Die Kapitalverzinsung I_{Cap} ist

$$I_{\text{Cap}} = \frac{P}{C_{\text{ap}}} \quad (5.50)$$

Sie ist der Quotient aus dem Reingewinn nach laufenden Kosten, Abschreibung und Steuern P und dem investierten Kapital C_{ap} .

Das eingesetzte *Kapital* besteht zum einen aus dem Kapital für die Betriebseinrichtungen und zum anderen aus dem Kapital für das durch das Mobilfunksystem belegte Frequenzspektrum (bei Einmalzahlung):

$$C_{\text{ap}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}}, F_{\text{N}}, r_{\text{z}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}}), \gamma_{\text{M}}, C_{\text{B}}, \gamma_{\text{B}}, C_{\text{N}}, \gamma_{\text{N}}, \gamma_{\text{BS}}) = \left(C_{\text{N}} + \gamma_{\text{N}} F_{\text{N}} + \frac{2 \gamma_{\text{BS}} F_{\text{N}}}{3\sqrt{3} r_{\text{z}, \text{max}}^2(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})} \right) + (C_{\text{B}} + \gamma_{\text{B}} B_{\text{ges}} F_{\text{N}}) \quad (5.51)$$

Ein sehr wichtiges wirtschaftliches Optimierungsziel ist es, die Kapitalverzinsung zu maximieren. Dies wird im folgenden beschrieben.

Für die dargestellte Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite B_{ges} und Teilnehmerdichte D_{T} in Bild 5.27 sind folgende Werte gewählt worden:

Gesamtfläche des Versorgungsgebiets	$F_{\text{N}} = 4 \cdot 10^5 \text{ km}^2$
Fixe Netzinvestitionskosten:	$C_{\text{N}} = 1 \cdot 10^7$
Fixkosten Frequenzspektrum:	$C_{\text{B}} = 1 \cdot 10^7$
Netzinvestitionskosten pro Flächeneinheit	$\gamma_{\text{N}} = 500 / \text{km}^2$
Lizenzkosten für das belegte Spektrum	$\gamma_{\text{B}} = 2 \cdot 10^3 / (\text{MHz} \cdot \text{km}^2)$
Investitionskosten pro Basisstation	$\gamma_{\text{BS}} = 1 \cdot 10^6$
Abschreibungszeitraum für Betriebseinrichtungen	$\tau_{\text{E}} = 8 \text{ Jahre}$
Abschreibungszeitraum für Spektrum (= Gültigkeitsdauer der Lizenz)	$\tau_{\text{B}} = 30 \text{ Jahre}$
Einnahmen pro Teilnehmer und Jahr nach Abzug aller <u>laufender</u> Kosten und Steuern	$\gamma_{\text{M}} = 200 / \text{a} .$

Die vorhandene Abhängigkeit der Kosten von den Dienstgüteparametern, den Parametern, die das Teilnehmerverhalten beschreiben und den Systemgrößen, fließt über die Größe des maximalen Funkzellenradius $r_{\text{z}, \text{max}}$ in das Ergebnis mit ein.

Das Bild 5.27 zeigt die erreichbare mögliche Verzinsung I_{Cap} des investierten Kapitals in ein Mobilfunksystem, in Abhängigkeit von der eingesetzten Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_{T} nach dem ersten Schritt der Optimierung des Funkzellenradius r_{z} .

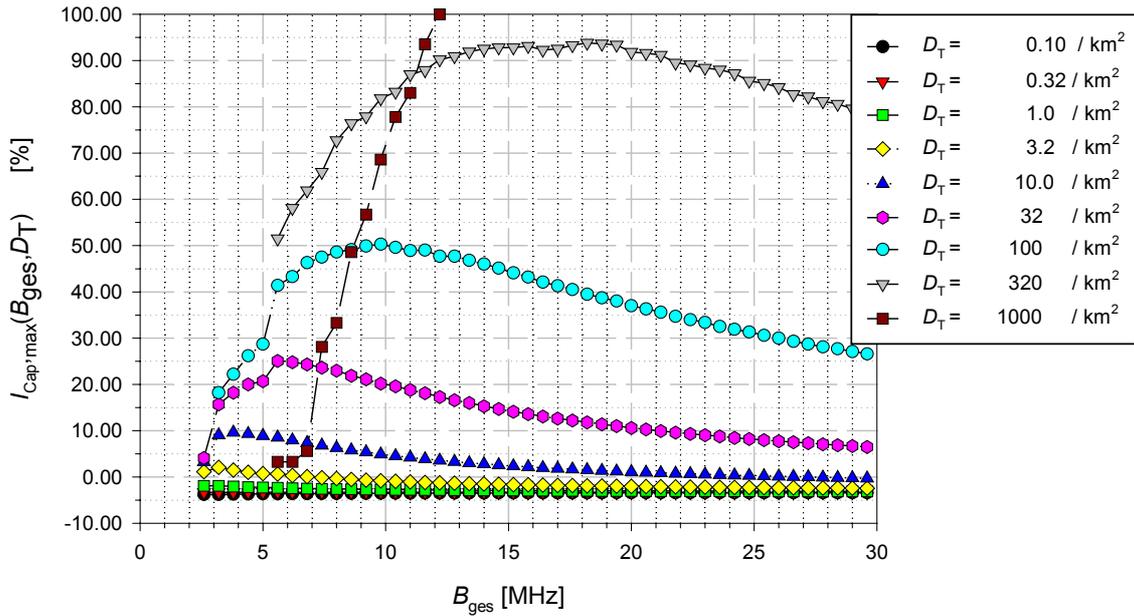


Bild 5.27 Die Verzinsung I_{Cap} des in ein Mobilfunksystem investierten Kapitals (interest rate) in Abhängigkeit von der gewählten Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_T (Sprach-Teilnehmer mit Verkehrsangebot $A=25\text{mErl}$)

Aus Bild 5.27 ist ersichtlich, dass für Teilnehmerdichten $D_T < 3.2$ Tln./km² kein Reingewinn erzielbar ist, die Kapitalverzinsung I_{Cap} ist damit negativ. Für zunehmende Teilnehmerdichten zeigt die Kapitalverzinsung I_{Cap} eine verstärkte Abhängigkeit von der gewählten Gesamtbandbreite B_{ges} . Die optimale Gesamtbandbreite $B_{\text{ges,opt}}$ für eine Teilnehmerdichte D_T ist die, bei der die Kapitalverzinsung (return on invest) I_{Cap} maximal wird. Die Bestimmung von $B_{\text{ges,opt}}$ erfolgt über den Ansatz zur Bestimmung von Maxima nach Gleichung (5.52) [2].

$$B_{\text{ges,opt}}(D_T): \quad \left. \frac{\partial I}{\partial B_{\text{ges}}} \right|_{B_{\text{ges,opt}}} = 0 \quad \wedge \quad \left. \frac{\partial^2 I}{\partial^2 B_{\text{ges}}} \right|_{B_{\text{ges,opt}}} < 0 \quad (5.52)$$

Nach Verwendung der Quotientenregel in Gleichung (5.52) in Verbindung mit der Definitivengleichung (5.50) der Kapitalverzinsung I_{Cap} erhält man:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial B_{\text{ges}}} C_{\text{ap}} \right|_{B_{\text{ges,opt}}} - \left. \frac{\partial C_{\text{ap}}}{\partial B_{\text{ges}}} P \right|_{B_{\text{ges,opt}}} = 0 \quad \wedge \quad \left. \frac{\partial^2 I}{\partial^2 B_{\text{ges}}} \right|_{B_{\text{ges,opt}}} < 0 \quad (5.53)$$

Diese Optimierung von $I_{\text{Cap}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ wird für jede der zu untersuchenden Teilnehmerdichten D_{T} mit der Bestimmungsgleichung (5.53) durchgeführt. Eine andere Möglichkeit ist die numerische Suche des Maximums aus den berechneten Punkten der entsprechenden Kurve (Bild 5.27). Das Ergebnis in Bild 5.28 zeigt den Zuwachs der in Bezug auf die Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap}}(B_{\text{ges}}, D_{\text{T}})$ optimal gewählten Gesamtbandbreite $B_{\text{ges, opt}}$ für ein Mobilfunksystem mit den oben aufgelisteten betriebswirtschaftlichen Faktoren in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_{T} . Dabei wurde ein Sprachdienst-Teilnehmer mit einem Verkehrsangebot von $A=25$ mErl angenommen.

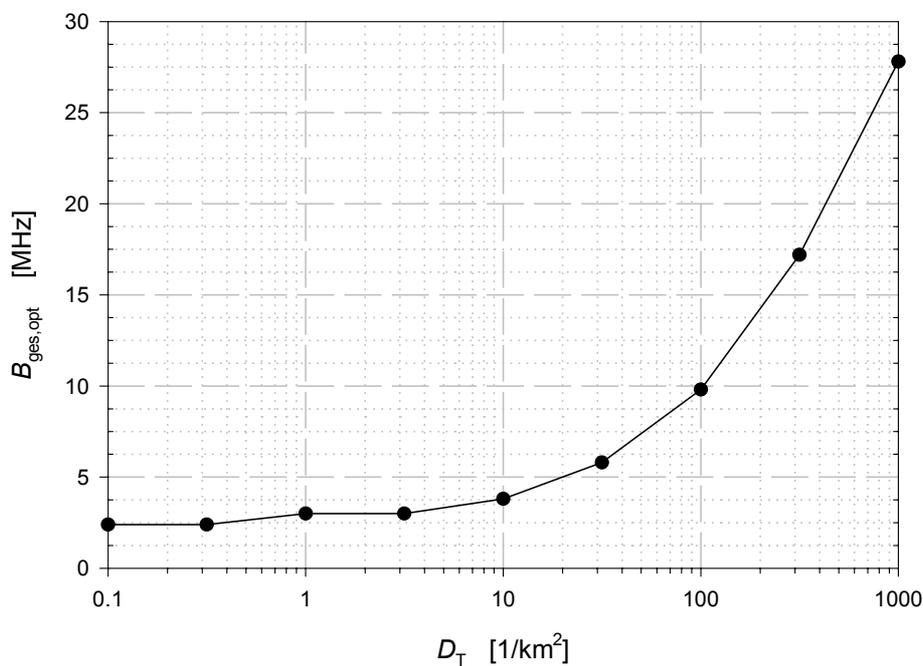


Bild 5.28 Die optimalen Werte Gesamtbandbreite $B_{\text{ges, opt}}$, in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_{T} , bei der die Kapitalverzinsung I_{Cap} maximal wird

Die resultierende Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap}}(B_{\text{gesopt}}, D_{\text{T}})$ bei optimaler Wahl der Gesamtbandbreite mit $B_{\text{gesopt}}(D_{\text{T}})$ ist im folgenden Bild dargestellt. Die Zunahme der Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap}}(B_{\text{gesopt}}, D_{\text{T}})$ ist nur aufgrund des logarithmischen Maßstabs D_{T} progressiv. Der Steigung ist bei linearer Skalierung der Abszisse aber abnehmend.

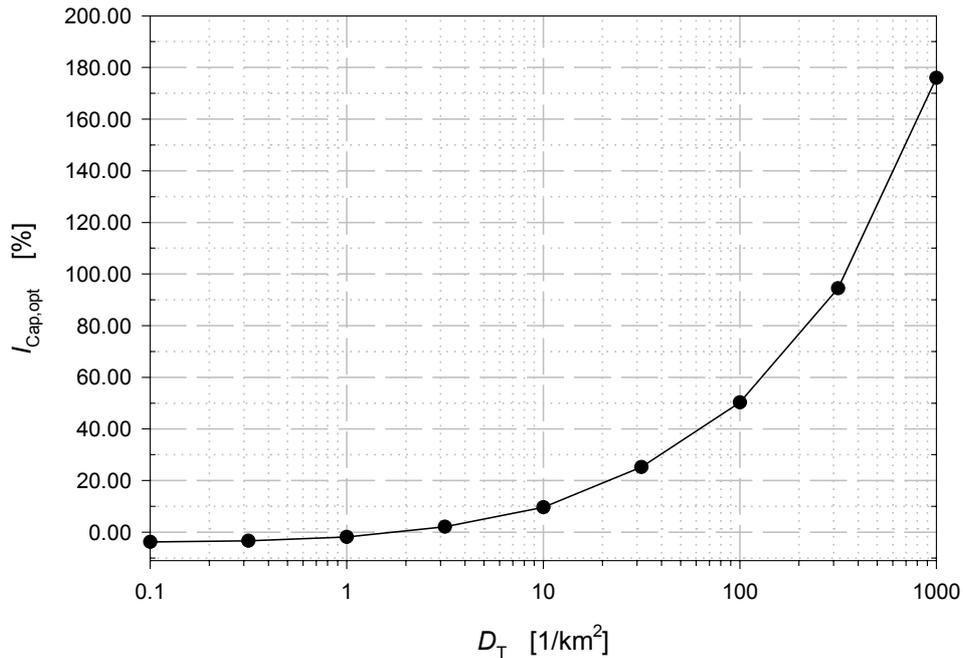


Bild 5.29 Die Verzinsung I_{Cap} des in ein Mobilfunksystem investierten Kapitals in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T (Sprach-Teilnehmer mit Verkehrsangebot $A=25\text{mErl}$) bei optimal gewählter Gesamtbandbreite $B_{\text{ges,opt}}$

Durch die Kurve lassen sich bei den gegebenen Kostenverhältnissen die folgenden Aussagen machen:

Im Bereich einer Teilnehmerdichte von $D_T < 5$ Teilnehmern/km² ist die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Systems nicht gegeben. Zwischen 10 und 100 Teilnehmern pro km² ist ein Bereich, der in Zentren von Städten mittlerer Größe (ca. 50 000 Einwohner) erreicht werden kann und ein wirtschaftliches Betreiben erlaubt. Der Bereich ab 100 Teilnehmern pro km² kann nur in Großstädten erreicht werden und verspricht eine sehr hohe Kapitalverzinsung. Durch die vom Gesetzgeber vorgeschriebene zu erreichende Flächendeckung eines Mobilfunksystems, besteht dessen Versorgungsgebiet aus Regionen mit sehr unterschiedlichen Teilnehmerdichten. Bei gegebener Häufigkeitsverteilung $h(D_T)$ der Teilnehmerdichte D_T kann die mittlere zu erwartende Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap,mean}}$ durch

$$I_{\text{Cap,mean}} = \int_0^{D_T, \text{max}} h(D_T) \cdot I_{\text{Cap}}(D_T) dD_T \quad (5.54)$$

ermittelt werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Informationstechnik hat sich in den letzten Jahren zu einem der bedeutendsten Wirtschaftszweige entwickelt. Erst die Technik der Mobilkommunikation es ermöglicht, die Bedürfnisse des heutigen Menschen nach Kommunikation und Information in Verbindung mit Mobilität zu befriedigen. Dabei wächst das Interesse der Firmen und der Privatpersonen in den industrialisierten Ländern an einem Zugang zu der im Internet verfügbaren Information sehr stark.

