

Modellierung und Leistungsbewertung von mobilen Satellitensystemen mit dynamischer Kanalvergabe

Branko Bjelajac

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke

Bjelajac, Branko:

Modellierung und Leistungsbewertung von mobilen Satellitensystemen mit dynamischer Kanalvergabe

1. Auflage Aachen:

Wissenschaftsverlag Mainz, 1999

(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 21)

ISSN 1437-6814

ISBN 3-86073-822-4

© 1999 Branko Bjelajac

Wissenschaftsverlag Mainz

Süsterfeldstr. 83, 52072 Aachen

Telefon: 02 41 / 2 39 48 oder 02 41 / 87 34 34

Fax: 02 41 / 87 55 77

Herstellung: Druckerei Mainz GmbH,

Süsterfeldstr. 83, 52072 Aachen

Telefon 02 41 / 87 34 34; Fax: 02 41 / 87 55 77

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

„D 82 (Diss. RWTH Aachen)“

KURZFASSUNG

Die Mobilkommunikation hat in den letzten Jahren weltweit eine explosive Entwicklung erfahren. Mobilfunknetze sind ein fester Bestandteil der Telekommunikationsinfrastruktur der neuen Informationsgesellschaft geworden. Die Bereitstellung von mobilen Sprach- und Datendiensten in dünn besiedelten Gebieten sowie in Flugzeugen oder auf Ozeanen wird in Zukunft über mobile Satellitensysteme erfolgen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme wird maßgeblich durch ihre Verkehrskapazität bestimmt sein.

In dieser Arbeit werden simulative Modelle und analytische Methode vorgestellt, die es ermöglichen, die Verkehrskapazität und Leistungsfähigkeit von mobilen Satellitensystemen mit statischer und dynamischer Kanalvergabe zu bewerten und zu vergleichen.

Es wird ein analytisches Verfahren für die Berechnung der mittleren Blockierwahrscheinlichkeit in einem Teilnehmergebiet vorgestellt, das auf einem neu entwickelten Verkehrsmodell eines IRIDIUM-ähnlichen Referenzsystems basiert. Es zeichnet sich vor allem durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Kapazitäts- und der Interferenzbegrenzung des Systems aus und ermöglicht eine genaue und zeiteffiziente Abschätzung der Verkehrskapazität.

Die simulative Leistungsbewertung, durchgeführt mit dem ereignisgesteuerten Simulationswerkzeug *MoSSS*, bestätigt zum einen die Genauigkeit der analytischen und verkehrstheoretischen Methoden, ermöglicht zum anderen aber auch, grundsätzliche Aussagen über die Leistungsfähigkeit von verschiedenen dynamischen Kanalvergabeverfahren für mobile Satellitensysteme zu machen.

So wird gezeigt, daß der Einsatz von dynamischen Kanalvergabeverfahren in mobilen Satellitensystemen der ersten Generation, die primär kapazitäts- und nur lokal interferenzbegrenzt sind, zu signifikanten Verkehrskapazitätssteigerungen führt, aber auch, daß sich der Einsatz von komplexen DCA-Verfahren in diesen Systemen nur bedingt lohnt.

ABSTRACT

With recent developments in mobile communications technology and the spectacular increase in the number of mobile users in the last few years, mobile communication networks have become an integral part of the telecommunications infrastructure of the new information society.

Mobile satellite systems will provide voice and data services to customers located in thinly populated areas, on airplanes and on ships in the near future. The economy of these systems will depend heavily on their traffic capacity.

In this thesis, simulation models and analytical methods are presented allowing to evaluate and to compare the traffic capacity and the performance of mobile satellite systems with fixed and dynamic channel allocation.

An analytical method for calculation of the mean blocking probability in a given service area is presented. This method is based on a new traffic model for an IRIDIUM-like reference system. It allows to simultaneously take into account capacity and interference limitations of the system and to estimate the traffic capacity time efficiently.

The performance of the system has been evaluated using the in-house developed event driven simulation tool *MoSSS*. The results show the accuracy of the analytical and traffic theory models, and also allow to make fundamental statements on the efficiency of various dynamic channel allocation schemes for mobile satellite systems.

It has been shown that traffic capacity of first generation mobile satellite systems (being primarily capacity limited and showing only local interference limitations) increases significantly when using dynamic channel allocation schemes. In most cases, simple dynamic channel allocation schemes perform as good as more complex schemes and thus the former should be preferred.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ziele	2
1.2	Struktur der Arbeit	3
2	Satellitengestützte Kommunikationssysteme	5
2.1	Klassifizierung und grundlegende Parameter	5
2.1.1	Erdumlaufbahnen von Satelliten	5
2.1.2	Bahnparameter	5
2.1.3	Konstellation Mobilstation-Satellit	8
2.2	Geostationäre Satellitensysteme	11
2.3	Satellitensysteme mit niedrigfliegenden Satelliten	11
2.3.1	Das mobile Satellitensystem IRIDIUM	12
3	Der Satellitenfunkkanal	19
3.1	Satellitenantennen	19
3.1.1	EIRP	20
3.1.2	Antenneneffektivität und max. Antennengewinn	20
3.1.3	Antennengewinn in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels	21
3.2	Das AWGN-Kanalmodell	22
3.3	Übertragungsverluste	24
3.3.1	Freiraumdämpfung	24
3.3.2	Pegelschwund	24
3.4	Interferenz und Störpegelabstand	25
3.4.1	Eigeninterferenzen in MSS	25
3.4.2	Gleichkanalinterferenzen in MSS	25
3.5	Störpegelabstand	28
4	Das Referenz-MSS	31
4.1	Komponenten des Referenz-MSS	31
4.2	Aufbau und Funktionalität des Referenzsatelliten	33
4.3	Die zellulare Ausleuchtung des Referenz-MSS	35
4.3.1	Zellularstruktur der Satellitenausleuchtungzone	35

4.3.2	Richtcharakteristik der Satellitenantenne	35
4.3.3	Berechnung des Antennengewinns	37
4.3.4	Empfangspegel auf der Erdoberfläche	39
4.3.5	Leistungssteuerung	42
4.4	Das Schichtenmodell des Referenz-MSS	44
4.4.1	Die Bitübertragungsschicht	44
4.4.2	Die Sicherungsschicht	46
4.4.3	Die Vermittlungsschicht	48
4.5	Das Vermittlungsschichtprotokoll des Referenz-MSS	48
4.5.1	Verbindungsaufbau	48
4.5.2	Verbindungsunterhaltung, Handover und Verbindungsabbau	51
4.6	Das Transceiver-Feld des Referenzsatelliten	53
4.6.1	Transceiver	53
4.6.2	Transceiver-Feld	54
4.6.3	Transceiver-Belegung und Sendeleistungsbegrenzung	55
4.7	Verkehrsmodellierung	57
4.7.1	Parameter der Teilgebiete	58
4.7.2	Der Verkehrsgenerierungsalgorithmus	59
4.7.3	Validierung des Verkehrsgenerierungsalgorithmus	60
4.7.4	Nicht gleichverteiltes Verkehrsangebot	61
4.8	Verkehrskapazität des MSS	61
4.8.1	Kapazitätsbegrenzung	62
4.8.2	Interferenzbegrenzung	62
5	Das Simulationswerkzeug MoSSS	63
5.1	Konzept und Entwurfsvorgaben	64
5.2	Aufbau und Funktionalität	64
5.2.1	Manager	66
5.2.2	Mobile Objekte	66
5.2.3	Kommunikationsobjekte	67
5.2.4	Algorithmen für die Funkressourcenverwaltung	67
5.2.5	Funkausbreitung	67
5.2.6	Berechnungsfunktionen	68
5.2.7	Statistische Auswertung	68
5.2.8	Graphikschnittstelle	69
5.3	Der Simulationsprozeß	69
5.4	Simulationsparameter	70

5.5	Bewertungskriterien	71
5.5.1	Gesprächsverlust- und Abbruchwahrscheinlichkeiten	71
5.5.2	Gesamtblockierwahrscheinlichkeit	72
5.5.3	Verbindungsqualität	72
6	Verkehrstheoretische Modellierung von MSS	75
6.1	Geometrie der Ausleuchtzonen eines MSS	75
6.1.1	Satellitenausleuchtzone in verschiedenen Breiten	75
6.1.2	Antennenausleuchtzone in verschiedenen Breiten	77
6.2	Einkanalkapazität in MSS	79
6.3	Das MSS als Verlustsystem	81
6.3.1	Das Verlustsystem M/M/n	81
6.3.2	Ankunfts- und Abgangsprozesse in MSS	83
6.3.3	Der Ankunftsprozeß der Handover-Rufe	83
6.3.4	Der Abgangsprozeß durch Handover	85
6.4	Kanalbelegungsdauer in MSS	85
6.4.1	Verfahren zur Berechnung der Kanalbelegungsdauer	86
6.4.2	Kanalbelegungsdauer in Funkzellen	87
6.4.3	Kanalbelegungsdauer in Antennenausleuchtzonen	89
6.4.4	Kanalbelegungsdauer in Satellitenausleuchtzonen	92
6.4.5	Vergleich der Kanalbelegungsdauern in MSS	93
6.5	Anzahl der Handover im Laufe eines Gespräches	96
6.5.1	Verfahren zur Berechnung der Anzahl der Handover	96
6.5.2	Handover zwischen Funkzellen	97
6.5.3	Handover zwischen Satellitenausleuchtzonen	98
6.6	Verkehrsmodell des Referenzsatelliten	101
6.6.1	Annahmen zur Modellbildung	102
6.6.2	Zustandsgraph des Referenzsatelliten	103
6.6.3	Blockierwahrscheinlichkeit des Referenzsatelliten	106
6.7	Blockierwahrscheinlichkeit in einem Teilnehmergebiet	109
6.7.1	Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit in einem Gebiet	110
6.7.2	Interferenzbedingte Begrenzung der maximalen Kanalanzahl	111
6.7.3	Blockierwahrscheinlichkeit in FCA-basierten MSS	114
6.7.4	Blockierwahrscheinlichkeit in DCA-basierten MSS	116
6.8	Grenzen der theoretischen Modellierung	120

7	Kanalvergabeverfahren für MSS	121
7.1	Klassifizierung von Kanalvergabeverfahren	121
7.1.1	Statische Kanalzuweisung - FCA	122
7.1.2	Kanalzuweisung mit Borgen - BCA	124
7.1.3	Dynamische Kanalvergabeverfahren - DCA	125
7.1.4	Hybride Kanalvergabeverfahren - HCA	127
7.2	Das statische Kanalvergabeverfahren MSS-FCA	128
7.3	Interferenzbasierte DCA-Verfahren für MSS	129
7.3.1	Erstellung der PCH-Liste	130
7.3.2	Erstellung der Zeitschlitzliste ZSL	130
7.3.3	DCA-Min	132
7.3.4	DCA-Max	134
7.3.5	DCA-MaxMin	136
7.4	Leistungsbewertung der Kanalvergabeverfahren	138
8	Handover in mobilen Satellitensystemen	147
8.1	Handover-Arten in MSS	147
8.2	Handover-Steuerung	150
8.3	Handover-Ablauf	151
8.4	Handover-Strategien für MSS	153
8.5	Verfahren zur Senkung der Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit	154
8.5.1	Heraufsetzen der Störpegelabstandsschwelle für neue Gespräche	155
8.5.2	Halten von Verbindungen trotz mangelhafter Verbindungsqualität	156
8.5.3	Reservierung von Ressourcen exklusiv für Handover-Rufe	156
9	Zusammenfassung	159

Einleitung

Die Mobilkommunikation hat in den letzten Jahren weltweit eine explosive Entwicklung erfahren und ist dadurch ein fester Bestandteil der Telekommunikationsinfrastruktur der neuen Informationsgesellschaft geworden.

Seit einigen Jahren sind Mobilfunksysteme der zweiten Generation, wie das digitale Mobilfunksystem GSM¹ und der digitale Schnurlosstandard DECT², in der Anwendung. Nach der Jahrtausendwende werden neue Standards und technische Lösungen bereitstehen, die für den Aufbau von Mobilfunksystemen der dritten Generation, wie UMTS³ und IMT2000⁴, benötigt werden. Der Betrieb von terrestrischen Mobilfunknetzen ist jedoch nur in Gebieten mit großer Bevölkerungsdichte wirtschaftlich sinnvoll. Für die Versorgung von entlegenen Gebieten oder Gebieten ohne bestehende Telekommunikationsinfrastruktur müssen alternative Lösungen gefunden werden, um mobile Kommunikation zu ermöglichen.

Um Flugzeug- und Schiffspassagieren, internationalen Geschäftreisenden und Rettungsmannschaften eine weltweite Erreichbarkeit zu ermöglichen oder Großbaustellen und Abbaugelände von Rohstoffen kommunikationstechnisch anzuschließen, eignen sich insbesondere satellitengestützte Mobilfunksysteme. Bereits bestehende geostationäre Satellitensysteme, wie z.B. die INMARSAT-Systeme [29], ermöglichen fast weltweite Sprach- und Datenkommunikation, jedoch mit erheblichen Qualitätseinbußen im Vergleich zu heutigen Fest- und Mobilfunknetzen.

Eine globale Versorgung mit einer von GSM-Systemen gewohnten Verbindungsqualität wird erst durch zukünftige Systeme mit niedrig fliegenden Satelliten, die sogenannten mobilen Satellitensysteme (MSS⁵), erreicht. Anfang der 90er Jahre wurde mit der Entwicklung mehrerer MSS, wie z.B.

¹Global System for Mobile Communication

²Digital European Cordless Telephone

³Universal Mobile Telecommunications System

⁴International Mobile Telecommunications

⁵Mobile Satellite Systems

IRIDIUM, Globalstar und ICO, begonnen, die vor der Jahrtausendwende in Betrieb gehen werden. Sie werden mit den Diensten Sprache, niedrigrati-ge Datenübertragung und Faxübertragung der Gruppe 3 ein Dienstange- bot zur Verfügung stellen, wie es heute bei terrestrischen Mobilfunknetzen üblich ist.

1.1 Motivation und Ziele

Für den Betreiber ist die Verkehrskapazität seines Mobilfunknetzes, definiert als die maximale Anzahl von Verbindungen, die bei gegebener Systemband- breite und gegebenem Verkehrsangebot in einem Gebiet unterhalten werden kann, wobei eine garantierte Verbindungsqualität nicht unterschritten wer- den darf, ein äußerst wichtiger Systemparameter.

Im Gegensatz zu Festnetzen, wie z.B. einem Telefonnetz, ISDN und diversen Datennetzen, die im Hinblick auf ihre Verkehrskapazität und deren Erwei- terung vorwiegend durch die Investitionsfreude der Netzbetreiber in neue Festverbindungen und Vermittlungssysteme eingeschränkt sind, ist die Ver- kehrskapazität eines Mobilfunksystems primär durch die Breite des ihm zur Verfügung stehenden Frequenzbandes begrenzt.

Um die zur Verfügung stehenden Frequenzressourcen so effektiv wie möglich zu nutzen, müssen Frequenzkanäle in einem Mobilfunksystem vielfach wiede- rverwendet werden. So wird z. B. in GSM, einem System mit fester Kanal- vergabe (FCA⁶), ein Frequenzkanal im Rahmen der Funknetzplanung, die auf dem durchschnittlich zu tragenden Verkehr pro Funkzelle basiert, meh- reren weit von einander entfernten Funkzellen des Systems fest zugeordnet. Dieses Verfahren ist jedoch unflexibel und aufwendig. Die dynamische Kan- alvergabe (DCA⁷) dagegen erlaubt eine automatische Anpassung an das Verkehrsangebot und führt, vor allem bei einem zeitlich stark variierenden Verkehrsangebot, zu einer beachtlichen Steigerung der Verkehrskapazität eines Mobilfunksystems. Daher werden DCA-Verfahren auch in MSS der ersten Generation im Rahmen der Funkressourcenverwaltung (RRM⁸) An- wendung finden.

Die Verkehrskapazität von MSS der ersten Generation ist einerseits durch die maximale Gesamtsendeleistung eines Satelliten und die Kapazität der

⁶Fixed Channel Allocation

⁷Dynamic Channel Allocation

⁸Radio Resource Management

Satellitenbatterie, und andererseits, bei einer lokalen Verkehrskonzentration und in höheren geographischen Breiten, durch Gleichkanalinterferenzen begrenzt. Durch den Einsatz neu entwickelter RRM-Verfahren kann die Verkehrskapazität von MSS gesteigert und entsprechend den neuen Anforderungen optimiert werden.

Um den Optimierungsprozeß zu vereinfachen und die Effektivität von Modifikationen abschätzen zu können, wäre es wünschenswert, die obere Leistungsgrenze von MSS und ihre maximale Verkehrskapazität auf einfache Weise bestimmen zu können. Da es sich bei MSS jedoch um hochkomplexe, dynamische Systeme handelt, war die analytische Berechnung der Verkehrskapazität mit ausreichender Genauigkeit bisher nicht möglich. Daher war es ein Ziel dieser Arbeit, ein verkehrstheoretisches Modell zu entwickeln, das dies erstmals ermöglicht.

Die Verkehrskapazität eines MSS kann sehr genau mit leistungsfähigen Simulationswerkzeugen bestimmt werden. So wird auch die Optimierung der Verkehrskapazität von MSS in dieser Arbeit durch die simulative Leistungsbewertung von neuen RRM-Verfahren ermöglicht.

Aus dieser Motivation ergeben sich die Ziele dieser Arbeit, die sich in den folgenden Punkten zusammenfassen lassen:

- Spezifikation und detaillierte Modellierung eines Referenz-MSS;
- Entwicklung eines Werkzeuges für die simulative Leistungsbewertung von RRM-Verfahren für MSS;
- Entwicklung von analytischen Modellen für die Bestimmung der maximalen Verkehrskapazität von MSS mit dynamischer Kanalvergabe;
- Entwicklung von DCA- und Handover-Verfahren für MSS und deren Leistungsbewertung;
- Untersuchung der Abhängigkeit der Verkehrskapazität von MSS von ausgewählten Systemparametern.

1.2 Struktur der Arbeit

Im **Kapitel 2** werden grundlegende Parameter von Satellitensystemen beschrieben, eine Klassifizierung der Satellitensysteme nach Bahnhöhen vorgenommen und die im Aufbau befindlichen MSS am Beispiel des IRIDIUM-Systems vorgestellt.

Im **Kapitel 3** werden die Eigenschaften des Satellitenfunkkanals und des entsprechenden Funkkanalmodells vorgestellt. Nach der Beschreibung der

Zellstruktur einer Satellitenausleuchtzone und der Funkausleuchtung des MSS werden die Auswirkungen der Eigeninterferenz des MSS, besonders der Gleichkanalinterferenz, diskutiert.

Kapitel 4 beschreibt das Referenz-MSS mit seinen wesentlichen Eigenschaften. Es beinhaltet eine Beschreibung des Systemaufbaus, des Aufbaus eines Referenzsatelliten und seiner Funktionalität, und eine detaillierte Vorstellung der Funkschnittstelle. Ebenso werden die verschiedenen Arten der Verkehrskapazitätsbegrenzung bei MSS vorgestellt.

Das im Rahmen dieser Arbeit am Lehrstuhl Kommunikationsnetze entwickelte Simulationswerkzeug für mobile Satellitensysteme MoSSS⁹, die Simulationsparameter und die Kriterien für die Bewertung der Verkehrskapazität von MSS werden im **Kapitel 5** vorgestellt und beschrieben.

Kapitel 6 befaßt sich mit verkehrstheoretischen Ansätzen zur Modellierung von MSS. Die Kanalbelegungsdauer durch Mobilstationen in den Ausleuchtzonen eines MSS wird ermittelt. Es werden analytische Modelle für MSS vorgestellt, die eine obere Leistungsgrenze für reale MSS mit DCA darstellen, und die Abhängigkeit der Verkehrskapazität von der Größe, Form und Lage des Teilnehmergebietes untersucht.

Kapitel 7 gibt eine Übersicht über Kanalvergabeverfahren für Mobilfunknetze und beschreibt drei Referenzverfahren, die die obere und untere Leistungsgrenze realer Kanalvergabeverfahren aufzeigen. Nachfolgend werden drei neue DCA-Verfahren für MSS detailliert vorgestellt und anhand von Simulationen untersucht.

Im **Kapitel 8** wird eine Einteilung der Handover in verschiedene Typen vorgenommen, der Einfluß der Reservierung von Ressourcen exklusiv für Handover erläutert und der Ablauf eines Handover beschrieben. Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Handover-Verfahren vorgestellt.

Im **Kapitel 9** werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefaßt und Anregungen für zukünftige Arbeiten gegeben.

⁹Mobile Satellite System Simulator

Satellitengestützte Kommunikationssysteme

2.1 Klassifizierung und grundlegende Parameter

2.1.1 Erdumlaufbahnen von Satelliten

Satellitensysteme lassen sich anhand der Umlaufbahnen ihrer Satelliten klassifizieren. Neben geostationären Systemen (GEO¹) befindet sich z. Zt. eine Reihe von nicht-geostationären Konfigurationen im Aufbau, die in LEO²- , MEO³- und HEO⁴-Systeme unterteilt werden können (siehe Abbildung 2.1).

LEO-Satelliten haben Bahnhöhen zwischen 200 und 2000 km. Satelliten mit einer Bahnhöhe zwischen 2000 und 20000 km werden als MEO-Satelliten bezeichnet. HEO-Satelliten können sich der Erde im Perigäum, dem erdnächsten Punkt der Umlaufbahn, bis auf einige hundert Kilometer nähern und im Apogäum, dem Punkt der größten Entfernung zur Erde, sogar die Bahnhöhe der geostationären Umlaufbahn erreichen oder überschreiten. Sie sind jedoch einer sehr hohen Strahlenbelastung ausgesetzt, da sie immer wieder die Van-Allen-Gürtel⁵, zwei durch das Erdmagnetfeld hervorgerufene Zonen starker ionisierender Strahlung, durchlaufen.

2.1.2 Bahnparameter

Satellitenbahnen werden durch die folgenden fünf Parameter vollständig beschrieben, die als Kenngrößen der Kepler'schen Gleichungen bezeichnet werden[10]:

- die Inklination, i ,
- die rechte Aszensionaldifferenz des aufsteigenden Knotens, Ω ,

¹Geostationary Earth Orbit

²Low Earth Orbit

³Medium Earth Orbit

⁴Highly Elliptical Orbit

⁵James Alfred Van Allen, *1914, amerikanischer Physiker

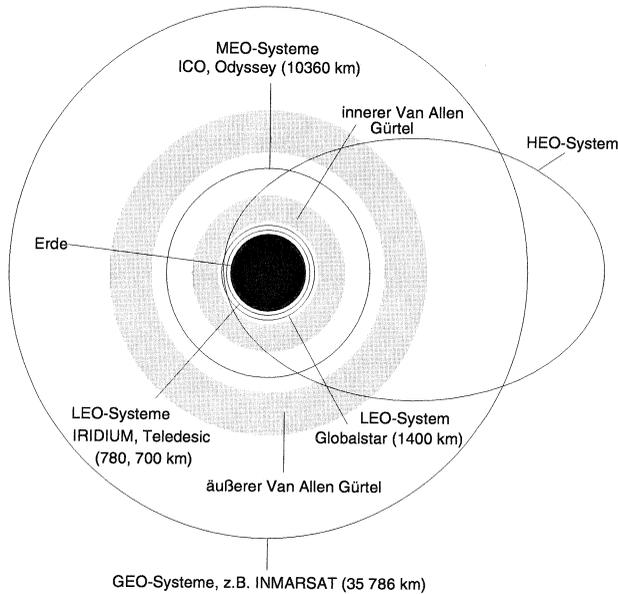


Abbildung 2.1: Umlaufbahnen von Kommunikationssatelliten

- die große Halbachse der elliptischen Umlaufbahn, a ,
- die Exzentrizität, e ,
- und das Argument des Perigäums, ω .

Die ersten beiden Parameter beschreiben die Lage der Bahnebene im Raum. Die *Inklination*, i , beschreibt die Neigung der Bahnebene in bezug auf die Äquatorialebene der Erde. Die *rechte Aszendenzdifferenz des aufsteigenden Knotens*, Ω , gibt die Orientierung der Knotenlinie, die die auf- und absteigenden Knoten durch den Erdmittelpunkt miteinander verbindet, in der Äquatorialebene an, wobei unter Knoten die Schnittpunkte der Umlaufbahn mit der Äquatorialebene zu verstehen sind. Ω wird dabei auf die Projektion des Nullmeridian auf die Äquatorialebene, γ , bezogen.

Die Parameter a , e und ω bestimmen die Orientierung und Form der elliptischen Satellitenbahn in ihrer Bahnebene. Das *Argument des Perigäums*, ω , beschreibt die Lage des Punktes der geringsten Annäherung des Satelliten

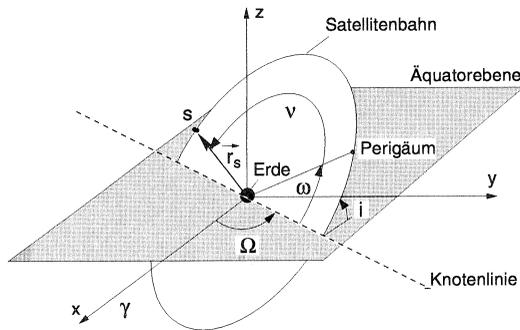


Abbildung 2.2: Parameter der Satellitenbahn

an die Erde. Er wird ab der Knotenlinie in Bewegungsrichtung des Satelliten in seiner Bahnebene abgetragen (siehe Abbildung 2.2).

Für die Bestimmung der aktuellen Position des Satelliten auf seiner Umlaufbahn in dem hier definierten perifokalen Koordinatensystem wird ein zusätzlicher Parameter, die *Anomalie*, benötigt. Hierbei muß zwischen exzentrischer, mittlerer und wahrer Anomalie unterschieden werden.

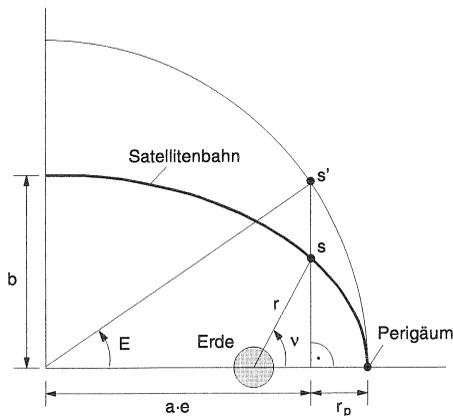


Abbildung 2.3: Exzentrische und wahre Anomalie

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, ist die *exzentrische Anomalie*, E , der Winkel zwischen der großen Halbachse der Bahnellipse, a , und der Position des Satelliten. Sie wird im Mittelpunkt der Ellipse abgetragen. Die *mittlere Anomalie*, M , ist eine reine Rechengröße und berechnet sich aus der exzentrischen Anomalie zu

$$M = \frac{2\pi}{T_s}(t - t_0) = E - e \sin E \quad (2.1)$$

wobei T_s die Umlaufzeit des Satelliten, t_0 der Zeitpunkt des Perigäumdurchgangs und t der Betrachtungszeitpunkt ist. Die *wahre Anomalie* beschreibt die Position des Satelliten bezogen auf die Perigäumsposition. Sie wird im Brennpunkt der Ellipse, dem Erdmittelpunkt, abgetragen.

2.1.3 Konstellation Mobilstation-Satellit

Der Winkel, unter dem eine Mobilstation, m , auf der Erde einen Satelliten, s , bezogen auf ihre Horizontebene sieht, wird *Elevationswinkel*, ε , genannt (siehe Abbildung 2.4). Er ist abhängig von der relativen Position der Mobilstation zum Satelliten und berechnet sich zu

$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{R_e + h_s}{d} \sin \phi\right) \quad (2.2)$$

Hierbei ist R_e der Erdradius, $h_s = |\vec{r}_{ssp-s}|$ die Höhe des Satelliten über der Erdoberfläche und $d = |\vec{r}_{m-s}|$ die Entfernung zwischen der Mobilstation und dem Satelliten. ϕ ist der Öffnungswinkel zwischen dem Satellitenvektor, \vec{r}_s , und dem Mobilstationsvektor, \vec{r}_m , wobei beide Vektoren ihren Ursprung im Erdmittelpunkt haben. Er berechnet sich zu

$$\cos \phi = \cos(\lambda_s - \lambda_m) \cos \varphi_s \cos \varphi_m + \sin \varphi_s \sin \varphi_m \quad (2.3)$$

wobei λ_s , λ_b , φ_s und φ_b jeweils die geographischen Längen und Breiten der Position des Satelliten und der Mobilstation im geozentrischen Polarkoordinatensystem sind.

Um Abschattungseffekte zu vermeiden, ist ein minimaler Elevationswinkel, ε_{min} , erforderlich, der üblicherweise zwischen 3° und 10° liegt.

Der *Azimutwinkel*, α , ist der Winkel zwischen dem in der Horizontebene der Mobilstation gelegenen Vektor, der in Richtung des Nordpols zeigt, und der Projektion $\vec{r}_{m-s'}$ des Vektors \vec{r}_{m-s} in diese Ebene, also im topozentrischen Horizontkoordinatensystem. Er ist gegeben mit

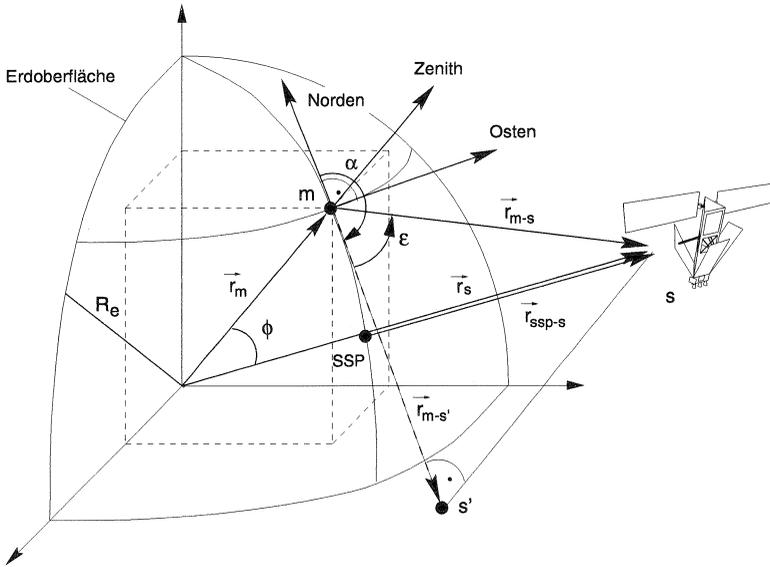


Abbildung 2.4: Parameter der Konstellation Mobilstation-Satellit

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\sin \cos(\lambda_s - \lambda_m) \cos \varphi_s}{\sin \phi} \right) \quad (2.4)$$

Bei gegebenem minimalen Elevationswinkel, ε_{min} , sind der Öffnungswinkel, ϕ_s , und der Radius der Gesamtausleuchtzone, R_s , mit (2.5) und (2.6) gegeben.

$$\phi_s = \arccos \left(\frac{R_e}{R_e + h_s} \cos \varepsilon_{min} \right) - \varepsilon_{min} \quad (2.5)$$

$$R_s = R_e \cdot \phi_s \text{ [m]} \quad (2.6)$$

$$A_s = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \phi_s) \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

Die maximale Fläche der Gesamtausleuchtzone eines Satelliten, A_s , also des Teils der Erdoberfläche, die der Satelliten versorgen kann, ist durch die

Bahnhöhe und den gegebenen minimalen Elevationswinkel ε_{min} über den resultierenden Öffnungswinkel, ϕ_s , bestimmt

Bahn- typ	Bahn- höhe h_s [km]	Umlauf- zeit T_s [h:min]	Geschw. v_s [m/s]	Ausleuchtzone $D_s = 2 \cdot R_s$ [km]
LEO	200	1:28	7797	1616
	400	1:32	7681	2666
	600	1:36	7569	3474
	800	1:40	7463	4136
	1000	1:45	7361	4698
	1200	1:49	7263	5184
	1400	1:54	7168	5610
MEO	2000	2:07	6906	6640
	3000	2:30	6527	7828
	10000	5:47	4936	10722
GEO	20000	11:50	3889	11638
	35786	23:56	3075	12054

Tabelle 2.1: Parameter kreisförmiger Satellitenbahnen ($\varepsilon_{min} = 10^\circ$)

Die Geschwindigkeit eines Satelliten auf einer kreisrunden Bahn, v_s , ist abhängig von seiner Bahnhöhe, h_s , und ist gegeben mit

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{(R_e + h_s)}} \quad [m/s] \quad (2.8)$$

wobei $\mu = 398600,5 \cdot 10^9 m^3 s^{-2}$ die Gravitationskonstante ist. Die Umlaufzeit T_s ist

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{(R_e + h_s)^3}{\mu}} \quad [s] \quad (2.9)$$

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Abhängigkeit der Umlaufzeit und Bahngeschwindigkeit von der Bahnhöhe bei kreisförmigen Umlaufbahnen.

2.2 Geostationäre Satellitensysteme

Satelliten, die sich auf einer geostationären Umlaufbahn in ca. 36000 km Höhe befinden, bewegen sich in ca. 24 Stunden einmal um die Erde. Ein Satellit, der sich auf einer solchen Umlaufbahn befindet, scheint auf einer festen Position über dem Äquator zu stehen.

Durch geostationäre Satelliten ist eine flächendeckende Versorgung großer Gebiete möglich. Signale mit hohen Datenraten können so über große Entfernungen übertragen werden. Diese Übertragung ist jedoch durch eine hohe Signallaufzeit und Pegeldämpfung der Signale aufgrund der großen Entfernung zwischen einem Satelliten und der Erdoberfläche gekennzeichnet. Dadurch ist der Einsatz entsprechend großer Antennen und leistungsfähiger Verstärker nötig. Die Unterhaltung von Mobilfunkverbindungen ausreichender Güte ist in hohen geographischen Breiten nicht möglich, da der Elevationswinkel zu klein und damit die Abschattungswahrscheinlichkeit zu hoch wird. Selbst in mittleren geographischen Breiten kommt es durch die Vegetation oder durch hohe Gebäude häufig zu Abschattungen.

Dieser Typ von Satellitensystemen wird daher hauptsächlich in Verbindung mit ortsfesten oder portablen Endgeräten, z.B. für die Verteilung von Radio- und Fernsehsendungen, als sternförmiges Unternehmensnetz oder in der maritimen Kommunikation, eingesetzt.

2.3 Satellitensysteme mit niedrigfliegenden Satelliten

Als Mobilfunksysteme besitzen LEO- und MEO-Systeme gegenüber geostationären Satellitensystemen folgende Vorteile:

- Aufgrund der geringeren Satellitenbahnhöhe ist eine geringere mittlere Sendeleistung erforderlich.
- Die geringere Bahnhöhe führt auch zu bedeutend niedrigeren Signallaufzeiten als bei geostationären Satelliten.
- Wegen der großen Satellitenanzahl verringert sich die Abschattungswahrscheinlichkeit.
- Durch die erhöhte Redundanz der Satelliten kann eine hohe Betriebssicherheit gewährleistet werden.
- Auch Regionen sehr hoher geographischer Breite können mit Telekommunikationsdiensten versorgt werden.