Die große Herausforderung für die Netzbetreiber besteht darin, sich durch das Dienstangebot und die Dienstgüte bei günstigen Gebühren von den Mitbewerbern abzuheben. Diese Herausforderung für die Hersteller und Betreiber von Mobilfunksystemen erfordert die effiziente Bereitstellung der neuen Dienste mit höheren Übertragungsraten bei verändertem Teilnehmerverhalten und höheren Teilnehmerdichten. Dabei steht dem zunehmenden Bedarf an Übertragungskapazität die benötigte aber nicht vermehrbare Ressource Frequenzbandbreite gegenüber. Hinzu kommt, dass in Deutschland die Frequenzlizenzen, die für den Betrieb erforderlich sind, versteigert werden. Die Kosten für den Erwerb einer Lizenz für das Betreiben eines Mobilfunksystems der 3. Generation (UMTS) liegen im zweistelligen Milliardenbereich und stellen damit einen wesentlichen Investitionsfaktor dar. Unter diesem Gesichtspunkt ist es für den Betreiber wichtig, den ihm durch den Erwerb der Lizenz zur Verfügung stehenden Frequenzbereich möglichst effizient zu nutzen.

Diese Herausforderung war der Anstoß für die vorliegende Arbeit. Es ist gelungen, einen Dimensionierungsalgorithmus zu entwickeln, der es ermöglicht, die optimalen Werte für die variablen Systemparameter (Bild 5.1) zu bestimmen.

Diese sind:

- Anzahl der Funkzellen, die zu einem Cluster gehören N_C ,
- die Trägerbandbreite B_{Tr}
- Anzahl der Zeitschlitze n_{zs} ,
- Anzahl der verwendeten Modulationsstufen M_{mod} ,
- die Sendeleistung S_S ,
- Coderate der Kanalcodierung R_{Code} ,
- Anzahl der für Handover reservierten Kanäle einer Basisstation m_{res} ,
- und die kostenoptimale Gesamtbandbreite B_{ges} .

Dieses mehrdimensionale Optimierungsproblem konnte durch die geeignete Aufteilung des Optimierungsvorgangs auf mehrere parallel durchführbare, zweidimensionale Optimierungsprozesse zurückgeführt werden. Dadurch konnte die Komplexität des Suchraums erheblich reduziert werden, so dass der gesamte Optimierungsvorgang auf heute üblichen PC's in wenigen Minuten durchgeführt werden kann. Zudem ist durch diese Aufteilung das **Auffinden der optimalen Werte für die Parameter stets gewährleistet**. Diese Sicherheit ist ein weiterer Vorteil gegenüber einem einstufigen aber sehr komplizierten Optimierungsprozess.

Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang effiziente Ausnutzung der Ressourcen und damit Minimierung der Betriebs- und Investitionskosten. Dabei werden im Gegensatz zu früheren Arbeiten die Teilbereiche wie Modulation/Codierung und Zugriffsverfahren nicht isoliert für sich betrachtet und optimiert, sondern mit den entscheidenden Größen aus allen Bereichen in einem ganzheitlichen Modell der Optimierung zugrunde gelegt. Die modellierten Komponenten (Bild 5.4) lassen sich in 2 Kategorien teilen:

1. Die außerhalb des Systems liegenden Modellkomponenten. Diese sind die angebotenen Dienste (Datenrate und Dienstgüte), das Teilnehmerverhalten und der Funkkanal.
2. Die systeminhärenten Modellkomponenten, wie z.B. Multiplexverfahren und Frequenzressourcen, Modulation und Kanalcodierung und das Kanalzugriffsverfahren unter Berücksichtigung von Handover.

Die neuen Dienste und das damit einhergehende veränderte Teilnehmerverhalten und die neuen Übertragungsverfahren mit Pausenausnutzung erfordern neue mathematische Teilnehmerverkehrsmodelle. Dazu wurde ein **Multiservice-Teilnehmermodell** (Bild 2.10) entwickelt, das die Aktivität eines Teilnehmers während des Bestehens einer Verbindung detailliert beschreibt. Mit Aktivität wird der Zustand bezeichnet, in dem der Kommunikationskanal zur Informationsübertragung genutzt wird, während im Zustand Pause keine Übertragung stattfindet. Wird dieses Teilnehmermodell für die Dimensionierung des Telekommunikationssys-

tems verwendet, so entsteht eine Komplexität, die in der Regel nur noch durch den Einsatz von Großrechnern beherrschbar ist. Um eine Berechnung auch mit Hilfe von Kleinrechnern (PCs) möglich zu machen, wurden Transformationsgleichungen hergeleitet, die eine erhebliche Reduktion der Anzahl der Systemzustände des Telekommunikationssystems erlauben. Ausgehend von einem vereinfachten Teilnehmermodell wurden die Gleichungen so gewählt, dass die Zustandswahrscheinlichkeiten des Telekommunikationssystems noch ausreichend genau modelliert werden konnten. Für den MS-Teilnehmer konnte ein Näherungsverfahren mit guter Genauigkeit entwickelt werden, das es erlaubt, die Auswirkungen von Handover auf die Verkehrskapazität in analytischen Berechnungsverfahren zu berücksichtigen. Der Vergleich der Verkehrskapazität einer Basisstation für Multiservice-Teilnehmer und Sprachdienst-Teilnehmer bei gleicher nomineller Verkehrslast zeigt, dass die Übertragung der aus der Literatur [17] bekannten Ergebnisse zu einer Unterdimensionierung des Systems führen würden. Dies unterstreicht die Bedeutung der neu entwickelten Berechnungsmethode für den Multiservice-Teilnehmer unter Berücksichtigung von Handover.

Eine weitere außerhalb des Systems liegende Modellkomponente ist der Funkkanal. Sie modelliert die Signalausbreitung durch eine Dämpfungskurve [20].

Die unter Punkt 2 aufgeführten, systeminhärenten Modellkomponenten enthalten alle für die Dimensionierung spezifischen Eigenschaften und Parameter der eingesetzten technischen Verfahren und Algorithmen (z.B. Zugriffsverfahren und Kanalcodierung).

Die Schnittstellen zwischen den Komponenten werden über Variablen realisiert. Auf der Basis des so geschaffenen mathematischen Modells (Bild 5.4) für die von außen auf das System einwirkenden Einflüsse und die spezifischen Eigenschaften des Mobilfunksystems wurde es möglich, einen Algorithmus für eine **kostenoptimale Systemdimensionierung** zu entwickeln.

Dies wird in zwei Schritten erreicht.

Schritt 1:

Im ersten Schritt werden die freien Systemgrößen so festgelegt, dass der Funkzellenradius unter **Einhaltung der Dienstgüteanforderungen** für eine gegebene Gesamtbandbreite maximal gewählt wird (Bild 5.2). Dadurch wird ein betrachtetes Gebiet bei gegebener Funkkanaldämpfung, geforderten Datenraten und Dienstgüteparametern, gegebenem Teilnehmerverhalten (auch Teilnehmerbewegung) und der erwarteten Teilnehmerdichte mit einer minimalen Anzahl von Basisstationen versorgt. Die durch die Anzahl der Basisstationen entstehenden flächenabhängigen Kosten stellen einen erheblichen Anteil der Investitions- und Betriebskosten dar.

Die Bedeutung der **Bestimmung der optimalen Systemparameter** lässt sich beispielhaft anhand von Bild 5.23 zeigen. Es enthält für ein Mobilfunksystem für Sprachdienst-Teilnehmer mit einer Teilnehmerdichte von 100 Teilnehmern pro km^2 und einer Gesamtbandbreite von 25 MHz die maximal möglichen Funkzellenradien. Werden 12 Basisstationen pro Frequenz-Cluster und eine Anzahl von 12 Zeitschlitzten pro Übertragungsrahmen gewählt, so beträgt der maximale Radius $r_z=3,7$ km (Bild 5.23). Bei optimaler Wahl der Parameter mit 7 Basisstationen pro Cluster und 24 Zeitschlitzten pro Übertragungsrahmen kann der Funkzellenradius mehr als doppelt so groß gewählt werden. Dies bedeutet eine **Reduktion der Anzahl der erforderlichen Basisstationen** für das betrachtete Gebiet um einen Faktor 4. Bei angenommenen Investitionskosten im nicht optimierten Fall von 2 Milliarden Euro wird eine Kostenreduktion auf 500 Millionen erzielt, was der Betreiberfirma einen nennenswerten **Wettbewerbsvorteil** sichert.

Zudem reduziert sich durch die Minimierung der Anzahl der Basisstationen die Anzahl der Standorte, die das Landschafts- oder Stadtbild beeinträchtigen.

Schritt 2:

Das **Bestimmen der optimalen Gesamtbandbreite** (Bild 5.26) für ein Mobilfunksystem unter den im 1. Schritt genannten Randbedingungen erfolgt im 2. Schritt der Optimierung. Dieser ist sowohl aufgrund des Kostenaspekts für die einzelnen Netzbetreiber, als auch gesamtwirtschaftlich hinsichtlich der optimalen Nutzung des insgesamt zur Verfügung stehenden Frequenzbereichs von großer Bedeutung.

Aus der errechneten **Kapitalverzinsung $I_{\text{Cap}}(B_{\text{gesopt}}, D_T)$ in Abhängigkeit von der dem System zur Verfügung stehenden Gesamtbandbreite B_{ges}** in Bild 5.27 zeigt sich die ökonomische Bedeutung der optimalen Wahl der Gesamtbandbreite. Bei zu gering gewählter Bandbreite lassen sich selbst bei optimaler Einstellung der anderen Systemgrößen (Schritt 1) die Systeme nicht wirtschaftlich betreiben. Eine Erhöhung der Bandbreite erhöht zunächst zwar die Kosten für die Lizenzgebühren, aber durch die Vergrößerung dieser Ressource reduzieren sich die Kosten für die notwendigen Betriebseinrichtungen (Basisstationen) in stärkerem Maß, wodurch die Gesamtinvestitionskosten gesenkt werden können. Die Schwellenbandbreite, ab der ein System wirtschaftlich betreibbar ist, ist von der Teilnehmerdichte und dem Verkehrsvolumen pro Teilnehmer abhängig. Je höher die Teilnehmerdichte ist, desto höher ist die erforderliche Bandbreite, um wirtschaftliche Gewinne zu erzielen. Wird die Ressource Bandbreite für eine gegebene Teilnehmerdichte überdimensioniert, so verursacht sie über die Lizenzgebühren hohe Kosten, ohne noch effektiv genutzt werden zu können. Wird die Bandbreite unterdimensioniert, werden zu viele Basisstationen benötigt, die hohe Investitionskosten

ten verursachen. Dazwischen liegt der optimale Wert für die minimalen Gesamtkosten und somit den maximalen Gewinn. Im Bereich einer Verkehrsangebotsdichte (Teilnehmerdichte · Verkehrsangebot pro Teilnehmer) von 750 mErl pro km² liegt die optimale Gesamtbandbreite bei ca. 6 MHz. Für kleineren Verkehrsangebotsdichten ist weniger Bandbreite erforderlich. Wobei bei einer Verkehrsangebotsdichte unter 75 mErl pro km² bei den heutigen Betriebseinrichtungskosten - selbst bei optimaler Wahl der Gesamtbandbreite - ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich ist. Diese Ergebnisse zeigen die weitreichende Bedeutung der Optimierung der Systemgrößen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit eines Mobilfunksystems. Dies erfordert eine **ganzheitliche Modellierung und Optimierung**, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurde.

Durch den **modularen Aufbau der zugrundeliegenden Software** (Bild 5.4) wurde eine Basis geschaffen, so dass auch zukünftige Systeme mit neuen Übertragungs-, Multiplex- und Zugriffsverfahren modelliert und optimiert sowie wirtschaftlich bewertet werden können.

Ein neues Anwendungsfeld könnte die Optimierung der Parameter der Mobilfunksysteme der 3. Generation (UMTS) unter unterschiedlichen Randbedingungen mit neuen Diensten und variablen Datenraten sein.

Anhang A

Verwendete verkehrstheoretische Modelle

Stochastische Prozesse können mit Markoff-Ketten beschrieben werden, wenn sie die Eigenschaft der Gedächtnisfreiheit - Markoff-Eigenschaft - besitzen, d.h. die zukünftige Entwicklung ist unabhängig von der Vergangenheit des Prozesses. Sie hängt nur vom aktuellen Zustand ab, in dem sich der Prozess befindet, aber nicht von der Zeitdauer des Zustands.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}\{X(t_{n+1})=x_{n+1} \mid X(t_{n+1})=x_n, \dots, X(t_0)=x_0\} &= \mathbb{P}\{X(t_{n+1})=x_{n+1} \mid X(t_n)=x_n\} \\
 &\quad \forall t_0 < t_1 < t_2 \cdots < t_n < t_{n+1} \quad \cdot
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

Für die Aufenthaltsdauern der Zustände zeitkontinuierlicher Prozesse ist die negativ exponentielle Verteilungsfunktion die einzige Funktion, welche die Markoff-Eigenschaft besitzt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (WVF) lautet für eine Zufallsgröße T_i :

$$F_{T_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_i t} \quad \text{mit} \quad \lambda_i = 1/\bar{T}_i \quad \cdot
 \tag{A.2}$$

Die Rate λ_i ist der Kehrwert des Mittelwerts der Zufallsgröße T_i . Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) lautet:

$$f_{T_i}(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad \cdot
 \tag{A.3}$$

Diese Funktion wird häufig zur Beschreibung der Ankunftsabstände von Rufen in Telefonsystemen verwendet.

A.1 Überlagerung von Markoff-Prozessen

A.1.1 Überlagerung von Markoff-Ankunftsprozessen

Die Überlagerung von M Ankunftsprozessen mit negativ-exponentiell verteilten Ankunftsabständen mit den Raten λ_i ist äquivalent zu einem negativ-exponentiell verteilten Ankunftsprozess mit der Gesamtankunftsrate λ_g . Sie ist die Summe der Ankunftsrate der Teilnehmer (Bild A.1). Bei der Überlagerung wird von der statistischen Unabhängigkeit der Verkehrserzeugungprozesse ausgegangen.

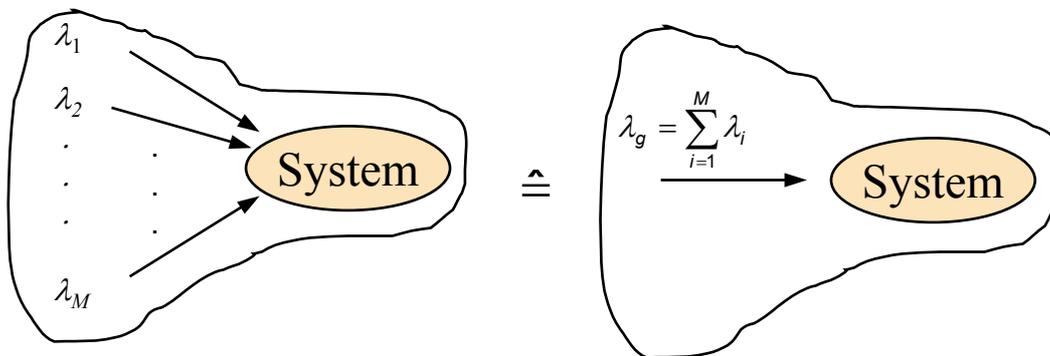


Bild A.1 Summenverkehr von M Verkehrsquellen mit negativ-exponentiellen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen mit den Raten λ_i .

Die Herleitung der Gesamtrate beginnt mit der Überlagerung von zwei Prozessen.