Durch die geringen Satellitenbahnhöhen ergeben sich aber auch Nachteile:

- Die einzelnen Satelliten sind nur kurze Zeit sichtbar.
- Die Elevationswinkel ändern sich ständig. Gerichtete Antennen müßten nachgeführt werden.
- Das Versorgungsgebiet eines LEO-Satelliten ist viel kleiner als das eines geostationären Satelliten. Deshalb ist eine größere Anzahl von Satelliten für eine vollständige Versorgung der Erde erforderlich.
- Das System-Management ist aufwendiger.

In der vorliegenden Arbeit wird ein IRIDIUM-ähnliches LEO-Satellitensystem als Referenz verwendet. Daher wird das mobile Satellitensystem IRIDIUM im folgenden kurz vorgestellt.

2.3.1 Das mobile Satellitensystem IRIDIUM

Das mobile Satellitensystem IRIDIUM besteht aus 66 niedrig fliegenden Satelliten, SV⁶ genannt, mehreren Gateways, die die Anbindung des Systems an andere Telekommunikationsnetze gewährleisten und einer Vielzahl von Mobilstationen, ISU⁷ genannt. Die SV sind untereinander und mit den Gateways über Funkverbindungen im K_a -Band und mit den ISU über Funkverbindungen im L -Band verbunden (siehe Abbildung 2.5). Es werden Telekommunikationsdienste mit Bitraten von 2400 bit/s für Daten und 4800 bit/s für Sprache angeboten. Zusätzlich werden den Teilnehmern Positionierungs- sowie Paging-Dienste angeboten.

Die SV bewegen sich auf sechs polaren Bahnen (siehe Abbildung 2.6) um die Erde. Die Inklination der Satellitenbahnen beträgt $86,4^\circ$, ihre Höhe 780 km. Auf jeder Bahn befinden sich 11 SV. Die Umlaufgeschwindigkeit eines SV beträgt ca. 7481 m/s. Für einen Erdumlauf benötigt er daher ca. 100 Minuten. Bei einem minimalen Elevationswinkel von $8,3^\circ$ ergibt sich eine durchschnittliche Sichtbarkeitsdauer von ca. 11 Minuten.

Ein SV besitzt drei Phased-Array-Antennen. Mit ihnen erzeugt er 48 Ausleuchtzonen, Funkzellen genannt, auf der Erdoberfläche, die sich mit den Satelliten bewegen. In Regionen hoher Breite verringern sich die Abstände zwischen den einzelnen Bahnen bzw. den SV. Um Überlappungen der Zellen verschiedener Satelliten zu minimieren, werden äußere Zellen in höheren geographischen Breiten zeitweise deaktiviert. Zur Ausleuchtung der gesamten Erde werden nur ca. 2150 der insgesamt 3168 Zellen benötigt.

⁶Space Vehicle

⁷IRIDIUM Subscriber Unit

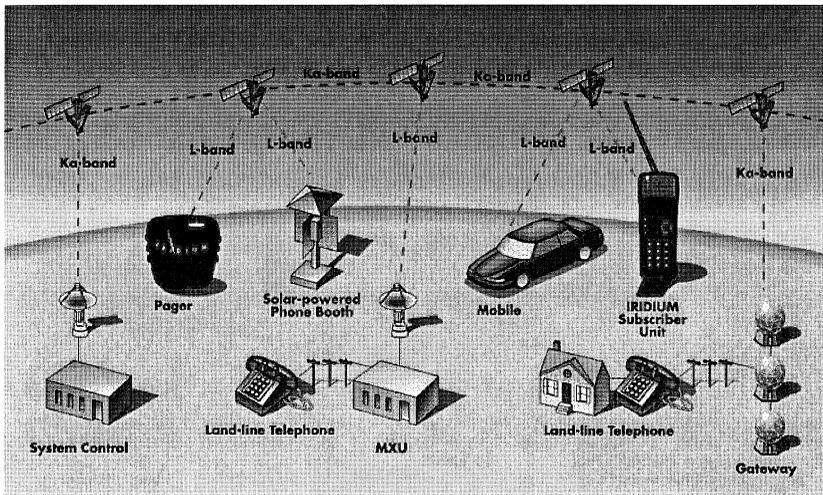


Abbildung 2.5: IRIDIUM Systemübersicht

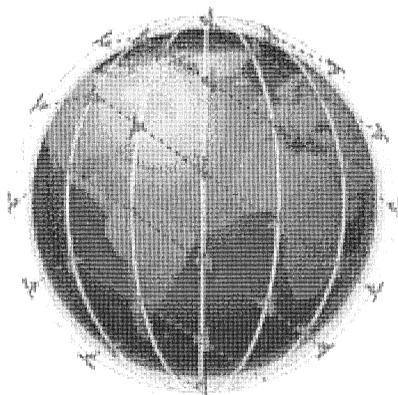


Abbildung 2.6: Das IRIDIUM-System



Abbildung 2.7: ISU und IRIDIUM-Pager

Jeder SV ist über Zwischensatellitenverbindungen, ISL⁸, mit vier anderen SV verbunden [17]. So können Daten zu einem beliebigen Punkt auf der Erde übertragen werden, ohne terrestrische Transportnetze nutzen zu müssen. Für eine effektive Verbindung mit terrestrischen Netzen werden mindestens zehn Erdstationen benötigt. Eine ISU ist etwas größer und schwerer als ein GSM-Terminal (siehe Abbildung 2.7) und hat eine maximale Impulssendeleistung von 7 W.

Der Vielfachzugriff erfolgt über ein kombiniertes FDMA/TDMA/ TDD⁹-Verfahren [22]. Das System verwendet QPSK¹⁰-Modulation. Zur bidirektionalen Datenübertragung zwischen den Teilnehmern und den Satelliten wird ein 10,5 MHz breites Frequenzband (1616-1626,5 MHz) verwendet. Dieses Frequenzband wird in 240 Frequenzkanäle unterteilt. Jeder Frequenzkanal hat eine Bandbreite von 31,5 kHz, wobei der Abstand zwischen den Trägerfrequenzen 41,67 kHz beträgt. Ein Frequenzkanal ist in acht Zeitschlitze unterteilt. Für jede Verbindung werden zwei Zeitschlitze benötigt, jeweils einer

⁸Inter Satellite Links

⁹Frequency Division Multiple Access/Time Division Multiple Access/Time Division Duplex

¹⁰Quarternary Phase Shift Keying

für den Up- und den Downlink. Jeder Frequenzkanal besitzt somit vier bidirektionale Verkehrskanäle. Ein Zeitschlitz hat eine Dauer von 8,64ms.

Systemhersteller	Motorola SSTG
Aufnahme des Betriebs	1998
Dienste	Sprache, Daten, RDSS, Paging
Versorgungsgebiet	weltweit
Satellitenanzahl	66(+ 6 Reserve)
Verbindung Satellit – Satellit	vorhanden
Umlaufbahn	LEO (zirkular)
Bahnhöhe	780 km
Anzahl der Bahnen	6
Bahninklination	86,4 °
Satellitengewicht	689 kg
mittlere Satellitenlebensdauer	5 Jahre
Trägerraketen	USA, China, Rußland
Anzahl der Erdstationen	ca. 27
Art der Mobilstation	mobiles Handgerät
Deutscher Partner	o.tel.o (ca. 10 %)

Tabelle 2.2: Allgemeine Informationen zu IRIDIUM

Kanal	Frequenzband	Frequenz [MHz]
ISU ↔ SV	L-Band	1616 – 1626,5
Gateway → SV	Ka-Band	29100 – 29300
SV → Gateway	Ka-Band	19400 – 19600
SV ↔ SV	Ka-Band	23180 – 23380

Tabelle 2.3: Frequenzbänder des IRIDIUM-Systems

Dazwischen sichert eine Schutzzeit von $42,857\mu\text{s}$ bzw. $85,714\mu\text{s}$ die Übertragung. Zusätzlich werden am Anfang jedes TDMA-Rahmens in einem *Framing Time Slot* mit einer Dauer von 20,23 ms Signalisierungs- bzw. Paging-

Informationen übertragen. Ein TDMA-Rahmen dauert somit 90 ms (siehe Abbildung 2.8).

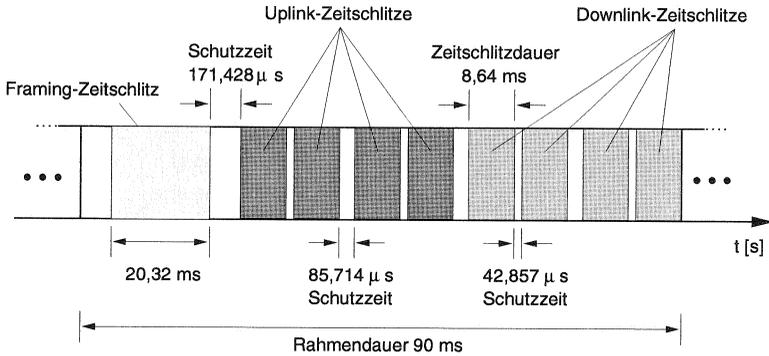


Abbildung 2.8: Rahmenstruktur des IRIDIUM-Systems [22]

max. Verbindungsanzahl pro Sat.	ca. 1100
min. garantierte Elevation	ca. 8,3°
max. Sendeleistung pro Satellit	ca. 1400 W
Übertragungsrate (Sprache/Daten)	2,4 / 4,8 kbit/s
Signallaufzeit	10 – 33 ms
Anzahl der Zellen pro Satellit	48
Antennentyp	phased array, planar
Frequenzwiederverwendung	180 (global) 5 (USA), 4 (Europa)
Kanalzugriffsverfahren	FDMA/TDMA/TDD
Modulationsverfahren	QSPK
Codierungsverfahren	FEC 2/3

Tabelle 2.4: Leistungsdaten des IRIDIUM-Systems

Dem System stehen, bei vierfacher Frequenzwiederverwendung, 3840 Verkehrskanäle pro SV zur Verfügung. Die Gesamtsendeleistung ist auf 1400 W begrenzt.

Die ersten fünf IRIDIUM-SV wurden am 5.5.1997 an Bord einer Delta II Rakete in die Erdumlaufbahnen transportiert. Der kommerzielle Betrieb soll Ende 1998 aufgenommen werden. In den Tabellen 2.2, 2.3 und 2.4 sind die Kennwerte des IRIDIUM-Systems zusammengestellt.

Der Satellitenfunkkanal

Funkkanalmodelle werden im Rahmen der simulativen und analytischen Untersuchung und der Leistungsbewertung von Kommunikationsprotokollen verwendet.

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Funkkanalmodell vorgestellt. Unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik und des Gewinns der Antenne eines Satelliten bzw. einer Mobilstation werden Aussagen über die Empfangspegel von Satellitensignalen auf der Erdoberfläche gemacht. Auch wird gezeigt, wie Gleichkanalinterferenzen in einem MSS entstehen, und wie der resultierende Störpegelabstand berechnet werden kann.

3.1 Satellitenantennen

Die Richtcharakteristik einer Satellitenantenne beeinflusst entscheidend die Leistungsfähigkeit eines MSS. Sie bestimmt die Größe und Form der Zellen und damit die Ausdehnung der Satellitenausleuchtzone. Wesentlich dabei ist, daß der Antennengewinn innerhalb einer Zelle groß ist, außerhalb der Zelle jedoch stark abfällt.

Die Hauptaufgaben einer Antenne sind:

- Das gewünschte Signal mit einer gegebenen Polarisierung in einem bestimmten Frequenzband zu empfangen bzw. zu senden.
- Unerwünschte Signalanteile von anderen Sendern bzw. an andere Empfänger zu unterdrücken.
- Radiowellen in die gewünschte Richtung zu senden.
- Die benötigte Sendeleistung durch Bündelung so gering wie möglich zu halten.

3.1.1 EIRP

Aufgrund der Richteigenschaften der Antenne ergibt sich ein endlicher Maximalwert für die abgestrahlte Leistung pro Einheitsraumwinkel. Bei gleichmäßiger Abstrahlung in alle Richtungen durch einen *isotropen Strahler* [33] beträgt die Leistungsflußdichte

$$F = \frac{P_a}{4\pi} [W/sr^1] \quad (3.1)$$

wobei P_a die Sendeleistung ist, die der Antenne zugeführt wird. Der Antennengewinn, G_{max} , ist als Verhältnis der Leistungsflußdichte in Richtung der maximalen Abstrahlung, F_{max} , zur Leistungsflußdichte eines isotropen Strahlers definiert. Es gilt

$$G_t = \frac{F_{max}}{F} = \frac{4\pi F_{max}}{P_a} \quad (3.2)$$

woraus folgt

$$F_t = \frac{P_a G_{max}}{4\pi} [W/sr] \quad (3.3)$$

Die EIRP² ist das Produkt der zugeführten Sendeleistung und des Antennengewinns.

$$EIRP = P_a G_{max} [W] \quad (3.4)$$

$$EIRP_{dBW} = 10 \log(P_a G_{max}) [dBW] \quad (3.5)$$

Sie gibt die Sendeleistung an, die bei ungerichteter Abstrahlung benötigt wird, um die gleiche Leistungsflußdichte in Richtung des Empfängers wie mit der gerichteten Antenne zu erreichen.

3.1.2 Antenneneffektivität und max. Antennengewinn

Der maximale Gewinn einer Antenne mit der äquivalenten elektromagnetischen Antennenfläche A_{eff} ist gegeben durch

¹Steradian (Einheit für Raumwinkel)

²Effective Isotropically Radiated Power

$$G_{max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (3.6)$$

Eine Antenne mit einer zirkularen Apertur und einer geometrischen Abstrahlungsfläche von

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.7)$$

wobei D der Antennendurchmesser ist, besitzt die effektive Antennenfläche

$$A_{eff} = \eta A \quad (3.8)$$

Die Antenneneffektivität, η , hängt von der physikalischen Beschaffenheit der Antenne ab und liegt typischerweise im Bereich von 0.55 bis 0.75. Aus (3.6) folgt für den maximalen Antennengewinn G_{max}

$$G_{max} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.9)$$

3.1.3 Antennengewinn in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels

Das im Referenz-MSS verwendete realitätsnahe Modell einer Satellitenantenne (siehe Kapitel 4.3) basiert auf der Antennencharakteristik CCIR-Rep. 558-4 (siehe Abbildung 3.1).

Der Antennengewinn ist gegeben durch

$$G(\theta) = G_{max} - 3 \left(\frac{\theta}{\theta_o} \right)^2 \quad [dB] \quad (3.10)$$

Abhängig vom Abstrahlwinkel, θ , verringert sich der Gewinn der Antenne gegenüber dem maximalen Gewinn, G_{max} , für $\theta = 0$. Die Hauptkeule der Satellitenantenne nach CCIR-Rep. 558-4 ist mit $\theta < \theta_l$ (Bereich a) begrenzt. Die Bereiche b und c zwischen θ_l und θ_{sl} approximieren die Nebenkeulen. Für Abstrahlwinkel $\theta > \theta_{sl}$ (Bereich d) gilt $G(\theta) = -\infty$ dB.

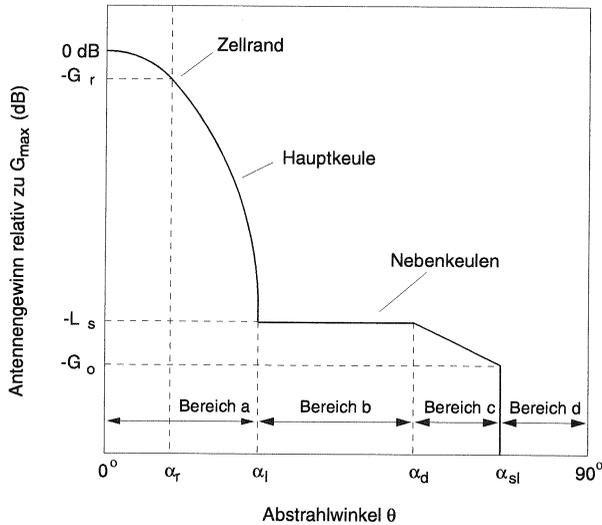


Abbildung 3.1: Charakteristik einer Satellitenantenne nach CCIR-Rep. 558-4

3.2 Das AWGN-Kanalmodell

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Funkkanalmodell basiert auf dem AWGN³-Kanalmodell. Ein AWGN-Kanal ist durch folgende Eigenschaften definiert [28]:

- idealer Bandpaß der Bandbreite $f_{\Delta} = f_B$;
- additive Störung durch weißes, Gauß'sches Rauschen der Leistungsdichte N_0 und der Leistung $N = 2f_B N_0$ am Kanalausgang;
- eine auf den Wert P_r begrenzte Signalleistung am Kanalausgang.

Aus den Abbildungen 3.2 und 3.3 wird ersichtlich, wie sich additives weißes Gauß'sches Rauschen auf den Empfang von QPSK-Signalen auswirkt. Die empfangenen Symbole sind den gesendeten Symbolen noch zuordbar. Würde zusätzlich auch der Pegelschwund (siehe Kapitel 3.3.2) berücksichtigt wer-

³Additive White Gaussian Noise

den, wäre eine Zuordnung der empfangenen zu den gesendeten Symbolen nicht mehr ohne weiteres möglich.

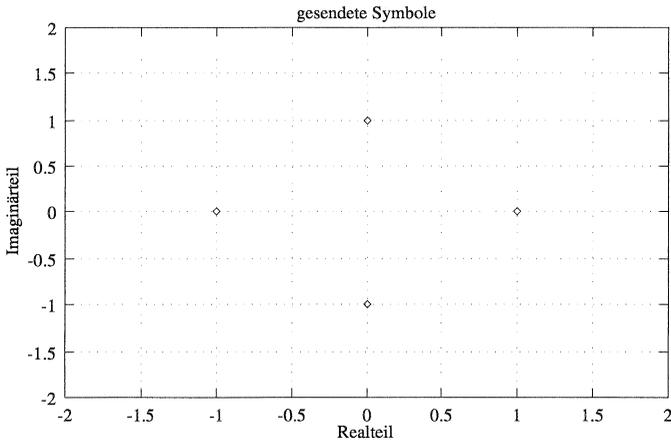


Abbildung 3.2: Gesendete QPSK-Symbole

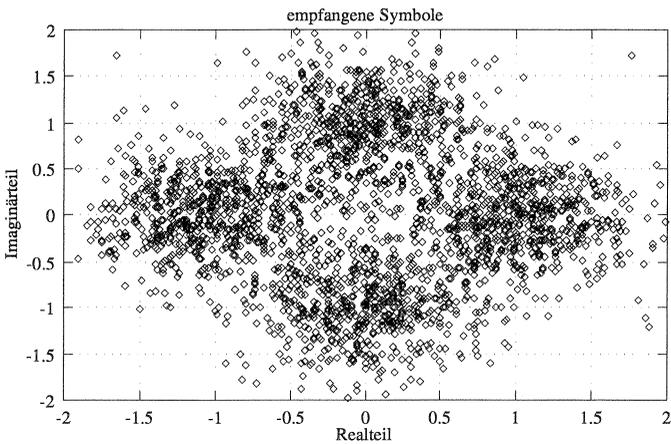


Abbildung 3.3: Empfangene QPSK-Symbole

3.3 Übertragungsverluste

3.3.1 Freiraumdämpfung

Die Empfangsleistung, P_r , ist abhängig von der abgegebenen Leistung des entsprechenden Senders, P_t , der Ausbreitungsdämpfung, L , und dem Antennengewinn der Sendeantenne, G_t , bzw. der Empfangsantenne, G_r .

$$P_r = \frac{G_r G_t P_t}{L} [W] \quad (3.11)$$

Im einfachsten Fall ist die Ausbreitungsdämpfung L gleich der *Freiraumdämpfung* L_p . Diese beschreibt die Signaldämpfung für den Fall einer direkten Sichtverbindung. Sie hängt von der Entfernung, d , zwischen Sender und Empfänger und der Wellenlänge, λ , ab.

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3.12)$$

3.3.2 Pegelschwund

In Mobilfunksystemen kann der Empfangspegel starken Schwankungen unterworfen sein, die als *Pegelschwund* oder *Fading* bezeichnet werden. Sie entstehen durch atmosphärische Einflüsse, Abschattungseffekte oder Mehrwegeausbreitung.

Atmosphärische Dämpfung entsteht durch die in der Luft enthaltenen Moleküle, hauptsächlich Sauerstoff und Wasserdampf. Die Dämpfung durch Einflüsse der Erdatmosphäre ist in hohem Maße frequenzabhängig. Sie muß jedoch erst ab 10 GHz berücksichtigt werden.

Besonders in stark bebauter, städtischer Umgebung ist eine direkte Sichtverbindung zwischen einer Mobilstation und einem Satelliten nicht immer gegeben. Infolge dieser *Abschattung* erreichen den Empfänger nur noch reflektierte oder in den abgeschatteten Raum hineingebeugte Signalanteile.

Werden die gesendeten Signale innerhalb des Übertragungsmediums gestreut, an Objekten in der Nähe des Empfängers reflektiert und dabei unterschiedlich stark gedämpft und verzögert, spricht man von *Mehrwegeausbreitung*. Besonders Mobilstationen mit ihren omnidirektionalen Antennen empfangen nicht nur die direkt abgestrahlten Signale, sondern auch die unter Umständen aus allen Richtungen eintreffenden reflektierten Signalanteile. Die Amplitude des empfangenen Signals hängt von den Amplituden und

Phasenlagen der einzelnen Teilwellen ab. Die Überlagerung der Teilwellen kann theoretisch zu einer völligen Auslöschung oder extremen Verstärkung des Empfangssignals führen. Aufgrund der Bewegungen des Senders und des Empfängers ändern sich dabei die Ausbreitungspfade und damit auch die Amplituden und Phasenlagen der einzelnen Teilwellen ständig.

In dem in dieser Arbeit verwendeten Kanalmodell wurden Abschattung und Mehrwegeausbreitung jedoch nicht berücksichtigt.

3.4 Interferenz und Störpegelabstand

3.4.1 Eigeninterferenzen in MSS

Die Funkverbindung in einem MSS kann durch andere Funkverbindungen dieses MSS gestört werden. Es handelt sich somit um *Eigeninterferenzen* des MSS. Dabei sind im wesentlichen zwei Arten von Interferenzeinflüssen zu unterscheiden:

1. Gleichkanalinterferenzen durch Benutzung des gleichen Funkkanals durch andere Mobilstationen des MSS.
2. Nachbarkanalinterferenzen durch Benutzung eines benachbarten Funkkanals durch andere Mobilstationen des MSS.

Durch den Einsatz digitaler Filter können Nachbarkanalinterferenzen ausreichend unterdrückt werden. Man spricht auch von einer *Quasiorthogonalität* der Signale. Aufgrund der Kanalwiederbenutzung in MSS läßt sich das Auftreten von Gleichkanalinterferenzen jedoch nicht vermeiden.

3.4.2 Gleichkanalinterferenzen in MSS

In einem realen MSS wird die Gleichkanalinterferenz anhand von Messungen der Bitfehlerhäufigkeit bestimmt. Sind die Positionen und Antennengewinne der Satelliten und Gleichkanalmobilstationen bekannt, kann die resultierende Gleichkanalinterferenz auf die hier vorgestellte Weise berechnet werden. Die Mobilstation m habe eine Verbindung zum Satelliten s_m über dessen Antenne a_m . M_m sei die Menge aller anderen Mobilstationen des Systems mit Ausnahme von m . Eine oder mehrere andere Mobilstationen i , $i \in M_m$, befände(n) sich jeweils in der Ausleuchtzone der Antenne a_i des Satelliten s_i , wobei auch $s_i = s_m$ zulässig sei, und unterhalte(n) jeweils eine Funkverbindung auf dem gleichen Verkehrskanal wie m .

Wenn die Entfernung der Gleichkanalmobilstation i zur Mobilstation m nicht ausreichend groß ist, erfährt m die Gleichkanalinterferenzleistung $I_{dn}(m)$.

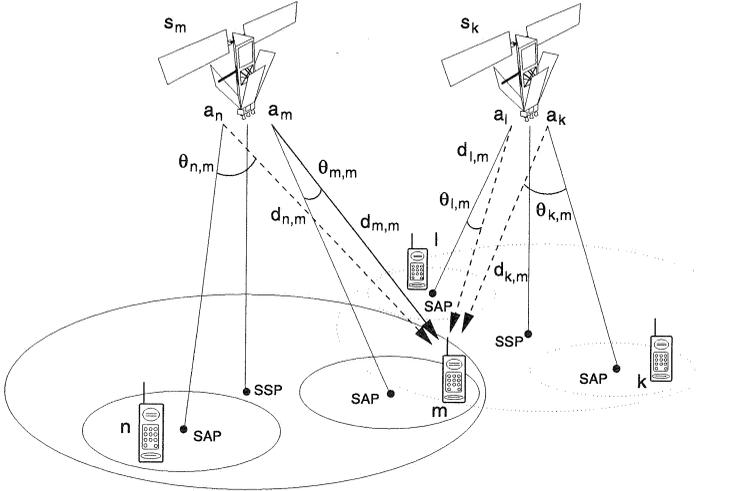


Abbildung 3.4: Gleichkanalstörung auf dem Downlink

$$I_{dn}(m) = \sum_{i \in M_m} G_i(\theta_{i,m}) I_{dn_i}(d_{i,m}) \text{ [W]} \quad (3.13)$$

Hierbei ist $G_i(\theta_{i,m})$ der Gewinn der Antenne a_i des Satelliten s_i in Richtung der Mobilstation m , wobei $\theta_{i,m}$ der Winkel zwischen der Hauptachse der Antenne a_i und dem Vektor „Satellit s_i - Mobilstation m “ ist. $G_i(\theta_{i,m}) I_{dn_i}(d_{i,m})$ ist die von der Mobilstation m empfangene Störleistung des über die Antenne a_i des Satelliten s_i abgestrahlten Signals, wobei $d_{i,m}$ der Abstand des Satelliten s_i von der Mobilstation m ist [7].

In dem Beispiel in Abbildung 3.4 verwenden die Mobilstationen m , n , k und l den gleichen Verkehrskanal, sind also Gleichkanalbenutzer. Dabei wird die Mobilstation m von der Antenne a_m und die Mobilstation n von der Antenne a_n des Satelliten s_m versorgt. Entsprechendes gilt für k und l und

die Antennen a_k und a_l des Satelliten s_k . Die Mobilstation m erfährt die Störleistung

$$I_{dn}(m) = G_n(\theta_{n,m}) I_{dn n}(d_{n,m}) + G_k(\theta_{k,m}) I_{dn k}(d_{k,m}) + G_l(\theta_{l,m}) I_{dn l}(d_{l,m}) [W] \tag{3.14}$$

Der Uplink der Mobilstation m wird mit der Gleichkanalinterferenzleistung $I_{up}(m)$ gestört. Sie ist gegeben mit

$$I_{up}(m) = \sum_{i \in M_m} G_m(\theta_{m,i}) I_{up i}(d_{m,i}) [W] \tag{3.15}$$

$G_m(\theta_{m,i})$ beschreibt den Gewinn der Antenne b_m des Satelliten s_m in Richtung der Mobilstation i , wobei $\theta_{m,i}$ der Winkels zwischen der Hauptachse der Antenne a_m und dem Vektor „Satellit s_m - Mobilstation i “ ist. $G_m(\theta_{m,i}) I_{up i}(d_{m,i})$ ist die von der Mobilstation i stammende Interferenzleistung, die von der Antenne a_m des Satelliten s_m empfangen wird. $d_{m,i}$ ist die Entfernung zwischen dem Satelliten s_m und der Mobilstation i .

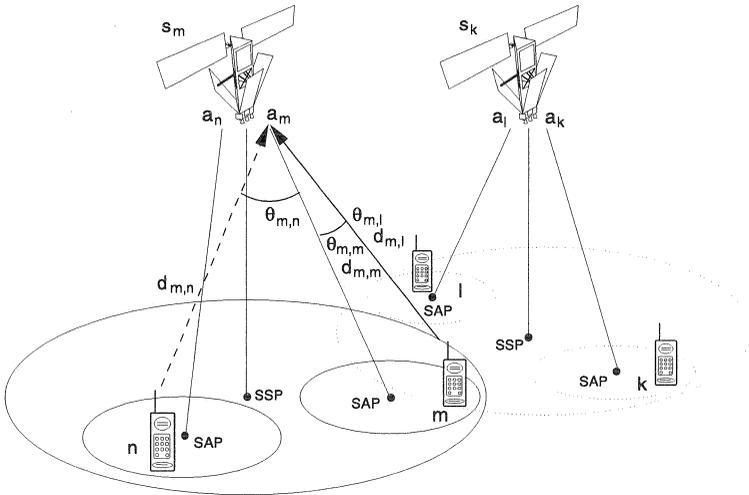


Abbildung 3.5: Gleichkanalstörung auf dem Uplink

In dem Beispiel in Abbildung 3.5 beträgt die Gleichkanalstörleistung auf dem Uplink der Mobilstation m

$$I_{up}(m) = G_m(\theta_{m,n}) I_{up\ n}(d_{m,n}) + G_m(\theta_{m,k}) I_{up\ k}(d_{m,k}) + G_m(\theta_{m,l}) I_{up\ l}(d_{m,l}) [W] \quad (3.16)$$

Es ist offensichtlich, daß sich die Intensität von Uplink- und Downlink-Gleichkanalinterferenzen einer Funkverbindung voneinander unterscheiden. Die Gesamtinterferenzleistung auf einer Uplink- oder Downlink-Verbindung besitzt zwei Komponenten: zum einen die Gleichkanalinterferenz, zum anderen die thermische Rauschleistung N . Dies muß bei der Berechnung des Störpegelabstandes berücksichtigt werden.

3.5 Störpegelabstand

In zellularen Mobilfunknetzen wird das Signalstörleistungsverhältnis CIR^4 bzw. der Störpegelabstand CIR_{dB} als ein Qualitätsmerkmal für bestehende Verbindungen angesehen. Dabei gilt

$$CIR_{dB} = 10 \cdot \log(CIR) \quad (3.17)$$

Da sich die Störpegelabstände auf dem Uplink und dem Downlink einer Funkverbindung voneinander unterscheiden, ist es notwendig, beide Werte in Betracht zu ziehen, wenn die Qualität dieser Verbindung bewertet wird. Das resultierende Signalstörleistungsverhältnis auf dem Downlink der Mobilstation m , CIR_{dn} , ergibt sich zu

$$CIR_{dn}(m) = \frac{G_m(\theta_{m,m}) \cdot C_{dn}(d_{m,m})}{I_{dn}(m) + N} \quad (3.18)$$

Hierbei ist $G_m(\theta_{m,m})$ der Gewinn der Antenne a_m des Satelliten s_m in Richtung der Mobilstation m , $G_m(\theta_{m,m}) C_{dn}(d_{m,m})$ die Leistung des von der Mobilstation m empfangenen Signals, $d_{m,m}$ die Entfernung zwischen dem Satelliten s_m und der Mobilstation m , $I_{dn}(m)$ die Gleichkanalinterferenzleistung m (siehe (3.13)) und N die Rauschleistung des additivem weißen Gauß'schen Rauschens.

⁴Carrier-to-Interference Ratio

Entsprechend ist das resultierende $CIR_{up}(m)$ auf dem Uplink der Mobilstation m

$$CIR_{up}(m) = \frac{G_m(\theta_{m,m}) \cdot C_{up}(d_{m,m})}{I_{up}(m) + N} \quad (3.19)$$

$G_m(\theta_{m,m})C_{up}(d_{m,m})$ ist die Leistung des von der Antenne a_m des Satelliten s_m empfangenen Signals und $I_{up}(m)$ die entsprechende Gleichkanalinterferenzleistung (siehe (3.15)).

Aus (3.18) und (3.19) ist ersichtlich, daß der Funkkanal, auf dem die Übertragung zwischen einer bestimmten Mobilstation und dem Satelliten, der sie zu diesem Zeitpunkt in einer seiner Zellen versorgt, erst in einer ausreichend entfernten Zelle wiederverwendet werden darf. Die minimale Entfernung berechnet sich aus dem geforderten minimalen Störpegelabstand.

Das Referenz-MSS

Um prinzipielle Aussagen über die Leistungsfähigkeit von MSS und die Möglichkeiten zu ihrer Verkehrskapazitätsoptimierung machen zu können, muß ein realitätsnahes Referenz-MSS definiert werden, anhand dessen sowohl die grundlegenden Probleme und Einschränkungen von MSS analysiert als auch gezielt Verbesserungen gemacht und deren Auswirkungen isoliert betrachtet werden können.

Im folgenden wird zunächst der Aufbau des Referenz-MSS und die Funktionalität eines Referenzsatelliten und seiner Untersysteme beschrieben. Hierbei wird auf die zellulare Ausleuchtung des Referenz-MSS eingegangen und das verwendete Antennenmodell vorgestellt. Nach der Beschreibung der Netzschichtprotokolle und des verwendeten Leistungssteuerungsverfahrens wird abschließend das für das Referenz-MSS entwickelte Verkehrsangebotsmodell vorgestellt, sowie kurz auf die Arten der Verkehrskapazitätsbegrenzung eingegangen.

4.1 Komponenten des Referenz-MSS

Das Referenz-MSS ist an IRIDIUM angelehnt. Wie dieses besteht es aus 66 niedrigfliegenden Satelliten, mehreren Gateways und einer Vielzahl von Mobilstationen. Die Satelliten umkreisen die Erde auf sechs Umlaufbahnen mit einer Geschwindigkeit von ca. 26900 km/h. Jeweils elf Satelliten sind dabei in gleichmäßigen Abständen von $\Delta\lambda = 32.7^\circ$ auf einer Bahn angeordnet (siehe Abbildung 4.1).

Die Bahnhöhe beträgt 780 km und die Bahninklination $86,4^\circ$. Der Bahnabstand zwischen den gegenläufigen Bahnen beträgt $\Delta\varphi_g = 22^\circ$, sonst $\Delta\varphi = 31.6^\circ$. Durch diese Anordnung wird eine vollständige Funkversorgung der gesamten Erdoberfläche erreicht (siehe Abbildung 4.2).

Beim Referenz-MSS sind die Abstände zwischen den Satellitenbahnen am Äquator am größten. In höheren nördlichen und südlichen Breiten werden die Abstände zwischen den Satellitenbahnen geringer (siehe Abbildung 4.1),

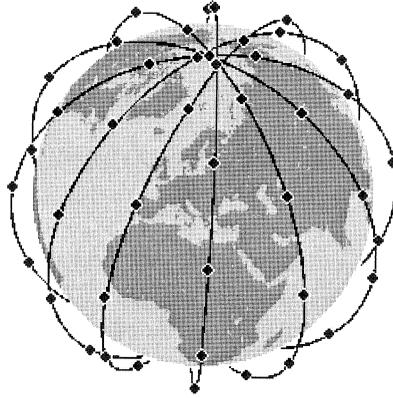
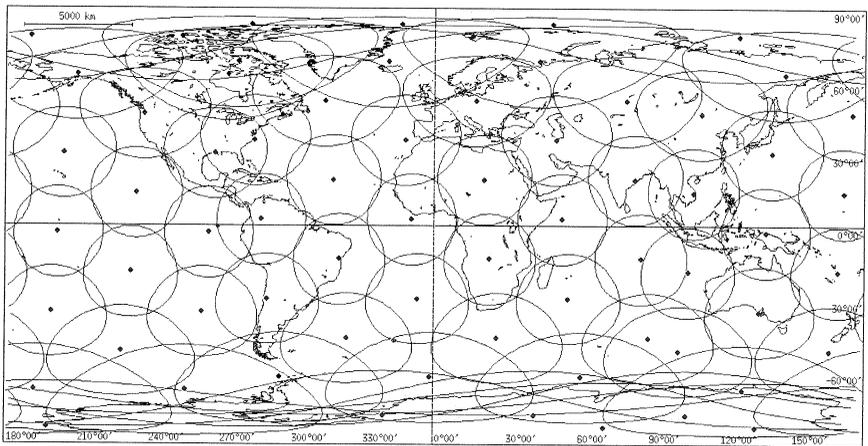


Abbildung 4.1: Referenzsatelliten und ihre Bahnen

Abbildung 4.2: Versorgungsbereiche der Referenzsatelliten ($\varepsilon = 10^\circ$)

so daß es zu Überlappungen von Funkzellen benachbarter Satelliten kommen würde, wobei sich die Überlappungsbereiche, bedingt durch die Dynamik des MSS, ständig ändern würden. Daher werden bestimmte Funkzellen in höheren Breiten temporär deaktiviert.

4.2 Aufbau und Funktionalität des Referenzsatelliten

Der Referenzsatellit besteht aus mehreren Untersystemen: dem Energieversorgungssystem, den Systemen für die Lage-, Positions- und Temperaturregelung, dem Telemetrie- und Telekommandosystem TT&C¹ und dem Kommunikationsmodul mit dem Antennensystem (siehe Abbildung 4.3).

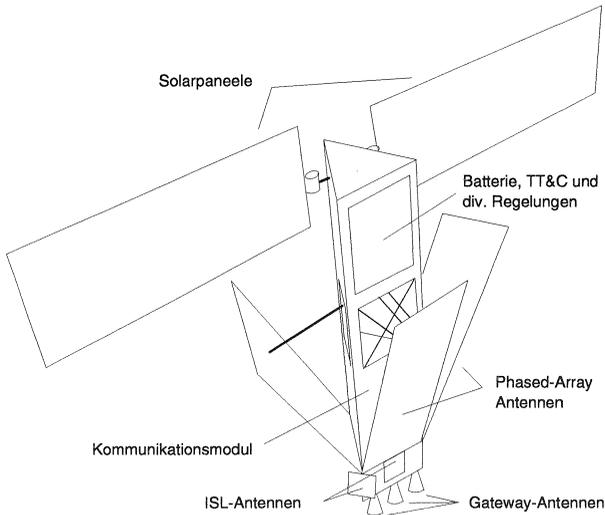


Abbildung 4.3: Untersysteme des Referenzsatelliten

Die *Energieversorgung* des Satelliten erfolgt primär durch Solarzellen. Da die Leistungsabgabe einer Solarzelle gering ist, werden Felder bestehend aus Serien- und Parallelschaltungen vieler Solarzellen benötigt - die Solarpaneele. Da sich der Satellit während seiner Umlaufzeit zeitweise im Erdschatten befindet, müssen Batterien mitgeführt werden, die die ständige Energieversorgung des Satelliten sicherstellen. Diese Batterien werden über die Solarpaneele zyklisch aufgeladen, wenn sich der Satellit außerhalb des Erdschattens befindet. Aufgrund der begrenzten Leistungsabgabe der Solarpaneele ist die Sendeleistung des Satelliten begrenzt.

¹Tracking, Telemetry & Command

Die Lage eines Satelliten bezieht sich auf seine Ausrichtung im Weltall. Eine *Lageregelung* ist notwendig, um die gewünschte Strahlrichtung der Satellitenantennen einstellen und beibehalten zu können.

Zusätzlich zur Regelung der Lage ist es wichtig, den Satelliten im korrekten Abschnitt seiner Bahn zu halten. Um dem Abdriften entgegenzuwirken, wird der Satellit bei Bedarf durch Korrekturmanöver in die gewünschte Position gebracht. Diese Funktionalität wird *Positionsregelung* genannt.

Kommandos zur Bahnkorrektur werden von der TT&C-Erdfunkstelle, die die Satellitenposition überwacht, gesendet. Die Telemetriedaten und -meßwerte werden vom *TT&C-System* des Satelliten zur Verfügung gestellt. Da Satelliten sehr großen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, es jedoch wichtig ist, die Ausrüstung des Satelliten unter möglichst gleichbleibenden Temperaturbedingungen zu betreiben, werden Maßnahmen für die *Temperaturregelung* ergriffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird vorausgesetzt, daß die Lage-, Positions- und Temperaturregelung des Referenzsatelliten ideal ist.

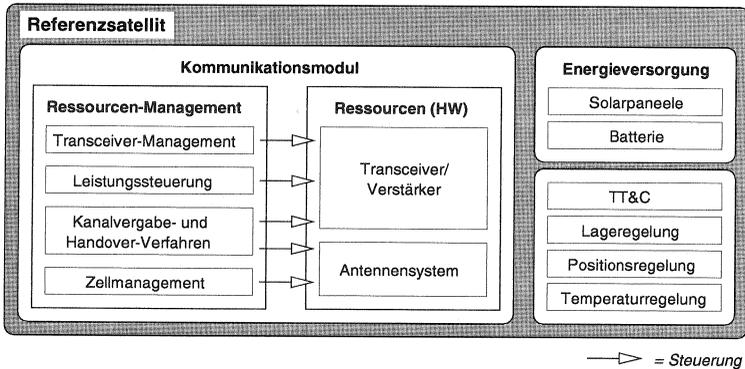


Abbildung 4.4: Funktionaler Aufbau eines Referenzsatelliten

Das *Kommunikationsmodul* enthält die für die Übertragung notwendigen Einrichtungen des Satelliten (siehe Abbildung 4.4). Im Falle des Referenzsatelliten handelt es sich um ein regeneratives, vermittelndes System, d.h. das empfangene Signal wird vermittelt und in einem anderen Frequenzband gesendet. Das Kommunikationsmodul enthält die Transceiver und Leistungsverstärker des Satelliten, deren Funktionsweise im folgenden genau-

er beschrieben wird. Das *Ressourcen-Management* umfaßt das Transceiver-Management, das Zellmanagement, die Leistungssteuerung, die Kanalvergabe und den Handover und dient der Steuerung der Kommunikationseinrichtungen des Satelliten und der Kommunikationsverbindungen.

Das *Antennensystem* des Referenzsatelliten besteht aus drei Phased-Array-Antennen für die Kommunikation mit Mobilstationen im L-Band, vier Hornstrahlern für die Kommunikation mit den Gateways im K_a -Band und vier Antennen für die Kommunikation mit benachbarten Satelliten im K_a -Band.

4.3 Die zellulare Ausleuchtung des Referenz-MSS

Die Antennen der Mobilstationen und der Referenzsatelliten beeinflussen maßgeblich sowohl den Empfangspegel als auch den Störpegel. Da die Antennen der Mobilstationen eine omnidirektionale Charakteristik haben und das Signal nur um ca. 1 dB verstärken, werden im folgenden nur die Satellitenantennen und deren Richtcharakteristik detailliert betrachtet.

4.3.1 Zellularstruktur der Satellitenausleuchtzone

Die Gesamtausleuchtzone eines Satelliten des Referenz-MSS besteht aus 48 Zellen. Die Abbildung 4.5 zeigt die Zellstruktur, die Nummerierung der Zellen und die Zuordnung der einzelnen Zellen zu den drei Phased-Array-Antennen eines Referenzsatelliten. Jede Phased-Array-Antenne versorgt 16 Funkzellen.

4.3.2 Richtcharakteristik der Satellitenantenne

Ein Referenzsatellit befindet sich immer über dem Mittelpunkt seiner Ausleuchtzone, dem Satellitenfußpunkt SSP², und damit über dem Schnittpunkt der drei inneren Zellen 1, 2 und 3. Die äußeren Zellen werden unter einem kleineren Elevationswinkel (siehe Kapitel 2.1) ausgeleuchtet. Während eine um die Antennenachse rotationssymmetrische Richtcharakteristik der virtuellen Antennen (siehe Kapitel 3.1.3) im Inneren der Satellitenausleuchtzone zu kreisrunden Zellen führen würde, würden Zellen am Rand der Ausleuchtzone eine ellipsenartige Form annehmen. Dabei würde die Länge einer

²Sub Satellite Point

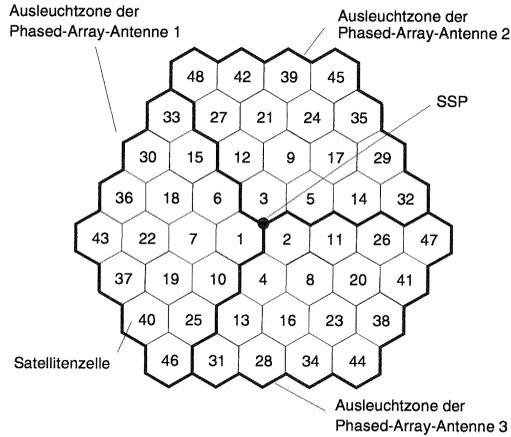


Abbildung 4.5: Die zellulare Struktur der Satellitenausleuchtungzone

äußeren Zelle, gegeben durch die Richtung vom SSP zu dem entsprechenden SAP³, das mehrfache ihrer Breite betragen.

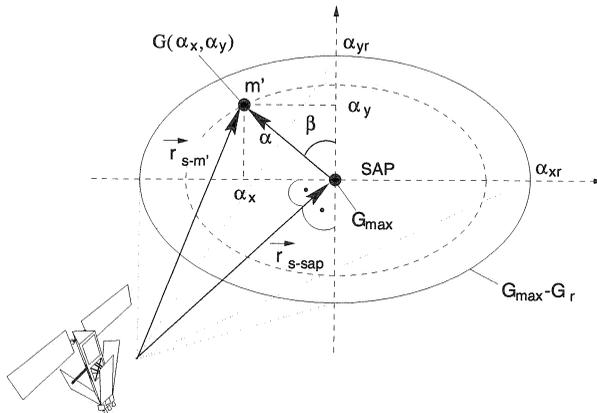


Abbildung 4.6: Antennengewinn in Abhängigkeit des Antennenwinkels

³Sub Antenna Point

Um eine wie in die Abbildung 4.5 dargestellte, gleichmäßige, zellulare Struktur zu erhalten, wurde für jede Antenne eine elliptische Richtcharakteristik festgelegt, die zu annähernd kreisförmigen Zellausleuchtungszonen führt. Der Grund für die geringfügige Abweichung von der Kreisform ist die Krümmung der Erdoberfläche.

Der Gewinn einer Antenne, $G(\alpha_x, \alpha_y)$, ist mit

$$G(\alpha_x, \alpha_y) = G_{max} - \frac{G_r}{4} \cdot \left[\left(\frac{\alpha_x}{\alpha_{xr}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_y}{\alpha_{yr}} \right)^2 \right]^2 \quad (4.1)$$

gegeben, wobei G_{max} der maximale Gewinn, G_r der Pegelabfall am Zellrand, α_x und α_y die beiden Komponenten des Abstrahlwinkels α , und α_{xr} und α_{yr} die große und die kleine Halbachse der elliptischen Richtcharakteristik der Satellitenantenne sind. α_{xr} und α_{yr} werden abhängig von der Entfernung des SAP einer Zelle vom SSP parametrisiert.

4.3.3 Berechnung des Antennengewinns

Aufgrund der Systemdynamik ändert sich die relative Position einer Mobilstation zu einem Satelliten, die sie versorgen, und somit auch der Gewinn der Antennen ständig. Wenn die absoluten Koordinaten der Mobilstation und des Satelliten und die Ausrichtung der Achsen der Satellitenantenne bekannt sind, läßt sich der Antennengewinn jedoch einfach berechnen.

Eine Mobilstation m befinde sich in der Ausleuchtungzone des Satelliten s (siehe Abbildung 4.7). Die Position der Mobilstation und die des Satelliten ist eindeutig durch die Vektoren \vec{r}_m und \vec{r}_s gegeben. Der Vektor \vec{r}_{s-m} berechnet sich zu

$$\vec{r}_{s-m} = \vec{r}_s - \vec{r}_m \quad (4.2)$$

Die Ausrichtung der Satellitenantenne, die die Mobilstation m versorgt, ist durch den Vektor \vec{r}_{s-sap} gegeben. Der Endpunkt dieses Vektors ist durch die Position des entsprechenden Antennenfußpunktes SAP gegeben. Dieser entspricht dem Endpunkt des im Erdmittelpunkt beginnenden Vektors \vec{r}_{sap} . Die Ebene, die diesen SAP enthält und senkrecht zum \vec{r}_{s-sap} steht, heißt *Antennenebene*.

Der Abstrahlwinkel α , dessen Komponenten α_x und α_y den Antennengewinn bestimmen, ist der Winkel zwischen den Vektoren \vec{r}_{s-sap} und \vec{r}_{s-m} . Er ist gegeben durch

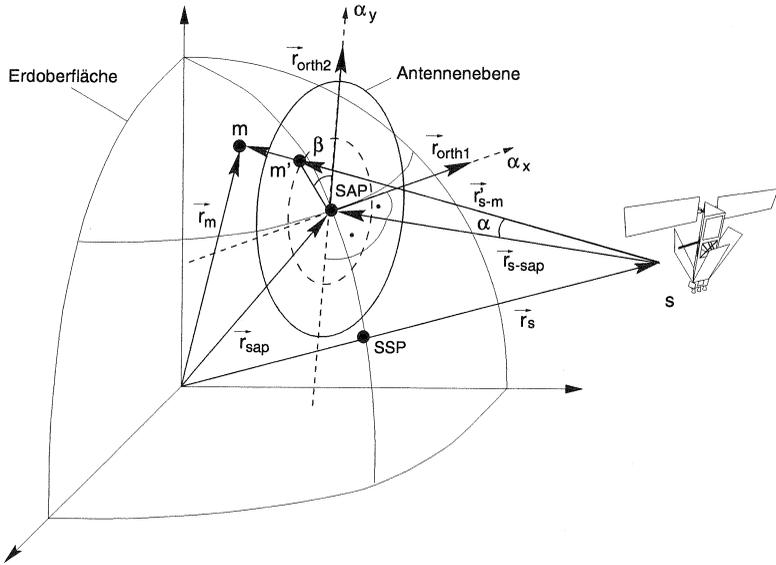


Abbildung 4.7: Satellitenzellen und die Projektion in die Antennenebene

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\vec{r}_{s-sap} \cdot \vec{r}_{s-m}}{|\vec{r}_{s-sap}| \cdot |\vec{r}_{s-m}|}\right) \quad (4.3)$$

Um die beiden Komponenten des Abstrahlwinkels α zu berechnen, wird mit \vec{r}'_{s-m} ein Vektor eingeführt, der die gleiche Richtung hat wie \vec{r}_{s-m} , dessen Betrag jedoch so modifiziert wurde, daß sein Endpunkt in der Antennenebene liegt. Dieser Vektor hat die Komponenten

$$r'_{s-m} = \frac{r_{s-sap}}{\cos\alpha}$$

$$\theta'_{s-m} = \theta_{s-m}$$

$$\varphi'_{s-m} = \varphi_{s-m}$$

Der Vektor

$$\vec{r}'_{sap-m} = \vec{r}_{s-sap} - \vec{r}'_{s-m}$$

liegt in der Antennenebene und verbindet den SAP mit der Projektion m' der Mobilstation m in der Antennenebene.

Der in der Antennenebene gelegene Rotationswinkel β (siehe Abbildung 4.6) berechnet sich dann zu

$$\beta = \arccos\left(\frac{\vec{r}_{orth2} \cdot \vec{r}'_{sap-m}}{|\vec{r}_{orth2}| \cdot |\vec{r}'_{sap-m}|}\right) \quad (4.4)$$

wobei sich \vec{r}_{orth2} aus (4.5) und (4.6) zu (4.7) ergibt.

$$\vec{r}'_s = -\vec{r}_s \quad (4.5)$$

$$\vec{r}_{orth1} = \vec{r}_{s-sap} \times \vec{r}'_s \quad (4.6)$$

$$\vec{r}_{orth2} = \vec{r}_{s-sap} \times \vec{r}_{orth1} \quad (4.7)$$

Mit Hilfe des Rotationswinkels β lassen sich nun α_x und α_y einfach berechnen (siehe (4.8) und (4.8)).

$$\alpha_x = \alpha \cdot \sin\beta \quad (4.8)$$

$$\alpha_y = \alpha \cdot \cos\beta \quad (4.9)$$

4.3.4 Empfangspegel auf der Erdoberfläche

In der Abbildung 4.8 ist der Empfangspegel des für die Ausleuchtung einer der 'inneren' Zellen des Referenzsatelliten gesendeten Funksignals auf der Erdoberfläche dargestellt. Die Abbildung 4.9 zeigt im gleichen Gebiet den Empfangspegel in einer 'äußeren' Zelle und in ihrer Umgebung.

Da die Antennen nur die Mobilstationen versorgen, die sich in geringer Entfernung (ca. 2° bezogen auf den Erdmittelpunkt) von einem ihrer SAP befinden, wurden die Antennenparameter so gewählt, daß innerhalb dieser Entfernung das Empfangssignal nicht mehr als 3 dB von G_{max} abweicht. Bemerkenswert ist der große Einflußbereich der Nebenkeulen bei der Ausleuchtung einer 'inneren' Zelle und die parabolische Form der Gesamtausleuchtung einer 'äußeren' Zelle. Der Versorgungsbereich einer Antenne ist zusätzlich durch den Elevationswinkel begrenzt.

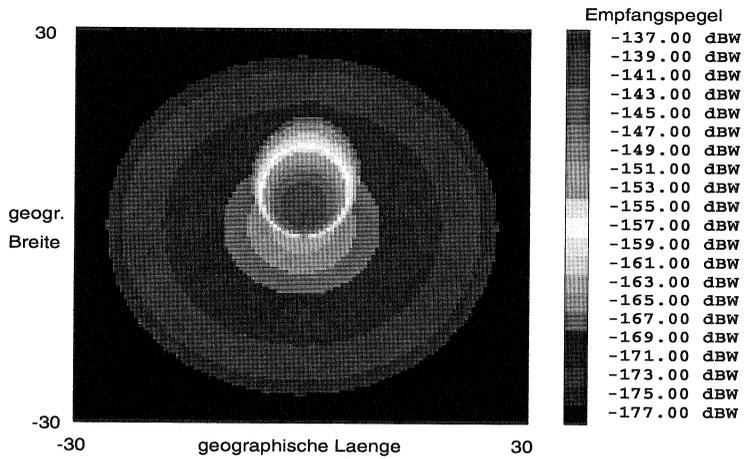


Abbildung 4.8: Empfangspegel (Ausleuchtung der Antenne 3)

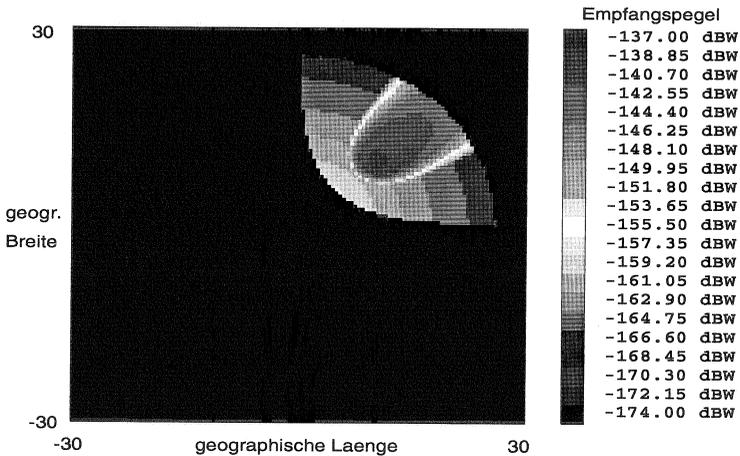


Abbildung 4.9: Empfangspegel (Ausleuchtung der Antenne 35)

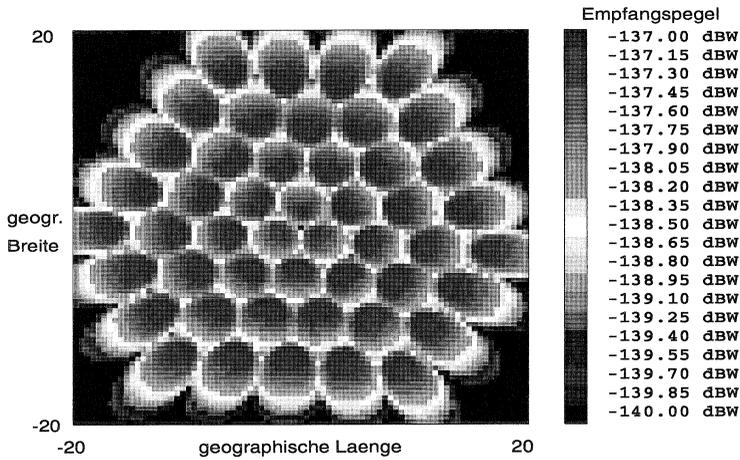


Abbildung 4.10: Empfangspegel (Ausleuchtung eines Referenzsatelliten)

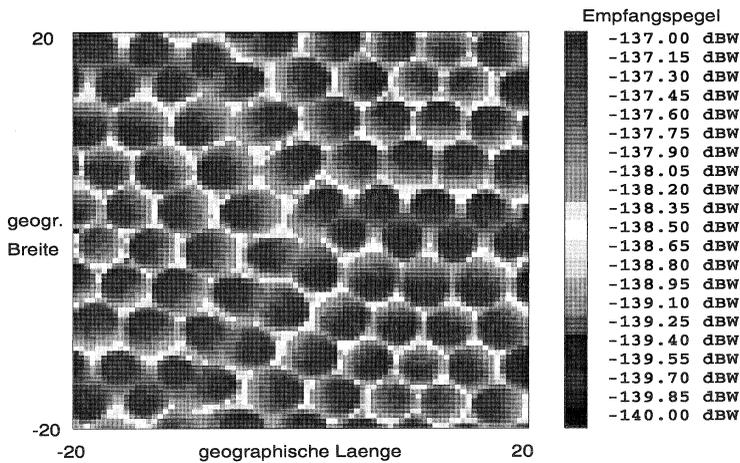


Abbildung 4.11: Empfangspegel (Ausleuchtung des Referenz-MSS)

In der Abbildung 4.10 ist eine Satellitenausleuchtzone anhand der empfangenen Signalpegel auf dem Downlink dargestellt. Es ist immer nur das stärkste Signal dargestellt. Man sieht, daß die resultierenden Zellen eine hexagonale Form haben, die sich durch die Überlagerung der kreisförmigen Zellausleuchtzonen ergibt, und daß in der gesamten Ausleuchtzone eines Referenzsatelliten Empfangspegel resultieren, die nicht mehr als 3 dB vom maximalen Wert abweichen. Letzteres ist jedoch auch auf das verwendete Leistungssteuerungsverfahren zurückzuführen, das im folgenden Unterkapitel vorgestellt wird.

Die Abbildung 4.11 zeigt im gleichen Gebiet die Ausleuchtung des Gesamtsystems. Es ist ersichtlich, daß das Referenz-MSS selbst im kritischen Bereich der Systemausleuchtung, im äquatornahen Bereich, eine vollständige und lückenlose Funkversorgung gewährleistet.

4.3.5 Leistungssteuerung

Um zu erreichen, daß die Empfangspegel auf dem Downlink für eine nicht abgeschattete Mobilstation in allen 48 SAP eines Satelliten gleich dem Empfangspegel im SAP einer der drei mittleren Zellen sind, wird im Referenz-MSS eine *passive Leistungssteuerung* eingesetzt. Dabei werden die Pfadverluste, die aufgrund der Entfernungsunterschiede zwischen einem Satelliten und seinen SAP bestehen, mit Hilfe eines Korrekturfaktors ausgeglichen, der die vom Satelliten bzw. von der Mobilstation abgegebene Sendeleistung bestimmt. Der Korrekturfaktor, und damit auch die korrigierte Sendeleistung, ist von der tatsächlichen Entfernung zwischen einer Mobilstation und dem Satellit, der sie versorgt, unabhängig. Er wird einmalig im Satelliten für jede Zelle eingestellt, bzw. in der Mobilstation abhängig von der Zelle, in der sie sich befindet, kontinuierlich angepaßt.

Da bei dieser geometriebasierten Leistungssteuerung eventuelle Störungen auf dem Funkkanal nicht kompensiert werden, senden die Referenzsatelliten mit einer Leistungsreserve, um bei Pegelbrüchen einen ausreichend hohen Empfangspegel gewährleisten zu können. Durch dieses einfache Verfahren konnte der Signallisierungs- und Berechnungsaufwand beim Betrieb einer Funkverbindung niedrig gehalten werden.

Berechnung des Korrekturfaktors

Der Downlink-Empfangspegel einer nicht abgeschatteten Mobilstation m (siehe Abbildung 4.12), die sich auf einem der SAP einer 'inneren' Zelle befindetet, ist gegeben mit

$$P_{sap1}[dBW] = G_{max} + G_m + P_s - L_{sap1} \quad (4.10)$$

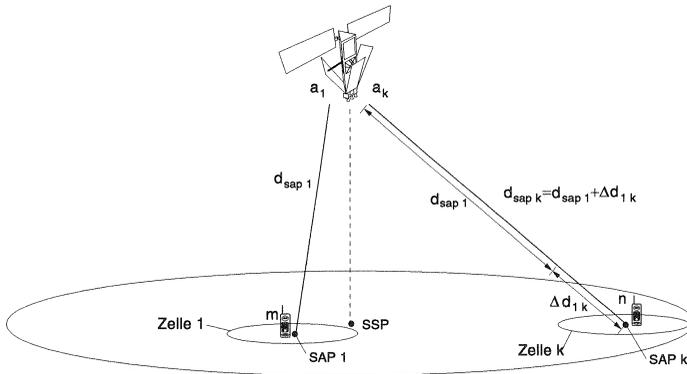


Abbildung 4.12: Entfernungen der SAP vom Referenzsatelliten

Dabei ist G_{max} der Gewinn der Satellitenantenne in dem entsprechenden SAP, G_m der Antennengewinn der Mobilstation m , P_s die unregelte Sendeleistung des Satelliten und L_{sap1} der Pfadverlust. Der Pfadverlust ist gegeben durch

$$L_{sap1}[dB] = 20 \log \frac{4\pi d_{sap1}}{\lambda} \quad (4.11)$$

wobei d_{sap1} die Entfernung zwischen dem Satelliten und der Mobilstation m bzw. dem SAP 1 ist.

Eine Mobilstation n , die sich auf einem beliebigen SAP k dieses Satelliten aufhält, wird von ihrer Antenne k mit dem gleichen Empfangspegel versorgt werden. Es gilt

$$P_{sap1} = P_{sapk} \quad (4.12)$$

$$P_{sapk}[dBW] = G_{max} + G_n + P'_s - L_{sapk} \quad (4.13)$$

und

$$L_{sapk}[dB] = 20 \log \frac{4\pi d_{sapk}}{\lambda} \quad (4.14)$$

Da die Antennen der Mobilstationen eine omnidirektionale Richtcharakteristik haben, gilt $G_n = G_m$. Aus (4.10), (4.12) und (4.13) folgt, daß für die geregelte Sendeleistung P'_s gelten muß

$$P'_s[dBW] = P_s - L_{sap1} + L_{sapk} \quad (4.15)$$

bzw.

$$P'_s[dBW] = P_s + F_{korrk} \quad (4.16)$$

Hierbei ist F_{korrk} der Korrekturfaktor für die Zelle k . Er ist gegeben durch

$$F_{korrk}[dB] = L_{sapk} - L_{sap1} = 20 \log \frac{d_{sapk}}{d_{sap1}} \quad (4.17)$$

4.4 Das Schichtenmodell des Referenz-MSS

Da der Informationsaustausch zwischen Mobilstationen und Satelliten komplex und unübersichtlich ist, wird der Kommunikationvorgang schematisiert und in einzelne hierarchische Ebenen, sogenannte *Schichten*, unterteilt. Jede Schicht, mit Ausnahme der obersten, bietet der nächsthöheren Schicht Dienste an. Um Dienste erbringen zu können, erfolgt ein Informationsaustausch zwischen den Partnerinstanzen der jeweiligen Schicht über *Protokolle* [38].

Das Schichtenmodell der Funkschnittstelle des Referenz-MSS entspricht prinzipiell den unteren drei Schichten des ISO-OSI-Referenzmodells (siehe Abbildung 4.13).

4.4.1 Die Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht stellt die Grundlage bzw. Voraussetzung für die Kommunikation dar und ist für die Übertragung von Bits über physikalische Kanäle zuständig. Um mehreren Mobilstationen den gleichzeitigen Zugriff

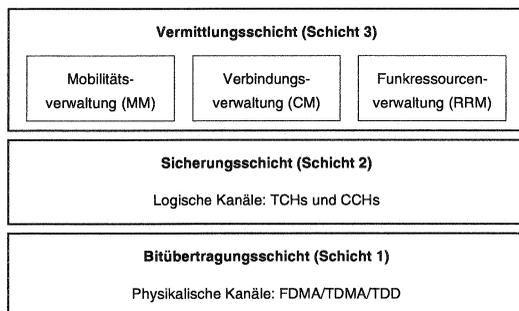


Abbildung 4.13: Schichtenmodell des Referenz-MSS

auf die zur Verfügung stehenden Funkressourcen zu ermöglichen, wird das Frequenzband in physikalische Kanäle unterteilt.

Frequenzkanäle

Das dem Referenz-MSS zur Verfügung stehende 1 MHz breite Frequenzband liegt im L-Band. Es ist in $n_f = 24$ Frequenzkanäle unterteilt. Man spricht von *FDM*⁴ bzw. *FDMA*⁵. Jeder Frequenzkanal f_i , $1 \leq i \leq n_f$, ist durch seine Mittenfrequenz und Bandbreite festgelegt. Damit kein Übersprechen zwischen Frequenzkanälen auftritt, ist ein Schutzabstand vorgesehen. Die Bandbreite eines Frequenzkanals des Referenz-MSS ist 31,5 kHz. Der Schutzabstand beträgt 10,167 kHz (siehe Abbildung 4.14).

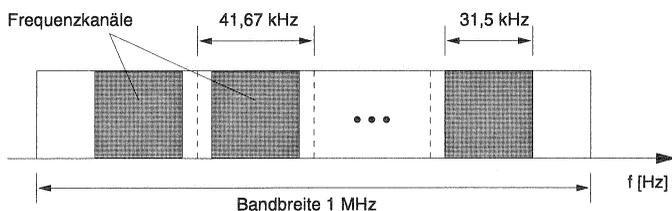


Abbildung 4.14: Bandbreite und Frequenzkanäle des Referenz-MSS

⁴Frequency Division Multiplex

⁵Frequency Division Multiple Access

Zeitschlitz

Jeder Frequenzkanal des Referenz-MSS ist in acht Zeitschlitz unterteilt (siehe Abbildung 4.15). Man spricht von TDM^6 bzw. $TDMA^7$.

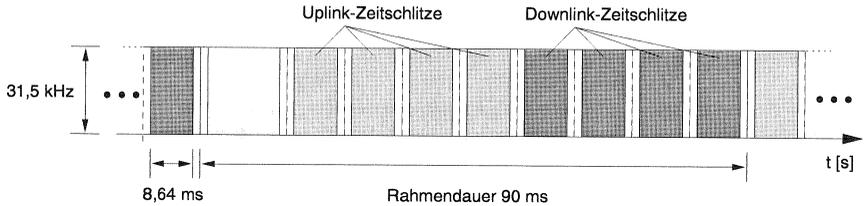


Abbildung 4.15: Zeitschlitz auf einem Frequenzkanal

Innerhalb eines Zeitschlitz werden die Daten als Datenpakete, sogenannte *Büschel* oder *Bursts*, übertragen. Da die ersten vier Zeitschlitz für den Uplink und die zweiten vier Zeitschlitz für den Downlink vorgesehen sind, ergeben sich vier TDMA/TDD⁸-Kanäle s_i , $1 \leq i \leq 4$, pro Frequenzkanal. Ein Zeitschlitz dauert 8,64 ms. Die Dauer eines TDMA-Rahmens beträgt $T_{Rahmen} = 90 \text{ ms}$.

Physikalische Kanäle

Ein physikalischer Kanal (PCH⁹) des Referenz-MSS besteht aus einem Uplink- und Downlink-Zeitschlitzpaar eines Frequenzkanals. Ein Frequenzkanal stellt vier PCH bereit. Das Referenz-MSS verfügt damit über $n_p = 96$ PCH, die gemäß Abbildung 4.16 mit PCH_i , $1 \leq i \leq n_p$, bezeichnet werden. Durch die räumliche Wiederbenutzung von PCH läßt sich die Anzahl der logischen Verkehrskanäle jedoch beträchtlich steigern.

4.4.2 Die Sicherungsschicht

Die wichtigste Aufgabe der Sicherungsschicht ist, den Bitstrom der Bitübertragungsschicht als Datenblock zu interpretieren und ihn ohne

⁶Time Division Multiplex

⁷Time Division Multiple Access

⁸Time Division Duplex

⁹Physical CHannel

s_1	PCH 1	PCH 5	PCH 9	PCH 13	...	PCH 89	PCH 93
s_2	PCH 2	PCH 6	PCH 10	PCH 14	...	PCH 90	PCH 94
s_3	PCH 3	PCH 7	PCH 11	PCH 15	...	PCH 91	PCH 95
s_4	PCH 4	PCH 8	PCH 12	PCH 16	...	PCH 92	PCH 96
	f_1	f_2	f_3	f_4	...	f_{23}	f_{24}

Abbildung 4.16: Physikalische Kanäle des Referenz-MSS

Fehler an die Vermittlungsschicht weiterzugeben. Sie stellt, neben der Flußsteuerung, Fehlererkennung und -korrektur, der Vermittlungsschicht Dienste für den Aufbau, Erhalt und Abbau von Sicherungsschichtverbindungen zur Verfügung.

Ferner beinhaltet sie das Zugriffsprotokoll für die Funkkanäle. Sie verwaltet dabei logische Kanäle, die auf den physikalischen Kanälen der Bitübertragungsschicht aufbauen. Zu unterscheiden sind zwei Arten von logischen Kanälen:

- Verkehrskanäle (TCH¹⁰): Sie dienen der Übertragung von Sprache und Daten.
- Steuerkanäle (CCH¹¹): Sie werden für die Übertragung von Signalisierungsdaten benötigt.