Für zwei Prozesse mit den Raten λ_1 und λ_2 ist die WDF für die Ankunftsabstände T_A von Anrufen ($T_A=t$)

$$f_{T_{A,1-2}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t < T_A \leq t + \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t < \min(T_{A,1}, T_{A,2}) \leq t + \Delta t)}{\Delta t}$$

$$f_{T_{A,1-2}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[e^{-\lambda_1(t+\Delta t)} - e^{-\lambda_1 t}] e^{-\lambda_2 t} + [e^{-\lambda_2(t+\Delta t)} - e^{-\lambda_2 t}] e^{-\lambda_1 t}}{\Delta t} = (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (\text{A.4})$$

Die Rate $\lambda_{1-2} = \lambda_1 + \lambda_2$ ist die Rate des äquivalenten Poisson-Ankunftsprozesses für den Übergang in den Zustand k .

$$f_{T_{A,1-2}}(t) = \lambda_{1-2} e^{-(\lambda_{1-2})t} \quad \text{mit } \lambda_{1-2} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (\text{A.5})$$

Zu diesem neuen Summenankunftsprozess mit der Rate λ_{1-2} kann jetzt ein Prozess 3 hinzugefügt werden und die neue Rate berechnet. Diese Schritte werden für alle M Prozesse durchgeführt. Der resultierende Gesamtankunftsprozess ist wieder exponentiell verteilt. Die Verteilungsfunktion lautet:

$$f_{T_{A,g}}(t) = \lambda_g e^{-\lambda_g t} \quad \text{mit } \lambda_g = \sum_{\forall i} \lambda_i \quad (\text{A.6})$$

Diese fundamentale Beziehung für die WDF des Gesamtankunftsprozess ist von großer Bedeutung für die Modellierung von Kommunikationssystemen mit Markoff-Modellen.

A.1.2 Enderate bei der Überlagerung von Markoff-Prozessen

Ein Zustandswechsel eines Systems im Zustand k zu einem der n_k Folgezustände wird durch den Markoff-Prozess mit der kürzesten Zeit T_i ausgelöst.

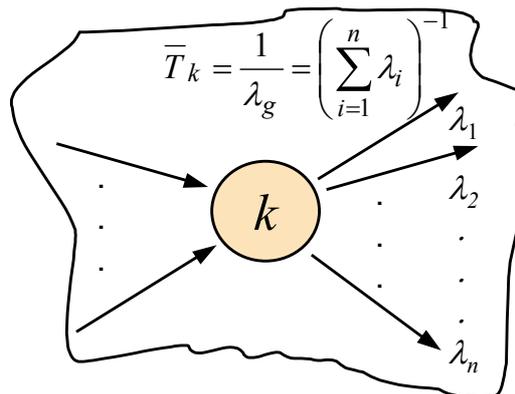


Bild A.2 Summenverkehr von M Verkehrsquellen mit negativ-exponentiellen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen mit den Raten λ_i .

Die Gesamtübergangsrate $\lambda_{g,k}$ im Zustand k ist analog zu Abschnitt 0 gleich der Summe der einzelnen Übergangsraten λ_i . Die mittlere Verweilzeit \bar{T}_k des Systems im Zustand k ist der Kehrwert der Summe der Raten an den Kanten, die den Zustand verlassen (siehe Bild A.2).

A.2 Allgemeine zeitdiskrete Markoff-Ketten

Die zeitdiskrete Markoff-Kette erlaubt nur Zustandsübergänge zu diskreten Zeitpunkten. Zustandsübergänge in einen der anderen Zustände oder in den gleichen Zustand der Markoff-Kette sind nur zu diesen Zeitpunkten möglich. Sind die Zeitpunkte äquidistant so wird von einer getakteten Markoff-Kette gesprochen. Die Übergänge sind stochastisch und werden durch die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten beschrieben.

Bild A.1 ist ein verkehrstheoretisches Modell für die Belegung der m Verkehrskanäle eines TDMA-Funksystems. Der Takt der Markoff-Kette ist gleich der Rahmendauer. Die Bezeichnung der Zustände gibt die Zahl der belegten Verkehrskanäle wieder. Die diskreten Zeitpunkte, an denen ein Übergang möglich ist, sind die Anfangszeitpunkte der TDMA-Rahmen. In der Zeit zwischen zwei Zeitpunkten - einer Rahmendauer Δt - kann sich einer oder mehrere der noch nicht sprechenden Benutzer entschließen, ein Gespräch zu beginnen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Benutzer während der Zeit Δt ein Gespräch führt, ist

$$p_{\lambda,1} = 1 - e^{-\lambda \cdot \Delta t} \quad (A.7)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gespräch eines sprechenden Benutzers endet, ist

$$p_{\mu,1} = 1 - e^{-\mu \cdot \Delta t} \quad (A.8)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass i der $(M-k)$ freien Benutzer (i aus $M-k$) während der Zeit Δt ein Gespräch beginnen wollen, ist

$$p_{\lambda}(i/M-k) = \binom{M-k}{i} \cdot (p_{\lambda,1})^i \cdot (1-p_{\lambda,1})^{M-k-i} \quad (A.9)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit in Gleichung (A.9) ist die Wahrscheinlichkeit, dass i Benutzer im Zeitraum ein Gespräch beginnen wollen, unter der Bedingung, dass $(M-k)$ Benutzer im Zustand 'frei' sind.

Für die Binomial-Verteilung der in Δt beginnenden Gespräche gilt folgende Ungleichung:

$$p_{\lambda}(i+1/M-k) \leq \left(\frac{(M-k)p_{\lambda,1}}{1-p_{\lambda,1}} \right) \cdot p_{\lambda}(i/M-k) < \left(\frac{M \cdot p_{\lambda,1}}{1-p_{\lambda,1}} \right) \cdot p_{\lambda}(i/M-k) \quad (\text{A.10})$$

(das Gleichheitszeichen gilt für $i = 0$)

$$p_{\lambda}(i+1/M-k) \leq q_{\lambda} \cdot p_{\lambda}(i/M-k) \quad \text{mit} \quad q_{\lambda} = \frac{M \cdot p_{\lambda,1}}{1-p_{\lambda,1}}$$

für $0 \leq i < M-k-1 \wedge 0 \leq k \leq m$. (A.11)

(das Gleichheitszeichen gilt für $i = 0$ und $k = 0$)

Entsprechend gilt für die Wahrscheinlichkeit für eine Beendigung von i der k aktiven Gespräche

$$p_{\mu}(i/k) = \binom{k}{i} \cdot (p_{\mu,1})^i \cdot (1-p_{\mu,1})^{k-i} \quad (\text{A.12})$$

Diese Verteilung wird als Binomialverteilung bezeichnet. Für die Binomial-Verteilung der in Δt endenden Gespräche gilt folgende Abschätzung

$$p_{\mu}(i+1/k) \leq \left(\frac{k \cdot p_{\mu,1}}{1-p_{\mu,1}} \right) \cdot p_{\mu}(i/k) < \left(\frac{m \cdot p_{\mu,1}}{1-p_{\mu,1}} \right) \cdot p_{\mu}(i/k) \quad (\text{A.13})$$

(das Gleichheitszeichen gilt für $i = 0$)

und

$$p_{\mu}(i+1/k) < q_{\mu} \cdot p_{\mu}(i/k) \quad \text{mit} \quad q_{\mu} = \frac{m \cdot p_{\mu,1}}{1-p_{\mu,1}} \quad \text{für} \quad 0 \leq i < k-1 \wedge 0 \leq k \leq m$$

(das Gleichheitszeichen gilt für $i = 0$ und $k = m$) . (A.14)

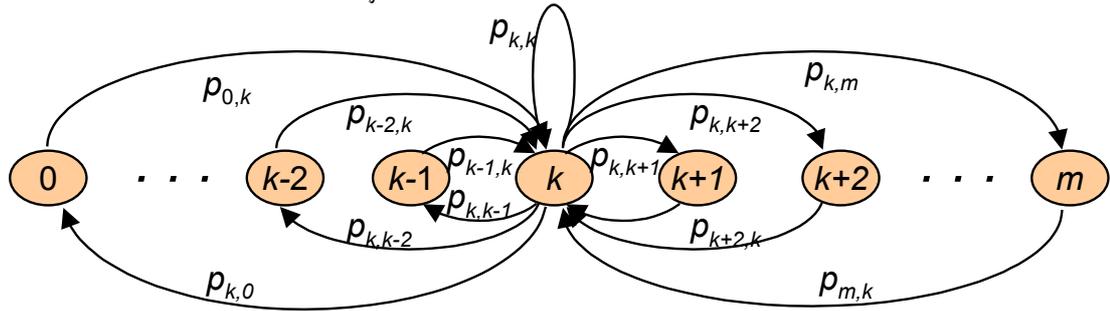
Diese Wahrscheinlichkeiten stehen in Bild A.3 unter der Summe. In der Zeit Δt können gleichzeitig n der $M-k$ freien Benutzer ein Gespräch beginnen und l der k sprechenden Benutzer ihr Gespräch beenden. Die beiden Abschätzungen werden im folgenden benötigt, um den Fehler abzuschätzen, der entsteht, wenn in der Markoff-Kette nur Übergänge zu den Nachbarzuständen berücksichtigt werden.

Da alle Benutzerprozesse statistisch unabhängig sind, sind die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines solchen Verbundereignisses gleich dem Produkt der Einzelereignisse. Die Wahrscheinlichkeit, vom Belegungszustand k in den Belegungszustand j zu gelangen, ist gleich der Summe der Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Kombinationen, für die gilt:

$$\text{Anzahl der beginnenden Rufe} - \text{Anzahl der endenden Rufe} = j - k \quad (\text{A.15})$$

Mit dieser Aussage ergeben sich die unten stehenden Summen für die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{k,j}$.

Anzahl der Benutzer $M > m$
 Anzahl der Kanäle m
 Anzahl der belegten Kanäle k oder j
 Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{k,j}$



$$p_{k,j} = \sum_{i=0}^k p_{\lambda}(j - k + i / M - k) \cdot p_{\mu}(i / k) \quad \text{für } j > k \wedge 0 \leq k < m$$

$$p_{k,j} = 1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^m p_{k,i} \quad \text{für } j = k \wedge 0 \leq k < m$$

$$p_{k,j} = \sum_{i=0}^j p_{\lambda}(i / M - k) \cdot p_{\mu}(k - j + i / k) \quad \text{für } j < k \wedge 0 < k < m$$

Bild A.3 Zeitdiskrete Markoff-Kette mit den Zuständen 0 bis m (eingezeichnet sind nur die Übergänge von und zu dem betrachteten Zustand k).

Die Zustandswahrscheinlichkeit π_k ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich das System im Zustand k befindet. Für Zustandswahrscheinlichkeiten aller Zustände 0 bis m des Systems wird ein Vektor π definiert.

$$\pi = [\pi_0 \ \pi_1 \ \pi_2 \ \dots \ \pi_m] \quad (\text{A.16})$$

Die Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten von Knoten k zu den Knoten j wird als

$$P^{(n)} = [p_{k,j}^{(n)}] \quad (\text{A.17})$$

definiert. Der hochgestellte Index (n) kennzeichnet, den Zeitpunkt ($n \cdot \Delta t$) für die Übergangswahrscheinlichkeiten.

Die Zustandswahrscheinlichkeiten werden aus der Matrix der Übergangswahrscheinlichkeit durch das folgende Gleichungssystem bestimmt:

$$\pi^{(n)} = \pi^{(n-1)} \cdot P^{(n)} \quad (\text{A.18})$$

Die Berechnung der Werte $p_{k,j}^{(n)}$ in der angegebenen Form ist sehr aufwendig und kann für den Fall

$$q_\lambda = \frac{M \cdot p_{\lambda,1}}{1 - p_{\lambda,1}} \ll 1 \quad \text{und} \quad q_\mu = \frac{m \cdot p_{\mu,1}}{1 - p_{\mu,1}} \ll 1 \quad (\text{A.19})$$

erheblich vereinfacht werden. Auf die Rahmendauer und auf die Ankunfts- und Enderate bezogen, lautet die Forderung:

$$M \cdot \lambda \cdot \Delta t \ll 1 \quad \text{und} \quad m \cdot \mu \cdot \Delta t \ll 1, \quad \text{oder auf die Taktzeit bezogen:} \quad \Delta t \ll \min(1/(M \cdot \lambda), 1/(m \cdot \mu)) \quad (\text{A.20})$$

Wenn die Bedingung erfüllt ist, genügt es, nur die Zustandsübergänge zu den Nachbarknoten zu berücksichtigen, da die Übergangswahrscheinlichkeiten zu weiter entfernten Knoten mindestens um die Faktoren q_λ bzw. q_μ kleiner sind. Diese Markoff-Kette ist in der Literatur als Geburts-/Sterbeprozess bekannt.

A.2.1 Zeitdiskrete Markoff-Kette mit Übergängen ausschließlich zwischen den Nachbarzuständen

Eine obere Schranke für die Übergangswahrscheinlichkeiten zu weiter entfernten Knoten j ist

$$\begin{aligned} p_{k,j} &\leq q_\lambda^{j-k-1} \cdot p_{k,k+1} && \text{für } k+2 \leq j \leq m \quad \wedge \quad 0 \leq k \leq m-2 \\ &\text{und} && \\ p_{k,j} &\leq q_\mu^{j-k-1} \cdot p_{k,k-1} && \text{für } 0 \leq j \leq k-2 \quad \wedge \quad 2 \leq k \leq m \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Die Größen $p_{k,k-1}$ und $p_{k,k+1}$ sind die Übergangswahrscheinlichkeiten zu den Nachbarknoten.