Die Verkehrskanäle des Referenz-MSS haben eine Nettodatenrate von 4.8 kbit/s. Jedem Verkehrskanal ist jeweils ein SACCH¹² beigeordnet.

Folgende Steuerkanäle werden im Referenz-MSS verwendet:

- ↓ **BCCH** Der *Broadcast Control Channel* verteilt Orientierungsinformationen an die Mobilstationen im Empfangsbereich.
- ↑ **RACH** Der *Random Access Channel* ermöglicht über ein Zufallszugriffsverfahren den Verbindungsaufbau und die Belegung eines SDCCH.
- ↓ **AGCH** Der *Access Grant Channel* wird benutzt, um einer Mobilstation einen TCH während des Verbindungsaufbaus zuzuweisen.

¹⁰Traffic **CH**annels

¹¹Control **CH**annels

¹²Slow **A**ssociated **C**ontrol **CH**annel

- ↕ **SACCH** Der *Slow Associated Control Channel* ist jedem Verkehrskanal beigeordnet und dient zur Übertragung von Steuerinformation und Meßwertreporten während einer Verbindung.
- ↕ **FACCH** Der *Fast Associated Control Channel* dient zur schnellen Signalisierung während einer Verbindung, insbesondere für den Handover-Vorgang.

(↑=nur Uplink, ↓=nur Downlink, ↕=Uplink und Downlink)

4.4.3 Die Vermittlungsschicht

Die Vermittlungsschicht des Referenz-MSS ist für die Einrichtung, den Betrieb und die Auslösung von Netzverbindungen zwischen Mobilstationen und Satelliten verantwortlich.

Dabei stellt sie die folgenden Funktionalitäten zur Verfügung:

- Mobilitätsverwaltung (MM¹³): Sie beinhaltet u.a. die Verwaltung des Aufenthaltsbereichs einer Mobilstation.
- Verbindungsverwaltung (CM¹⁴): Sie ist für den Aufbau, die Unterhaltung und den Abbau eines leitungsvermittelten Rufes zuständig.
- Funkbetriebsmittelverwaltung (RRM¹⁵): Sie stellt eine Reihe von Subfunktionen, wie z.B. Kanaluweisung, Bereitstellung von Meßwertreporten, Handover und Leistungssteuerung, bereit.

4.5 Das Vermittlungsschichtprotokoll des Referenz-MSS

Die Funktionen der Funkressourcenverwaltung und die entsprechenden Protokolle werden im folgenden ausführlich erläutert, da sie die Basis für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kanalvergabe- und Handover-Verfahren sind.

4.5.1 Verbindungsaufbau

Eine nicht aktive Mobilstation befindet sich im Zustand *Idle* (siehe Abbildung 4.17).

¹³Mobility Management

¹⁴Call Management

¹⁵Radio Resource Management

Initiiert der Teilnehmer einen Ruf, mißt die Mobilstation die Empfangspegel aller BCCH. Aufgrund der Messung der Empfangspegel aller möglichen PCH generiert sie eine Präferenzliste aller PCH, die PCH_list. Die PCH_list wird mit dem Signal CONNreq über den RACH, der dem BCCH mit dem höchsten Empfangspegel zugeordnet ist, an den entsprechenden Satelliten gesendet. Damit sind die gewählte Funkzelle und der entsprechende Korrekturfaktor der passiven Leistungssteuerung (siehe Kapitel 4.3.5) eindeutig bestimmt.

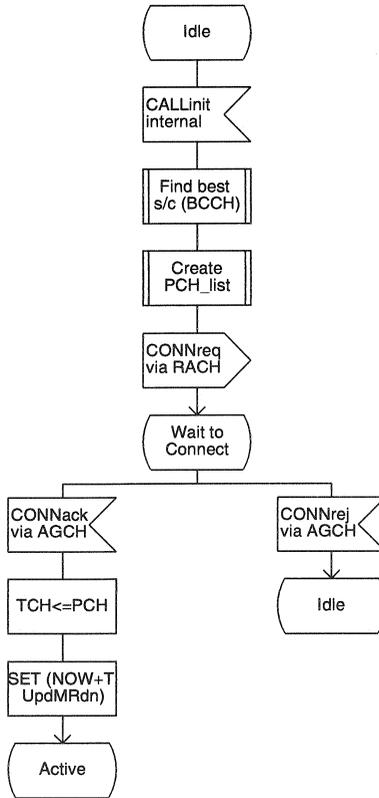


Abbildung 4.17: Mobilstation: Verbindungsaufbau

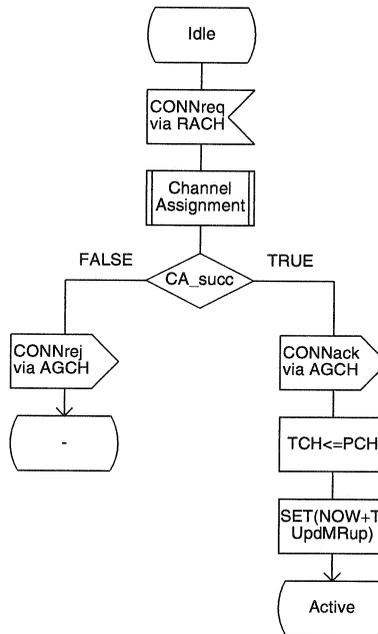


Abbildung 4.18: Referenzsatellit: Verbindungsaufbau

Um einen TCH einzurichten, wird im Satelliten, der sich zuvor seinerseits im Zustand *Idle* befunden hat, bei Erhalt des Signals CONNreq einen Kanalvergabealgorithmus aufgerufen (siehe Abbildung 4.18). Dieser bewertet alle in der PCH_list aufgeführten PCH nach vorgegeben Kriterien.

Wird ein geeigneter PCH gefunden, antwortet der Satellit mit CONNack über den AGCH. In diesem Fall wird ein Timer gesetzt, der die zyklische Abfrage von Meßwerten über die Verbindungsqualität des Uplinks gewährleistet. Die Schicht-3-Instanz des Satelliten wechselt in den Zustand *Active*. Wurde jedoch kein geeigneter PCH gefunden, antwortet sie der Mobilstation mit CONNrej und geht in den ursprünglichen Zustand *Idle* zurück.

Die Mobilstation setzt nach Erhalt des CONNack einen entsprechenden Timer für die Messung der Downlink-Verbindungsqualität und wechselt ihrerseits in den Zustand *Active*. Damit ist der logische Kanal TCH über den physikalischen Kanal PCH eingerichtet. Antwortet der Satellit mit CONN-

rej, geht die Mobilstation in den ursprünglichen Zustand *Idle* zurück. Eine Verbindung ist nicht zustande gekommen.

4.5.2 Verbindungsunterhaltung, Handover und Verbindungsabbau

Aufgrund der Mobilität der Mobilstationen und der Satelliten ändert sich der Störpegel auf jeder Verbindung ständig. Dies kann zur Verschlechterung der Verbindungsqualität auf den temporär zugewiesenen PCH führen.

Die Verbindungsqualität wird sowohl von den Mobilstationen als auch von den Satelliten ständig überwacht und in Meßwertreports (MR) festgehalten. Nach Erhalt des internen Signals UpdMRup aktualisiert der Satellit den Uplink-MR, schickt ihn mit dem Signal MRupData über den SACCH an die entsprechende Mobilstation, setzt den Timer für die nächste MR-Aktualisierung und geht in den Zustand *Active* zurück (siehe Abbildung 4.20).

Die Mobilstation verwendet den Uplink-MR zusammen mit dem entsprechenden Downlink-MR, den sie nach Erhalt des internen Signals UpdMRdn aktualisiert, für die Bewertung der bestehenden Verbindung und möglicher Alternativen (siehe Abbildung 4.19).

Um dem Abbruch einer Verbindung vorzubeugen, wird der Funkkanal, die Funkzelle oder der Satellit bei einer nicht ausreichenden Verbindungsqualität gewechselt, ohne daß das laufende Gespräch unterbrochen wird. Dieser Vorgang wird *Handover* genannt.

Wird kein Handover eingeleitet, bleibt die Mobilstation im Zustand *Active*. Falls jedoch ein Handover nötig ist, generiert sie eine PCH'-list (siehe Kapitel 4.5.1), schickt diese mit einem HOREq über den FACCH an ihre Partnerinstanz im Satelliten und wechselt in den Zustand *Wait for Handover*.

Findet der Satellit nach Erhalt des Signals HOREq einen ausreichend guten PCH', antwortet er der Mobilstation mit HOack über den FACCH, richtet den TCH über den neuen PCH' ein und gibt damit den alten PCH frei, setzt den Timer für die MR-Aktualisierung und geht in den Zustand *Active* zurück. Entsprechendes geschieht in der Mobilstation.

Antwortet der Satellit mit HOREj und geht in den ursprünglichen Zustand *Active* zurück, sendet die Mobilstation im Falle, daß keine neuen Handover-Versuche erlaubt sind, ein DISCreq über den FACCH an den Satelliten und löst die Verbindung. Entsprechendes geschieht im Satelliten. Sind aber

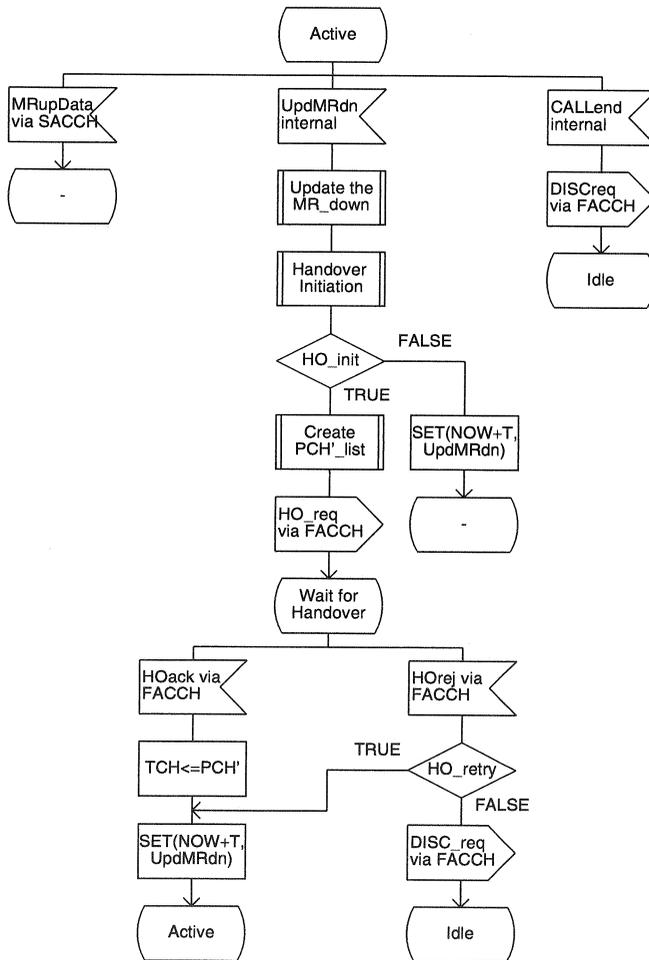


Abbildung 4.19: Mobilstation: Handover, Verbindungsunterhaltung und -abbau

weitere Handover-Versuche erlaubt, setzt die Mobilstation den Timer für die MR-Aktualisierung und geht in den Zustand *Active* zurück.

Bei Gesprächsende schickt die Mobilstation ein DISCreq über den FACCH an den Satelliten und gibt, wie auch der Satellit, den Funkkanal frei.

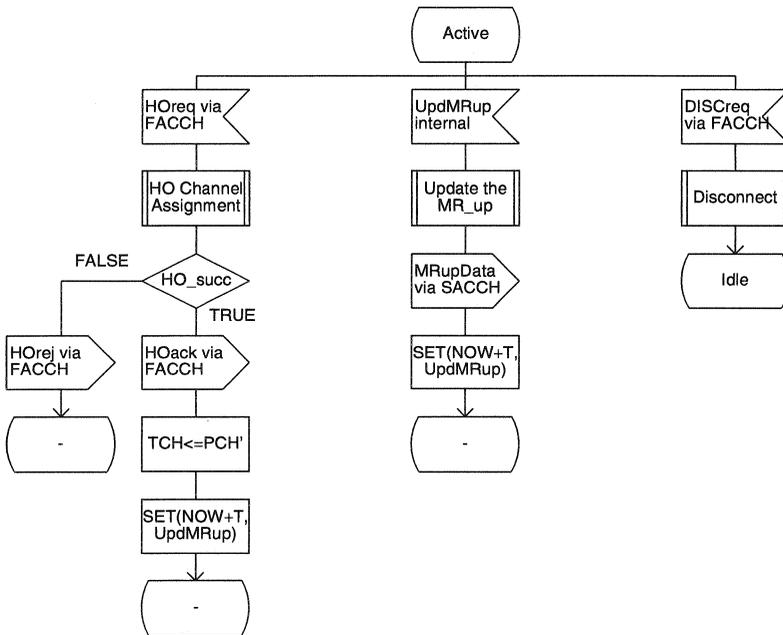


Abbildung 4.20: Referenzsatellit: Handover, Verbindungsunterhalt und -abbau

4.6 Das Transceiver-Feld des Referenzsatelliten

Das Transceiver-Feld des Referenzsatelliten hat die Aufgabe, Informationspakete der einzelnen Teilnehmerverbindungen, die als Paketströme am Koppelfeld des Transceiver-Feldes vorliegen, auf der gewünschten Frequenz und dem gewünschten Zeitschlitz dem Koppelfeld der Antennensteuerung vorverstärkt zur Verfügung zu stellen. Die entsprechenden Signale werden dann an die entsprechende Phased-Array Antenne geleitet, verstärkt und über die Antennensteuerung in eine bestimmte Funkzelle abgestrahlt.

4.6.1 Transceiver

Das Transceiver-Feld besteht aus N_t Transceivern. Ein Transceiver hat die Funktion eines Senders und Empfängers. Pro Zeitschlitzrahmen empfängt

und sendet er jeweils vier Bündel, wobei jeweils ein Uplink- und Downlink-Zeitschlitzpaar einer Teilnehmerverbindung zugeordnet sind und die entsprechenden Bündel auf demselben Frequenzkanal empfangen bzw. gesendet werden.

In der Abbildung 4.21 sind die Betriebsphasen eines Transceiver-Feldes des Referenzsatelliten abgebildet. Es seien q und m zwei Teilnehmerverbindungen. Der Transceiver 2 sendet zyklisch jeweils ein Bündel auf dem Frequenzkanal f_4 zu Mobilstation q und auf dem Frequenzkanal f_6 zu Mobilstation m . Im selben Rahmen empfängt er zeitversetzt die beiden Uplink-Bündel der Mobilstationen q und m auf den entsprechenden Frequenzkanälen.

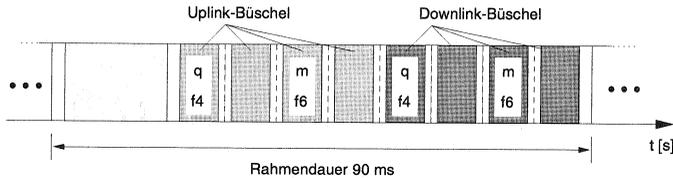


Abbildung 4.21: Von Transceiver 2 gesendete und empfangene Bündel

In der Abbildung 4.21 ist die Belegung eines Transceiver-Rahmens gegeben. Im Gegensatz zum Zeitrahmen eines Frequenzkanals (siehe Abbildung 4.15), der die prinzipielle zeitliche Aufteilung der Funkressourcen des Referenz-MSS festlegt, gibt der Transceiver-Rahmen die Struktur für die frequenzunabhängige Zeitschlitzbelegung eines Transceivers vor. Abbildung 4.21 veranschaulicht, daß ein Transceiver von Zeitschlitz zu Zeitschlitz den Frequenzkanal wechseln kann.

4.6.2 Transceiver-Feld

Der Aufbau des Transceiver-Feldes des Referenzsatelliten ist in der Abbildung 4.22 zu sehen. Es sind nur die Downlink-Bündel abgebildet. Sowohl die Zuordnung der Verkehrskanäle auf die Transceiver und Zeitschlitz, als auch deren Zuordnung zu den Antennen bzw. Zellen ist dynamisch.

Die Funktionsweise wird anhand des folgenden Beispiels erläutert. Es seien p , q , m und n vier aktive Teilnehmerverbindungen des Referenzsatelliten.

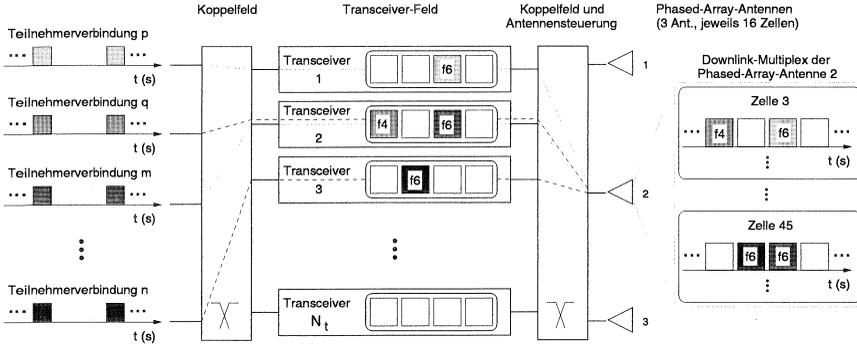


Abbildung 4.22: Aufbau des Transceiver-Feldes des Referenzsatelliten

Alle vier Mobilstationen befinden sich in der Ausleuchtzone der Phased-Array Antenne 2, p und q in Zelle 3 und m und n in Zelle 45.

Über ein Koppelfeld werden die ankommenden Informationspakete an die N_t Transceiver weitergeleitet. Die Verbindung p verwendet den PCH_{23} über den Transceiver 1, die Verbindung q den PCH_{13} über den Transceiver 2, die Verbindung m den PCH_{23} über den Transceiver 2, und die Verbindung n den PCH_{22} über den Transceiver 3.

Wie aus Abbildung 4.16 ersichtlich, ist PCH_{13} der erste Zeitschlitz des Frequenzkanals f_4 , PCH_{22} der zweite Zeitschlitz des Frequenzkanals f_6 und PCH_{23} der dritte Zeitschlitz des Frequenzkanals f_6 .

Es ist also möglich, über dieselbe Phased-Array Antenne zwei Mobilstationen p und m auf dem gleichen PCH zu versorgen. Aufgrund der resultierenden Gleichkanalinterferenz müssen diese Mobilstationen ausreichend weit voneinander entfernt sein.

4.6.3 Transceiver-Belegung und Sendeleistungsbegrenzung

Die Funktionsweise des Transceiver-Feldes des Referenzsatelliten ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Vergabe der Satellitenressourcen. Dies ist notwendig, da es aufgrund der begrenzten Sendeleistung der Referenzsatelliten bei der Vergabe von Ressourcen Einschränkungen gibt.

Es sei $P(s, a, t)$ die Leistung, die der Transceiver t für das Senden eines Bündels über die Phased-Array Antenne a benötigt. Sie wird im Referenz-

MSS in relativen Leistungseinheiten (LE) angegeben, wobei 1 LE der Sendeleistung eines Büschels entspricht.

Die Büschelsendeleistung pro Antenne und Zeitschlitz $P(s, a)$ entspricht der Summe der Büschelsendeleistungen, die im Zeitschlitz s an die Phased-Array Antenne a abgegeben werden.

$$P(s, a) = \sum_{t=1}^{N_t} P(s, a, t) \quad (4.18)$$

Die Büschelsendeleistung eines Satelliten im Zeitschlitz s , $P(s)$, entspricht der Summe der Büschelsendeleistungen pro Antenne in diesem Zeitschlitz.

$$P(s) = \sum_{n_a=1}^{N_a} P(s, a) \quad (4.19)$$

wobei im Referenzsatelliten $N_a = 3$ gilt. Es gelten die folgenden einschränkenden Bedingungen:

- Die maximale Sendeleistung, die in einem Zeitschlitz an eine Phased-Array Antenne abgegeben werden kann, beträgt $P_{a \max}$. In diesem Fall sendet der Satellit im Zeitschlitz s insgesamt $N_{t \ a \ max}$ Bursts über die Antenne a .

$$P(s, a) \leq P_{a \max} \quad (4.20)$$

- Die maximale Sendeleistung, die in einem Zeitschlitz pro Satellit abgegeben werden kann, beträgt $P_{sat \ max}$. In diesem Fall sendet der Satellit im Zeitschlitz s insgesamt $N_{t \ sat \ max}$ Bursts über alle drei Antennen.

$$P(s) \leq P_{sat \ max} \quad (4.21)$$

Hierbei gilt

$$P_{sat \ max} = \lceil x \cdot P_{a \ max} \rceil \quad (4.22)$$

Bei $x = 1,5$ würde ein Satellit beispielsweise all seine Ressourcen über zwei Phased-Array Antennen bereitstellen können. Die dritte Antenne würde in diesem Fall keine Mobilstationen versorgen können.

Anhand der Abbildung 4.23, die an das Beispiel in Kapitel 4.6.2 anknüpft, kann die Büschelsendeleistung pro Zeitschlitz und Phased-Array Antenne

abgelesen werden. Jeder Würfel entspricht einer Sendeleistung von 1 LE. Eine Sendeleistung von i LE entspricht i gleichzeitig gesendeten Bündeln. Senden alle Transceiver gleichzeitig über dieselbe Antenne (die hellgrauen LE-Würfel in Abbildung 4.23), ist die maximal mögliche Bündelsendeleistung pro Antenne $P_{a\ max} = N_t$ LE erreicht.

In die Gesamtsendeleistung des Referenzsatelliten im Zeitschlitz 1 fließt zusätzlich die Sendeleistung ein, die an der Antenne 2 für die Verbindung q und an der Antenne 3 abgegeben wird (der dunkelgraue LE-Würfel).

Die maximale Bündelsendeleistung $P_{sat\ max}$ wäre bei $x = 1,5$ für $N_t > 1$ im Zeitschlitz 1 nicht erreicht, da gilt

$$P(1) = N_t + 2\ LE \leq P_{sat\ max} = \lceil 1,5 \cdot N_t \rceil LE \tag{4.23}$$

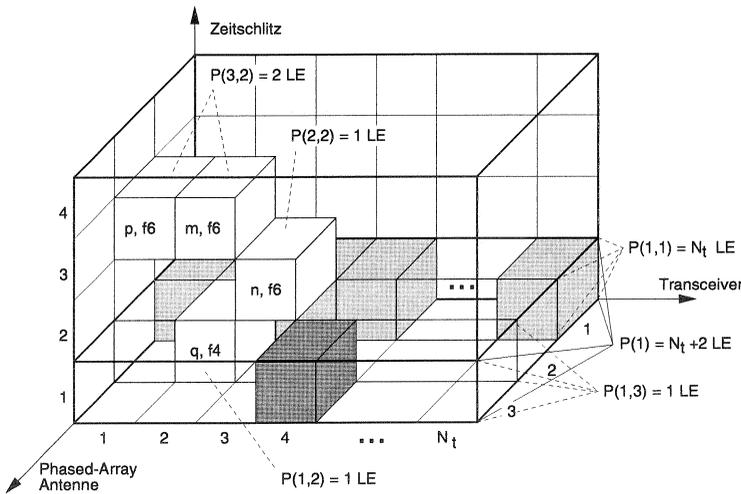


Abbildung 4.23: Bündelsendeleistung pro Zeitschlitz und Antenne

4.7 Verkehrsmodellierung

Das Teilnehmergebiet, nachfolgend Gesamtgebiet genannt, setzt sich aus einem oder mehreren Teilgebieten zusammen, innerhalb derer die Mobil-

stationen uniform verteilt sind. Die Teilgebiete können sich überlagern. Jedes Teilgebiet ist durch seine minimale und maximale geographische Länge, $\lambda_{i \min}$ und $\lambda_{i \max}$, und seine minimale und maximale geographische Breite, $\varphi_{i \min}$ und $\varphi_{i \max}$, definiert (siehe Abbildung 4.24). Das Verkehrsangebot in jedem der Teilgebiete wird mit drei Parametern vollständig beschrieben: dem mittleren Verkehrsangebot pro Flächeneinheit, Υ_i , dem mittleren Verkehrsangebot pro Mobilstation, ρ_i , und der mittleren Gesprächsdauer, β_i .

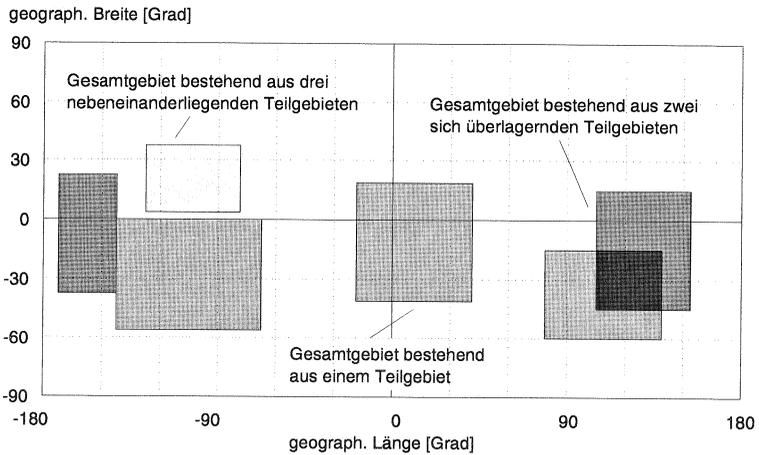


Abbildung 4.24: Verkehrsmodellierung: Teilgebiete und Gesamtgebiet

4.7.1 Parameter der Teilgebiete

Der Flächeninhalt des Teilgebiets i , S_i , berechnet sich zu

$$S_i = \int_{\lambda_{i \min}}^{\lambda_{i \max}} \int_{\varphi_{i \min}}^{\varphi_{i \max}} R_e^2 \cos \varphi \, d\varphi \, d\lambda \quad (4.24)$$

bzw.

$$S_i = R_e^2 (\lambda_{i \max} - \lambda_{i \min}) (\sin \varphi_{i \max} - \sin \varphi_{i \min}) \quad (4.25)$$

wobei R_e der Erdradius ist. Bei einem vorgegebenen mittleren Verkehrsangebot pro Flächeneinheit im Teilgebiet i , Υ_i , berechnet sich das mittlere Verkehrsangebot im Teilgebiet i zu

$$A_i = \Upsilon_i \cdot S_i \quad (4.26)$$

Die mittlere Anzahl aktiver Mobilstationen im Teilgebiet i , N_i , berechnet sich zu

$$N_i = \frac{A_i}{\rho_i} = \frac{\Upsilon_i \cdot S_i}{\rho_i} \quad (4.27)$$

wobei ρ_i das mittlere Verkehrsangebot pro Mobilstation im Teilgebiet i ist. Innerhalb des Teilgebiets i werden neue Gespräche mit einer negativ exponentiell verteilten Zwischenankunftszeit, Λ_i^{-1} , generiert. Da alle Mobilstationen des Teilgebiets i eine negativ exponentiell verteilte Gesprächsdauer mit dem Mittelwert β_i aufweisen, berechnet sich Λ_i^{-1} zu

$$\Lambda_i = \frac{A_i}{\beta_i} \quad (4.28)$$

4.7.2 Der Verkehrsgenerierungsalgorithmus

Der Verkehrsgenerierungsalgorithmus weist einer Mobilstation zu Gesprächsbeginn eine zufällige Position (λ_{rnd} , φ_{rnd}) und eine Gesprächsdauer zu. Er besteht aus den folgenden vier Schritten:

1. Definiere ϕ_{rnd} als uniform verteilte Zufallsvariable mit $\phi_{i\min} \leq \phi_{rnd} \leq \phi_{i\max}$, $\phi_{i\min} = \sin\varphi_{i\min}$ und $\phi_{i\max} = \sin\varphi_{i\max}$. Definiere λ_{rnd} als uniform verteilte Zufallsvariable mit $\lambda_{i\min} \leq \lambda_{rnd} \leq \lambda_{i\max}$.
2. Ziehe bei Ankunft eines neuen Gesprächs die Zufallsvariablen λ_{rnd} und ϕ_{rnd} .
3. Führe die Transformation $\varphi_{rnd} = \arcsin\phi_{rnd}$ durch.
4. Weise dem neuen Teilnehmer die Position (λ_{rnd} , φ_{rnd}) zu.

Nachfolgend soll bewiesen werden, daß dieser Algorithmus Mobilstationen in dem vorgegebenen Teilgebiet gleichmäßig verteilt.

4.7.3 Validierung des Verkehrsgenerierungsalgorithmus

Es sei ϕ_{rnd} eine uniform verteilte Zufallsvariable, $p_i(\phi_{rnd})$ ihre VDF¹⁶ gegeben mit

$$p_i(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{\phi_{i\max} - \phi_{i\min}} & \text{für } \phi_{i\min} \leq \phi \leq \phi_{i\max} \\ 0 & \text{für } \phi < \phi_{i\min} \vee \phi > \phi_{i\max} \end{cases} \quad (4.29)$$

und $\varphi_{rnd} = \arcsin\phi_{rnd}$. Die VDF $g_i(\varphi_{rnd})$ der Zufallsvariablen φ_{rnd} im Teilgebiet i berechnet sich nach [26] dann zu

$$\begin{aligned} g_i(\varphi_{rnd}) &= \frac{p(\phi_{rnd})}{\left| \frac{d\varphi_{rnd}}{d\phi_{rnd}} \right|} \\ &= \begin{cases} \frac{\cos\varphi_{rnd}}{\sin\varphi_{i\max} - \sin\varphi_{i\min}} & \text{für } \varphi_{i\min} \leq \varphi_{rnd} \leq \varphi_{i\max} \\ 0 & \text{für andere } \varphi_{rnd} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.30)$$

wobei $\varphi_{i\min} = \arcsin\phi_{i\min}$ und $\varphi_{i\max} = \arcsin\phi_{i\max}$ ist.

Die mittlere Anzahl von Mobilstationen in einem beliebigen durch die Koordinaten $\lambda_{test\min}$, $\lambda_{test\max}$, $\varphi_{test\min}$ und $\varphi_{test\max}$ definierten *Testgebiet*, N_{test} , das innerhalb des Teilgebiets i liegt, und dessen Flächeninhalt, S_{test} , sind durch

$$N_{test} = \frac{N_i}{\lambda_{i\max} - \lambda_{i\min}} \cdot \int_{\lambda_{test\min}}^{\lambda_{test\max}} \int_{\varphi_{test\min}}^{\varphi_{test\max}} g_i(\varphi) d\varphi d\lambda \quad (4.31)$$

und

$$S_{test} = R_e^2 \int_{\lambda_{test\min}}^{\lambda_{test\max}} \int_{\varphi_{test\min}}^{\varphi_{test\max}} \cos\varphi d\varphi d\lambda \quad (4.32)$$

gegeben.

Das Verkehrsangebot pro Flächeneinheit in dem vorgegebenen Bereich des Teilgebiets i , Υ_{test} , berechnet sich nach (4.26) und (4.27) zu

¹⁶Verteilungsdichtefunktion

$$\begin{aligned}
\Upsilon_{test} &= \frac{\rho_i \cdot N_{test}}{S_{test}} \\
&= \frac{\rho_i \cdot N_i \int_{\lambda_{test\ min}}^{\lambda_{test\ max}} \int_{\varphi_{test\ min}}^{\varphi_{test\ max}} g(\varphi) d\varphi d\lambda}{R_e^2(\lambda_{i\ max} - \lambda_{i\ min}) \int_{\lambda_{test\ min}}^{\lambda_{test\ max}} \int_{\varphi_{test\ min}}^{\varphi_{test\ max}} \cos\varphi d\varphi d\lambda} \\
&= \frac{\rho_i \cdot N_i}{R_e^2(\lambda_{i\ max} - \lambda_{i\ min})(\sin\varphi_{i\ max} - \sin\varphi_{i\ min})} \\
&= \frac{\rho_i \cdot N_i}{S_i} = \Upsilon_i \tag{4.33}
\end{aligned}$$

Es ist unabhängig vom Flächeninhalt oder der Lage des Testgebietes. Die Mobilstationen sind somit innerhalb eines Teilgebiets i gleichverteilt.

4.7.4 Nicht gleichverteiltes Verkehrsangebot

Durch die Überlagerung von Teilgebieten sind beliebige, nicht gleichverteilte Verkehrsangebote im Gesamtgebiet definierbar.

Das Verkehrsangebot pro Flächeneinheit Υ in einem beliebigen Bereich, der innerhalb der Teilgebiete i liegt, wobei $1 \leq i \leq n$ gilt, berechnet sich zu

$$\Upsilon = \sum_{i=1}^n \Upsilon_i \tag{4.34}$$

Für die mittlere Anzahl von Mobilstationen N im gleichen Bereich gilt

$$N = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{\lambda_{i\ max} - \lambda_{i\ min}} \cdot g_i(\varphi) \right) d\varphi d\lambda \tag{4.35}$$

wobei die Bereichsgrenzen durch die Koordinaten λ_{min} , λ_{max} , φ_{min} und φ_{max} gegeben sind.

4.8 Verkehrskapazität des MSS

Die *Verkehrskapazität* eines MSS ist definiert als die maximale Anzahl der Verbindungen, die mit einer gegebenen Gesprächsverlust- und Gesprächsab-

bruchswahrscheinlichkeit und einem garantierten CIR bzw. BER¹⁷ bei gegebenem Verkehrsangebot und gegebener Systembandbreite bedient werden können.

Die Verkehrskapazität eines MSS ist durch die dem System zur Verfügung stehende Bandbreite, die Anzahl der Transceiver pro Satellit und die maximale Sendeleistung pro Antenne und Satellit begrenzt. Ebenso hängt sie von der Verteilung des angebotenen Verkehrs und der geographischen Lage des zu versorgenden Gebietes ab.

4.8.1 Kapazitätsbegrenzung

Eine Begrenzung der Verkehrskapazität eines MSS aufgrund einer unzureichenden Anzahl von Transceivern oder nicht ausreichender Gesamtsendeleistung eines Satelliten wird *Kapazitätsbegrenzung* genannt.

In diesem Fall würde auf einem oder mehreren Funkkanälen der resultierende Signalstörabstand ausreichen, um zusätzliche Verbindungen bereitzustellen, es steht jedoch kein freier Transceiver zur Verfügung oder die maximal mögliche Sendeleistung des Satelliten ist bereits erreicht. Die vorhandenen Hardware-Ressourcen des Satelliten sind in diesem Fall bereits vollständig belegt.

4.8.2 Interferenzbegrenzung

Eine lokale oder globale Begrenzung der Verkehrskapazität eines MSS aufgrund zu hoher Gleichkanalinterferenz wird als *Interferenzbegrenzung* bezeichnet. Ursache für die Gleichkanalinterferenz ist die Wiederverwendung von Funkkanälen im MSS.