Außerdem kann bei der Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten zu den Nachbarzuständen $p_{k,k-1}$ und $p_{k,k+1}$ die Summation nach dem 1. Glied abgebrochen werden, wenn die Bedingung (A.20) erfüllt ist. Für die Übergangswahrscheinlichkeiten erhält man näherungsweise

$$\begin{aligned} p_{k,k+1} &= \sum_{i=0}^k p_{\lambda}(1+i/M-k) \cdot p_{\mu}(i/k) \approx p_{\lambda}(1/M-k) \cdot p_{\mu}(0/k) + \Delta p_{k,k+1} \\ &\approx (M-k) \cdot (p_{\lambda,1})^1 \cdot (1-p_{\lambda,1})^{M-k-1} \cdot (1-p_{\mu,1})^k \approx (M-k) \cdot \lambda \cdot \Delta t \quad \text{für } 0 \leq k \leq m-1 \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

und

$$\begin{aligned} p_{k,k-1} &= \sum_{i=0}^j p_{\lambda}(i/k) \cdot p_{\mu}(1+i/k) \approx p_{\lambda}(0/M-k) \cdot p_{\mu}(1/k) + \Delta p_{k,k-1} \\ &\approx k \cdot (p_{\mu,1})^1 \cdot (1-p_{\mu,1})^{k-1} \cdot (1-p_{\lambda,1})^k \approx k \cdot (p_{\mu,1}) \approx k \cdot \mu \cdot \Delta t \quad \text{für } 1 \leq k \leq m \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

Für die Fehler $\Delta p_{k,k-1}$ und $\Delta p_{k,k+1}$, die durch den Abbruch der Summe nach dem ersten Glied entstehen, gelten folgende obere Schranken:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_{1,0}}{p_{1,0}} &= 0 && \text{für } k=1 \wedge j=0 \\ \frac{\Delta p_{k,k-1}}{p_{k,k-1}} &\leq q_{\lambda,\mu} \cdot \left(\frac{1-[q_{\lambda,\mu}]^{k-2}}{1-q_{\lambda,\mu}} \right) && \text{für } 1 \leq k \leq m \wedge j=k-1 \\ \frac{\Delta p_{0,1}}{p_{0,1}} &= 0 && \text{für } k=0 \wedge j=1 \\ \frac{\Delta p_{k,j}}{p_{k,j}} &\leq q_{\lambda,\mu} \cdot \left(\frac{1-[q_{\lambda,\mu}]^{k-1}}{1-q_{\lambda,\mu}} \right) && \text{für } 1 \leq k \leq m-1 \wedge j=k+1 \\ &&& \text{für } 1 \leq k \leq m \wedge j=k \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

mit $q_{\lambda,\mu} = q_{\lambda} \cdot q_{\mu}$

Zusammengefasst ergeben sich für $\Delta t \ll \max(1/M \cdot \lambda, 1/m \cdot \mu)$ folgende Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$\begin{aligned}
 p_{k,j} &\approx 0 && \text{für } j \leq k-2 \wedge 2 \leq k \leq m \\
 p_{k,j} &\approx k \cdot \mu \cdot \Delta t && \text{für } j = k-1 \wedge 1 \leq k \leq m \\
 p_{k,j} &= 1 - \sum_{i=0}^m p_{k,i} \approx (M-k) \cdot \lambda \cdot \Delta t + k \cdot \mu \cdot \Delta t && \text{für } j = k+1 \wedge 0 \leq k \leq m-1 \\
 p_{k,k+1} &\approx (M-k) \cdot \lambda \cdot \Delta t && \text{für } j = k+1 \wedge 0 \leq k \leq m-1 \\
 p_{k,j} &\approx 0 && \text{für } j \leq k+2 \wedge 0 \leq k \leq m-2
 \end{aligned} \tag{A.25}$$

Durch die Berücksichtigung der obigen Übergangswahrscheinlichkeiten erhält man folgendes Übergangsmodell:

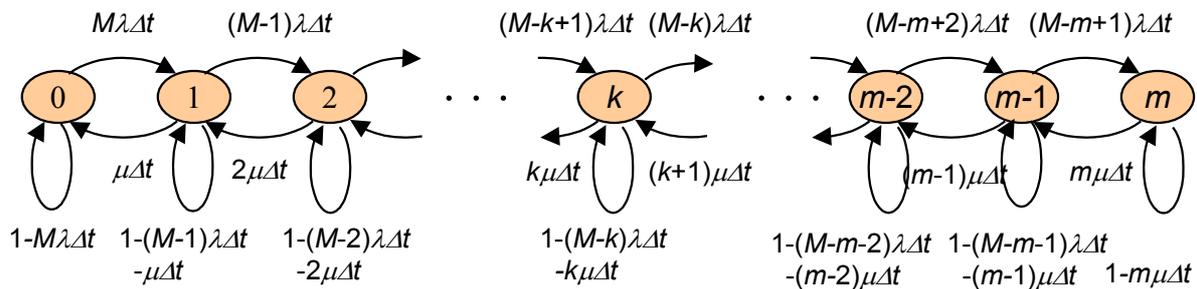


Bild A.4 Vereinfachtes Markoff-Modell, bei dem nur Übergänge zu benachbarten Knoten berücksichtigt werden.

Für die zeitabhängige Ankunfts- und Enderate (unterschiedliche Raten in den definierten Zeitpunkten $n \cdot \Delta t$) $\lambda^{(n)}$ bzw. $\mu^{(n)}$ sind die zeitabhängigen Zustandswahrscheinlichkeiten $\pi^{(n)}$ durch das Differenzengleichungssystem

$$\begin{aligned}
 \pi^{(n)} - \pi^{(n-1)} &= \pi^{(n-1)} \cdot [P^{(n)} - E] \\
 \Delta\pi^{(n)} &= \pi^{(n-1)} \cdot [P^{(n)} - E]
 \end{aligned} \tag{A.26}$$

bestimmt.

A.3 Zeitkontinuierliche Markoff-Kette

Durch die Division der beiden Seiten von Gleichung (A.26) - zeitdiskrete Markoff-Kette - durch Δt und anschließendem Grenzübergang für Δt gegen 0, kann die Gleichung für die zeitkontinuierliche Markoff-Kette abgeleitet werden:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \pi^{(n)}}{\Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\pi^{(n-1)} \cdot \frac{[P^{(n)} - E]}{\Delta t} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{d\pi(t)}{dt} = \pi(t) \cdot Q(t) \quad \text{mit} \quad Q(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{[P^{(n)} - E]}{\Delta t} \right) \quad . \quad (\text{A.27})$$

Die Elemente der Matrix $Q(t)$ ergeben sich aus den Elementen der Zustandsübergangsmatrix $P(t)$ durch

$$q_{k,k} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{p_{k,k}(t, t + \Delta t) - 1}{\Delta t} \right)$$

$$q_{k,j} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{p_{k,j}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \right) \quad \text{für } j \neq k \quad . \quad (\text{A.28})$$

Die so gewonnene Matrix Q ist die gleiche, die man erhält, wenn man für folgendes zeitkontinuierliches Markoff-Modell die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix aufstellt. Durch den Grenzübergang zu einem kontinuierlichen Zeitverlauf entfällt der Parameter Δt , und die Übergänge zwischen den Zuständen werden durch Übergangsraten bestimmt:

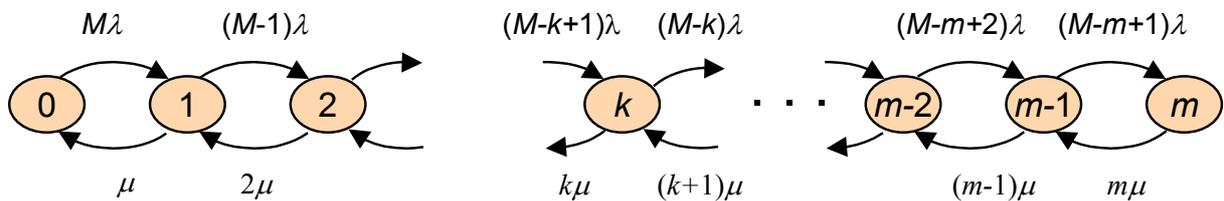


Bild A.5 Zeitkontinuierliches M/M/m/M Markoff-Modell bei dem nur Übergänge zwischen den Nachbarzuständen existieren

Die Rate λ in Bild A.5 ist der Parameter des Poisson-Prozesses, der die Ankünfte der Gespräche im System beschreibt. Die Rate μ ist die mittlere Enderate des Poisson-Bedienprozesses. Für den stationären Fall sind die Zustandswahrscheinlichkeiten konstant, d.h. $\frac{d\pi(t)}{dt} = 0$. Hiermit ergibt sich für den stationären Fall das folgende lineare Differentialgleichungssystem für die Zustandswahrscheinlichkeiten:

$$\pi(t) \cdot Q(t) = 0 \quad . \quad (\text{A.29})$$

Die Zustandswahrscheinlichkeiten für das Markoff-Modell ergeben die Engset-Verteilung ohne Warteplätze (Verlustsystem) [17].

A.4 Vergleich der Ergebnisse der zwei Arten von Markoff-Ketten

Das folgende Diagramm zeigt den relativen Fehler der entsteht, wenn nur Übergänge zu den Nachbarknoten berücksichtigt werden und zudem bei diesen Übergängen unberücksichtigt bleibt, dass während einer Taktdauer i weitere Benutzer zu senden beginnen und gleichzeitig i Teilnehmer ihre Gespräche beenden. Die Übergangswahrscheinlichkeiten eines Teilnehmers $p_{\lambda,1}$ und $p_{\mu,1}$ werden mit den exakten Gleichungen berechnet. Bild A.6 zeigt, dass für $\Delta t < 0.1 \cdot \min(1/M \cdot \lambda, 1/m \cdot \mu)$ der relative Fehler (für Blockierwahrscheinlichkeiten größer 0.4 %) kleiner 3 Prozent ist.

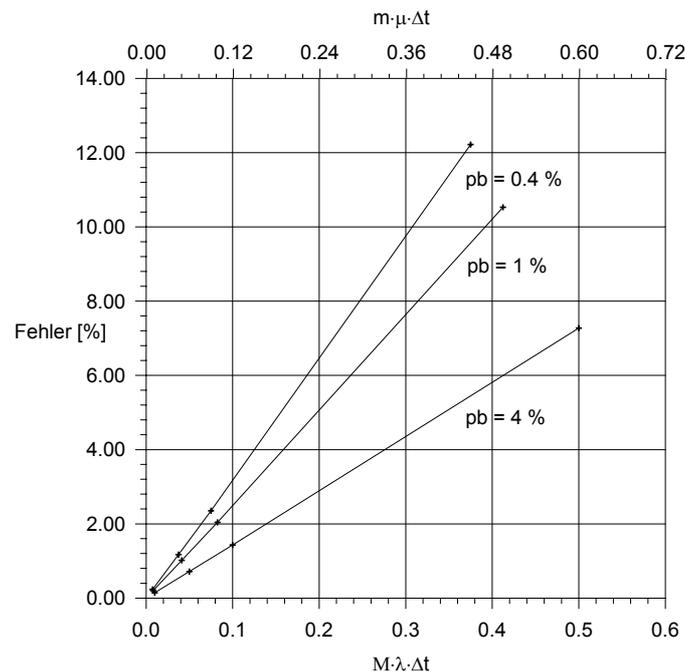


Bild A.6 Relativer Fehler der vereinfachten zeitdiskreten Markoff-Kette gegenüber der exakten zeitkontinuierlichen Lösung (Engset-Verteilung)

Anhang B

Optimierungsalgorithmus MAXZRDIM

Die Flussdiagramme in diesem Kapitel des Anhangs beschreiben den kompletten Algorithmus “MAXRZDIM” mit den zugehörigen mathematischen Zusammenhängen. Der Algorithmus optimiert die wesentlichen Parameter eines Mobilfunksystems im Hinblick auf die Erzielung eines maximalen Funkzellenradius r_z . Zudem wird der maximale Funkzellenradius $r_{z,\max}$ ausgegeben. Der Algorithmus gliedert sich in drei Teile. Berechnung von

- $r_{z,\text{SINR}}$: In diesem Modul werden die maximalen Radien $r_{z,\text{SINR},\max}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit des Clustertyps N_C und der Anzahl der realisierten Zeitschlitze n_{zs} pro TDM-Rahmen (Bild B.1 und Bild B.2) berechnet. Bis zu diesen berechneten maximalen Radien wird die geforderte Übertragungsgüte garantiert.
- $r_{z,\text{V}}$: berechnet die maximalen Radien $r_{z,\text{V},\max}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit vom Clustertyp N_C und der Anzahl der zu realisierenden Zeitschlitze n_{zs} (Bild B.3). Bis zu diesen berechneten maximalen Radien kann die geforderte Verkehrsgüte garantiert werden.
- $r_{z,\max}$: berechnet den maximalen Radius $r_{z,\max}$ und die optimalen Werte für die Systemparameter (Bild B.4 und Bild B.5). Bei der Wahl der so berechneten Systemparameter wird durch die optimale Dimensionierung die maximale Versorgungsfläche pro Basisstation erzielt.

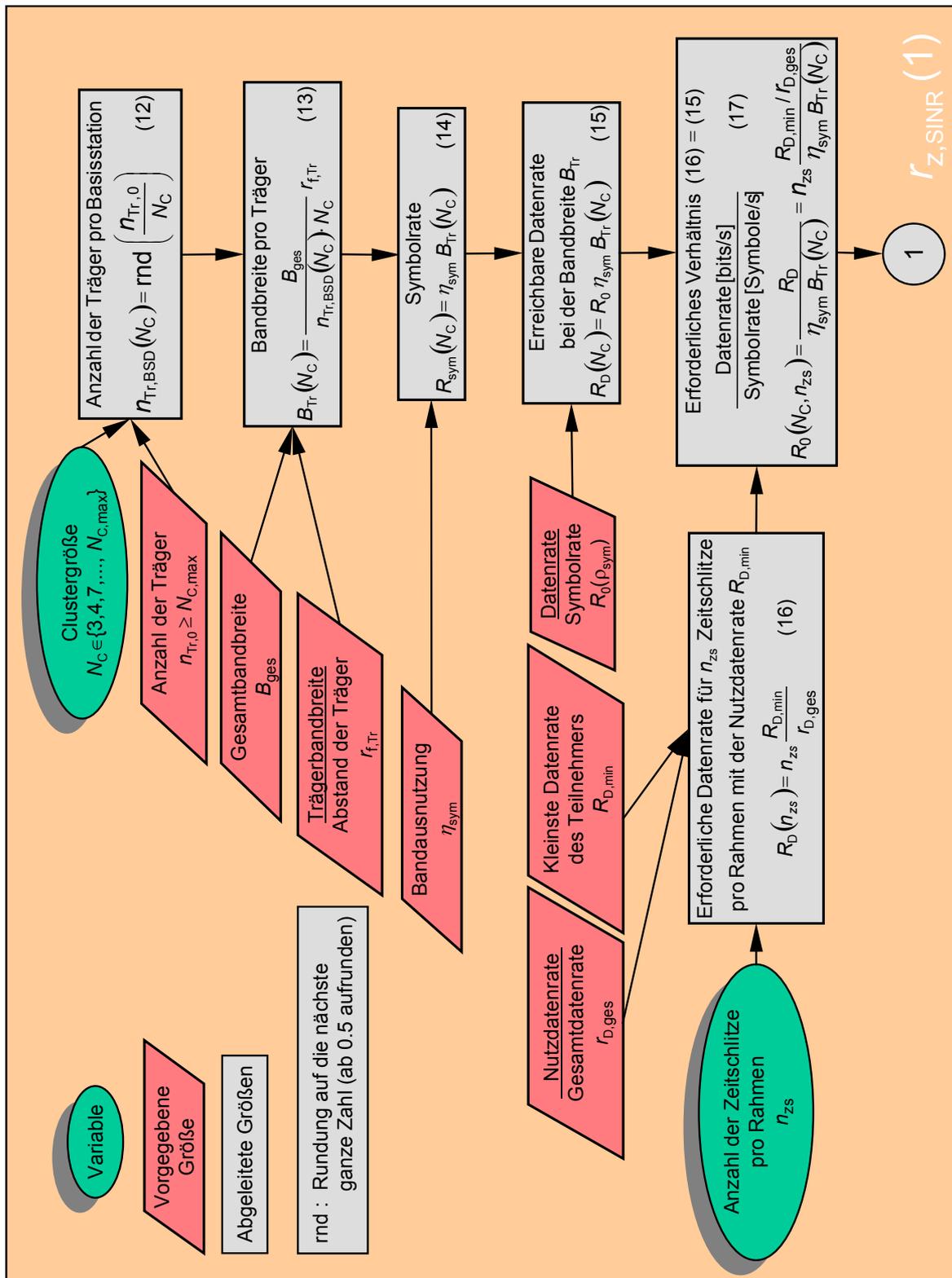


Bild B.1 Berechnung der maximalen Zellenradien $r_{z,SINR,max}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit des Clustertyps N_C und der Anzahl der realisierten Zeitschlitzte n_{zs} pro Zeitrahmen: Teil (1)