Im Falle einer Interferenzbegrenzung stehen einem Satelliten zwar freie Transceiver und eine Sendeleistungsreserve zur Verfügung, um eine zusätzliche Verbindung bereitzustellen, jedoch übersteigt die gemessene Störleistung auf allen potentiell vergeblichen Funkkanälen in der gegebenen Zelle einen vorgegebenen Maximalwert. Der kanalfordernden Mobilstation kann daher kein Kanal zugewiesen werden, der die geforderten Qualitätskriterien erfüllt.

¹⁷Bit Error Ratio

Das Simulationswerkzeug MoSSS

Um die Leistungsfähigkeit eines MSS zu bewerten, bieten sich die folgenden Verfahren an:

- Messungen am realen System
- Modellierung und analytische Berechnung
- Modellierung und rechnergestützte Simulation

Experimente und Messungen an einem realen MSS erlauben genaue Aussagen über die Leistungsfähigkeit dieses Systems bzw. der untersuchten Verfahren und Algorithmen. Trotz einer engen Zusammenarbeit mit Motorola SSTG, dem Hersteller des Satellitensystems IRIDIUM, im Rahmen des Projektes ACTS INSURED¹ waren experimentelle Eingriffe und Parameterveränderungen am IRIDIUM-System in einem für diese Arbeit benötigten Umfang nicht möglich.

Analytische Modelle erfordern im Regelfall eine starke Vereinfachung des Systems. Da MSS ein in hohem Grad dynamisches Systemverhalten aufweisen und ihre Leistungsfähigkeit von Mobilität, Funkausbreitung, Antennencharakteristika und variablen Verkehrsangeboten in vielfältiger Weise abhängig ist, ist eine umfassende analytische Modellierung schwierig und teilweise sogar unmöglich. Daher dienen analytische Untersuchungen im Regelfall dazu, prinzipielle Aussagen über ein MSS zu machen.

Die rechnergestützte Simulation dagegen erlaubt eine aussagekräftige und realistische Leistungsbewertung von MSS. Dazu werden die für die Leistungsbewertung relevanten Systemkomponenten und -eigenschaften detailliert modelliert. Jedoch sollte auf eine Validierung von Simulationsergebnissen durch analytische Betrachtungen oder, soweit möglich, Messungen nicht verzichtet werden.

¹INtegrated Satellite-UMTS Real Environment Demonstrator

Für die Leistungsbewertung von MSS wurde im Rahmen dieser Arbeit das Simulationswerkzeug *MoSSS*² entwickelt, das im folgenden genauer beschrieben wird.

5.1 Konzept und Entwurfsvorgaben

Das Simulationswerkzeug *MoSSS* basiert auf dem Konzept der *stochastischen Simulation*, wobei bestimmte Systemgrößen als Zufallsvariablen betrachtet bzw. durch Zufallsprozesse modelliert werden. Die Leistungsfähigkeit eines MSS wird durch Messung und statistische Auswertung dieser Zufallsgrößen ermittelt.

Dabei werden nur Zustandsübergänge des Systems zu bestimmten Zeitpunkten betrachtet. Da diese Zustandsübergänge durch bestimmte Ereignisse initiiert werden, spricht man von *ereignisgesteuerter Simulation*.

Beim Entwurf des *MoSSS* wurden die folgenden Vorgaben gemacht:

- Der im Kapitel 3 beschriebene Satellitenfunkkanal und das in Kapitel 4 vorgestellte Referenz-MSS sollen vollständig und detailliert implementiert werden.
- In SDL³ formal spezifizierte Protokolle sollen einfach implementierbar sein.
- Ausgewählte Systemeigenschaften wie z.B. Sendeleistung, Simulationsgebiet, Teilnehmerverteilung und Verkehrsangebot sollen frei parametrisierbar sein.
- Der Simulator sollte modular aufgebaut sein. Module, wie z.B. Kanalvergabe- und Handover-Verfahren, sollten austauschbar sein.
- Der Simulator muß speicher- und laufzeiteffizient sein, um auch Verkehrskapazitätsuntersuchungen des Gesamt-MSS vornehmen zu können.

5.2 Aufbau und Funktionalität

Die programmtechnische Grundlage des Simulationswerkzeuges *MoSSS* bildet die C++-Klassenbibliothek CNCL⁴. Durch die Verwendung des CNCL-

²Mobile Satellite System Simulator

³Specification and Description Language

⁴Communication Networks Class Library

Klassenkonzeptes wurde ein modularer Aufbau des *MoSSS* möglich (siehe Abbildung 5.1).

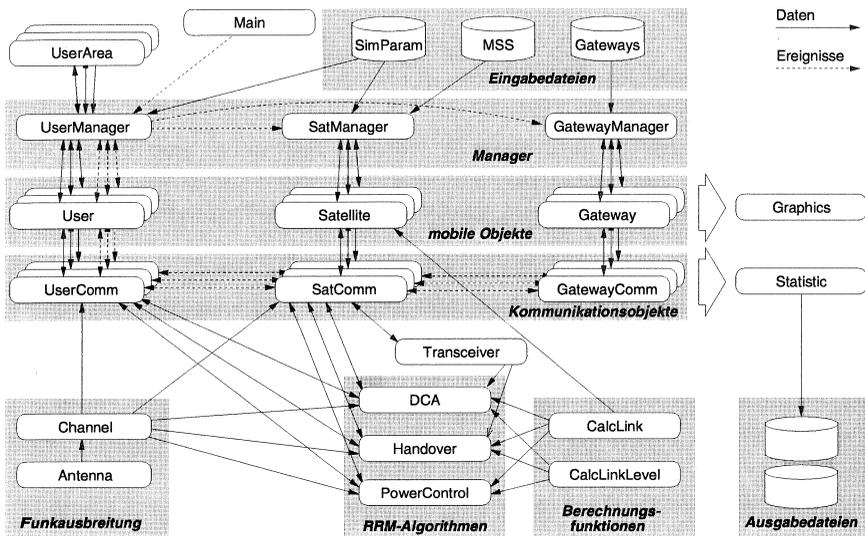


Abbildung 5.1: Aufbau des MoSSS

Das eigentliche Simulationstool *MoSSS* wird durch drei weitere Programme ergänzt:

- Die graphische Benutzerschnittstelle *GMoSSS* für die Visualisierung der Satellitenmobilität in zwei- und dreidimensionaler Ansicht. Sie wurde in der Programmiersprache C realisiert und basiert auf *XWindows*.
- Das Analysewerkzeug *LevelMoSSS* für die Untersuchung und Visualisierung der Ausleuchtung von Satellitenantennen in beliebigen Gebieten.
- Das kommerzielle SDL-Entwicklungswerkzeug *SDT*⁵ für die formale Spezifikation und Validierung von Kommunikationsprotokollen.

⁵SDL Tool

Die Komponenten des *MoSSS* und ihre Funktionalität werden im folgenden vorgestellt.

5.2.1 Manager

Die drei Manager *SatManager*, *GatewayManager* und *UserManager* initiieren und verwalten jeweils die Satelliten, Gateways und Mobilstationen des MSS.

Der *SatManager* ist für die Mobilität des MSS zuständig, wobei auch die Erdrotation berücksichtigt wird. Er sendet dazu in einem parametrisierbaren Zeitschritt, der auf 1 s voreingestellt wurde, *Events*⁶ an jeden Satelliten, und veranlaßt so die Neuberechnung der Satellitenpositionen.

Im Gegensatz zum *SatManager* bzw. *GatewayManager*, die einmalig zu Simulationsbeginn alle Satelliten bzw. Gateways anlegen, generiert der *UserManager* dynamisch Mobilstationen anhand der Parameter des Verkehrsangebotes der einzelnen Teilgebiete, die frei parametrisierbar sind und in den Instanzen der Klasse *UserArea* verwaltet werden. Während einer Simulation ist eine Mobilstation, repräsentiert durch jeweils eine Instanz der Klasse *User* und *UserComm*, also nur dann vorhanden, wenn sie eine Verbindung aufbauen will bzw. betreibt; nach Abbau der Verbindung existiert das Objekt nicht mehr.

5.2.2 Mobile Objekte

Es gibt drei Arten von mobilen Objekten: *Satellite*, *Gateway* und *User*.

Jeweils eine Instanz der Klasse *Satellite* repräsentiert einen Satelliten mit seinen physikalischen Eigenschaften, wie z.B. seiner momentanen geographischen Position und Geschwindigkeit, seiner Antennenkonfiguration, sowie den aktuellen Listen der sichtbaren Mobilstationen und Gateways. In dieser Klasse ist auch die Funktionalität für die Berechnung der realistischen Satellitenbahnen implementiert.

Jede Instanz der Klasse *Gateway* enthält die Position des Gateways und die Liste der sichtbaren Satelliten. Die Position des Gateways ändert sich nicht. Jede Instanz der Klasse *User* repräsentiert eine Mobilstation mit ihrer Benutzernummer, ihrer geographischen Position, ihrer Gesprächsdauer und der Liste der sichtbaren Satelliten. Sie wird jeweils zu Gesprächsbeginn generiert und nach Gesprächsende gelöscht. Da die Eigenbewegung der Mobil-

⁶Ereignisse

stationen im Vergleich zu der Satelliten- und Erdrotationsgeschwindigkeit marginal ist, wird sie vernachlässigt.

5.2.3 Kommunikationsobjekte

Jedem mobilen Objekt ist jeweils ein entsprechendes Kommunikationsobjekt vom Typ *SatComm*, *GatewayComm* oder *UserComm* zugeordnet.

Jede Instanz der Klasse *SatComm* verwaltet die parametrisierbaren Funkbetriebsmittel des entsprechenden Satelliten, wie z.B. Transceiver, Zeitschlitze und Frequenzkanäle, Sendeleistungen, sowie die Anzahl der Mobilstationen, die mit diesem Satelliten verbunden sind, und die entsprechenden Verkehrskanäle. Dabei ist das Transceiver-Feld eines Satelliten als separate Klasse *Transceiver* implementiert. Jedes *SatComm* ist ständig mit einem der *GatewayComm* verbunden.

Zwischen einer *SatComm*-Instanz und einer oder mehreren *UserComm*-Instanzen läuft das Kommunikationsprotokoll für den Gesprächsaufbau, -unterhalt und -abbau ab. Daher ist hier der Protokollstapel der Luftschnittstelle des Referenz-MSS implementiert. Zu Gesprächsbeginn schickt eine *UserComm*-Instanz an sich selbst ein *Event*, das nach Ablauf der Gesprächszeit eintrifft und so den Gesprächsabbau einleitet. Die Gesprächsdauern sind dabei negativ exponentiell verteilt.

Eine *UserComm*-Instanz ist auch für die Leistungssteuerung, die Erstellung von Meßwertreports und die Initiierung des Handover-Prozesses zuständig.

5.2.4 Algorithmen für die Funkressourcenverwaltung

Die Algorithmen für die Funkkanalwahl, den Handover und die Leistungssteuerung sind in den Klassen *DCA*, *Handover* und *PowerControl* implementiert.

Die gewünschte Funktionalität wird im Rahmen des Protokollablaufs von den Kommunikationsobjekten aufgerufen. Aufgrund der Modularität des *MoSSS* können neue Algorithmen einfach implementiert werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten RRM-Algorithmen werden in den Kapiteln 7 und 8 detailliert vorgestellt.

5.2.5 Funkausbreitung

In den beiden Klassen *Channel* und *Antenna* wurde die Funktionalität für die Empfangspegel- und Interferenzberechnung implementiert.

Das in den Kapiteln 3.2 und 3.3 vorgestellte Funkkanalmodell ist vollständig in der Klasse *Channel* implementiert. Sie stellt auch die Funktionalität für die Berechnung des Empfangspegels des Nutz- und Bakensignals, des Ausbreitungsverlustes und des EIRP, sowie der Gleichkanalinterferenzen und der Störpegelabstände nach Kapitel 3.4 bereit. Ändern die Satelliten des MSS ihre Position oder beginnt oder beendet ein Teilnehmer ein Gespräch, wird mit Hilfe einer Instanz dieser Klasse die neue Interferenzsituation im System berechnet.

Der Antennengewinn innerhalb einer Zelle wird von einer Instanz der Klasse *Antenna* entsprechend Kapitel 4.3 berechnet.

5.2.6 Berechnungsfunktionen

Die **Berechnungsfunktionen** *CalcLink* und *CalcLinkLevel* fassen alle anderen Funktionen zur Berechnung der geometrischen und pegelbezogenen Werte zusammen:

- Entfernung zwischen einem Satelliten und einer Mobilstation bzw. einem Gateway
- Elevations- und Azimutwinkel eines Satelliten bzgl. der Position einer Mobilstation bzw. eines Gateways
- Liste der von der Position einer Mobilstation bzw. eines Gateways sichtbaren Satelliten unter einem vorgegebenen Elevationswinkel
- Liste der von der Position eines Satelliten sichtbaren Mobilstationen bzw. Gateways unter einem vorgegebenen Elevationswinkel
- Liste der n besten Satelliten von der Position einer Mobilstation bzw. eines Gateways. Das Kriterium ist alternativ die Entfernung oder der Empfangspegel.
- Transformationen von polaren in kartesische Koordinaten und umgekehrt
- Addition, Subtraktion und Negation von in Polarkoordinaten gegebenen Vektoren
- Skalar- und Vektorprodukte von in Polarkoordinaten gegebenen Vektoren

5.2.7 Statistische Auswertung

In der Simulation wird eine Reihe von Zufallsgrößen gemessen. Dies sind u.a. die Anzahl der Gesprächsneuankünfte und -abbrüche, der Handover-

Ereignisse, der blockierten Verbindungsaufbauversuche, sowie die Verteilungen relevanter Leistungskenngrößen wie z.B. der Empfangspegel und der Störpegelabstände. Die Klasse *Statistic* dient der Aufbereitung und Speicherung dieser Simulationsergebnisse.

5.2.8 Graphikschnittstelle

Die Klasse *Graphic* ist die Schnittstelle des *MoSSS* zum unabhängig ablaufenden Programm *GMoSSS*, welches die graphische Benutzerschnittstelle bereitstellt.

Die zu visualisierenden Daten werden vom *MoSSS* in einem gemeinsam genutzten Speicherbereich abgelegt und vom *GMoSSS* ausgelesen. Auf diese Art können auch Kommandos des Benutzers vom *GMoSSS* an den *MoSSS* kommuniziert werden.

5.3 Der Simulationsprozeß

Um die Leistungsfähigkeit der neuen Kanalvergabe- und Handover-Strategien für verschiedene Ausbaustufen und Parametrisierungen des Referenz-MSS simulativ untersuchen und ihre Parameter optimieren zu können, wurde der folgende Simulationsprozeß definiert (siehe Abbildung 5.2).

Die Kommunikationsprotokolle des Referenz-MSS werden in SDL formal spezifiziert und mit Hilfe des kommerziellen Programms SDT validiert. Nach einer Übersetzung des SDL-Codes in C++ werden die nun CNCL-konformen Protokolle in den *MoSSS* implementiert.

Im Rahmen der simulativen Untersuchungen dient die graphische Darstellung der Systemmobilität und -ausleuchtung der visuellen Validierung des parametrisierten MSS.

Die gewonnenen Simulationsergebnisse können nun anhand theoretischer Analysen validiert werden. Anhand der gewonnenen Simulationsergebnisse wird die Leistungsfähigkeit der untersuchten Strategien und Verfahren bewertet. Um diese zu optimieren, können Parameter oder Strategien beliebig oft modifiziert und simulativ untersucht werden.

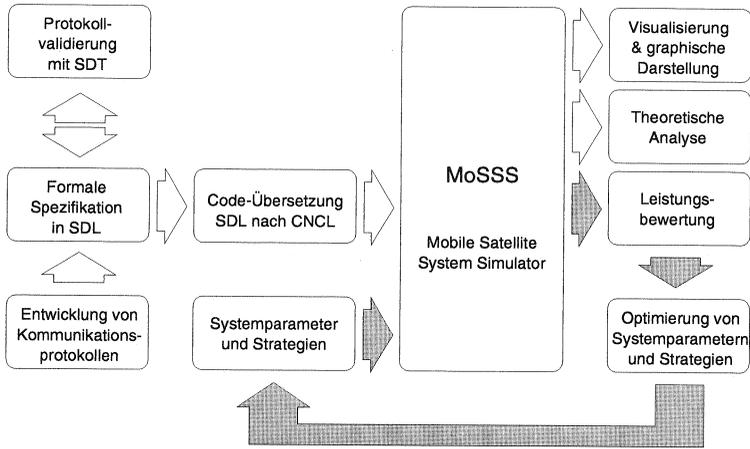


Abbildung 5.2: Der Simulationsprozeß

5.4 Simulationsparameter

Die meisten Parameter des Simulationswerkzeugs *MoSSS* sind in bestimmten Grenzen bzw. ohne Einschränkung frei wählbar.

Der angebotene Verkehr wird durch die Parametrisierung des Simulationsgebietes und der einzelnen Teilnehmer festgelegt. Um das Verkehrsangebot unabhängig von der Gebietsgröße und -lage festlegen zu können, wurde das mittlere Verkehrsangebot pro Flächeneinheit (in Millionen km^2 , im folgenden Mkm^2 bezeichnet), im folgenden mit A bezeichnet, als Parameter gewählt. Das Simulationsgebiet wird entsprechend Kapitel 4.7 durch seine minimale und maximale geographische Länge und Breite, λ_{min} , λ_{max} , φ_{min} und φ_{max} , vollständig beschrieben.

Die Gesprächsdauer ist negativ exponentiell verteilt. Als Standardwert wurde eine mittlere Gesprächsdauer von $\mu^{-1} = 180$ s gewählt. Das Verkehrsangebot pro Teilnehmer wurde mit $\rho = 20$ mE voreingestellt. Die Mobilität der Teilnehmer wird gegenüber der Satellitengeschwindigkeit vernachlässigt. Jeder Teilnehmer versucht bei Gesprächsbeginn nur einmal eine Verbindung aufzubauen.

Alle Verbindungen müssen eine Mindestqualität aufweisen, die durch die folgenden Bedingungen festgelegt ist:

- Der Signalpegel auf dem Uplink bzw. dem Downlink muß mindestens $-140dBW$ betragen.
- Der Gleichkanalstörpegel sowohl auf dem Uplink als auch auf dem Downlink darf $-150dBW$ nicht übersteigen.
- Der Störpegelabstand auf dem Uplink bzw. dem Downlink darf nicht größer als $10 dB$ sein.

Alle Simulationen wurden mit dem im Kapitel 3 beschriebenen AWGN-Kanalmodell durchgeführt.

Weiterhin sind die folgenden Parameter im Rahmen der Leistungsbewertung und Optimierung des Referenz-MSS bzw. der Kanalvergabeverfahren und Handover-Strategien anzugeben:

- Die Anzahl der Transceiver pro Satellit, N_t .
- Die maximale Anzahl von Transceivern pro Antenne, N_{ta} . Sie kann jeden ganzzahligen Wert zwischen $N_t/3$ und N_t annehmen.
- Der minimale Gleichkanalstörpegel auf dem Up- bzw. Downlink, CIR_{upnmin} bzw. CIR_{dnnmin} , den ein Kanal aufweisen muß, um an eine verbindungsanfordernde Mobilstation vergeben werden zu können.
- Der Gleichkanalstörpegel auf dem Up- bzw. Downlink, CIR_{uphmin} bzw. CIR_{dnhmin} , bei dem ein Handover eingeleitet wird.
- Die Anzahl der Transceiver, N_{tres} , Zeitschlitze, N_{sres} , und Frequenzkanäle, N_{fres} , die ausschließlich für Handover reserviert sind.
- Die Zeit, t_{hold} , nach der eine Verbindung, die nach einem nicht erfolgreichen Handover trotz mangelhafter Qualität aufrechterhalten wird, abgebaut wird.

5.5 Bewertungskriterien

5.5.1 Gesprächsverlust- und Abbruchwahrscheinlichkeiten

Im Rahmen einer Simulation werden die folgenden Werte statistisch erfaßt:

- $N_{ConnReq}$: die Anzahl der Anforderungen eines Verbindungsaufbaus
- $N_{ConnRej}$: die Anzahl der abgewiesenen Verbindungsanforderungen
- N_{HoReq} : die Anzahl der Handover-Anforderungen
- N_{HoRej} : die Anzahl der abgewiesenen Handover-Anforderungen
- $N_{ConnDrop}$: die Anzahl der Gesprächsabbrüche

Mit diesen Meßwerten können die Gesprächsverlustwahrscheinlichkeit, P_n , die Handover-Blockierwahrscheinlichkeit, P_h , und die Gesprächsabbruchwahrscheinlichkeit, P_d , anhand von (5.1), (5.2) und (5.3) berechnet werden.

$$P_n = \frac{N_{ConnRej}}{N_{ConnReq}} \quad (5.1)$$

$$P_h = \frac{N_{HoRej}}{N_{HoReq}} \quad (5.2)$$

$$P_d = \frac{N_{ConnDrop}}{N_{ConnReq} - N_{ConnRej}} \quad (5.3)$$

Je nach verwendetem Protokoll führt eine Handover-Rückweisung zum Verlust der Verbindung, oder dazu, daß die Verbindung auf dem alten Kanal weitergeführt wird. Im ersten Fall gilt $P_d = P_h$, im zweiten $P_d < P_h$.

5.5.2 Gesamtblockierwahrscheinlichkeit

Die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit, P_g , berücksichtigt sowohl die Gesprächsverlustwahrscheinlichkeit, P_n , als auch die Gesprächsabbruchwahrscheinlichkeit, P_d , und ist mit

$$P_g = P_n + (1 - P_n)P_d. \quad (5.4)$$

definiert. Mit (5.1) und (5.3) wird (5.4) zu

$$P_g = \frac{N_{ConnRej} + N_{ConnDrop}}{N_{ConnReq}} \quad (5.5)$$

Damit kann die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit eines MSS zu jedem Simulationszeitpunkt aus der Anzahl der zurückgewiesenen Gesprächsanfragen und der Anzahl der abgebrochenen Gespräche ermittelt werden.

5.5.3 Verbindungsqualität

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Blockierwahrscheinlichkeiten ist die Verbindungsqualität (QoS⁷) von besonderem Interesse. Sie wird über das

⁷Quality of Service

CIR der jeweiligen Verbindungen definiert. Aus allen gemessenen CIR werden jeweils für Up- und Downlink die VF⁸ und die VDF⁹ einschließlich ihrer Mittelwerte und Varianzen erstellt.

⁸Verteilungsfunktion

⁹Verteilungsdichtefunktion

Verkehrstheoretische Modellierung von MSS

6.1 Geometrie der Ausleuchtzonen eines MSS

Um analytische Modelle für die Abschätzung der Verkehrskapazität eines MSS entwickeln zu können, muß zuvor die Flächengröße, Form und Lage seiner Funkzellen, Antennen- und Satellitenausleuchtzonen untersucht werden. So ist z.B. das Verkehrsangebot in einer Ausleuchtzone bei einem gleichverteilten Verkehrsangebot auf der Erdoberfläche proportional zu ihrer Fläche. Aufgrund der Mobilität der Satelliten bestimmt die Form einer Ausleuchtzone die Kanalbelegungsdauer.

Innerhalb einer Satellitenausleuchtzone ist die Anordnung der Funkzellen statisch. Die Fläche und hexagonale Form der Zellen ändert sich, abgesehen von den Zellen, die sich am Rand der entsprechenden Satellitenausleuchtzone befinden, nicht.

6.1.1 Satellitenausleuchtzone in verschiedenen Breiten

Wie aus der Abbildung 6.1 ersichtlich ist, ändert sich die Fläche und Form einer Satellitenausleuchtzone abhängig von der geographischen Breite der Satellitenposition.

In Äquatornähe nimmt eine Satellitenausleuchtzone ihre maximale Größe und eine hexagonale Form an. In höheren geographischen Breiten deformiert sie sich, da die Entfernung zu den vier Nachbarsatelliten auf den beiden benachbarten Bahnen geringer wird und sich die Ausleuchtzonen dieser Satelliten stärker überlappen. Der Abstand zu den Nachbarsatelliten auf derselben Bahn ändert sich dabei nicht.

Der Winkelabstand zwischen den SSP der Satelliten A und B, ϕ_{AB} , ist mit (6.1) gegeben. Entsprechend gilt für ϕ_{AC} (6.2). Der Winkelabstand ist in beiden Fällen nur von der geographischen Breite des betrachteten Satelliten A, φ_A , abhängig. Die Abhängigkeit der Winkelabstände ϕ_{AB} und

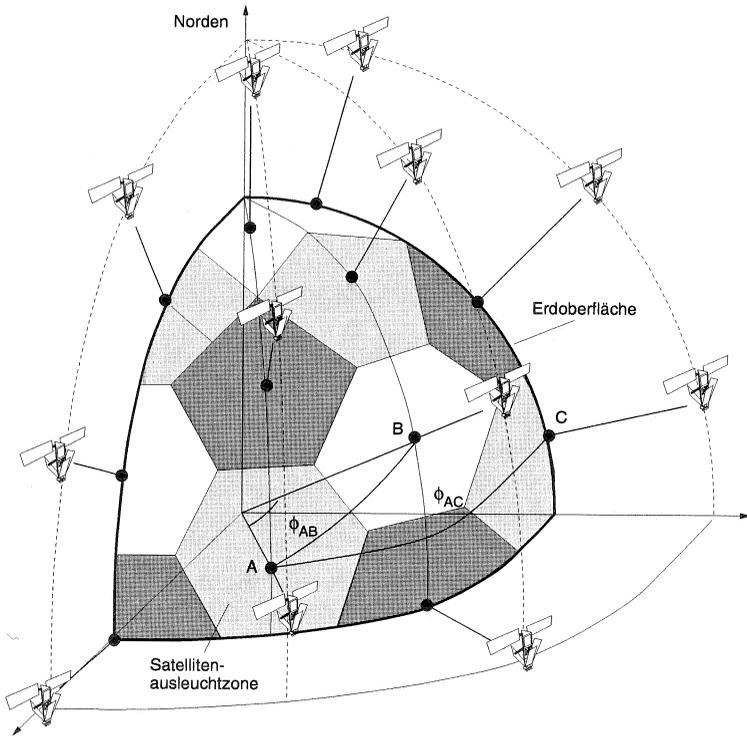


Abbildung 6.1: Abhängigkeit der Ausleuchtzonenform vom Breitengrad

ϕ_{AC} von φ_A kann der Abbildung 6.2 entnommen werden, wobei $\Delta\lambda = 31.6^\circ$, $\Delta\varphi = 32.73^\circ$ und $\varphi'_A = \varphi_A + \frac{\Delta\varphi}{2}$ ist.

$$\phi_{AB} = \arccos(\cos \Delta\lambda_A \cos \varphi_A \cos \varphi'_A + \sin \varphi_A \sin \varphi'_A) \quad (6.1)$$

$$\phi_{AC} = \arccos(\cos(2 \cdot \Delta\lambda_A) \cos^2 \varphi_A + \sin^2 \varphi_A) \quad (6.2)$$

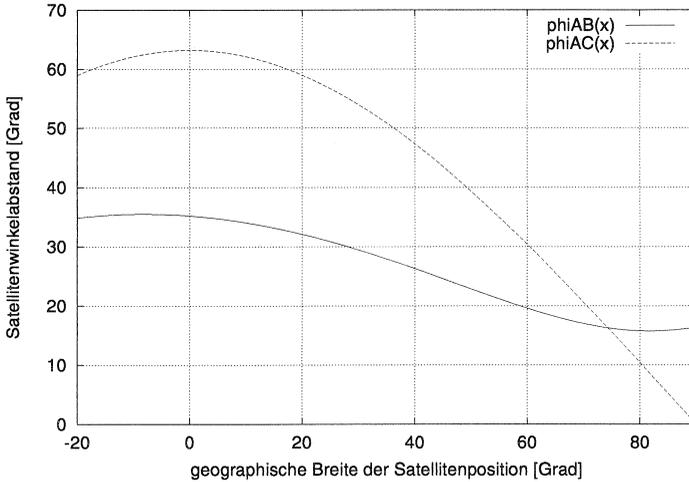


Abbildung 6.2: Winkelabstand zwischen den Satelliten A und B bzw. A und C in Abhängigkeit von der geographischen Breite des Satelliten A

6.1.2 Antennenausleuchtzone in verschiedenen Breiten

Eine Satellitenausleuchtzone setzt sich aus drei Antennenausleuchtzonen zusammen. Die Form der Antennenausleuchtzonen ändert sich, wie in Abbildung 6.3 dargestellt, mit der geographischen Breite der Satellitenposition. Ab ca. 42° ist der Winkelabstand zwischen den beiden vorangehenden Satelliten auf den beiden Nachbarbahnen kleiner als der Winkelabstand zum vorangehenden Nachbarsatelliten auf derselben Bahn, so daß die Ausleuchtzone zeitweise ihre hexagonale Form verliert.

Die Fläche aller drei Antennenausleuchtzonen verkleinert sich mit ansteigender Breite (siehe Abbildung 6.4). Dieser Effekt ist auf der nördlichen Hemisphäre und einer Süd-Nord-Flugrichtung bzw. Nord-Süd-Flugrichtung des Satelliten bei der Antennenausleuchtzone 2 bzw. 3 am ausgeprägtesten. Auf der südlichen Hemisphäre gilt der umgekehrte Fall.

Aus der Abbildung 6.5 ist ersichtlich, daß sich auch die Relationen der Flächengrößen ändern. So sind die drei Antennenausleuchtzonen in Äquatornähe etwa gleich groß. Bei einer Breite von $\varphi = 60^\circ$ ist die Antennenaus-

leuchtzone 3 bereits doppelt so groß wie die Antennenausleuchtzone 2.

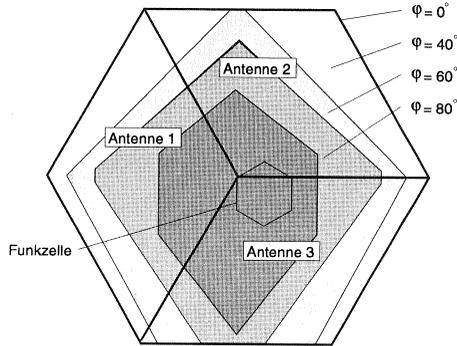


Abbildung 6.3: Verkleinerung der Ausleuchtzonen bei ansteigender geographischer Breite φ

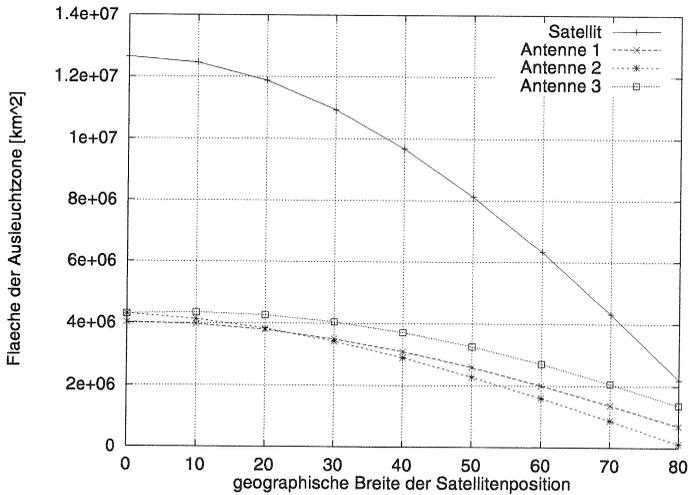


Abbildung 6.4: Flächen der Satelliten- und Antennenausleuchtzonen

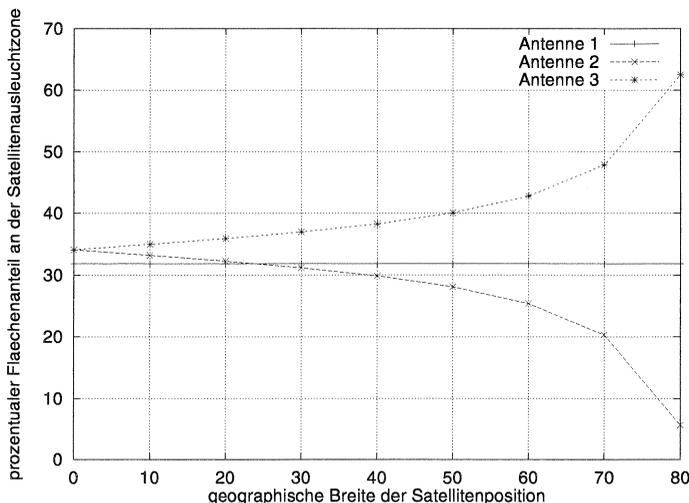


Abbildung 6.5: Prozentualer Anteil der Fläche der Antennenausleuchtzonen an der Satellitenausleuchtzonenfläche

6.2 Einkanalkapazität in MSS

Für eine erste Abschätzung der Verkehrskapazität von MSS dient ein Vergleich der *Einkanalkapazität*¹ eines idealisierten MSS, das eine teilweise überlappende hexagonale Struktur aufweist, mit einem entsprechenden Mobilfunkssystem mit einer unendlichen, regelmäßigen Hexagonalstruktur.

In einem MSS mit der Einkanalkapazität C und n_p physikalischen Kanälen stehen pro Funkzelle durchschnittlich $C \cdot n_p$ Funkkanäle zur Verfügung.

Die Kanalvergabe basiert auf geometrischen Kriterien: Ein Funkkanal kann nur dann an eine verbindungsanfordernde Mobilstation vergeben werden, wenn er in dieser und allen anderen Zellen der ersten R Ringe noch nicht benutzt wird.

Bei einem Mobilfunkssystem mit regelmäßiger Hexagonalstruktur ist die minimale bzw. maximale Einkanalkapazität, C_{min} bzw. C_{max} , mit

$$C_{min} = [1 + 3R(R + 1)]^{-1} \quad (6.3)$$

¹definiert als die Anzahl der aktiven Mobilstationen pro Funkkanal und Funkzelle

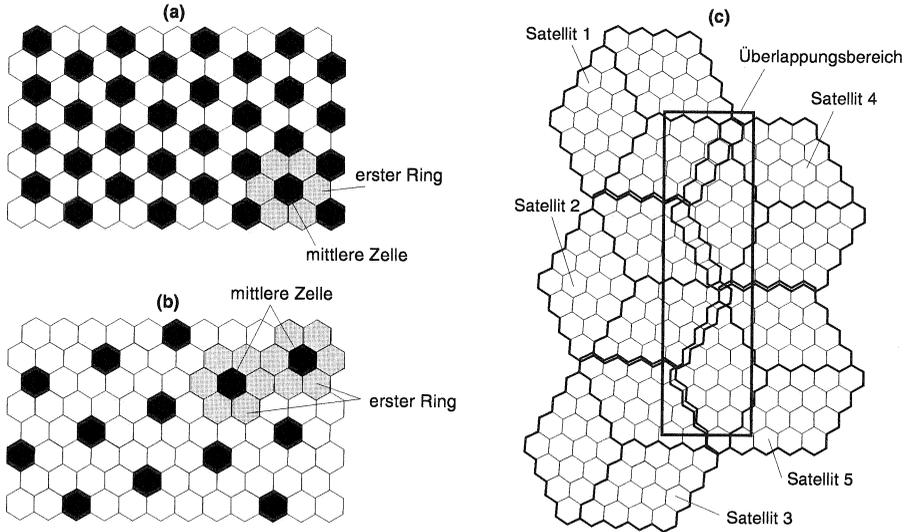


Abbildung 6.6: Hexagonale Zellstrukturen: (a) maximale Einkanalkapazität, (b) minimale Einkanalkapazität, (c) Überlappung im MSS

$$C_{max} = 4 \cdot [1 + 3(R + 1)^2]^{-1} \quad (6.4)$$

gegeben [11], wobei angenommen wurde, daß in dem ersten Zellring um eine belegte Zelle (siehe Abbildung 6.6, (a) und (b)) kein Kanal vergeben werden kann, also $R = 1$ gilt. Dies entspricht im besten Fall einem 3er-Cluster; im schlechtesten Fall resultiert ein 7er-Cluster. Es ergeben sich die in Tabelle 6.1 aufgeführten Werte.