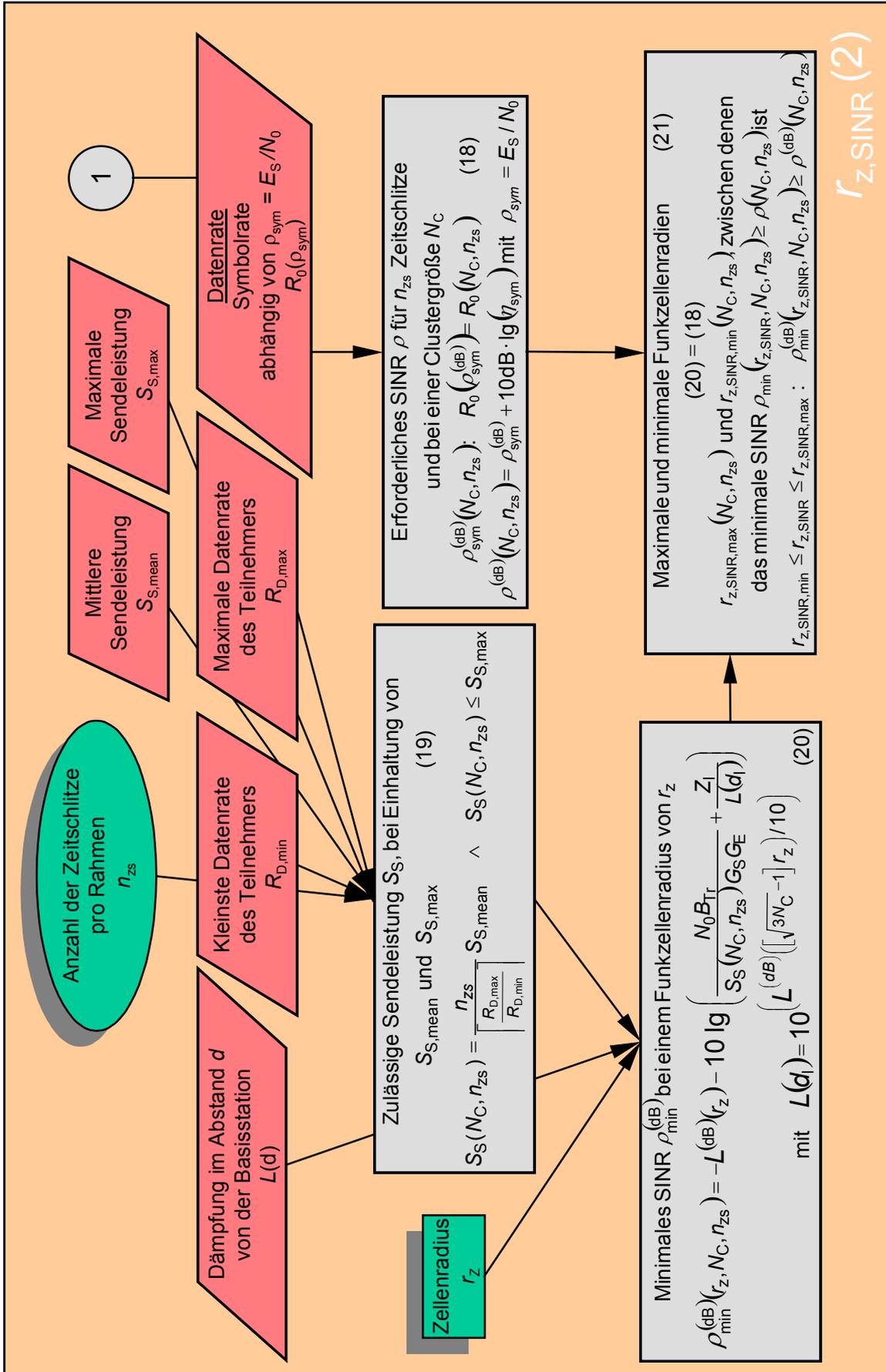


Bild B.2 Berechnung der maximalen Zellenradien $r_{z,SINR,max}(N_C, n_{zs})$: Teil (2)

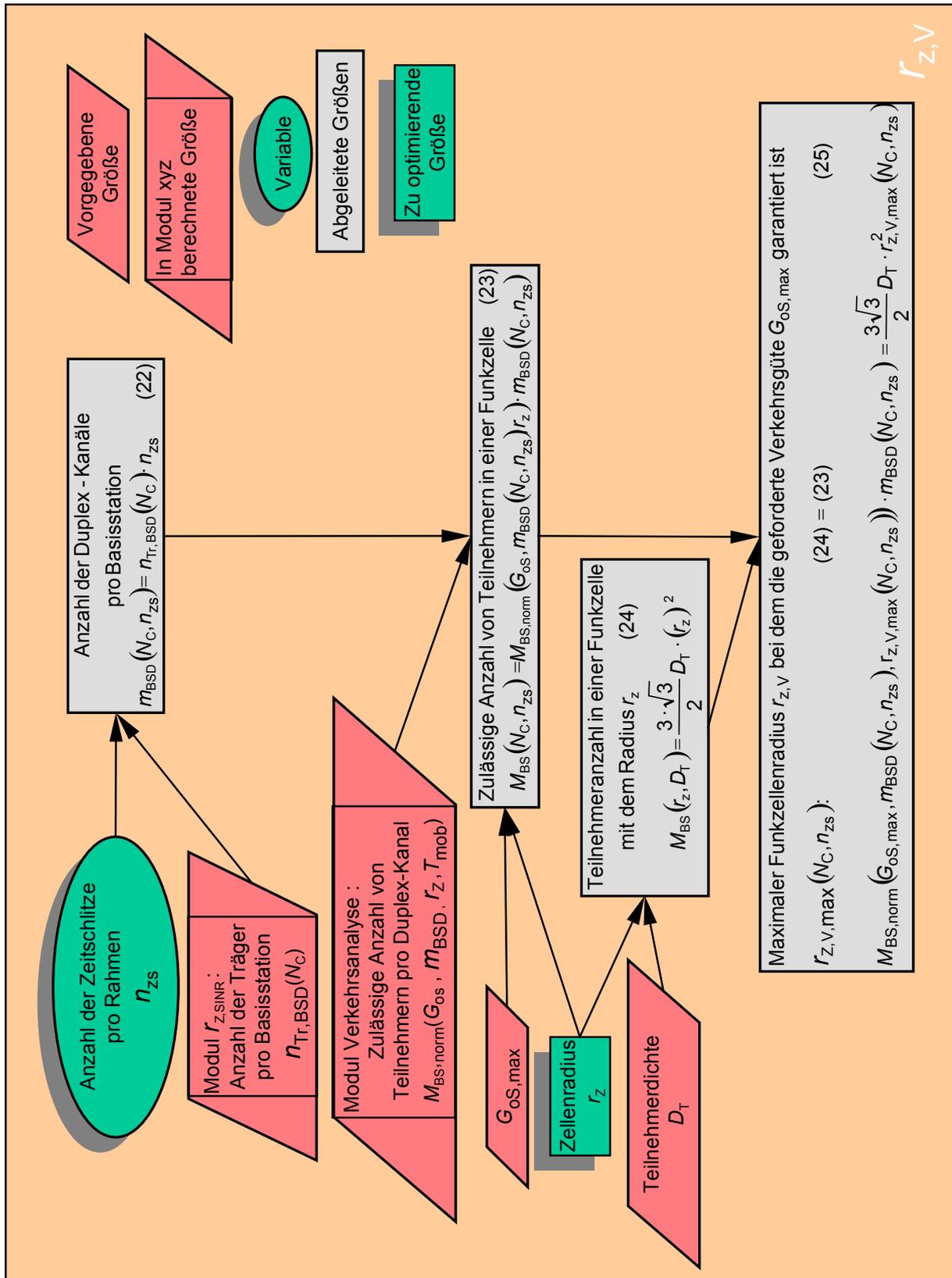


Bild B.3 Berechnung der maximalen Zellenradien $r_{z,V,max}(N_C, n_{zs})$ in Abhängigkeit des Clustertyps N_C und der Anzahl der realisierten Zeitschlitze n_{zs} pro Zeitrahmen

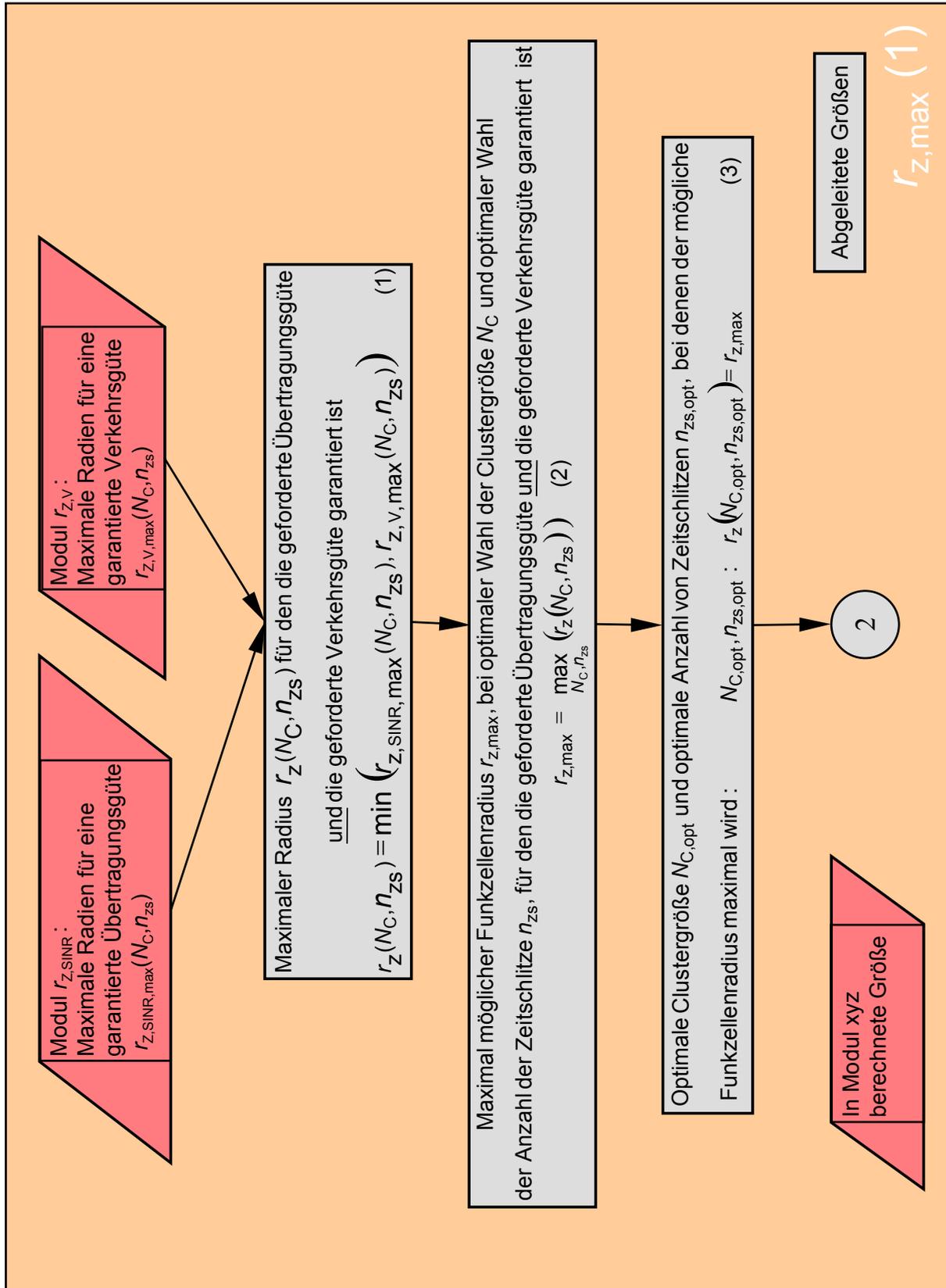


Bild B.4 Berechnung des maximalen Zellenradius $r_{z,max}$ und der optimalen Systemparameter : Teil (1)

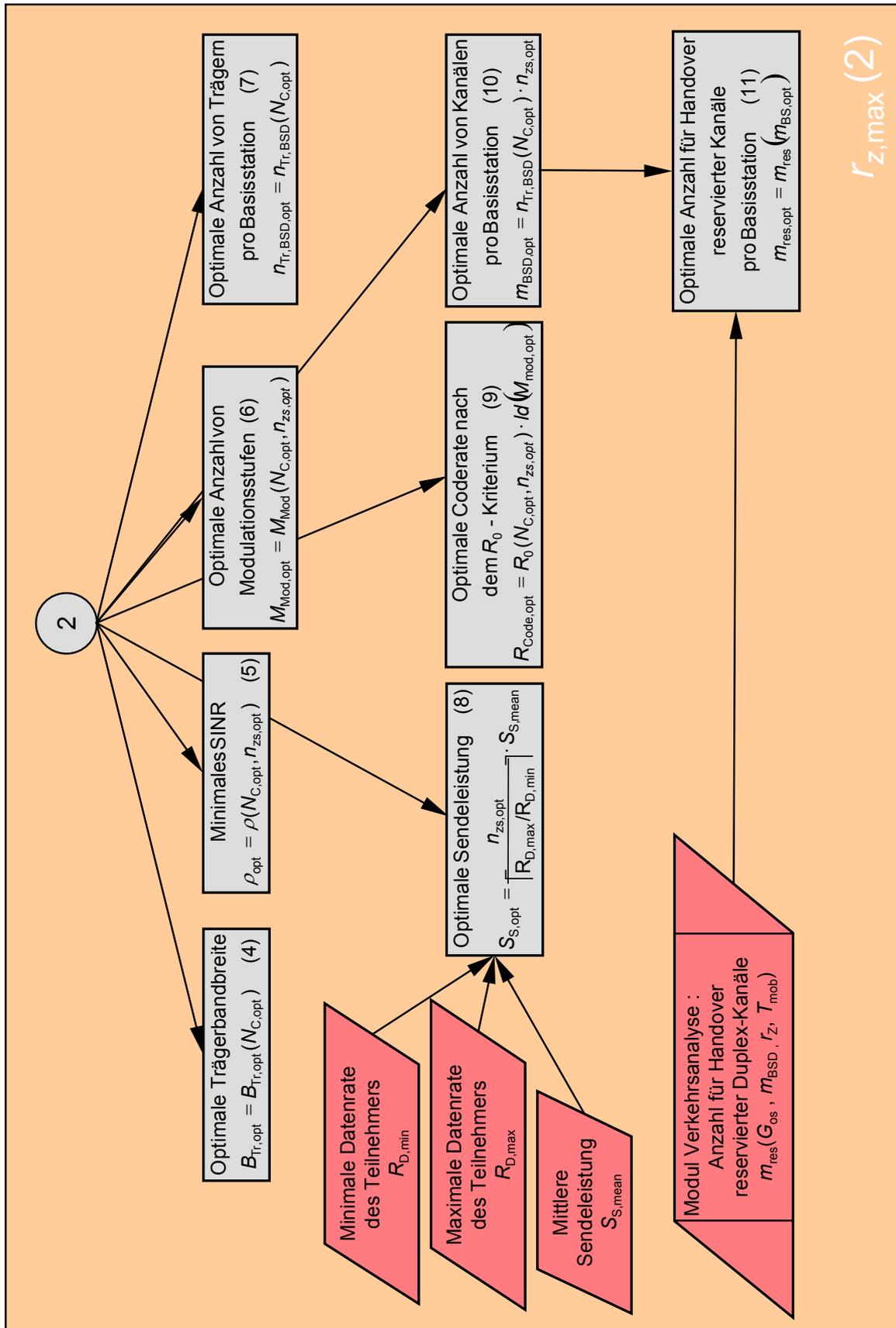


Bild B.5 Berechnung des maximalen Zellenradius $r_{z,max}$ und der optimalen Systemparameter : Teil (2)

Anhang C

Begriffsdefinitionen, Abkürzungen, Symbole und Formelzeichen

C.1 Begriffsdefinitionen

Die verwendeten Begriffsdefinitionen sind, soweit möglich, von Normierungsgremien übernommen und, falls erforderlich, an die Verwendung im Zusammenhang mit dieser Arbeit angepasst.

- Aktivitätsebene:** Verkehrsmodelle der Aktivitätsebene beschreiben die zeitlichen Abläufe für den Auf- und Abbau von Verbindungen und die Teilnehmeraktivität während des Bestehens einer Verbindungen. Diese Modelle besitzen einen höheren Detaillierungsgrad als die Modelle der Verbindungsebene und eignen sich z.B. zur Modellierung statistischer Multiplexverfahren.
- Ankunftsabstand:** Zeitlicher Abstand zweier aufeinanderfolgender Ankünfte von Verbindungsaufbauanforderungen (Belegungsversuche)
- Ankunftsrate:** ist der Kehrwert des mittleren Ankunftsabstands T_A
- Ankunftsprozess:** Prozess innerhalb eines Verkehrsmodells, durch den die zeitliche Aufeinanderfolge von Verbindungsaufbauanforderungen beschrieben wird.
- Anrufverlustwahrscheinlichkeit:** Wahrscheinlichkeit, dass eine ankommende Verbindungsaufbauanforderung durch das Mobilfunksystem abgewiesen wird und damit verloren geht.
- Bedienprozess:** Prozess innerhalb eines Verkehrsmodells, durch den die Verteilung von Bediendauern (Belegungsdauern) beschrieben wird. Die Verteilung wird

	häufig durch die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion der Belegungs- dauern dargestellt.
Belegung:	Benutzung eines Übertragungskanals bzw. einer vermittlungstechnischen Einrichtung.
Belegungsdauer:	Zeitlicher Abstand zwischen Beginn und Ende einer Belegung.
Blockierung:	Zustand eines Telekommunikationssystems, in dem ein beabsichtigter Zustandsübergang im Teilnehmermodell durch fehlende Systemressour- cen nicht möglich ist. Daraus resultiert ein Verbindungsabbruch oder der Verlust einer Verbindungsaufbauanforderung.
Cluster:	Menge von benachbarten Basisstationen, die disjunkte Mengen von Trägerfrequenzen besitzen.
Dienstgüte	Quality of Service (G_{oS}) ist die Qualität der Telekommunikationsdienst- Abwicklung, soweit sie von technischen Einrichtungen abhängt.
downlink	Übertragungsrichtung von der Basisstation zur Mobilstation (BS→MS)
“Frei“	Bezeichnung eines Zustandes im Teilnehmer-Verkehrsmodell, in dem der Teilnehmer keine Telekommunikationsverbindung besitzt und somit keinen Übertragungskanal belegt.
Funkzelle	Gebiet um eine Basisstation, in dem die Teilnehmer mit Mobilfunkdiens- ten versorgt werden.
Handover	bezeichnet den Vorgang des Weiterreichens einer Verbindung von der momentan die Verbindung unterhaltenden Basisstation zu einer anderen, die die Verbindung übernimmt.
Handover-Modell	beschreibt die Auswirkungen von Handover auf die Zustandübergänge im Verkehrsmodell des Mobilfunksystems.
Kanalbedarf:	Anzahl an Übertragungskanälen, die zur Bereitstellung eines Telekommunikationsdienstes erforderlich ist.
Kanalbedarfsvektor	beinhaltet für jeden Zustand im Teilnehmer-Verkehrsmodell die Anzahl an Übertragungskanälen, die zur Bereitstellung des Telekommunikati- onsdienstes in diesem Zustand erforderlich ist.
Kollision:	bedeutet, dass durch das gleichzeitige Senden von mindestens zwei Teil- nehmern auf dem gleichen Übertragungskanal das empfangene Signal an der Basisstation so stark gestört ist, dass die darin enthaltene Information nicht korrekt empfangen wird.

- Makro-Zustand:** besteht aus einer Menge von zusammengehörigen Unterzuständen. Er ist definiert durch die Menge aller Zustände, in denen die gleiche Kombination von Diensten XY benutzt wird.
- Markoff-Modell:** dient zur Modellierung eines gedächtnislosen stochastischen Prozesses, (eines Markoff-Prozesses).
- Markoff-Prozesse:** Prozesse, deren zukünftige Entwicklung nur vom momentanen Zustand abhängen; nicht von der Zeitdauer des Bestehens des momentanen Zustands.
- Mobilitätsmodell:** beschreibt die Bewegung der Mobilfunk-Teilnehmer als statistischen Prozess
- Multiservice-Teilnehmer:** Teilnehmer, der die Möglichkeit hat, mehrere vom Mobilfunksystem angebotene Telekommunikationsdienste - auch gleichzeitig - benutzen zu können.
- Signal-zu-Störleistungsverhältnis:** Quotient aus der Signalleistung und der Störleistung. Die Störleistung ist die Summe aus Interferenzleistung, hervorgerufen durch andere Teilnehmer und der Rauschleistung.
- Singleservice-Teilnehmer:** ein Teilnehmer, der nur die Möglichkeit hat, einen Telekommunikationsdienst zu benutzen. Dieser Dienst darf einen oder mehrere Übertragungskanäle belegen.
- Sprachdienst-Teilnehmer:** Teilnehmer der nur den mobilen Fernsprehdienst nutzt und nur einen (Duplex-) Übertragungskanal belegt.
- Systemmodell:** bezeichnet das mehrdimensionale Markoff-Modell, das alle möglichen Kanalbelegungszustände und Zustandsübergänge einer Basisstation für MS-Teilnehmer enthält.
- Teilnehmer:** besitzt die Möglichkeit (im Festnetz besitzt er einen Teilnehmeranschluss, im Mobilfunksystem eine entsprechende SIM-Karte), die Telekommunikationsdienste des betrachteten Telekommunikationssystems zu benutzen.
- Teilnehmernennkapazität:** Teilnehmeranzahl, die bei vorgegebener Verkehrsgüte gerade noch bewältigt werden kann.
- Teilnehmer-Verkehrsmodellparameter:** Parameter des Verkehrsmodells.
- Teilnehmer-Parameter:** Kurzform für Teilnehmer-Verkehrsmodellparameter.
- Teilnehmer-Messgrößen:** durch Verkehrsmessungen ermittelbare Größen zur mathematischen Beschreibung des Teilnehmerverhaltens.

- Übertragungsgüte: bezeichnet die Qualität einer Telekommunikationsverbindung.
- Übertragungskanal: bezeichnet einen logischen Kanal in dem Informationen einer Telekommunikationsverbindung übertragen werden können. Durch Multiplexverfahren ist es möglich, mehrere Kanäle mit dem gleichen Medium zu bilden.
- Uplink: Übertragungsrichtung von der Mobilstation zur Basisstation (MS→BS).
- Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass eine bestehende Telekommunikationsverbindung aufgrund fehlender Systemressourcen beim Handover durch das Mobilfunksystem abgebrochen wird.
- Verbindungsaufbauverlustwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass eine Anforderung für den Aufbau einer neuen Telekommunikationsverbindung aufgrund fehlender Systemressourcen durch das Mobilfunksystem abgewiesen wird.
- Verbindungsebene: Verkehrsmodelle der Verbindungsebene; sie beschreiben die zeitlichen Abläufe für den Auf- und Abbau von Verbindungen durch den Teilnehmer.
- Verkehr: Benutzung von Übertragungskanälen bzw. vermittlungstechnischen Einrichtungen für die Übertragung von Informationen (Nachrichten): der Verkehr setzt mit dem Belegen des Übertragungskanals bzw. der vermittlungstechnischen Einrichtung ein.
- Verkehrsangebot: Verkehrswert der aufträte, wenn alle Belegungsversuche erfolgreich wären; das Verkehrsangebot ist i.a. nicht direkt messbar, sondern errechnet sich aus der pro Zeiteinheit auftretenden Anzahl von Belegungsversuchen (Ankunftsrate) multipliziert mit der mittleren Belegungsdauer der erfolgreichen Belegungsversuche dieses Verkehrs.
- Verkehrsbelastung: Verkehrswert des Verkehrs, der durch die akzeptierten Belegungsversuche verursacht wird.
- Verkehrsgüte Grade of Service (G_{oS}) ist die Qualität der Verkehrsabwicklung, soweit sie von technischen Einrichtungen abhängt. Für Mobilfunksysteme wird sie als gewichtete Summe aus der Anrufblockierwahrscheinlichkeit beim Verbindungsaufbau und der Verbindungsunterbrechungswahrscheinlichkeit bestimmt.

- Verkehrsmenge:** Summe der Belegungsdauern eines Kollektivs von Belegungen innerhalb eines Beobachtungszeitraums. Die Dimension ist die Zeit. Zur Kennzeichnung, dass es sich um eine Verkehrsmenge handelt, nennt man die Einheit Erlangstunde (Erlh).
- Verkehrsmessung:** Messtechnische Ermittlung von Größen, die den Verkehr beschreiben.
- Verkehrsmodell:** Mathematisches Modell zur Beschreibung des Verkehrsablaufs.
- Verkehrs-Nennangebot:** Verkehrsangebot, bei dem eine vorgegebene Verkehrsgüte gerade noch eingehalten wird. Eine Überschreitung dieses Wertes (Verkehrs-Überangebot) führt zu einer verminderten Verkehrsgüte.
- Verkehrsnennkapazität:** Verkehrsbelastung, die bei vorgegebener Verkehrsgüte gerade noch bewältigt wird. Sie ist gleich dem Produkt aus Verkehrslast pro Teilnehmer und der Teilnehmernennkapazität.
- Verkehrsquelle** Ursprung von Nachrichtenverkehr, in der Regel der rufende Teilnehmer
- Verkehrssenke** Ziel des Nachrichtenverkehrs, in der Regel der gerufene Teilnehmer
- Verkehrswert:** Quotient aus der während eines Beobachtungszeitraums auftretenden Verkehrsmenge und der Dauer dieses Zeitraums. Die Dimension ist die „1“. Zur Kennzeichnung, dass es sich um eine Verkehrsmenge handelt, nennt man die Einheit Erlang (Erl). Der Verkehrswert ist gleich der mittleren Anzahl gleichzeitig bestehender Belegungen.
- Verlustwahrscheinlichkeit:** Wahrscheinlichkeit, dass eine Verbindungsaufbauanforderung abgewiesen wird und dadurch verloren geht.
- Zugriffsverfahren:** Technisches Verfahren um auf eine Systemressource (Übertragungskanal) zuzugreifen. Zugriffsverfahren mit statischer Kanalzuteilung belegen die Übertragungskanäle während der gesamten Dauer der Verbindung durchgehend. Zugriffsverfahren mit dynamischer Kanalzuteilung können die Anzahl der einer Verbindung zugeteilten Übertragungskanäle während der Dauer der Verbindung variieren. Ein Verfahren ist PRMA. Bei diesem wird der Übertragungskanal zu Beginn einer Übertragungspause wieder für andere Teilnehmer freigegeben..

C.2 Abkürzungen

ARQ	Automatic Repeat Request
BS	Basisstation

BER	Bit Error Rate
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
GSM	Global System for Mobile Communications
FDD	F requency D ivision D uplex
FDM	F requency D ivision M ultiplex
MS	M obilstation oder in Verbindung mit “-Teilnehmer”: M ultiservice
PRMA	P acket R eservation M ultiple A ccess
SIR	S ignal-zu- I nterferenzleistungs- V erhältnis (s ignal to i nterference r atio)
SINR	S ignal-zu- S törleistungs- V erhältnis (s ignal to i nterference and n oise r atio)
SNR	S ignal-zu- R auschleistungs- V erhältnis (s ignal to n oise r atio)
TDM	T ime D ivision M ultiplex
WDF	W ahrscheinlichkeits d ichtefunktion
WVF	W ahrscheinlichkeits v erteilungsfunktion

C.3 Symbole

B_{ges}	Gesamtbandbreite, die zum Betrieb eines Mobilfunksystems zur Verfügung steht
E	Einnahmen aus dem Betrieb eines Mobilfunksystems im Betrachtungszeitraum (z.b. Abschreibungszeitraum)
D	Abstand zwischen zwei Funkzellen mit der gleichen Menge von Trägerfrequenzen
D_d	vom System angebotener Dienst
\tilde{D}_A	$=\{D_d \mid d = 1 \dots n_D\}$, Menge der vom System angebotenen Dienste
\tilde{D}_i	Menge der von einem Teilnehmer im Zustand i benutzten Dienste
$ \tilde{D}_i $	Mächtigkeit der Menge \tilde{D}_i
D_T	Teilnehmerdichte im Versorgungsgebiet der Basisstation

Δf_{FDD}	Frequenzversatz bei Frequency-Division-Duplex zwischen den Sendesignalen in down- und uplink einer Vollduplex-Verbindung
$G_E, G_E^{(\text{dB})}$	Antennengewinn des Empfängers als Faktor und in dB
$G_S, G_S^{(\text{dB})}$	Antennengewinn des Senders als Faktor und in dB
G_{oS}	Verkehrsgüte
F_u	Trägerfrequenzgruppe in der Funkzelle u eines Clusters
f	Frequenz
f_B	Funktion der Blockierwahrscheinlichkeit
I_{Cap}	Kapitalverzinsung: Quotient aus Reingewinn P und eingesetztem Kapital C_{ap}
λ	Wellenlänge
λ_A	Ankunftsrate eines Markoff-Prozesses
$L, L^{(\text{dB})}$	Ausbreitungsdämpfung als Faktor und in dB
$L_0, L_0^{(\text{dB})}$	Ausbreitungsdämpfung bei Freiraumausbreitung als Faktor und in dB
$L_A, L_A^{(\text{dB})}$	Über die Freiraumausbreitung hinausgehende Ausbreitungsdämpfung als Faktor und in dB
K_B	Kosten für die vom System belegte Gesamtbandbreite im Versorgungsgebiet
K_k	dieser Multiservice-Faktor beschreibt die statistische Abhängigkeit der Benutzung der Dienste (<u>K</u> ombination) durch einen Multiservice-Teilnehmer
K_N	Kosten für die vom Mobilfunksystem verursachten Investitions- und Betriebskosten (ohne Kosten für belegte Bandbreite)