Überlappung	C_{min}	C_{rnd}	C_{max}
nein	14,3%	23,1%	33,3%
ja	15-18%	19-20%	23-29%

Tabelle 6.1: Einkanalkapazität bei hexagonalen Strukturen für $R = 1$

Für die mittlere Einkanalkapazität C_{rnd} , die sich bei zufällig eintreffenden Verbindungsanforderungen durch gleichverteilte Mobilstationen ergibt, konnte in [11] kein geschlossener Ausdruck gefunden werden. Sie wurde mit Hilfe von Simulationen ermittelt.

Bei dem idealisierten MSS hat die Überlappung der aus 48 Zellen bestehenden Ausleuchtzonen der Satelliten, die sich auf benachbarten Bahnen befinden, in höheren geographischen Breiten signifikante Auswirkungen auf die Einkanalkapazität des Systems. Obwohl hier das gleiche Kanalvergabe-kriterium gilt, das einem minimalen Abstand zwischen den Zentren zweier belegter Zellen von drei Zellradien entspricht, führt die Überlappung der regelmäßigen hexagonalen Zellstruktur am Rand der Ausleuchtzonen (siehe Abbildung 6.6, (c)) zu einem Gleichkanalzellenabstand, der größer als der dreifache Zellradius ist. Die drei Einkanalkapazitäten für das MSS wurden mit Hilfe von Simulationen ermittelt (siehe Tabelle 6.1). Es zeigt sich, daß die minimale Einkanalkapazität im Vergleich zur regelmäßigen hexagonalen Struktur größer, die zufällige bzw. mittlere und die maximale Einkanalkapazität jedoch kleiner ist.

6.3 Das MSS als Verlustsystem

Bei der Entwicklung von verkehrstheoretischen Modellen ist es notwendig, die stochastische Natur der Ankunfts- und Abgangsprozesse zu kennen. Ein MSS kann dabei als Verlustsystem angesehen werden, wobei Anforderungen und Bediener jeweils Gesprächen und Funkkanälen entsprechen. Gespräche können vom System entweder abgewiesen oder bearbeitet werden, wobei sie während der Bearbeitungszeit Funkkanäle und Ressourcen des MSS belegen.

6.3.1 Das Verlustsystem M/M/n

Bei der Modellierung von stationären Kommunikationsnetzen für die Sprachübertragung wird häufig das M/M/n-Verlustsystem verwendet, anhand dessen nachfolgend die für diese Arbeit relevanten Begriffe eingeführt werden.

Gemäß der *Kendall'schen Notation* beschreibt der erste Buchstabe, M , einen Markov'schen Ankunftsprozeß, dessen Folgezustand nur vom unmittelbar vorhergehenden Zustand abhängt. Dieser sogenannte *Poisson-Prozeß* hat die Eigenschaft der *Gedächtnislosigkeit*, was eine einfache mathematische Berechnung des Modells ermöglicht. Die Länge der Zeitintervalle zwi-

schen zwei eintreffenden Gesprächen, *Zwischenankunftszeit* genannt, ist negativ exponentiell verteilt und wird durch die mittlere Ankunftsrate λ festgelegt.

Der zweite Buchstabe der Modellbezeichnung M/M/n beschreibt einen Markov'schen Bedienprozeß mit einer negativ exponentiellen Verteilung der Gesprächsdauern. Die mittlere Gesprächsdauer, T , entspricht dem Kehrwert der mittleren Abgangsrate im Modell, μ^{-1} .

Der dritte Kennwert, n , gibt die Anzahl der Kanäle des Systems an. Diese werden unabhängig voneinander jeweils durch ein Gespräch belegt. Sind alle n Kanäle belegt, werden neu ankommende Gespräche abgewiesen. Wird ein Gespräch beendet, wird der entsprechende Kanal freigegeben.

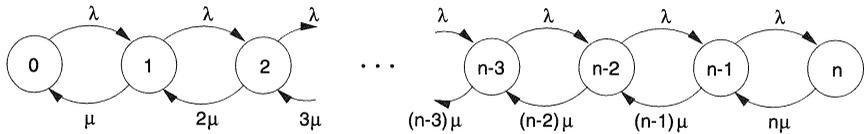


Abbildung 6.7: Zustandsgraph eines M/M/n-Verlustsystems

Der Zustand des Systems ist gekennzeichnet durch die Anzahl der belegten Kanäle und wird durch einen Zustandsgraphen beschrieben (siehe Abbildung 6.7). Dieser besteht aus $n + 1$ Zuständen, wobei Zustandsübergänge nur zwischen unmittelbar benachbarten Zuständen möglich sind. Ein solcher Zustandsgraph wird auch *Markov-Kette* genannt.

Die Blockierwahrscheinlichkeit P_B ist bei einem M/M/n-System gleich der Wahrscheinlichkeit, daß alle Bediener belegt sind. Sie ist mit der *Erlang-B-Formel*

$$p_B = P(n) = \frac{\rho^n / n!}{\sum_{l=0}^n \frac{\rho^l}{l!}} \quad (6.5)$$

gegeben. Das Verkehrsangebot ρ ist mit

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (6.6)$$

definiert.

6.3.2 Ankunfts- und Abgangsprozesse in MSS

Aufgrund der Systemmobilität ist das Verkehrsmodell eines zellularen MSS weitaus komplexer als das Modell eines stationären Sprachübertragungssystems. Die folgenden Prozesse müssen getrennt betrachtet werden:

- Der *Ankunftsprozeß der neuen Gespräche*, der bei ausreichend großer Teilnehmeranzahl durch einen Poisson-Prozeß mit der mittleren Ankunftsrate λ_n approximiert werden kann.
- Der *Abgangsprozeß durch Gesprächsbeendigung*, der ebenfalls durch einen Poisson-Prozeß approximiert wird. Die mittlere Abgangsrate ist mit μ gegeben.
- Der *Ankunftsprozeß der Handover-Rufe* mit der mittleren Ankunftsrate λ_h , dessen Kenngrößen a priori nicht bekannt sind. Dabei wird zwischen Handovern zwischen Funkzellen, Antennenausleuchtzonen und Satelliten unterschieden.
- Der *Abgangsprozeß durch Handover* mit der mittleren Abgangsrate μ_h , dessen Kenngrößen ebenfalls unbekannt sind. Auch hier gelten für Funkzellen, Antennenausleuchtzonen und Satelliten unterschiedliche Mittelwerte und Verteilungen.

6.3.3 Der Ankunftsprozeß der Handover-Rufe

Der Ankunftsprozeß der Handover-Rufe, λ_h , wird unter den in Kapitel 6.3.2 gemachten Annahmen über den Ankunftsprozeß der neuen Gespräche und den Abgangsprozeß durch Gesprächsbeendigung analysiert.

Es wird eine beliebig geformte, ausreichend große Ausleuchtzone der Höhe h und der Fläche S (siehe Abbildung 6.8) betrachtet, die sich mit der Geschwindigkeit v bewegt. Es stehen unendlich viele Verkehrskanäle zur Verfügung. Der Verkehr sei in der Fläche gleichverteilt. Das Verkehrsangebot in der Ausleuchtzone sei mit ρ gegeben.

Bei einer Flächenverschiebung der Ausleuchtzone um $h \cdot v \cdot dt$ ist der angebotene Verkehr in diesem Bereich mit $\frac{hvd t}{S} \rho$ gegeben. Ein Handover sei zum Zeitpunkt $t_o = 0$ eingetreten. Die Wahrscheinlichkeit $P(1)$, daß ein weiterer Handover im Zeitintervall $(t_o, t_o + dt]$ eintritt, ergibt sich aus der Erlang-B-Formel (6.5) zu

$$P(1) = \frac{hvd t}{S} \rho - o(dt) \quad (6.7)$$

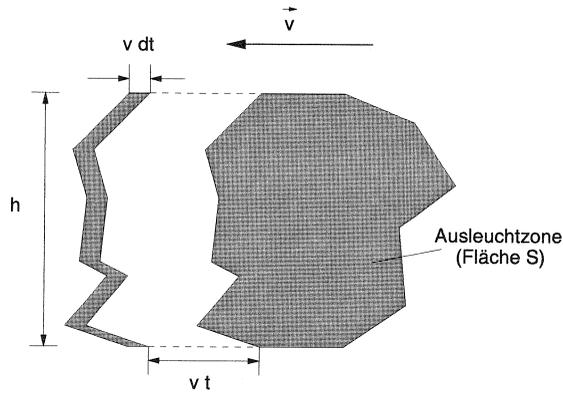


Abbildung 6.8: Modell für die Charakterisierung des Handover-Ankunftsprozesses

Für einen beliebigen Zeitpunkt t ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Handover im Zeitintervall $(t, t + dt]$ eintritt, mit

$$P_h(t + dt \geq \tau > t) = P(1) \cdot P_h(\tau > t) \quad (6.8)$$

gegeben, wobei $P_h(\tau > t)$ die Wahrscheinlichkeit ist, daß bis zum Zeitpunkt t kein Handover eingetreten ist. Durch Einsetzen von (6.7) in (6.8) und der Division beider Seiten mit dt erhält man die Differentialgleichung

$$-\frac{d}{dt}P_h(\tau > t) = P_h(\tau > t) \frac{h v \rho}{S} \quad (6.9)$$

$$P_h(\tau > t) = e^{-\frac{h v \rho}{S} t} \quad (6.10)$$

Deren Lösung in Gl. (6.10) zeigt, daß die Handover-Zwischenankunftszeit negativ exponentiell verteilt ist, was impliziert, daß der Ankunftsprozeß der Handover-Rufe ein Poisson-Prozeß mit der Ankunftsrate

$$\lambda_h = \frac{h v \rho}{S} \quad (6.11)$$

ist. Damit kann das Verlustsystem zur Modellierung eines MSS, gemäß der *Kendall'schen Notation*, als M/G/n-Modell kategorisiert werden.

6.3.4 Der Abgangsprozeß durch Handover

Betrachtet man das von einem MSS zu versorgende Gebiet, ist das Verkehrsangebot mit

$$\rho = \frac{\lambda_n}{\mu} \quad (6.12)$$

gegeben. Aus der Sicht des MSS ist die mittlere Ankunftsrate aller Rufe in einer Ausleuchtzone, λ_S , die Summe der mittleren Ankunftsrate der neuen Gespräche und der Handover-Rufe, also λ_n und λ_h . Ebenso ist die mittlere Abgangsrate aus der Sicht des MSS, μ_S , die Summe der mittleren Abgangsrate durch Gesprächsbeendigung und Handover, also μ und μ_h . Damit ist das Verkehrsangebot an eine Ausleuchtzone, ρ_S , gegeben mit

$$\rho_A = \frac{\lambda_S}{\mu_S} = \frac{\lambda_n + \lambda_h}{\mu + \mu_h} \quad (6.13)$$

Da $\rho = \rho_S$ gilt, ergeben sich die mittlere Kanalbelegungsdauer, $T_K = \mu_S^{-1}$, und die mittlere Abgangsrate durch Handover, μ_h , zu

$$T_K = \mu^{-1} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)^{-1} \quad (6.14)$$

$$\mu_h = \frac{v \cdot h}{S} \quad (6.15)$$

Die Vermutung liegt nahe, daß es sich bei dem Abgangsprozeß durch Handover auch um einen Poisson-Prozeß mit der mittleren Abgangsrate μ_h handelt. Wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, ist dies jedoch nicht der Fall!

6.4 Kanalbelegungsdauer in MSS

Die Kanalbelegungsdauer ist ein wichtiges Merkmal eines MSS. Im Unterschied zu terrestrischen Mobilfunksystemen ist beim Referenz-MSS die Teilnehmermobilität im Verhältnis zur Satellitenmobilität aufgrund der hohen Umlaufgeschwindigkeiten marginal. Daher wird sie hier, wie auch die Erdrotation, vernachlässigt. Im folgenden werden die KVF² der Kanalbelegungsduern in Funkzellen, Antennenausleuchtzonen und Satellitenausleuchtzonen des MSS untersucht.

²Komplementären Verteilungsfunktionen

Um die Berechnungen zu vereinfachen, wird angenommen, daß die Ausleuchtzonen stationär sind, wobei sich alle Mobilstationen mit der Geschwindigkeit v in die gleiche Richtung bewegen (siehe Abbildungen 6.9 und 6.11).

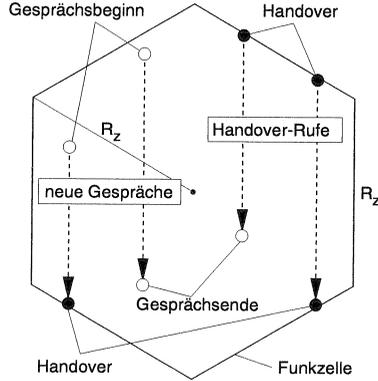


Abbildung 6.9: Kanalbelegung in einer Funkzelle des MSS

Bei der Berechnung der Kanalbelegungsdauer muß jeweils zwischen neuen Gesprächen, die in einer Ausleuchtzone beginnen, und Handover-Rufen, die am Ausleuchtzonenrand eintreffen, unterschieden werden. Ebenso muß berücksichtigt werden, daß ein Gespräch in dieser Ausleuchtzone beendet oder an eine benachbarte Ausleuchtzone übergeben werden kann.

6.4.1 Verfahren zur Berechnung der Kanalbelegungsdauer

Unter der Annahme, daß die Gesprächsdauer negativ exponentiell verteilt ist und die mittlere Gesprächsdauer μ^{-1} beträgt, ist die KVF der Gesprächsdauer mit

$$P_G(\tau > t) = e^{-\mu t} \quad (6.16)$$

gegeben. Da die KVF der Aufenthaltsdauer aktiver Mobilstationen in einer Ausleuchtzone, $P_{n/h,\infty}(\tau > t)$, unabhängig von der KVF der Gesprächsdauer, $P_G(\tau > t)$, ist, ist die KVF der entsprechenden Kanalbelegungsdauer durch neue Gespräche bzw. Handover-Rufe, $P_{n/h}(\tau > t)$, das Produkt der

entsprechenden KVF der Aufenthaltsdauer und der KVF der Gesprächsdauer, also

$$P_{n/h}(\tau > t) = P_{n/h,\infty}(\tau > t) \cdot P_G(\tau > t) \quad (6.17)$$

Entsprechend [23] ist die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen, $P(\tau > t)$, die gewichtete Summe der KVF der Kanalbelegungsdauer durch neue Gespräche, $P_n(\tau > t)$, und der KVF der Kanalbelegungsdauer durch Handover-Rufe, $P_h(\tau > t)$. Sie ist gegeben mit

$$P(\tau > t) = \frac{P_n(\tau > t) + \frac{\lambda_h}{\lambda_n} P_h(\tau > t)}{1 + \frac{\lambda_h}{\lambda_n}} \quad (6.18)$$

wobei sich das Verhältnis λ_h/λ_n aus (6.11) und (6.12) zu

$$\frac{\lambda_h}{\lambda_n} = \frac{v \cdot h}{\mu \cdot S} \quad (6.19)$$

berechnet.

6.4.2 Kanalbelegungsdauer in Funkzellen

Unter der Annahme, daß Mobilstationen in einer Funkzelle mit dem Radius R_z gleichverteilt sind, ergibt sich die KVF der Aufenthaltsdauer einer aktiven Mobilstation in einer Funkzelle, $P_{n,z}(\tau > t)$, zu

$$P_{n,z}(\tau > t) = \begin{cases} (1 - \frac{2vt}{3R_z})e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{R_z}{v} \\ \frac{1}{3}(2 - \frac{vt}{R_z})^2 e^{-\mu t} & \text{für } \frac{R_z}{v} \leq t < \frac{2R_z}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{2R_z}{v} \end{cases} \quad (6.20)$$

Aktive Mobilstationen, die aus Nachbarzellen übergeben werden, betreten die Zelle über ihren oberen Rand. Die KVF der Aufenthaltsdauer dieser Handover-Rufe, $P_{h,z}(\tau > t)$, ist gegeben mit

$$P_{h,z}(\tau > t) = \begin{cases} e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{R_z}{v} \\ (2 - \frac{vt}{R_z})e^{-\mu t} & \text{für } \frac{R_z}{v} \leq t < \frac{2R_z}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{2R_z}{v} \end{cases} \quad (6.21)$$

Das Verhältnis λ_h/λ_n berechnet sich nach (6.19) zu

$$\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)_z = \frac{2}{3} \frac{v}{\mu R_z} \quad (6.22)$$

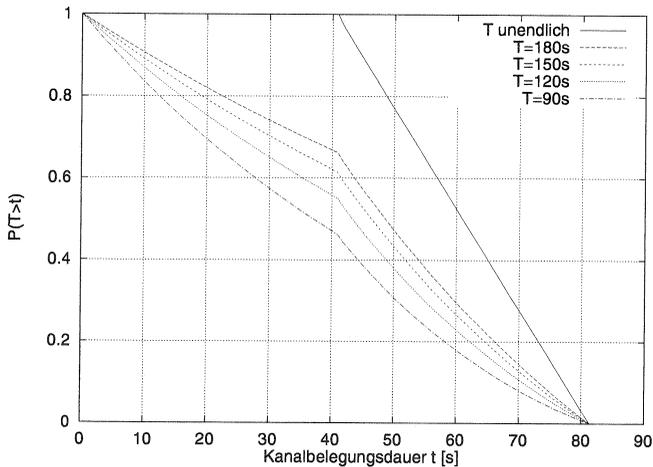


Abbildung 6.10: KVF der Kanalbelegungsdauer durch aktive Mobilstationen in einer Zelle

Damit ist die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen in einer Funkzelle gegeben mit

$$P_z(\tau > t) = \begin{cases} (1 - \frac{2v\mu t}{2v+3\mu R_z})e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{R_z}{v} \\ (1 - \frac{\mu(R_z+vt)}{3\mu R_z+2v})(2 - \frac{vt}{R_z})e^{-\mu t} & \text{für } \frac{R_z}{v} \leq t < \frac{2R_z}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{2R_z}{v} \end{cases} \quad (6.23)$$

In Abbildung 6.10 ist die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen in einer Funkzelle für mittlere Gesprächsdauern T zwischen 90s und $+\infty$ dargestellt.

Die mittlere Kanalbelegungsdauer in einer Funkzelle ist entsprechend (6.14) gegeben mit

$$T_{K,z} = \left(\mu + \frac{2}{3} \frac{v}{R_z} \right)^{-1} \quad (6.24)$$

6.4.3 Kanalbelegungsdauer in Antennenausleuchtzonen

Auf die in Kapitel 6.4.1 geschilderte Weise wurden auch die KVF der Kanalbelegungsdauer durch neue Gespräche und Handover-Rufe in Antennenausleuchtzonen berechnet. Die KVF gelten jedoch nur für *geringe geographische Breiten*, da sich sowohl die Größe, als auch die Form der Ausleuchtzonen in höheren geographischen Breiten signifikant ändern (siehe Kapitel 6.1).

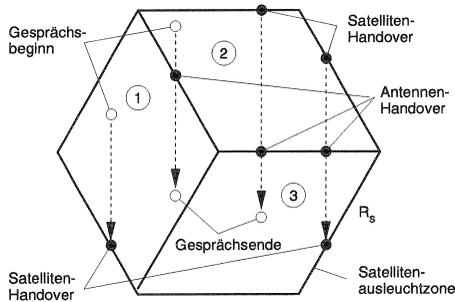


Abbildung 6.11: Kanalbelegung in Antennen- und Satellitenausleuchtzonen

Um die Berechnungen zu vereinfachen, wurde die Satellitenausleuchtzone in der Abbildung 6.11 im Vergleich zu der Abbildung 4.5 leicht modifiziert. Die KVF der Dauer der Kanalbelegung in den drei Antennenausleuchtzonen durch neue Gespräche, $P_{n,a1}(\tau > t)$, $P_{n,a2}(\tau > t)$ und $P_{n,a3}(\tau > t)$, sind jeweils das Produkt der entsprechenden KVF der Aufenthaltsdauer in dieser Antennenausleuchtzone und der KVF der Gesprächsdauer.

$$P_{n,a1}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{\sqrt{3}R_s}\right)^2 e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \quad (6.25)$$

$$P_{n,a2}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{\sqrt{3}R_s}\right)\left(1 - \frac{2vt}{\sqrt{3}R_s}\right) e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \end{cases} \quad (6.26)$$

$$P_{n,a3}(\tau > t) = P_{n,a2}(\tau > t) \quad (6.27)$$

Entsprechend sind die KVF der Dauer der Kanalbelegung in den drei Antennenausleuchtzonen durch Handover-Rufe, $P_{h,a1}(\tau > t)$, $P_{h,a2}(\tau > t)$ und $P_{h,a3}(\tau > t)$, gegeben mit

$$P_{h,a1}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{\sqrt{3}R_s}\right) e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \quad (6.28)$$

$$P_{h,a2}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{4vt}{3\sqrt{3}R_s}\right) e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \end{cases} \quad (6.29)$$

$$P_{h,a3}(\tau > t) = P_{h,a2}(\tau > t) \quad (6.30)$$

Mit

$$\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)_{a1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v}{\mu R_s} \quad (6.31)$$

und

$$\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)_{a2} = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)_{a3} = \sqrt{3} \frac{v}{\mu R_s} \tag{6.32}$$

berechnen sich die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen in den drei Antennenausleuchtungszonen zu

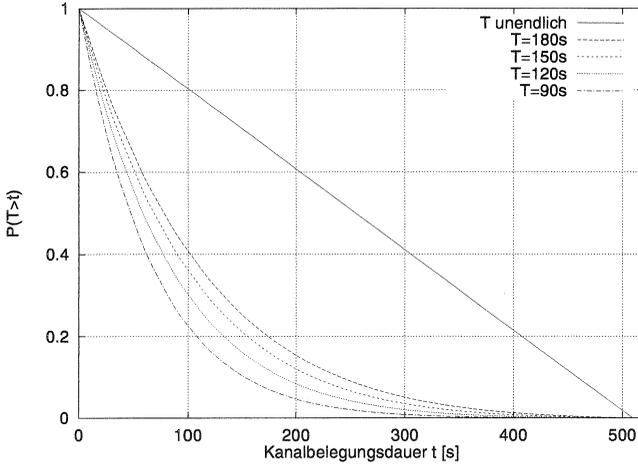


Abbildung 6.12: KVF der Kanalbelegungsdauer durch aktive Mobilstationen in Antennenausleuchtungzone 1

$$P_{a1}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{\sqrt{3}R_s}\right) \left(1 - \frac{\mu vt}{2v + \sqrt{3}\mu R_s}\right) e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \tag{6.33}$$

$$P_{a2}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt(3\sqrt{3}\mu R_s + 4v - 2\mu t)}{3R_s(\mu R_s + \sqrt{3}v)}\right) e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{2v} \end{cases} \tag{6.34}$$

$$P_{a3}(\tau > t) = P_{a2}(\tau > t) \tag{6.35}$$

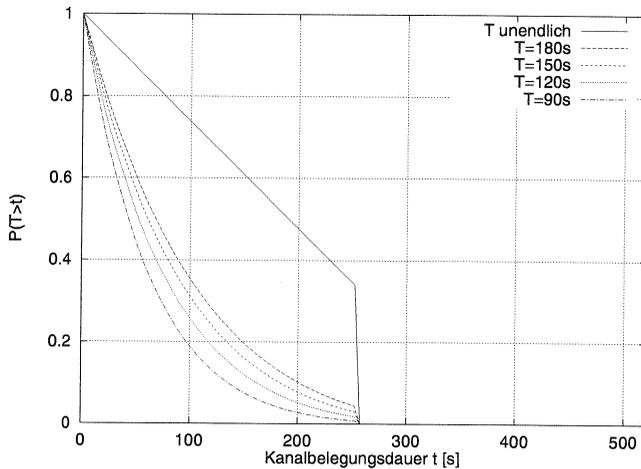


Abbildung 6.13: KVF der Kanalbelegungsdauer durch aktive Mobilstationen in Antennenausleuchtzone 2

In den Abbildungen 6.12 und 6.13 sind die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen für mittlere Gesprächsdauern T zwischen 90s und $+\infty$ dargestellt.

6.4.4 Kanalbelegungsdauer in Satellitenausleuchtzonen

Auf die in Kapitel 6.4.1 geschilderte Weise wurden auch die KVF der Kanalbelegungsdauer durch neue Gespräche und Handover-Rufe in einer Satellitenausleuchtzone berechnet. Wie zuvor gelten die folgenden Ausdrücke nur für *geringe geographische Breiten*, da sich sowohl die Größe, als auch die Form der Ausleuchtzonen in höheren geographische Breiten signifikant verändern (siehe Kapitel 6.1).

Die KVF der Dauer der Kanalbelegung in einer Satellitenausleuchtzone durch neue Gespräche, $P_{n,s}(\tau > t)$, ist das Produkt der entsprechenden KVF der Aufenthaltsdauer in dieser Satellitenausleuchtzone und der KVF der Gesprächsdauer.

$$P_{n,s}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{\sqrt{3}R_s}\right)\left(1 - \frac{vt}{3\sqrt{3}R_s}\right)e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \quad (6.36)$$

Entsprechend ist die KVF der Dauer der Kanalbelegung durch Handover-Rufe in einer Satellitenausleuchtzone, $P_{h,s}(\tau > t)$, gegeben mit

$$P_{h,s}(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt}{2\sqrt{3}R_s}\right)e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \quad (6.37)$$

Mit

$$\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_n}\right)_s = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{v}{\mu R_s} \quad (6.38)$$

berechnet sich die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen in einer Satellitenausleuchtzone zu

$$P_s(\tau > t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{vt(9v+8\sqrt{3}\mu R_s-2\mu vt)}{18R(\mu R_s+\sqrt{3}v)}\right)e^{-\mu t} & \text{für } 0 \leq t < \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \\ 0 & \text{für } t \geq \frac{\sqrt{3}R_s}{v} \end{cases} \quad (6.39)$$

In der Abbildung 6.14 ist die KVF der Kanalbelegungsdauer aller aktiven Mobilstationen für mittlere Gesprächsdauern T zwischen 90s und $+\infty$ dargestellt. Die mittlere Kanalbelegungsdauer in einer Satellitenausleuchtzone ist gegeben mit

$$T_{K,s} = \left(\mu + \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{v}{R_s}\right)^{-1} \quad (6.40)$$

6.4.5 Vergleich der Kanalbelegungsauern in MSS

Anhand der Abbildungen 6.15 und 6.16 kann die KVF der Kanalbelegungs-dauer durch aktive Mobilstationen in Zellen, Antennen- und Satellitenaus-leuchzonen mit der entsprechenden KVF der Gesprächsdauer verglichen werden.

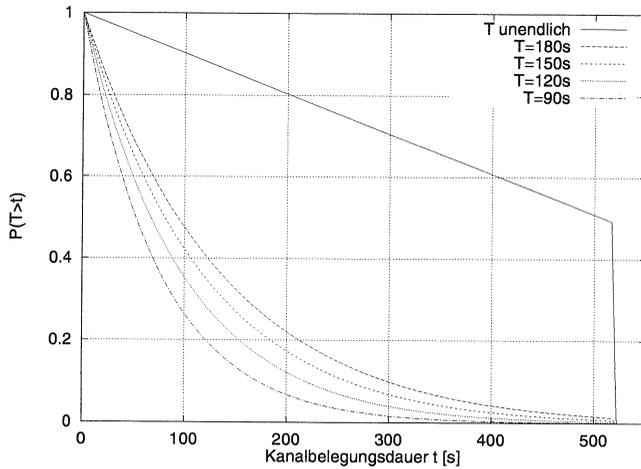


Abbildung 6.14: KVF der Kanalbelegungsdauer durch aktive Mobilstationen in einer Satellitenausleuchtzone

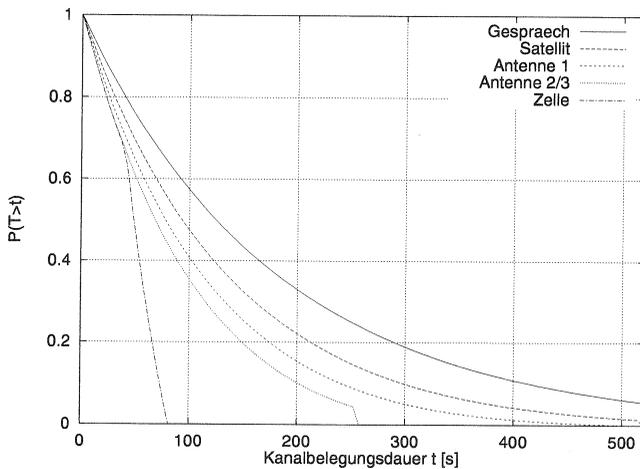


Abbildung 6.15: Vergleich der KVF der Kanalbelegungsdauer für die mittlere Gesprächsdauer $T = 180s$

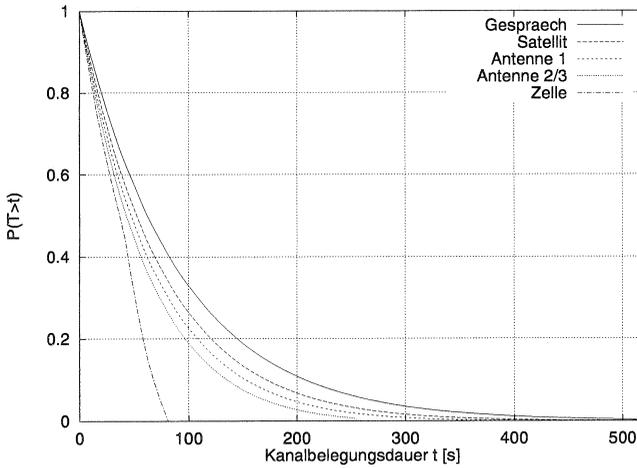


Abbildung 6.16: Vergleich der KVF der Kanalbelegungsdauer für die mittlere Gesprächsdauer $T = 90s$

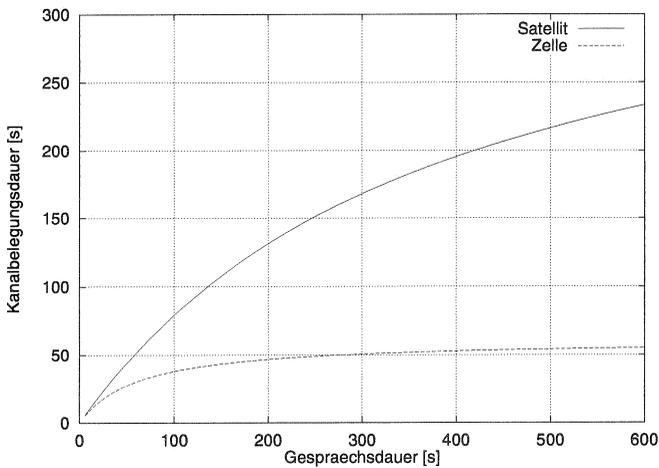


Abbildung 6.17: Mittlere Kanalbelegungsdauer in Abhängigkeit der mittleren Gesprächsdauer $T = \mu^{-1}$

Obwohl die Kanalbelegungsauern stückweise negativ exponentiell verteilt sind, ist offensichtlich, daß sich ihre KVF bei geringen mittleren Gesprächsdauern und großen Ausleuchtzonen der negativ exponentiellen KVF der Gesprächsdauer annähern.

In der Abbildung 6.17 sind die mittlere Kanalbelegungsauern, $T_{K,z}$ und $T_{K,s}$, in Abhängigkeit der mittleren Gesprächsdauer T dargestellt.

6.5 Anzahl der Handover im Laufe eines Gespräches

Die Kanalbelegungsdauer ist ein für die Verwaltung des MSS relevanter Systemparameter. Aus der Sicht eines Teilnehmers ist es wichtiger, wie viele Handover er im Laufe eines Gespräches durchläuft, da jeder Handover die Risiken eines Gesprächsabbruchs birgt.

Im folgenden werden die Wahrscheinlichkeit, daß es im Laufe eines Gespräches zu mindestens n Handovern kommt, und die entsprechende mittlere Anzahl von Handovern zwischen Funkzellen bzw. Satellitenausleuchtzonen untersucht.

6.5.1 Verfahren zur Berechnung der Anzahl der Handover

Eine Ausleuchtzone wird als Referenz gewählt und ihr Mittelpunkt zum Koordinatenursprung erklärt. Die Mobilstationen sind in der Ausleuchtzone gleichverteilt und bewegen sich parallel zur horizontalen Achse mit der Geschwindigkeit v (siehe Abbildung 6.18).

Da die Gesprächsdauer negativ exponentiell verteilt ist, ist die Wahrscheinlichkeit, daß es im Laufe eines Gespräches zu mindestens n Handovern kommt, mit

$$P(N \geq n, x, y) = e^{-\mu t_n} \quad (6.41)$$

gegeben, wobei t_n die Zeit bis zum n -ten Handover ist und die Position einer Mobilstation bei Gesprächsbeginn mit x und y gegeben ist (siehe Abbildung 6.18).

Die KVF der mittleren Wahrscheinlichkeit, im Laufe eines Gespräches mindestens n Handover zu durchlaufen, berechnet sich zu

$$\bar{P}(N \geq n) = \frac{1}{A} \int_A P(N \geq n, x, y) dx dy \quad (6.42)$$

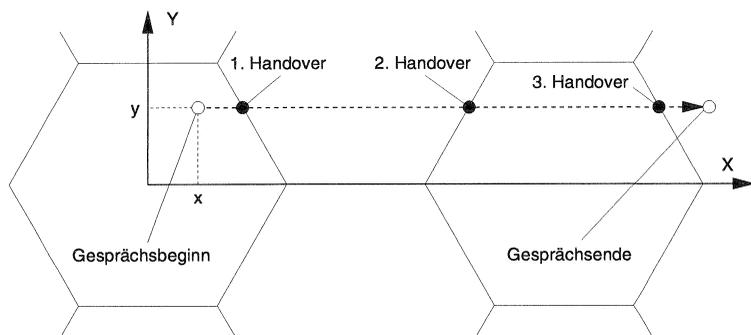


Abbildung 6.18: Modell für die Berechnung der Anzahl der Funkzellen-Handover im Laufe eines Gespräches

wobei A die Fläche der Ausleuchtzone ist. Die mittlere Anzahl von Handovern pro Gespräch ist mit

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{P}(N \geq i) \quad (6.43)$$

gegeben.