\underline{k}	Vektor zur Beschreibung eines Zustands im Verkehrsmodell eines Telekommunikationssystems. Ein Vektorelemente k_i repräsentiert die Anzahl der Teilnehmer, die Dienst i benutzen. Die Dimension des Vektors \underline{k} ist gleich der Anzahl der angebotenen Dienste.
\underline{k}_T	Vektor zur Beschreibung eines Zustands im Verkehrsmodell eines Teilnehmers
$\Delta\underline{k}_T(v)$	Vektor zur Beschreibung eines Zustandsübergangs im Verkehrsmodell eines Teilnehmers
M_{BS}	Anzahl der Teilnehmer in der Funkzelle einer Basisstation
$M_{BS,norm}$	Anzahl der Teilnehmer pro Übertragungskanal in der Funkzelle einer Basisstation
\underline{M}_i	Vektor, der den Zustand der Basisstation mit Index i beschreibt
$\{\underline{M}_i\}(i)$	Zustandsraum der Basisstation, in dem der höchste Index der Zustände i ist
$M_X(i)$	Anzahl der Teilnehmer, die im Zustand X sind, wenn sich die Basisstation im Zustand \underline{M}_i befindet
m	Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle
m_{BS}	Anzahl der Übertragungskanäle, die einer Basisstation zur Verfügung stehen
$m_{BS,j}$	Anzahl der Übertragungskanäle einer Basisstation, die im Zustand j belegt sind
m_S	Anzahl der erforderlichen Übertragungskanäle für eine Sprachverbindung
m_D	Anzahl der erforderlichen Übertragungskanäle für eine Datenverbindung
m_{SD}	Anzahl der erforderlichen Übertragungskanäle für eine Sprach-/Datenverbindung

m_{res}	Anzahl der für Handover reservierten Übertragungskanäle einer Basisstation
\underline{m}_T	Kanalbedarfsvektor: Vektorelemente repräsentieren die Anzahl der belegten Übertragungskanäle im zugehörigen Zustand im Teilnehmermodell
$\overline{m}_{T, \text{Ak}}$	Mittlerer Kanalbedarf eines Teilnehmers, modelliert auf der Aktivitätsebene
μ	Bedienrate, sie ist bei der Modellierung des Kanalbelegungsprozesses gleich dem Kehrwert der mittleren Kanalbelegungsdauer.
\tilde{N}	Menge der natürlichen Zahlen
$N_{I, s}$	Empfangene Interferenzleistung von Störer s
N_C	Clustergröße: Anzahl der Zellen (Basisstationen) in einem Zellcluster
$n_{\text{Tr, BS}}$	Anzahl der Trägerfrequenzen, die einer Basisstation zur Verfügung stehen
n_{zs}	Anzahl der Zeitschlitze in einem Übertragungsrahmen
P	Reingewinn (engl. profit): Gewinn nach Abschreibung und Steuern
p_B	Verlustwahrscheinlichkeit
p_U	Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit
$p_{k, j}$	die bedingte Verzweigungswahrscheinlichkeit von Zustand k nach Zustand j unter der Bedingung, dass Zustand k verlassen wird
$\underline{\pi}$	Zustandswahrscheinlichkeitsvektor eines Teilnehmers bzw. Telekommunikationssystems, der alle Wahrscheinlichkeiten der Zustände enthält, die für die verkehrstheoretische Analyse von Bedeutung sind
π_{HB}	Handover-Blockierwahrscheinlichkeit

π_k	Zustandswahrscheinlichkeit von Zustand k
$\pi_{k,\text{un}}$	unnormierte Zustandswahrscheinlichkeit von Zustand k
$q_{i,j}$	Übergangsraten zwischen den Zuständen in Markoff-Modellen
$q_T(\nu)$	Zustandsübergangsrate für einen Zustandsübergang ν im Teilnehmer-Verkehrsmodell
R_{eq}	Äquivalenter Funkzellenradius bei der Modellierung von Handover
r_z	Radius der Funkzelle
$r_{f,\text{Tr}}$	Verhältnis zwischen der Nutzbandbreite und der Gesamtbandbreite B_{ges}
$r_{z,V}$	maximaler Radius einer Funkzelle, bei dem die Teilnehmer in dieser Funkzelle mit Mobilfunkdiensten unter Einhaltung des geforderten Grade of Service G_{oS} versorgt werden können
$r_{z,\text{max}}$	maximaler Radius einer Funkzelle, bei dem die Teilnehmer in dieser Funkzelle mit Mobilfunkdiensten unter Einhaltung der geforderten Dienstgüte (Übertragungs- <u>und</u> Verkehrsgüte) versorgt werden können
$r_{z,\text{SINR}}$	bezeichnet den maximalen Radius einer Funkzelle, bei dem am Rande dieser Funkzelle das geforderte minimale Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis nicht unterschritten wird
ρ	Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis
ρ	ρ_I Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis
$\rho_{I,\text{min}}$	erforderliches, minimales Signal-zu-Interferenzleistungs-Verhältnis, das zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte nicht unterschritten werden darf.
ρ_{min}	erforderliches minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis, das zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte nicht unterschritten werden darf.
S_E	empfangene Signalleistung

$S_E^{(\text{dBm})}$	Sendepiegel in dBm
S_S	Sendeleistung
$S_S^{(\text{dBm})}$	Empfangspegel in dBm
T	Teilnehmertyp
T_{par}	Menge der Teilnehmerparameter, die zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens in bezug auf die Dimensionierung eines Mobilfunksystems erforderlich sind
$\overline{T_A}$	Mittelwert der <u>A</u> nkunftsabstände der Anrufe eines Teilnehmers
$\overline{T_B}$	Mittelwert der Verbindungsdauern (<u>B</u> edienzeiten)
T_{FDD}	Zeitversatz bei Frequency-Division-Duplex zwischen den Zeitrahmen im down- und uplink
T_R	Dauer eines TDM-Zeitrahmens
τ_B	Abschreibungszeitraum für das durch das Mobilfunksystem belegte Frequenzspektrum (Gesamt <u>b</u> andbreite)
τ_E	Abschreibungszeitraum für die Betriebseinrichtungen (<u>E</u> quipment)
$\tau_{H,\text{norm}}$	Verhältnis zwischen der Zeitdauer, die ein Teilnehmer mit der Geschwindigkeit v_{mean} zum Durchqueren der Funkzelle auf dem Weg mit der Länge $2R_{\text{eq}}$ benötigt und dem Mittelwert der Verbindungsdauer $\overline{T_B}$
P	Gewinn (= Einnahmen - Kosten) eines Mobilfunksystems
v_{mean}	Mittelwert der Geschwindigkeit der Mobilfunkteilnehmer
ρ_{norm}	Normierte Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung der Mobilfunkteilnehmer

C.4 Formelzeichen

$\text{ld}(x)$	Logarithmus zur Basis 2 von x
$\text{lg}(x)$	Logarithmus zur Basis 10 von x
$\lceil x \rceil$	Aufrunden der Zahl x auf die nächste ganze Zahl Richtung $+\infty$
$\lfloor x \rfloor$	Abrunden der Zahl x auf die nächste ganze Zahl Richtung $-\infty$
$\text{rnd}(x)$	Runden auf die nächstliegende ganze Zahl (Aufrunden ab 0.5)
\underline{v}	Vektor v
\underline{v}^T	Transponierter Vektor v
\bar{X}	Mittelwert der Zufallsgröße X
$f(y, \dots) _y$	Funktion f an der Stelle y

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Kriterien für die Dimensionierung von Mobilfunksystemen	2
Bild 1.2	Optimierung des Funkzellenradius durch geeignete Wahl der Modulation und Kanalcodierung (Prinzipdarstellung)	5
Bild 1.3	Begrenzung des maximalen Zellenradius durch das erforderliche Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis (SINR)	6
Bild 1.4	Begrenzung des maximalen Zellenradius durch die erforderliche Verkehrsgüte (GoS)	7
Bild 1.5	Verhältnisse bei optimaler Dimensionierung	7
Bild 2.1	Zustandsübergangsdiagramm mit den Messgrößen $p_{k,j}$ eines Multiservice-Teilnehmers, dem mehrere Dienste D_i zur Verfügung stehen (nur Übergänge von und nach k dargestellt)	17
Bild 2.2	Verkehrsmodell mit den Zustandsübergangsraten $q_{k,j}$ (Markoff-Modell) eines Multiservice-Teilnehmers, dem mehrere Dienste D_i zur Verfügung stehen (nur Übergänge von und nach k dargestellt)	18
Bild 2.3	Markoff-Modell zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Verbindungsebene	22
Bild 2.4	Verkehrsmodell eines Multiservice-Teilnehmers, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt	25
Bild 2.5	Ausschnitt aus dem Teilnehmermodell eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene	28
Bild 2.6	Ausschnitt aus dem Ersatzmodell eines Multiservice-Teilnehmers, der auf der Aktivitätsebene modelliert war (Bild 2.5)	34
Bild 2.7	Verkehrsmodell zur Beschreibung des Teilnehmerverhaltens eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene	38
Bild 2.8	Vereinfachtes Verkehrsmodell zur näherungsweisen Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten eines Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene (vgl. Bild 2.7)	42

Bild 2.9	Ersatzmodell für das vereinfachte Verkehrsmodell des Sprachdienst-Teilnehmers auf der Sprachaktivitätsebene (in Bild 2.8)	44
Bild 2.10	Verkehrsmodell eines Multiservice-Teilnehmers auf der Aktivitätsebene, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt	46
Bild 2.11	Ersatzmodell eines auf der Aktivitätsebene modellierten Multiservice-Teilnehmers, der Sprach-, Datendienste und deren Kombination benutzt	48
Bild 2.12	Funkzellen mit Radius r_z und angenommene Entfernung R_{eq} von der Basisstation, bei der ein Handover erfolgt	52
Bild 2.13	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Geschwindigkeit v_T und der normierten Geschwindigkeit $v_{T,norm}$	54
Bild 2.14	Weglänge d_h eines mobilen Teilnehmers innerhalb einer Funkzelle bei geradliniger Bewegung und einem Verbindungsaufbau zur Basisstation am Rand der Funkzelle (Handover von einer angrenzenden Basisstation)	56
Bild 2.15	Die Wahrscheinlichkeit für einen weiteren Handover eines Teilnehmers, dessen Verbindung zur betrachteten Basisstation durch Handover zustande gekommen ist, in Abhängigkeit der Größe $\tau_{H,norm}=(2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung.	59
Bild 2.16	Weglänge d_n eines mobilen Teilnehmers bei geradliniger Bewegung und einem Verbindungsaufbau innerhalb der Funkzelle (Neuankunft im System)	61
Bild 2.17	Wahrscheinlichkeit p_n für Handover eines Teilnehmers, der eine neue Verbindung zur betrachteten Basisstation aufgebaut hat in Abhängigkeit von der Größe $\tau_{H,norm}=(2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} in der Geschwindigkeits-WDF	63
Bild 2.18	Die zusätzlichen Ankunftsrate $\lambda_{H,norm} = \lambda_H/\lambda_A$ in Abhängigkeit von der Handover-Rate $\tau_{H,norm} = (2R_{eq}/v_{mean})\mu_B$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung (Bild 2.13)	66
Bild 2.19	Fehler $\Delta\mu_{BH,appr}(\tau_{H,norm},p_u)$ der approx. Raten für die Handover-Blockierwahrscheinlichkeiten für $\pi_{HB}=0.2, 0.1$ und 0.01	68
Bild 2.20	Darstellung der komplementären WVF $F_{T_{H,norm}}^C$ für die Bedienzeit mit Handover-Einfluss, der Näherung $F_{T_{HB,norm}}^C$ durch eine Exponentialfunktion und der komplementären WVF $F_{T_B,norm}^C$ der ursprünglichen Bedienzeit	70

Bild 2.21	Die normierten Bedienraten $\mu_{\text{BH, norm}} = \mu_{\text{BH}} / \mu_{\text{B}}$ in Abhängigkeit von der Handover-Rate $\tau_{\text{H, norm}} = (2R_{\text{eq}}/v_{\text{mean}})\mu_{\text{B}}$ und der Streuung σ_{norm} der Geschwindigkeitsverteilung (Bild 2.13)	71
Bild 2.22	Dreiteiliges Handover-Ersatzmodell für den Multiservice-Teilnehmer	73
Bild 2.23	Zusammensetzung der Dienstgüte und die verwendeten Parameter zu ihrer Beschreibung	75
Bild 3.1	Dämpfung der Signalleistung in vier Gebieten mit unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen	84
Bild 3.2	Dämpfung des Mobilfunkkanals in Vorstadtgebieten für drei verschiedene Antennenhöhen des Senders über Grund	85
Bild 3.3	2-Strahlen-Modell zur Berechnung der Empfangsleistung bei einem reflektierten Pfad	86
Bild 3.4:	Kombination von Frequenz-, Zeit- und Raummultiplex; Frequenzwiederverwendung durch Clusterbildung	90
Bild 3.5:	Frequenz/Zeit/Raum-Multiplexstruktur mit FDD (Frequency Division Duplex)	93
Bild 3.6:	Frequenz/Zeit/Raum-Multiplexstruktur mit TDD (Time Division Duplex)	94
Bild 3.7:	Frequenzwiederholung bei Verwendung eines Dreier-Clusters ($I=J=1, N_C=3$)	95
Bild 3.8	Interferenzsituation einer Basisstation (uplink) in einem Dreier-Cluster, in der die maximal mögliche Interferenzleistung empfangen wird (worst case)	97
Bild 3.9	Interferenzsituation einer Mobilstation (downlink) in einem Dreier-Cluster, in der die maximal mögliche Interferenzleistung empfangen wird (worst case).	98
Bild 3.10	Drei unterschiedliche Konstellationen in bezug auf die Lage des Nutzsensors und der Gleichkanalstörer auf der Dämpfungskennlinie für $N_C=7$	101
Bild 3.11	SIR in Abhängigkeit von der gewählten Clustergröße N_C und dem Zellradius r_z in einem Vorstadtgebiet	103
Bild 3.12	SINR in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und des Zellradius r_z in Vorstadtgebieten	105
Bild 4.1	Verkehrskapazitätsanalyse von Zugriffsverfahren	109
Bild 4.2	M/M/m/K=m/M Verlustsystem (keine Warteplätze) mit $M > m$ Teilnehmern	110