6.5.2 Handover zwischen Funkzellen

Die Zeit $t_{n,z}(x, y)$ bis zum n -ten Funkzellen-Handover ist für eine Mobilstation, die sich bei Gesprächsbeginn auf der Position (x, y) innerhalb einer Funkzelle befindet (siehe Abbildung 6.18), mit

$$t_{n,z}(x, y) = \begin{cases} \frac{(1.5 \cdot n - 0.5)R_z - \frac{|y|}{\sqrt{3}} - x}{v} & \text{für ungerade } n \\ \frac{(1.5 \cdot n - 1)R_z + \frac{|y|}{\sqrt{3}} - x}{v} & \text{für gerade } n \end{cases} \quad (6.44)$$

gegeben. Die KVF der mittleren Wahrscheinlichkeit $\bar{P}_z(N \geq n)$, im Laufe eines Gespräches mindestens n Funkzellen-Handover zu durchlaufen, berechnet sich entsprechend (6.41), (6.42) und (6.44) zu

$$\bar{P}_z(N \geq n) = \begin{cases} f_1 e^{-\frac{\mu(-0.5+1.5n)R_z}{v}} & \text{für ungerade } n \\ f_2 e^{-\frac{\mu(-1.0+1.5n)R_z}{v}} & \text{für gerade } n \end{cases} \quad (6.45)$$

Hierbei gilt

$$f_1 = \frac{2}{3} \left(\frac{v}{\mu R_z} \right)^2 \left(e^{\frac{\mu R_z}{v}} + \frac{\mu R_z}{v} e^{-\frac{\mu R_z}{v}} - 1 \right) \quad (6.46)$$

und

$$f_2 = \frac{2}{3} \left(\frac{v}{\mu R_z} \right)^2 \left(e^{\frac{\mu R_z}{v}} - \frac{\mu R_z}{v} e^{-\frac{\mu R_z}{v}} - 1 \right) \quad (6.47)$$

Die mittlere Anzahl von Handovern pro Gespräch, \bar{n}_z , berechnet sich zu

$$\bar{n}_z = \frac{2}{3} \frac{v}{\mu R_z} \quad (6.48)$$

und ist mit dem Verhältnis der Handover-Rate zur Ankunftsrate neuer Gespräche (6.22) identisch.

In der Abbildung 6.19 ist die KVF der Anzahl von Funkzellen-Handovern im Laufe eines Gespräches für mittlere Gesprächsdauern T zwischen 90s und 180s dargestellt.

6.5.3 Handover zwischen Satellitenausleuchtzonen

Bei der Berechnung der Anzahl der Handover zwischen Satellitenausleuchtzonen müssen, wie in Abbildung 6.20 dargestellt, zwei Zonen unterschieden werden:

- Zone 1: $0 \leq |y| \leq \frac{R_s}{2}$
- Zone 2: $\frac{R_s}{2} < |y| \leq R_s$

Die Zeit $t_{n,s1}(x, y)$ bis zum n -ten Satelliten-Handover ist für eine Mobilstation, die sich bei Gesprächsbeginn auf der Position (x, y) innerhalb der Zone 1 einer Satellitenausleuchtzone befindet (siehe Abbildung 6.20), mit

$$t_{n,s1}(x, y) = \frac{\sqrt{3}(n-0.5)R_s - x}{v} \quad (6.49)$$

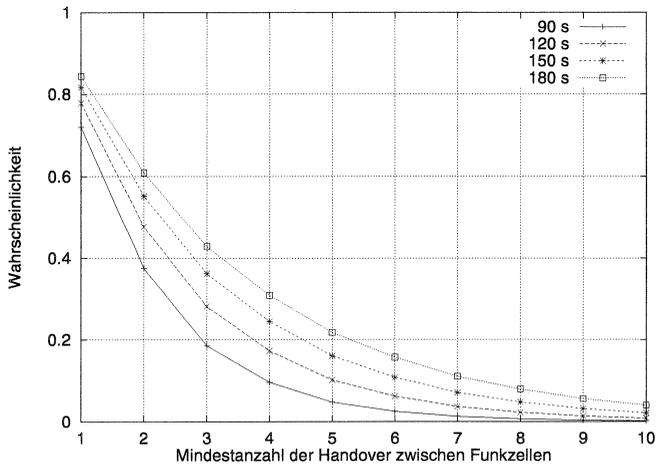


Abbildung 6.19: Mittlere Wahrscheinlichkeit, im Laufe eines Gespräches mindestens n Zell-Handover zu durchlaufen

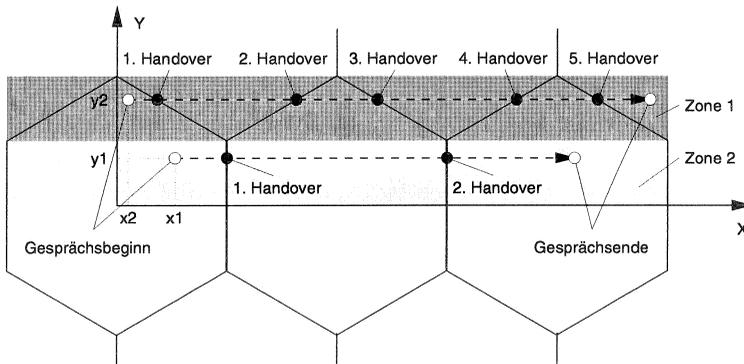


Abbildung 6.20: Modell für die Berechnung der Anzahl der Satelliten-Handover pro Gespräch

gegeben. In der Zone 2 muß zwischen geraden und ungeraden Handovern unterschieden werden. Es gilt

$$t_{n,s2}(x, y) = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}(0.5 \cdot n + 0.5)R_s - \sqrt{3}|y| - x}{v} & \text{für ungerade } n \\ \frac{\sqrt{3}(0.5 \cdot n - 1)R_s + \sqrt{3}|y| - x}{v} & \text{für gerade } n \end{cases} \quad (6.50)$$

Die KVF der mittleren Wahrscheinlichkeiten, $\bar{P}_{s1}(N \geq n)$ und $\bar{P}_{s2}(N \geq n)$, im Laufe eines Gespräches mindestens n Satelliten-Handover zu durchlaufen, sind mit

$$\bar{P}_{s1}(N \geq n) = \frac{v}{\sqrt{3}\mu R_s} e^{-\frac{\sqrt{3}\mu R_s n}{v}} \left(e^{\frac{\sqrt{3}\mu R_s}{v}} - 1 \right) \quad (6.51)$$

und

$$\bar{P}_{s2}(N \geq n) = \begin{cases} f_1 e^{-\frac{\sqrt{3}\mu R_s(n-1)}{2v}} & \text{für ungerade } n \\ f_2 e^{-\frac{\sqrt{3}\mu R_s n}{2v}} & \text{für gerade } n \end{cases} \quad (6.52)$$

gegeben, wobei gilt

$$f_1 = \frac{2v}{\sqrt{3}\mu R_s} \left[1 - \frac{v}{\sqrt{3}\mu R_s} \left(1 - e^{-\frac{\sqrt{3}\mu R_s}{v}} \right) \right] \quad (6.53)$$

und

$$f_2 = \frac{2v}{\sqrt{3}\mu R_s} \left[\frac{v}{\sqrt{3}\mu R_s} \left(e^{\frac{\sqrt{3}\mu R_s}{v}} - 1 \right) - 1 \right] \quad (6.54)$$

Die KVF der mittleren Wahrscheinlichkeit, im Laufe eines Gespräches mindestens n Satelliten-Handover zu durchlaufen, $\bar{P}_s(N \geq n)$, berechnet sich als gewichtete Summe aus (6.51) und (6.52) zu

$$\bar{P}_s(N \geq n) = \frac{2}{3} \bar{P}_{s1}(N \geq n) + \frac{1}{3} \bar{P}_{s2}(N \geq n) \quad (6.55)$$

Sie ist in der Abbildung 6.21 für mittlere Gesprächsdauern μ^{-1} zwischen 90s und 180s dargestellt. Die mittlere Anzahl von Handovern im Laufe eines Gespräches in der Zone 1 bzw. Zone 2 ist mit

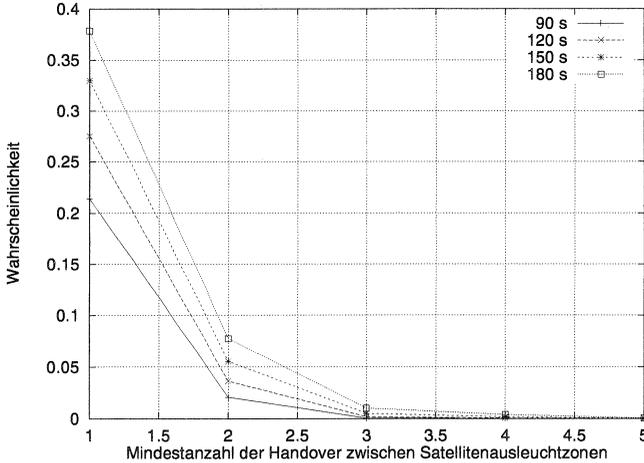


Abbildung 6.21: Mittlere Wahrscheinlichkeit, im Laufe eines Gespräches min. n Sat.-Handover zu durchlaufen

$$\bar{n}_{s1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{v}{\mu R_s} \quad (6.56)$$

$$\bar{n}_{s2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v}{\mu R_s} \quad (6.57)$$

Die mittlere Anzahl von Satelliten-Handovern im Laufe eines Gespräches, \bar{n}_s , berechnet sich als gewichtete Summe aus (6.56) und (6.57) zu

$$\bar{n}_s = \frac{2}{3} \bar{n}_{s1} + \frac{1}{3} \bar{n}_{s2} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{v}{\mu R_s} \quad (6.58)$$

und ist mit dem Verhältnis der Handover-Rate zur Ankunftsrate neuer Gespräche (6.38) identisch.

6.6 Verkehrsmodell des Referenzsatelliten

Die Grundlage für das Verkehrsmodell stellt das in Kapitel 4 vorgestellte Referenz-MSS dar. Es wird angenommen, daß das verwendete dynamische

Kanalvergabeverfahren Funkkanäle bei der Ankunft neuer Gespräche oder Handover-Rufe bzw. beim Abgang durch Gesprächsbeendigung oder Handover optimal umverteilt.

Die auf diesem Modell basierenden Ergebnisse stellen die *Obergrenze* für die Verkehrskapazität des Referenz-MSS dar. Die *Untergrenze* ist durch die Verkehrskapazität eines entsprechenden FCA³-basierten MSS gegeben. In diesem Fall wird jede Zelle als unabhängiges M/M/n-System modelliert. Die Blockierwahrscheinlichkeit in der Zelle eines FCA-basierten MSS ist mit der *Erlang-B-Formel* gegeben.

6.6.1 Annahmen zur Modellbildung

Das mittlere Verkehrsangebot an den Referenzsatelliten bzw. an seine drei Antennen sei mit ρ_s bzw. $\vec{\rho}_a = (\rho_{a_1}, \rho_{a_2}, \rho_{a_3})$ gegeben. Die Ankunfts- und Abgangsraten, sowie die KVF der Kanalbelegungsdauern, sind in Kapitel 6.4 beschrieben. Die maximale Anzahl der Funkkanäle, die ein Satellit bzw. eine Antenne bereitstellen kann, sei mit N_s bzw. N_a gegeben.

Aufgrund der Verkehrsverteilung und der Interferenzbegrenzung stehen jedoch nicht immer alle N_a Kanäle pro Antenne zur Verfügung. Die tatsächliche maximale Anzahl von Funkkanälen, $\vec{N}'_a = (N'_{a_1}, N'_{a_2}, N'_{a_3})$ bzw. N'_s , hängt vom mittleren Verkehrsangebot an die Antennen, $\vec{\rho}_a$, bzw. an den Satelliten, ρ_s , und der Verteilung dieses Verkehrs im Ausleuchtgebiet G , $p_\rho = p_\rho(\lambda_G, \varphi_G)$, ab. Es gilt

$$N'_s \leq N_s \quad (6.59)$$

$$\forall i(N'_{a_i} \leq N_a) \quad (6.60)$$

Der Einfachheit halber wird vorerst von $N'_s = N_s$ und $\vec{N}'_a = \vec{N}_a$ mit $N_{a_1} = N_{a_2} = N_{a_3} = N_a$ ausgegangen. Alle Ausführungen gelten jedoch auch für den allgemeinen Fall!

Bei der Modellbildung zur Bestimmung der Blockierwahrscheinlichkeit des Satelliten wird zwischen den folgenden drei Fällen unterschieden:

- Wenn $N_s = N_a$ ist, kann der Satellit als M/M/n-Modell mit $n = N_a = N_s$ und dem Verkehrsangebot ρ_s modelliert werden.

³Fixed Channel Assignment

- Ist $N_s = 3 \cdot N_a$, kann jede Antenne als unabhängiges M/M/n-Modell mit $n = N_a$ betrachtet werden. Das Verkehrsangebot an die Antenne i ist mit ρ_{a_i} gegeben.
- Ein Modell für den realistischen Fall, $N_a < N_s < 3 \cdot N_a$, wird im folgenden vorgestellt und diskutiert.

6.6.2 Zustandsgraph des Referenzsatelliten

Es liegt nahe, bei der Modellierung des Referenzsatelliten, für den $N_a < N_s < 3 \cdot N_a$ gilt, einen dreidimensionalen Zustandsgraphen zu verwenden, wobei jede Dimension einer Antenne entspricht.

Der Zustand $\vec{k} = (k_1, k_2, k_3)$ beschreibt den Fall, daß genau k_i Kanäle für Gespräche in der Antennenausleuchtzone i belegt sind. Hierbei sind nur die Zustände $(\vec{k} | \exists k_i > N_a)$ bzw. $(\vec{k} | \sum_{i=1}^d k_i > N_s)$ erlaubt. Die Wahrscheinlichkeit des Zustandes \vec{k} sei mit $P(\vec{k}) = P(k_1, k_2, k_3)$ gegeben. Zustandsübergänge sind, wie in der Abbildung 6.23 dargestellt, nur zwischen benachbarten Zuständen möglich. Die Übergangsraten in einen nächsthöheren bzw. nächstniedrigeren Zustand sind, abhängig von der Antenne i , mit λ_{a_i} bzw. $k_i \mu_{a_i}$ gegeben.

Entsprechend der Abbildung 6.23 und unter Verwendung der *Kolomogorov-Vorwärtsgleichung* für den stationären Fall gilt für einen beliebigen Zustand \vec{k}

$$\left[\delta_{\sum_{i=1}^3 k_i \neq N_s} \cdot \sum_{i=1}^3 \delta_{k_i \neq N_a} \lambda_{a_i} + \sum_{i=1}^3 \delta_{k_i \neq 0} k_i \mu_{a_i} \right] \cdot P(\vec{k}) = \sum_{i=1}^3 \delta_{k_i \neq 0} \lambda_{a_i} P(k_1, \dots, k_i - 1, \dots, k_3) + \delta_{\sum_{i=1}^3 k_i \neq N_s} \cdot \sum_{i=1}^3 \delta_{k_i \neq N_a} (k_i + 1) \mu_{a_i} P(k_1, \dots, k_i + 1, \dots, k_3) \quad (6.61)$$

wobei das Kronecker-Symbol δ_Ψ mit

$$\delta_\Psi = \begin{cases} 1 & \text{wenn die Bedingung } \Psi \text{ erfüllt ist} \\ 0 & \text{wenn die Bedingung } \Psi \text{ nicht erfüllt ist} \end{cases} \quad (6.62)$$

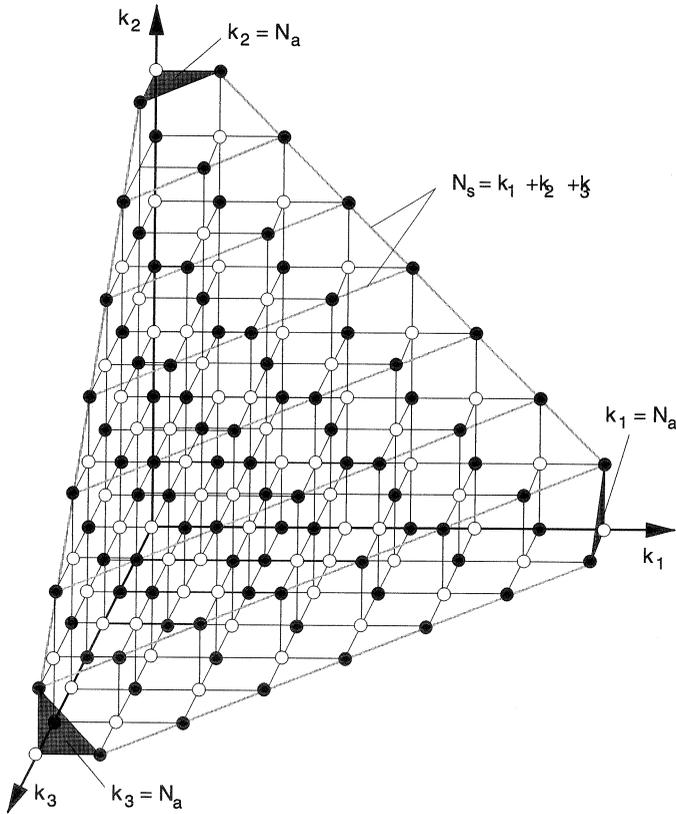


Abbildung 6.22: Zustandsgraph der Kanalbelegung des Referenzsatelliten

definiert ist. Aus (6.62) ergibt sich für die Zustandswahrscheinlichkeit $P(\vec{k})$ die Lösung in (6.63) in Abhängigkeit der Zustandswahrscheinlichkeit eines leeren Systems, $P(\vec{0})$.

$$P(\vec{k}) = \begin{cases} P(\vec{0}) \cdot \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!} & \text{für } \forall \vec{k} \in S \\ 0 & \text{in allen anderen Fällen} \end{cases} \quad (6.63)$$

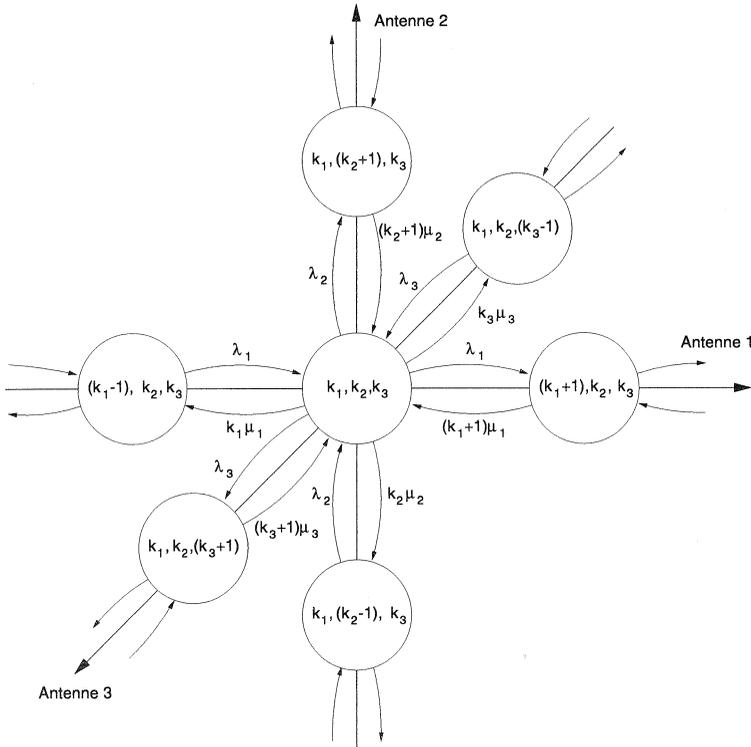


Abbildung 6.23: Zustandsübergänge der dreidimensionalen Markov-Kette

Die Menge S ist zu

$$S = \{\vec{k} | (\forall k_i | 0 \leq k_i \leq N_a) \wedge (0 \leq \sum_{i=1}^3 k_i \leq N_s)\} \quad (6.64)$$

definiert. Mit der Vollständigkeitsbedingung der Wahrscheinlichkeiten

$$\sum_{\forall \vec{k} \in S} P(\vec{k}) = 1 \quad (6.65)$$

ergibt sich für $P(\vec{0})$

$$P(\vec{0}) = \left(\sum_{\forall \vec{k} \in S} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!} \right)^{-1} \quad (6.66)$$

Durch Einsetzen von (6.66) in (6.63) ergibt sich die Zustandswahrscheinlichkeit $P(\vec{k})$ des Zustandes \vec{k} zu

$$P(\vec{k}) = \frac{\prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}}{\sum_{\forall \vec{k} \in S} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}} \quad (6.67)$$

6.6.3 Blockierwahrscheinlichkeit des Referenzsatelliten

Die Blockierwahrscheinlichkeit des Referenzsatelliten, $P_{B_s}(\vec{\rho}_a)$, entspricht der bedingten Wahrscheinlichkeit, daß sich das System bei der Ankunft eines Gespräches in einem der Zustände $\vec{k} \in Q$ befindet, wobei die Menge Q mit

$$Q = \{\vec{k} | (\exists k_i = N_a) \vee (\sum_{i=1}^d k_i = N_s)\} \quad (6.68)$$

definiert ist. Sie ergibt sich zu

$$P_{B_s}(\vec{\rho}_a) = \sum_{\forall \vec{k} \in Q} P(\vec{k}) \quad (6.69)$$

Durch Einsetzen von (6.67) in (6.69) ergibt sich der endgültige Ausdruck für die Blockierwahrscheinlichkeit des Referenzsatelliten zu

$$P_{B_s}(\vec{\rho}_a) = \frac{\sum_{\forall \vec{k} \in Q} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}}{\sum_{\forall \vec{k} \in S} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}} \quad (6.70)$$

Die Gleichung (6.70) kann im Falle eines kapazitätsbegrenzten Satelliten direkt verwendet werden. Bei einer lokalen oder globalen Interferenzbegrenzung kommt es jedoch auch zu Gesprächsverlusten, ohne daß die maximale Anzahl von Transceivern pro Satellit oder Antenne belegt worden ist. Unter Berücksichtigung der Interferenzbegrenzung berechnet sich die Blockierwahrscheinlichkeit des Referenzsatelliten zu

$$P_{Bs}(\vec{\rho}_a, p_\rho) = \frac{\sum_{\forall \vec{k} \in Q_{p_\rho}} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}}{\sum_{\forall \vec{k} \in S_{p_\rho}} \prod_{i=1}^3 \frac{\rho_{a_i}^{k_i}}{k_i!}} \quad (6.71)$$

wobei die Mengen S_{p_ρ} und Q_{p_ρ} mit

$$S_{p_\rho} = \{\vec{k} | [\forall k_i] 0 \leq k_i \leq N'_{a_i}] \wedge [0 \leq \sum_{i=1}^3 k_i \leq N'_s]\} \quad (6.72)$$

$$Q_{p_\rho} = \{\vec{k} | [\exists k_i = N'_{a_i}] \vee [\sum_{i=1}^d k_i = N'_s]\} \quad (6.73)$$

gegeben sind. Die maximale Anzahl von Funkkanälen pro Antenne, \vec{N}'_{a_i} , bzw. Satellit, N'_s , ist vom Verkehrsangebot und der Verkehrsverteilung in der Satellitenausleuchtzone bzw. den Antennenausleuchtzonen, sowie von der Flächengröße und Form des Teilnehmergebietes abhängig.

Anhand (6.70) wurden die Blockierwahrscheinlichkeiten eines Satelliten mit $N_{st} = 96$ Transceivern berechnet, wobei die maximale Anzahl von Transceivern pro Antenne jeweils auf $N_{at} = 32, 34, 36, 48$ bzw. 96 begrenzt wurde. Die entsprechenden Verläufe sind in der Abbildung 6.24 dargestellt. Dabei gilt $N_s = 4 \cdot N_{st}$ und $N_a = 4 \cdot N_{at}$.

Der Fall *DCA 32/96* entspricht einem Satelliten, in dem jeweils ein Drittel seiner Transceiver einer Antenne fest zugeordnet ist. Gilt $N_a > N_s/3$, kann die Verkehrskapazität⁴ des Satelliten bei einer gleichbleibenden Gesamtanzahl von Transceivern erhöht werden. Bereits eine geringe Erhöhung

⁴Unter Verkehrskapazität ist hier der getragene Verkehr bei einer Blockierwahrscheinlichkeit von 1% zu verstehen.

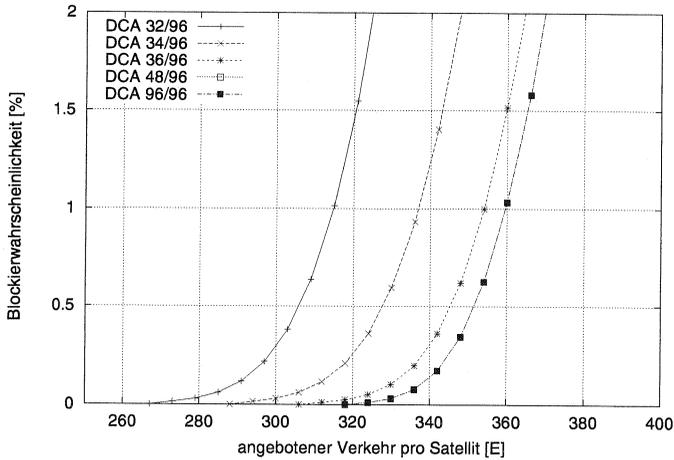


Abbildung 6.24: Blockierwahrscheinlichkeit eines Satelliten mit 96 Transceivern bei max. 32, 34, 36, 48 bzw. 96 Transceivern pro Antenne

der maximalen Anzahl von Transceivern, die einer Antenne dynamisch zugeordnet werden können, von $N_{at} = 32$ auf $N_{at} = 34$ bzw. 36 (dies entspricht den Fällen *DCA 34/96* bzw. *DCA 36/96* in der Abbildung 6.24) führt zu einer beachtlichen Verkehrskapazitätssteigerung von 7% bzw. 12%. Eine weitere Erhöhung der maximalen Anzahl von Funkkanälen pro Antenne auf $N_{at} = 48$ bzw. 96 führt jedoch nur noch zu einer geringfügigen weiteren Steigerung der Verkehrskapazität um zwei Prozentpunkte, obwohl bei *DCA 48/96* bzw. *DCA 96/96* die maximale Anzahl von Funkkanälen pro Satellit ggf. über nur zwei bzw. eine Antenne bereitgestellt werden könnte. Dies ist durch die hier zugrunde gelegte, in der Realität jedoch selten vorkommende Gleichverteilung des Verkehrsangebotes in der Satellitenausleuchtzone zu begründen.

Die Verkehrskapazität eines Satelliten kann auf einfache Weise durch die Erhöhung der Anzahl von Transceivern pro Satellit gesteigert werden, was sich in der Realität jedoch ungünstig auf die Größe und das Gewicht des Satelliten auswirkt. Wie aus der Abbildung 6.25 ersichtlich wird, führt eine Erhöhung der Anzahl von Transceivern pro Satellit um 25%, 50% bzw. 75% (dies entspricht den Fällen *DCA 60/120*, *DCA 72/144* und *DCA 84/168*)

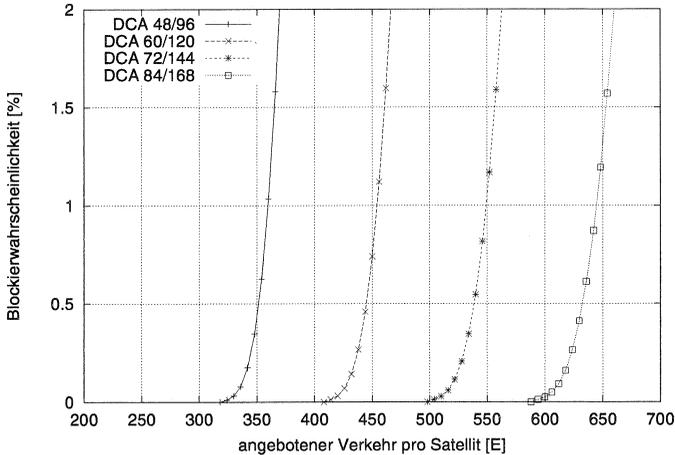


Abbildung 6.25: Blockierwahrscheinlichkeit bei 48/96, 60/120, 72/144, 84/168 bzw. 96/192 Transceivern pro Satellit/Transceivern pro Antenne

gegenüber dem Fall *DCA 48/96* jedoch nur zu einer Steigerung der Verkehrskapazität um 26%, 52% bzw. 78%.

6.7 Blockierwahrscheinlichkeit in einem Teilnehmergebiet

Die Blockierwahrscheinlichkeit in einem Gebiet, das durch ein MSS versorgt wird, kann nicht auf einfache Weise anhand der Blockierwahrscheinlichkeit eines ihrer Satelliten berechnet werden, wie dies in terrestrischen Mobilfunksystemen mit ihren stationären Basisstationen möglich ist.

Aufgrund der Eigenbewegung der Satelliten eines MSS wird selbst ein stationärer Teilnehmer im Laufe eines Gesprächs von mehreren Satelliten versorgt. Dabei ändert sich die Fläche und Form des von einem Satelliten versorgten Teilgebietes sowie das resultierende Verkehrsangebot an diesen Satelliten ständig, was Einfluß auf seine momentane Verkehrskapazität hat. Aus der Sicht eines Teilnehmers ändert sich dadurch die Verkehrskapazität des MSS laufend.

Nachfolgend wird erläutert, wie die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit eines MSS in einem Gebiet anhand der Satellitenblockierwahrscheinlichkeit berechnet werden kann.

6.7.1 Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit in einem Gebiet

Es sei G ein Gebiet der Fläche A_g , das zum Zeitpunkt t von einem oder mehreren Referenzsatelliten versorgt wird (z.B. das *Gebiet b* in der Abbildung 6.26). Es sei weiter $A_{z_i,j}(t)$ die Teilfläche der Zelle z_i des Satelliten j , die einen Teil des Gebietes oder das gesamte Gebiet versorgt (z.B. das *Teilgebiet b1* in der Abbildung 6.26). Entsprechend ist $A_{s_j}(t)$ die Teilfläche der Ausleuchtzone des Satelliten j , die einen Teil des Gebietes oder das gesamte Gebiet versorgt (z.B. das *Teilgebiet b2* in der Abbildung 6.26).

Die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit in dem Gebiet G zum Zeitpunkt t , $P_{BFCA}(t)$, ist bei einem FCA-basierten MSS mit

$$P_{BFCA}(t) = A_G^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_z} A_{z_i,j}(t) \cdot p_B(\rho_{z_i,j}(t), N_z) \quad (6.74)$$

gegeben, wobei N_z die Anzahl der Kanäle pro Zelle, $\rho_{z_i,j}(t)$ der der Zelle z_i des Satelliten s_j zum Zeitpunkt t angebotene Verkehr und $p_B(\rho_{z_i,j}(t), N_z)$ die Blockierwahrscheinlichkeit entsprechend der *Erlang-B-Formel* (6.5) ist. Bei einem DCA-basierten MSS ist die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit in dem Gebiet G zum Zeitpunkt t , $P_{BDCA}(t)$, mit

$$P_{BDCA}(t) = A_G^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{n_{sat}} A_{s_j}(t) \cdot P_{B,s_j}(\vec{\rho}_{a,s_j}, p_\rho, t) \quad (6.75)$$

gegeben.

Da sich die Satelliten mit hoher Geschwindigkeit über das Gebiet G hinwegbewegen, ist $P_{BxCA}(t)$ nur für ein relativ kurzes Zeitintervall um den Zeitpunkt t konstant. Die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit in dem Gebiet G , P_B , berechnet sich durch Integration von (6.74) bzw. (6.75) über die durch die Erdrotationsgeschwindigkeit und die Konfiguration und Dynamik des MSS festgelegte Periodendauer T_p zu

$$P_B = (A_G \cdot T_p)^{-1} \cdot \int_0^{T_p} P_{BxCA}(t) dt \quad (6.76)$$

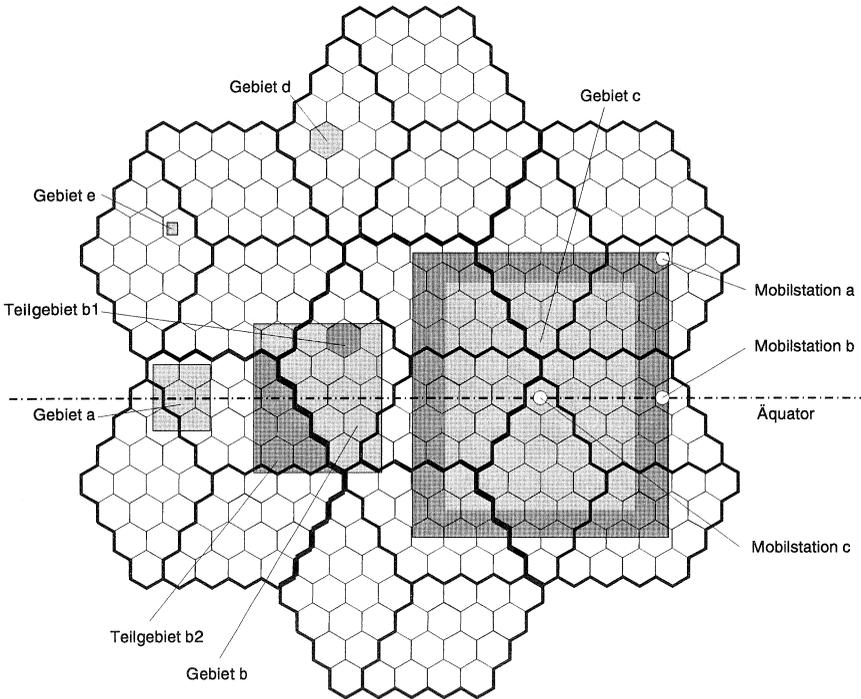


Abbildung 6.26: Gebiete mit einem gleichverteilten Verkehrsangebot

6.7.2 Interferenzbedingte Begrenzung der maximalen Kanalanzahl

Um (6.75) und (6.76) für die Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit in dem Gebiet verwenden zu können, wird im folgenden erläutert, wie die tatsächliche maximale Anzahl von Funkkanälen pro Antenne, N'_{a_i} , bzw. Satellit, N'_s , vom Verkehrsangebot und der Verkehrsverteilung abhängt.

Aufgrund der im Kapitel 4 beschriebenen Antennencharakteristika und Zellkonfiguration in einer Satellitenausleuchtzone könnte im Referenz-MSS, bei einem gleichverteilten Verkehrsangebot auf der Erdoberfläche, ein 7er-Cluster erreicht werden. Abhängig von der Anzahl der Transceiver pro Satellit ist dies jedoch erst in höheren geographischen Breiten möglich.