Bild 4.3	Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit für ein M/M/m/K/M Verlustsystem (Engset-Verteilung ohne Warteplätze: $K=M$) mit m Bedieneinheiten	113
Bild 4.4	Zulässige Anzahl von Teilnehmern (mit $T_A=2,5$ h und $T_B=4$ min) pro Übertragungskanal M_{norm} in einem System mit m Kanälen ohne Warteplätze bei der zulässigen Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B	114
Bild 4.5	Markoff-Modell für ein Mobilfunksystem mit TDMA-Zugriffsverfahren unter Berücksichtigung von Handover	116
Bild 4.6	Ermitteln der Verkehrsgüte G_{oS} aus der Verbindungsaufbaublockierwahrscheinlichkeit p_B und Verbindungsabbruchwahrscheinlichkeit p_U	120
Bild 4.7	Abhängigkeit der Verkehrsgüte G_{oS} vom Funkzellenradius r_z bei konstanter Teilnehmeranzahl $M_{\text{BS}}=6800$ mit einem Verkehrsangebot von $A_{\text{TIn}}=27$ mErl pro Sprachdienst-Teilnehmer	123
Bild 4.8	Abhängigkeit der Verkehrsgüte G_{oS} von der Anzahl der für Handover reservierten Kanäle m_{res} und der Anzahl der Sprachdienst-Teilnehmer pro Übertragungskanal $M_{\text{BS,norm}}$ bei einem Funkzellenradius von $r_z = 2$ km	124
Bild 4.9	Zulässige Teilnehmeranzahl pro Funkkanal mit Berücksichtigung von Handover $M_{\text{BS,norm}}$ und ohne Berücksichtigung von Handover $M_{\text{oH,norm}}$	125
Bild 4.10	Verlust an Teilnehmernennkapazität pro Übertragungskanal durch Hand-over $\Delta M_{\text{BS,norm}}$ (entspricht der normierten Distanz der Kurven mit und ohne Handover in Bild 4.9)	126
Bild 4.11	Optimale Anzahl exklusiv für Handover reservierter Kanäle $m_{\text{res,opt}}$	127
Bild 4.12	Relativer Fehler $E_{\text{appr MBS,norm}}$, der bei Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode (ohne Iteration von λ_H) bei der zulässigen Teilnehmeranzahl pro Funkkanal $M_{\text{BS,norm}}$ auftritt	129
Bild 4.13	Markoff-Modell eines Multiservice-Teilnehmers	130
Bild 4.14	Beispiel eines Verkehrsmodells einer Basisstation mit $m_{\text{BS}}=4$ Übertragungskanälen	134
Bild 4.15	Zulässige Anzahl von MS-Teilnehmern pro Übertragungskanal $M_{\text{BS,norm}}$ für unterschiedliche Sets an Übergangsraten aber bei konstantem Verkehrsennangebot pro Teilnehmer	142
Bild 4.16	Optimale Anzahl der für Handover reservierten Kanäle $m_{\text{res,opt}}$ bei Variation der Teilnehmer-Zustandsübergangsraten bei konstantem Verkehrsennangebot pro Teilnehmer	143

Bild 4.17	Ersatzverkehrsmodell einer Basisstation zur vereinfachten Bestimmung der Verkehrskapazität einer Basisstation für MS-Teilnehmer	144
Bild 4.18	Fehler des Verfahrens zur näherungsweise Berechnung von $M_{BS,norm}$ bei Variation der Teilnehmer-Zustandsübergangsraten	146
Bild 4.19	Abweichung des Verfahrens zur näherungsweise Berechnung der MS-Teilnehmerkapazität $M_{BS,norm}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl m_{BS} von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation	147
Bild 4.20	Zulässige Anzahl von MS-Teilnehmern pro Übertragungskanal $M_{BS,norm}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl m_{BS} von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation	148
Bild 4.21	Optimale Anzahl für Handover reservierter $m_{res,opt}$ in Abhängigkeit des Funkzellenradius r_z und der Anzahl von Übertragungskanälen der betrachteten Basisstation m_{BS}	149
Bild 4.22	Abweichung der Teilnehmernennkapazität für den MS-Teilnehmer im Vergleich zu einem Sprachdienst-Teilnehmer mit dem Kanalbedarf $m_s = 1$ und dem gleichen mittleren Verkehrsangebot pro Teilnehmer	150
Bild 5.1	Algorithmus zur optimalen Dimensionierung von Mobilfunksystemen	152
Bild 5.2	Drei mögliche Fälle nach der Dimensionierung eines Funksystems: α) kapazitätsbegrenzt, β) leistungs- bzw. störleistungsbegrenzt und im Fall γ) nach einer optimale Dimensionierung	158
Bild 5.3	Eingangsparameter und die mit dem Algorithmus "MAX_RZ_DIM" optimierten Systemgrößen	160
Bild 5.4	Zusammenhänge der Komponenten (Rechtecke) und Einflussgrößen (Pfeile), die bei der Dimensionierung eines Mobilfunksystems zu berücksichtigen sind	163
Bild 5.5	Anzahl $n_{TrBS}(N_C)$ der Trägerfrequenzen pro Basisstation in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C bei einer Gesamtbandbreite von $B_{ges}=3$ MHz und einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{Tr,0}=200$ kHz	167
Bild 5.6	Bandbreite der Trägersignale in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C bei einer Gesamtbandbreite von $B_{ges}=3$ MHz und einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{Tr,0}=200$ kHz	169
Bild 5.7	Anzahl der maximal realisierbaren Zeitschlitze in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C , einer angestrebten Trägerbandbreite von $B_{Tr,0}=200$ kHz und bei einer Datenrate von $R_{D,min}=13$ kbit/s pro Zeitschlitz	171

- Bild 5.8 Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_0(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ für einen Slow- ($b=0$) und einen Fast-Fading-Kanal ($b=0.667 \cdot 10^{-3}$) bei MDPSK und Soft-Decision-Decodierung 174
- Bild 5.9 Maximal erreichbares Verhältnis (für $\rho_{\min}/\eta_{\text{sym}} \rightarrow \infty$) von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_{0\text{asymp}}(b, M_{\text{Mod}})$ für einen Fast-Fading-Kanal bei MDPSK und Soft-Decision-Decodierung 175
- Bild 5.10 Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate $R_{0, \text{res}}(\rho_{\min, \text{norm}}, M_{\text{Mod}}, b)$ bei einem Übergang auf die nächst höhere Modulationsstufenanzahl bei einem Gewinn von $\Delta R_0=0.2$ 176
- Bild 5.11 Erforderliches normiertes Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{norm} in Abhängigkeit vom gewünschten Verhältnis von Informationsbitrate zu Symbolrate R_0 179
- Bild 5.12 Erforderliches Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der gewünschten Kommunikationskanäle (Zeitschlitz) n_{zs} pro Trägerfrequenz bei $B_{\text{ges}}=25\text{MHz}$ und $B_{\text{TR},0}=200\text{ kHz}$ 180
- Bild 5.13 Verwendete Anzahl von Modulationsstufen M_{Mod} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und der Anzahl der gewünschten Kommunikationskanäle (Zeitschlitz) n_{zs} pro Trägerfrequenz 182
- Bild 5.14 Sendeleistung S_S bei Einhaltung der mittleren Sendeleistung $S_{S, \text{mean}}=0.25\text{ W}$ und des Grenzwertes für die maximale Sendeleistung von $S_{S, \text{max}}=2\text{ W}$ 184
- Bild 5.15 Minimales Signal-zu-Störleistungs-Verhältnis ρ_{\min} in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C , dem Zellenradius r_z und der minimalen bzw. maximalen Anzahl von Zeitschlitz für ein Vorstadtgebiet 185
- Bild 5.16 Maximaler (obere Kurvenschar) und minimaler (untere Kurvenschar) Zellenradius in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und von der Anzahl der gewünschten Zeitschlitz n_{zs} (Kommunikationskanäle pro Trägerfrequenz) 187
- Bild 5.17 Maximaler (obere Kurvenschar) und minimaler (untere Kurvenschar) Zellenradius in Abhängigkeit von der Clustergröße N_C und von der Anzahl der möglichen Kommunikationskanäle m_{BS} pro Basisstation 189
- Bild 5.18 Maximale Anzahl von Duplexkanälen $m_{\text{BS}, \text{max}}(N_C)$, die maximale Anzahl $n_{\text{zs}, \text{max}}(N_C)$ der Zeitschlitz und die Anzahl $n_{\text{Tr}, \text{BS}}(N_C)$ der Duplex-Trägerfrequenzen pro Basisstation 190

- Bild 5.19 Bestimmung der maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(D_T, m_{BS})$ in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T und der Anzahl der Duplex-Kanäle pro Basisstation m_{BS} , für die die geforderte Verkehrsgüte G_{oS} garantiert wird 193
- Bild 5.20 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, m_{BS}, B_{ges}=25\text{MHz}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl der Duplex-Kanäle m_{BS} bei einer Verkehrsennangebotsdichte $D_A=2.5 \text{ E}/\text{km}^2$ 194
- Bild 5.21 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, m_{BS}, B_{ges}=25 \text{ MHz}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl der Zeitschlitz n_{zs} 195
- Bild 5.22 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,v}(N_C, n_{zs}, D_T=10^2/\text{km}^2)$ bei einer Verkehrsennangebotsdichte $D_A=2.5 \text{ E}/\text{km}^2$ und die minimalen und maximalen Radien zur Einhaltung der geforderten Übertragungsgüte 197
- Bild 5.23 Die maximal möglichen Zellenradien $r_{z,max}(N_C, n_{zs}, B_{ges}=25 \text{ MHz}, D_A=2.5 \text{ E}/\text{km}^2 (D_T=10^2/\text{km}^2)$ in Abhängigkeit der Clustergröße N_C und der Anzahl n_{zs} der Zeitschlitz 198
- Bild 5.24 Die maximal möglichen Funkzellenradien $r_{z,max}(B_{ges}, D_T)$ in Abhängigkeit von der Gesamtbandbreite B_{ges} des Systems und der Teilnehmerdichte D_T 201
- Bild 5.25 Die maximalen möglichen Funkzellenradien aufgrund des geforderten SINR $r_{z,SINR}$ und der geforderten Verkehrsgüte $r_{z,v}$ und der daraus abgeleitete maximal mögliche Funkzellenradius $r_{z,max}$ für $D_T = 3.2/\text{km}^2$ 202
- Bild 5.26 Algorithmus zur Bestimmung der kostenoptimalen Gesamtbandbreite $B_{ges,opt}$ 204
- Bild 5.27 Die Verzinsung I_{Cap} des in ein Mobilfunksystem investierten Kapitals (interest rate) in Abhängigkeit von der gewählten Gesamtbandbreite B_{ges} und der Teilnehmerdichte D_T (Sprach-Teilnehmer mit Verkehrsangebot $A=25\text{mErl}$) 206
- Bild 5.28 Die optimalen Werte Gesamtbandbreite $B_{ges,opt}$, in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T , bei der die Kapitalverzinsung I_{Cap} maximal wird 207
- Bild 5.29 Die Verzinsung I_{Cap} des in ein Mobilfunksystem investierten Kapitals in Abhängigkeit von der Teilnehmerdichte D_T (Sprach-Teilnehmer mit Verkehrsangebot $A=25\text{mErl}$) bei optimal gewählter Gesamtbandbreite $B_{ges,opt}$ 208

Literaturverzeichnis

- [1] T. Bregenzer: *User Mobility Model for an Indoor Environment*, ACTS Mobile Telecom. Summit, Granada/Spain, Vol. 2, November 27-29 1996
- [2] I. Bronstein, K. Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*, Kapitel 3, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1979
- [3] C. Delucchi, H. Bischl, T. Bregenzer: *Analysis of multimedia services and traffic models*, ACTS Mobile Telecom. Summit, Granada/Spain, Vol. 2, November 27-29 1996
- [4] J. Eberspächer, H.-J. Vögel: *GSM Global System for Mobile Communications*, Informationstechnik, France, Teubner, ISBN 3-519-06192-9, Stuttgart 1997
- [5] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)*, prETS 300 175-1 ...175-9, France, Vol. 2, June 1996
- [6] P. Dietrich, W. Endress: *Lexikon der Nachrichtentechnik*, VDE Schriftenreihe 41, VDE-Verlag GmbH, ISBN 3-8007-1441-8, Berlin, 1986
- [7] H. Garn, H. Kremser, R. Kremser: *Bewertung der Exposition bei D-Netz Mobiltelefonen*, ITG Fachbericht Mobile Kommunikation, No. 124, VDE-Verlag GmbH, ISBN 3-8007-1965-7, Berlin, 1993.
- [8] N. Gerlich, M. Tangemann: *Towards a Channel Allocation Scheme for SDMA-based Mobile Communication System*, ITG Fachbericht Mobile Kommunikation, No. 135, VDE-Verlag GmbH, ISBN 3-8007-2129-5, Berlin, 1995.

- [9] J. Gruber, Godfrey, Williams: *Transmission Performance of Evolving Telecommunications Network*, Artech House, Boston/London, 1992, ISBN 0-89006-591-8
- [10] J. Hagenauer, L. Kittel: *Grundlagen des digitalen Mobilfunks*, Kurs der Carl-Cranz-Gesellschaft e.V., Oberpfaffenhofen, 1992
- [11] H. Holma, A. Toskala: *WCDMA For UMTS: Radio Access For Third Generation Mobile Communications*, John Wiley & Sons LTD, West Sussex UK, Sept. 2000, ISBN 0 471 72051 8
- [12] D. Hong, S. Rappaport: *Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures*, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-35, NO. 3, Aug. 1986
- [13] International Telecommunications Union (ITU): *Framework Recommendation on "Network Capabilities to Support Multimedia Services"*, ITU-T Recommendation I.374, 03/93
- [14] S. Jamali, T. Le-Ngoc: *Coded-modulation techniques for fading channels*, Kap. 8.2, ISBN 0-7923-9421-6, Kluwer Academic Publisher, AH Dordrecht, Netherlands, 1994.
- [15] J. Kedaj, F. Jousen, G. Hentschel: *Mobilfunk, Handbuch: das Handbuch der mobilen Sprach-, Text- und Datenkommunikation*, Band 1, Teil 4, Interest Verlag, URL: <http://www.interest.de>, Augsburg, 1998, ISBN 3-923759-16-9.
- [16] P. Kühn: *Wartezeitprobleme der Daten- und Nachrichtenverkehrstheorie*, Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Stuttgart, 1983.
- [17] L. Kleinrock: *QUEUEING SYSTEMS*, Vol. I: THEORY, John Wiley & Sons, New York, 1975.

- [18] U. Kreßel: *Informationstheoretische Beurteilung digitaler Übertragungsverfahren mit Hilfe des Fehlerexponenten*, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 10, Nr. 121, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [19] K. Kyoung: *Handbook of CDMA System Design, Engineering, and Optimisation*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 2000, ISBN 0-13-017572-2.
- [20] W. C.Y. Lee: *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, Mc Graw-Hill Company, New York, 1989, ISBN 0-07-037030-3
- [21] The MathWorks, Inc.: *MATLAB Reference Guide*, The MathWorks, Inc, Natick, Mass. 01760, <http://www.mathworks.com>, 1992
- [22] O. Neufang: *Lexikon der Vermittlungstechnik*, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden, 1983.
- [23] NTG: *Nachrichtenverkehrstheorie Begriffe*, NTZ 36 Heft 6,7, VDE Verlag, Düsseldorf, 1983.
- [24] K. Pahlavan, A. Levescuc: *Wireless Information Networks*, Section 7, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [25] A. Papoulis: *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Book Company, 2nd Edition, 1984, ISBN 0-07-048468-6.
- [26] R. Prasad, W. Mohr, W. Konhäuser: *Third Generation Mobile Communications Systems Probability*, Artech House, 2000, ISBN 1-58053-082-6.
- [27] K-H. Tröndle: *Systemtheorie*, Kapitel 3, Vorlesung Nachrichtentechnik, Institut für Nachrichtentechnik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1995.
- [28] A. Viterbi, J. Omura: *Principles of Digital Communication and Coding*, McGraw-Hill Book Company, 1979, ISBN 0-07-067516-3.

- [29] M. Zonoozi, P. Dassanayake: *User Mobility Modelling and Characterization of Mobility Patterns*, IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 15, pp. 1239-1252 3, Sep. 1997