In geringen geographischen Breiten kann ein 7er-Cluster in den meisten Fällen aufgrund der Kapazitätsbegrenzung des Referenz-MSS nicht erreicht werden. Bei gleichmäßiger Vergabe aller Funkkanäle an die Funkzellen eines Satelliten resultiert dort z.B. bei einem MSS mit 96 Transceivern pro Satellit maximal ein 12er-Cluster.

Bei einem weltweit gleichverteilten und auf die Einheitsfläche, S_E , bezogenen Verkehrsangebot, ρ_E , hängt das mittlere Verkehrsangebot in einer Antennenausleuchtzone, ρ_{a_i} , nur von ihrer Fläche, S_{a_i} , ab. Es gilt

$$\rho_{a_i} = \rho_E \cdot \frac{S_{a_i}}{S_E} \quad (6.77)$$

Bei einem begrenzten Gebiet mit einem gleichverteilten Verkehrsangebot gilt (6.77) ebenfalls, wobei hier S_{a_i} die Teilfläche der Antennenausleuchtzone a_i ist, die das Teilnehmergebiet tatsächlich versorgt.

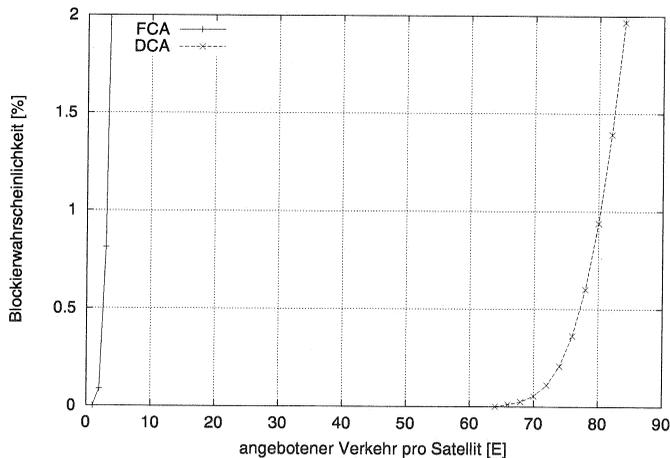


Abbildung 6.27: Blockierwahrscheinlichkeit bei punktuellm Verkehrsangebot

Bei einem punktuellen Verkehrsangebot (z.B. das *Gebiet e* in Abbildung 6.26) können maximal n_p Teilnehmer bedient werden, wobei n_p die Anzahl der verschiedenen PCH des MSS ist (siehe Kapitel 4.4.1). Dies gilt für alle

Gebiete, die nie von mehr als sieben Zellen versorgt werden (z.B. das *Gebiet a* in der Abbildung 6.26). Bei quasi-eindimensionalen Gebieten ist die entsprechende Zellenzahl drei. Aus der Abbildung 6.27 wird der Unterschied zwischen der Verkehrskapazität eines DCA- und eines FCA-basierten MSS mit $n_p = 96$ bei einem punktuellen Verkehrsangebot deutlich.

Bei einem ausreichend großen Gebiet mit einem gleichverteilten Verkehrsangebot (z.B. die *Gebiete b* und *c* in der Abbildung 6.26) ist die maximale Anzahl von Funkkanälen, die ein Satellit mit $N_a = N_s$ bereitstellen kann, N'_s , abhängig von der Anzahl der Zellen dieses Satelliten, die das Gebiet tatsächlich versorgen, $N_{zs\text{ akt}}$. Für ein MSS mit $n_p = 96$ ist sie mit

$$N'_s = \begin{cases} 13.72 \cdot N_{zs\text{ akt}} & \text{für } N_{zs\text{ akt}} < 0.29 \cdot N_s \\ N_s & \text{für } N_{zs\text{ akt}} \geq 0.29 \cdot N_s \end{cases} \quad (6.78)$$

gegeben. In der Abbildung 6.28 ist N'_s entsprechend (6.78) für $N_s = 384$ dargestellt.

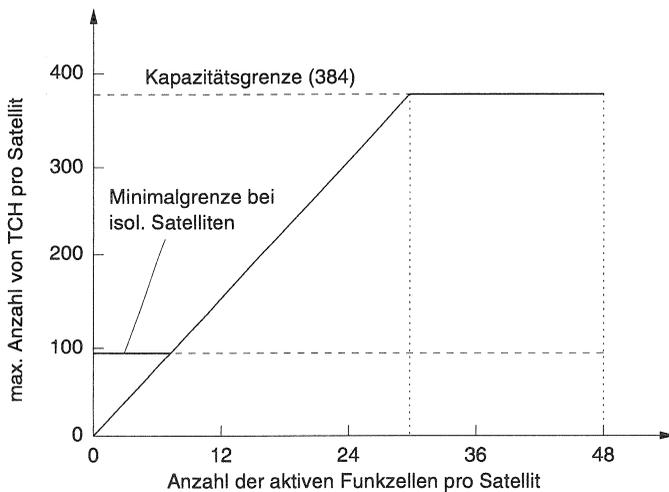


Abbildung 6.28: Begrenzung der maximalen Anzahl von TCH pro Satellit

Die maximale Anzahl von Funkkanälen, die ein Satellit mit $N_a = N_s/3$ über eine Antenne bereitstellen kann, N'_a , hängt von der Anzahl der Zellen der Antenne ab, die das Gebiet tatsächlich, $N_{z a akt}$. Es gilt

$$N'_a = \begin{cases} 13.72 \cdot N_{z a akt} & \text{für } N_{z a akt} < 0.29 \cdot N_a \\ N_a & \text{für } N_{z a akt} \geq 0.29 \cdot N_a \end{cases} \quad (6.79)$$

In der Abbildung 6.29 ist N'_a entsprechend (6.79) für $N_a = 128$ bzw. 192 dargestellt.

Bei einem MSS mit $N_s/3 < N_a < N_s$ müssen (6.78) und (6.79) entsprechend kombiniert werden.

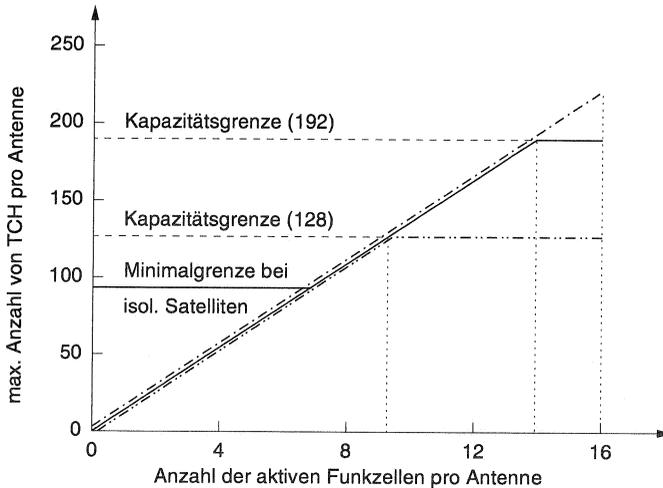


Abbildung 6.29: Begrenzung der maximalen Anzahl von TCH pro Antenne

6.7.3 Blockierwahrscheinlichkeit in FCA-basierten MSS

Bei einem FCA-basierten MSS stehen in jeder Zelle $N_s/48$ Funkkanäle zur Verfügung. Wie in der Abbildung 6.30 dargestellt, kann ein solches MSS mit $N_{s t} = 96$ in geringen geographischen Breiten in der Mitte ausreichend

großer Gebiete mit einem gleichverteilten Verkehrsangebot einen Verkehr von 11 E/Mkm^2 tragen.

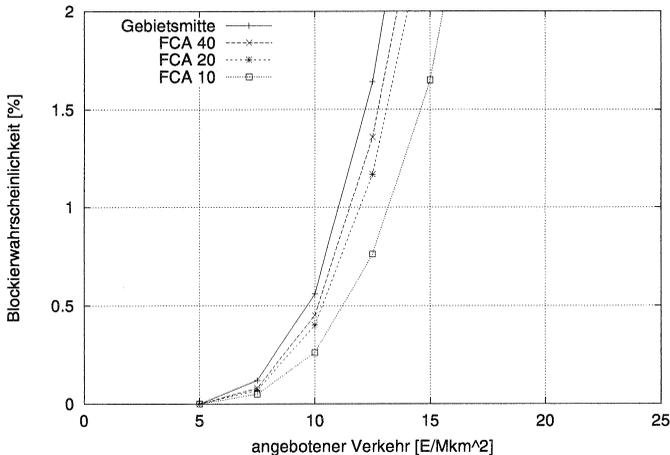


Abbildung 6.30: Abhängigkeit der Blockierwahrscheinlichkeit in FCA-basierten MSS von der Flächengröße des Teilnehmergebietes

Die mittlere Verkehrskapazität steigt bei Verkleinerung des Teilnehmergebietes aufgrund der sich stärker auswirkenden Randeffekte. In der Abbildung 6.30 wurden äquatornahe Gebiete mit $(\Delta\lambda, \Delta\varphi) = (40^\circ, 40^\circ)$, $(20^\circ, 20^\circ)$ und $(10^\circ, 10^\circ)$ verglichen. Bei einer Verkleinerung des Gebietes auf 25% der ursprünglichen Fläche, hier entsprechend mit *FCA 20* und *FCA 40* bezeichnet, steigt die mittlere Verkehrskapazität des FCA-basierten MSS um 5%. Eine Verkleinerung des Gebietes auf ca. 6% führt zu einer Verkehrskapazitätssteigerung von 15%.

In dem etwa einen Zellradius breiten Rand eines Gebietes (dunkelgrauer Bereich des Gebietes *c* in der Abbildung 6.26) ist die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit geringer als in der Gebietsmitte. Um den Anstieg der mittleren Blockierwahrscheinlichkeit vom Gebietsrand zur Gebietsmitte zu illustrieren, sind die mittleren Blockierwahrscheinlichkeiten in einer Gebietsecke (*Mobilstation a* in der Abbildung 6.26), in der Mitte des Gebietsrandes (*Mobilstation b* in der Abbildung 6.26) und in der Gebietsmitte (*Mobilstation c* in

der Abbildung 6.26) in der Abbildung 6.31 dargestellt. Wie erwartet entspricht die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit in der Gebietsmitte der mit der *ErlangB*-Formel berechneten Blockierwahrscheinlichkeit für eine Zelle mit konstantem Verkehrsangebot.

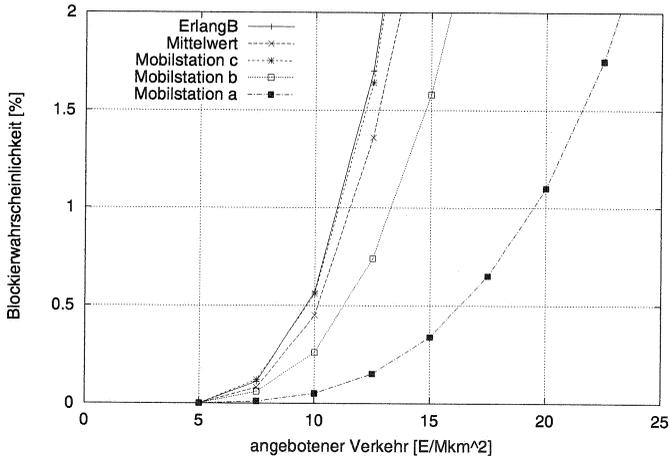


Abbildung 6.31: Abhängigkeit der Blockierwahrscheinlichkeit in FCA-basierten MSS von der Teilnehmerposition innerhalb des Gebietes

Da die mittlere Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit nur unbedeutend geringer ist als die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit in der Gebietsmitte, kann festgestellt werden, daß der Einfluß der Randeﬀekte bei ausreichend großen Gebieten gering ist, jedoch entsprechend der Abbildung 6.30 mit abnehmender Gebietsﬂäche steigt.

6.7.4 Blockierwahrscheinlichkeit in DCA-basierten MSS

Wie bei einem FCA-basierten MSS verringert sich die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit eines DCA-basierten MSS mit der Verkleinerung des Teilnehmergebietes. Die mittlere Verkehrskapazität steigt entsprechend. In der Abbildung 6.32 ist die Abhängigkeit der Blockierwahrscheinlichkeit von der Verkehrsangebotsdichte in unterschiedlich großen Teilnehmergebiete-

ten für ein MSS mit dynamischer Kanalvergabe und 96 Transceivern pro Satellit dargestellt. Dabei ist die Flexibilität bei der Transceiver-Vergabe im ersten Fall, *DCA 32/96*, mit maximal 32 Transceiver pro Antenne stark eingeschränkt. Im zweiten Fall, *DCA 96/96*, können alle 96 Transceiver den Antennen vollkommen flexibel zugeordnet werden. In beiden Fällen ist die Anzahl der lokal verwendbaren Funkkanäle durch die resultierende Gleichkanalinterferenz entsprechend (6.78) und (6.79) begrenzt.

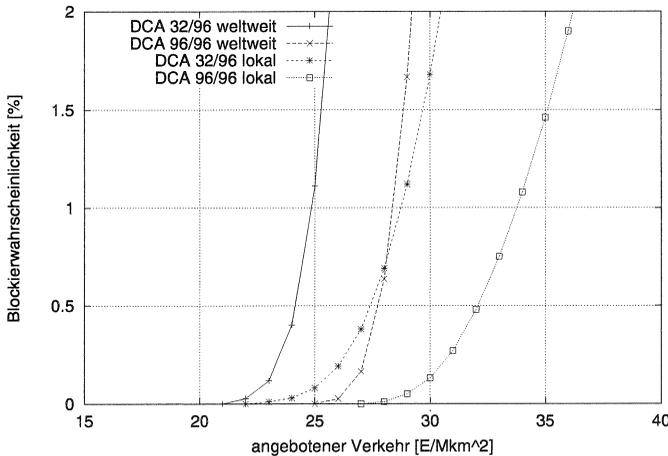


Abbildung 6.32: Blockierwahrscheinlichkeit bei *DCA 32/96* bzw. *DCA 96/96* bei einem weltweit bzw. lokal gleichverteilten Verkehrsangebot

Wie aus der Abbildung 6.32 zu ersehen ist, steigt die Verkehrskapazität bei Begrenzung des Teilnehmergebietes auf $(\Delta\lambda, \Delta\varphi) = (40^\circ, 40^\circ)$ im Vergleich zum unbegrenzten Teilnehmergebiet bei *DCA 32/96* um 15% und bei *DCA 96/96* um 20%. Durch die Erhöhung der maximalen Anzahl von Transceivern pro Antenne wird, abhängig von der Gebietsgröße, eine Kapazitätssteigerung von 12% bis 17% erreicht. Insgesamt verbessert sich die Verkehrskapazität bei einer Verkleinerung des Teilnehmergebietes und einer erhöhten Flexibilität bei der Transceiver-Vergabe um 35%. Im Vergleich zu einem FCA-basierten MSS mit gleicher Transceiver-Anzahl pro Satellit (siehe Abbildung 6.30) steigt die Verkehrskapazität eines MSS sogar um 175%!

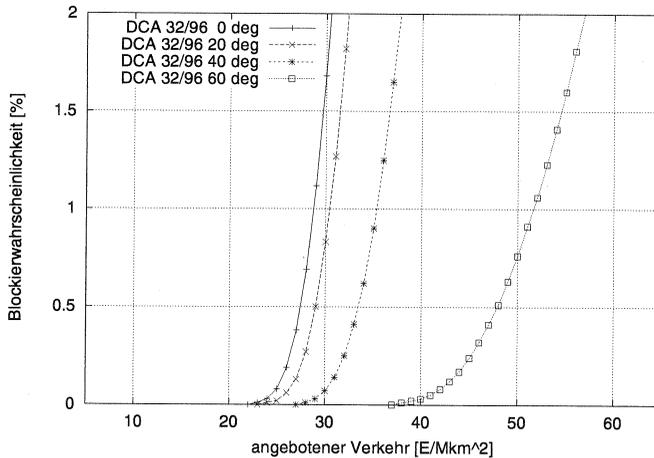


Abbildung 6.33: Blockierwahrscheinlichkeit bei DCA 32/96 und gleicher Gebietsfläche für verschiedene geographische Breiten

Wie aus den Abbildungen 6.33 und 6.34 deutlich wird, steigt die Verkehrskapazität eines DCA-basierten MSS in höheren geographischen Breiten bei gleichbleibender Gebietsgröße und maximaler Transceiver-Anzahl pro Antenne. Dies ist durch die Verkleinerung der aktiven Satelliten- und Antennenausleuchtzonenflächen und der Anzahl der aktiven Zellen pro Satellit und Antenne, sowie durch eine Vergrößerung der Anzahl der Satelliten, die das Teilnehmergebiet versorgen, zu erklären.

Bei *DCA 32/96* steigt die Verkehrskapazität des MSS bei einer Verschiebung der Gebietsmitte um jeweils $\varphi = 20^\circ$ um 8%, 27% und 86% im Vergleich zum gleichgroßen Teilnehmergebiet am Äquator. Bei *DCA 96/96* verbessert sich die Verkehrskapazität des MSS entsprechend um 7%, 24% und 74%.

Wie der Abbildung 6.35 zu entnehmen ist, steigt die Verkehrskapazität des MSS damit bei gleicher Gebietsgröße bei einem um $\varphi = 60^\circ$ höher gelegenen Teilnehmergebiet und einer erhöhten Flexibilität bei der Transceiver-Vergabe um 105%.

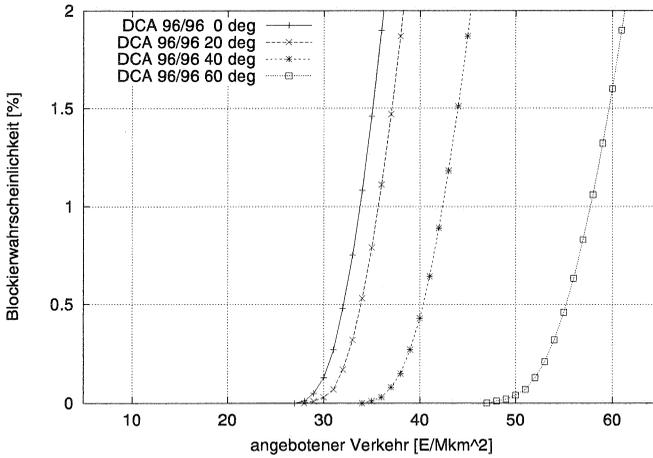


Abbildung 6.34: Blockierwahrscheinlichkeit bei DCA 96/96 und gleicher Gebietsfläche für verschiedene geographische Breiten

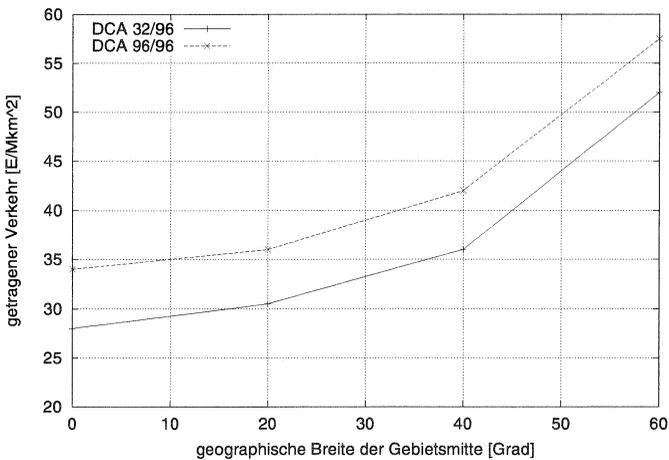


Abbildung 6.35: Getragener Verkehr bei 1% Blockierwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der geographischen Breite

6.8 Grenzen der theoretischen Modellierung

Anhand der in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen wird deutlich, daß sich die Verkehrskapazität eines MSS bei gleicher Verkehrsangebotsdichte abhängig von der Gebietsgröße und -lage, vom gewählten Kanalvergabeverfahren, von der maximalen Anzahl der Transceiver pro Antenne bei vorgegebener Transceiver-Anzahl pro Satellit und von der Anzahl der Transceiver pro Satellit erheblich ändert.

Anhand der vorgestellten Ergebnisse und ihrer Interpretation sieht man, daß die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten theoretischen Modelle ein flexibles und nützliches Werkzeug für die Abschätzung der Teilnehmeraufenthalts- und Kanalbelegungsdauer, der Blockierwahrscheinlichkeit und der Verkehrskapazität von MSS darstellen. Sie erlauben, grundlegende Aussagen über die Leistungsfähigkeit von FCA- und DCA-basierten MSS sowohl bei Kapazitäts- als auch bei Interferenzbegrenzung zu machen, ohne daß diese komplexen Systeme simulativ untersucht werden müssen.

Die theoretischen Modelle können eine simulative Leistungsbewertung jedoch nur unterstützen und nicht ersetzen, wenn komplexere Untersuchungen über das MSS durchgeführt werden sollen. So ist z.B. die Aufschlüsselung der Blockierwahrscheinlichkeit nach Gesprächsverlust- und Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit mit dem theoretischen Modell derzeit noch nicht möglich. Ebenso muß auf die simulative Leistungsbewertung zurückgegriffen werden, wenn es gilt, Aussagen über die Leistungsfähigkeit von konkreten dynamischen Kanalvergabeverfahren und Handover-Algorithmen, besonders in Verbindung mit einer Funkkanalreservierung oder bei verzögerten Gesprächsabbrüchen, in einem realistischen Interferenzszenario zu machen.

Diese und ähnliche Untersuchungen wurden im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe des Simulationswerkzeuges *MoSSS* durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse werden in den folgenden beiden Kapiteln vorgestellt und diskutiert.

Kanalvergabeverfahren für MSS

In einem Mobilfunksystem wird für eine Verbindung jeweils ein Funkkanal temporär bereitgestellt. Die zur Auswahl und Vergabe des geeigneten Funkkanals verwendeten Strategien werden *Kanalvergabeverfahren* genannt. Die Effektivität des gewählten Kanalvergabeverfahrens ist für die Leistungsfähigkeit eines Mobilfunksystems von großer Bedeutung. Ziel ist, in dem zur Verfügung stehenden Frequenzband möglichst viel Verkehr zu tragen, wobei jede Verbindung bestimmte Qualitätskriterien erfüllen muß. So darf ein gegebener minimaler Signalpegel nicht unterschritten und eine gegebene maximale Bitfehlerwahrscheinlichkeit nicht überschritten werden. Damit Funkkanäle mehrfach wiederverwendet werden können, wird eine zellulare Struktur zugrundegelegt. Die Größe und Form der Funkzellen richtet sich nach der zur Verfügung stehenden Sendeleistung der Stationen, den Antennencharakteristika, den von der Beschaffenheit der Umgebung abhängigen Übertragungsbedingungen und den resultierenden Gleichkanalstörungen.

Im folgenden werden die wichtigsten Kanalvergabeverfahren für Mobilfunksysteme genannt und klassifiziert. Um für die neu entwickelten Kanalvergabeverfahren für MSS, die nachfolgend vorgestellt werden, eine Vergleichsbasis und Bewertungsgrundlage zu schaffen, wird zuvor ein statisches Kanalzuweisungsverfahren für MSS vorgestellt.

7.1 Klassifizierung von Kanalvergabeverfahren

Kanalvergabeverfahren für Mobilfunksysteme werden prinzipiell in vier Kategorien eingeteilt:

- statische Kanalzuweisung - FCA¹
- Kanalzuweisung mit Borgen - BCA²

¹Fixed Channel Assignment

²Borrowing Channel Allocation

- dynamische Kanalvergabe - DCA³
- hybride Kanalvergabe - HCA⁴

Eine weiteres Kanalvergabekonzept, auf das hier jedoch nicht weiter eingegangen wird, ist *Reuse Partitioning* [24].

Basierend auf den Bewertungskriterien für die Qualität eines zu vergebenden Funkkanals läßt sich auch eine Einteilung in

- wiederverwendungsabstands-basierte Kanalvergabeverfahren und
- interferenzbasierte Kanalvergabeverfahren

vornehmen.

Bei *wiederverwendungsabstands-basierten Kanalvergabeverfahren* wird ein Funkkanal, auf dem die Übertragung zwischen einer Mobilstation und einer Basisstation stattfindet, erst wieder in einer durch den geforderten minimalen Störpegelabstand bedingten Entfernung vom Mittelpunkt der betroffenen Zelle, dem *Wiederverwendungsabstand*, benutzt.

Interferenzbasierte Kanalvergabeverfahren verwenden bei der Bewertung der Qualität einer möglichen Verbindung Meßwerte der empfangenen Störpegel auf den einzelnen Funkkanälen. Ein Funkkanal kann vergeben werden, wenn der empfangene Störpegel klein genug ist. Die Vergabe von Funkkanälen basiert somit auf der tatsächlichen Interferenzsituation im System.

7.1.1 Statische Kanalzuweisung - FCA

Terrestrische Mobilfunknetze der ersten und zweiten Generation, wie z.B. das C-Netz und GSM-Netze, basieren auf einer *statischen Kanalzuweisung* - FCA.

Im Rahmen der Funknetzplanung wird jeder Funkzelle eine Teilmenge der dem System zur Verfügung stehenden Funkkanäle zugeordnet. Diese Zuordnung und die Größe der Funkzellen hängt vom erwarteten Verkehrsangebot ab. Sie kann nur mit erheblichem Aufwand verändert werden.

Benötigt eine Mobilstation einen Funkkanal, wird ihr einer der freien Funkkanäle der Funkzelle, in der sie sich befindet, temporär zugewiesen. Hieraus wird ersichtlich, daß sich die *statische* Zuweisung der Funkkanäle auf die Funkzellen, jedoch nicht auf die Mobilstationen, bezieht.

³Dynamic Channel Allocation

⁴Hybrid Channel Allocation

der minimale Gleichkanalstörpegelabstand, was zu einem Anstieg der Bitfehlerrate führt. Eine bessere Möglichkeit, die Verkehrskapazität zu erhöhen, ist, die Zellgröße zu verringern und die Clustergröße beizubehalten.

7.1.2 Kanaluweisung mit Borgen - BCA

Ein Nachteil von FCA ist die mangelnde Flexibilität der Funkressourcenverwaltung. So kann es z.B. dazu kommen, daß in einer Funkzelle mehr Funkkanäle benötigt werden als vorhanden sind, in ihren Nachbarzellen jedoch freie Funkkanäle unbenutzt bleiben.

Um in diesem Fall die vorhandenen Funkressourcen effizienter zu nutzen, wurde die *Kanaluweisung mit Borgen - BCA*⁵ entwickelt. Hier werden, wie bei FCA, alle Funkkanäle auf die Funkzellen eines Clusters aufgeteilt. Sind alle Funkkanäle einer Funkzelle belegt, wird bei Bedarf ein in einer Nachbarzelle zu diesem Zeitpunkt unbenutzter Funkkanal ausgeborgt. Einschränkung gilt, daß nur Funkkanäle geborgt und verwendet werden dürfen, die keine bestehenden Verbindungen stören.

In [25] wurde eine Unterteilung der BCA-Verfahren in

- einfache BCA-Verfahren und
- hybride BCA-Verfahren

vorgenommen.

Zur Kategorie der *einfachen BCA-Verfahren* gehören BA⁶, BAR⁷ [15], SBR⁸ und BFA⁹ [1]. In [1] wurde gezeigt, daß diese Verfahren bei geringen und mittleren Verkehrsangeboten zu geringeren Blockierwahrscheinlichkeiten als FCA führen, bei hohen Verkehrsangeboten jedoch schlechter sind. Es wurde festgestellt, daß Verfahren, die den erstbesten Funkkanal borgen, der die Wiederverwendungsbedingung erfüllt, vergleichbare Ergebnisse aufweisen wie komplexere BCA-Verfahren dieser Kategorie.

Die Gruppe der hybriden BCA-Verfahren umfaßt Verfahren wie SHCB¹⁰ [24][39], BCO¹¹ [36][39], BDCL¹² [40]. In [40] wurde gezeigt, daß BDCL

⁵Borrowing Channel Assignment

⁶Basic Algorithm

⁷Basic Algorithm with Reassignment

⁸Simple Borrowing from the Richest

⁹Borrow First Available

¹⁰Simple Hybrid Channel Borrowing Strategy

¹¹Borrowing with Channel Ordering

¹²Borrowing with Directional Channel Locking

sowohl bei einem gleichverteilten als auch einem nicht gleichverteilten Verkehrsangebot niedrigere Blockierwahrscheinlichkeiten aufweist als BCO und FCA.

7.1.3 Dynamische Kanalvergabeverfahren - DCA

Bei *DCA* können prinzipiell alle Funkkanäle allen Funkzellen dynamisch zugewiesen werden. Der ausgewählte Funkkanal wird einer Funkzelle temporär zugewiesen. Die Kriterien für die Kanalvergabe basieren auf dem Wiederholabstand, dem Empfangspegel, dem Gleichkanalstörpegel oder dem Gleichkanalstörpegelabstand. Meist fließen einer oder mehrere dieser Faktoren in eine Kostenfunktion ein, anhand derer die Kanalwahl getroffen wird.

Mit *DCA*-Verfahren ist es möglich, die vorhandenen Funkressourcen bei sich zeitlich ändernder Verteilung des Verkehrsangebots, geringe bis mittlere Verkehrsangebote vorausgesetzt, optimal zu nutzen, da Funkkanäle dort bereitgestellt werden, wo sie gebraucht werden.

Abhängig von der Instanz, die die Entscheidung über die Kanalvergabe trifft bzw. welche maßgeblich für die Bewertung der potentiellen Funkkanäle verantwortlich ist, werden *DCA*-Verfahren weiter in

- zentral gesteuerte *DCA*-Verfahren
- dezentral gesteuerte *DCA*-Verfahren

unterteilt [25].

Bei *zentral gesteuerten DCA-Verfahren* ist die Basisstation für die Auswahl und Vergabe eines Funkkanals zuständig. Zu den wichtigsten zentral gesteuerten *DCA*-Verfahren, die den Wiederverwendungsabstand bei der Auswahl des zu vergebenden Funkkanals verwenden, gehören *LODA*¹³ [40][39], *FA*¹⁴, *RING*¹⁵, *MSQ*¹⁶, *NN*¹⁷, *NN+1*¹⁸ [12] und *1-Clique* [30]. In [31] wurde die Leistung von *FA*, *MSQ*, *NN* und *NN+1* simulativ bewertet. Es wurde festgestellt, daß *NN* die geringste Blockierrate aufweist, gefolgt von *MSQ*, *FA* und *NN+1*. Die in [13] veröffentlichten Simulationsergebnisse zeigen jedoch, daß die Blockierrate bei *FA*, *RING* und *NN* ab einem kritischen Wert sehr schnell ansteigt.

¹³ **Locally Optimized Dynamic Assignment**

¹⁴ **F**irst **A**vailable

¹⁵ Selection with Maximum Usage on the Reuse **RING**

¹⁶ **M**ean **SQ**are

¹⁷ **N**earest **N**eighbor

¹⁸ **N**earest **N**eighbor plus **O**ne

Das Kanalvergabeverfahren MP¹⁹ nimmt in dieser Kategorie der DCA-Verfahren eine Sonderstellung ein. Es wurde 1983 in [16] erstmals vorgestellt und gibt die obere Leistungsgrenze für wiederverwendungsabstandsbasierte zentral gesteuerte DCA-Verfahren vor. Mit MP kommt es nur dann zu einer Rückweisung einer Kanal Anforderung, wenn keine globale Umvergabe von Funkkanälen möglich ist, die die zusätzliche Vergabe eines benötigten Funkkanals ermöglicht. Dazu müssen in einer zentralen Instanz des Mobilfunknetzes alle Informationen über die vergebenen Funkkanäle vorhanden sein, und sie muß in der Lage sein, unter Umständen beliebig viele Kanalumvergaben im gesamten System durchzuführen. Dies ist z.Zt. in realen Systemen aufgrund ihrer Größe, Komplexität und beschränkten Leistungsfähigkeit nicht möglich.

Zur Kategorie der zentral gesteuerten DCA-Verfahren, die für den Einsatz in *eindimensionalen* Mobilfunknetzen, z.B. für die Funkversorgung von funkttechnisch isolierten Autobahnen und Bahnstrecken oder von Straßenschluchten in Großstädten, entwickelt wurden, zählen die Verfahren MAXMIN²⁰, MI²¹, RMI²², RMIR²³ und SMI²⁴ [19]. Die Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Funkkanals basieren bei diesen Verfahren auf Messungen der Gleichkanalstörpegel und -störpegelabstände. In [19] wurde gezeigt, daß die Blockierrate in der Reihenfolge FCA, RMI, RMIR, SMI, MAXMIN ansteigt, wobei MAXMIN mit Umvergabe die Leistungsgrenze in eindimensionalen Netzen darstellt.

Zur Kategorie der *dezentral gesteuerten DCA-Verfahren*, deren Kanalvergabekriterium auf dem Wiederverwendungsabstand basiert, gehören LP-DDCA²⁵ [20], seine erweiterte Variante LP-DDCA/ACI²⁶ [12], die auch die Nachbarkanalinterferenz berücksichtigt, und das für eindimensionale Systeme entwickelte MD²⁷ [21].

In realen Mobilfunksystemen wurde eine neue Qualität durch die Einführung von dezentral gesteuerten DCA-Verfahren, die auf der Messung und Bewertung des Gleichkanalstörpegels basieren, erreicht. Zu diesen prinzipiell

¹⁹Maximum Packing

²⁰MAXimize the MINimum (C/I)

²¹Minimum Intereference

²²Random Minimum Intereference

²³Random Minimum Intereference with Reassignment

²⁴Sequential Minimum Intereference

²⁵Locally Packing Distributed DCA

²⁶LP-DDCA with Adjacent Channel Interference constraint

²⁷Moving Direction

einfachen Verfahren gehören das in DECT verwendete DCS²⁸ [32], SCS²⁹, MSIR³⁰ [34] und *Channel Segregation* [18]. Sie bewerten die wirkliche Interferenzsituation und können so den temporär optimalen Funkkanal vergeben. Aufgrund des dezentralen Konzepts kann die Vergabe eines Funkkanals aber auch zu Unterbrechungen bestehender Verbindungen führen, die sich ggf. im System fortpflanzen.

7.1.4 Hybride Kanalvergabeverfahren - HCA

HCA-Verfahren sind eine Mischung aus FCA und DCA. Alle zur Verfügung stehenden Funkkanäle werden in zwei Gruppen eingeteilt. Die Funkkanäle der ersten Gruppe werden den Funkzellen, wie bei FCA, fest zugeordnet. Funkkanäle der zweiten Gruppe werden, wie bei DCA, bei Bedarf dynamisch an eine Basisstation vergeben, wenn sie die vorgegebenen Qualitätskriterien erfüllen.

Prinzipiell werden zuerst die einer Funkzelle fest zugewiesenen Funkkanäle vergeben. Falls alle Funkkanäle belegt sind, wenn eine neue Verbindungsanforderung eintrifft, wird in der Funkzelle ein Funkkanal aus der zweiten Gruppe vergeben.

Die in [24] vorgestellten HCA-Verfahren basieren auf den DCA-Strategien FA und RING. HCA-Verfahren können um die Funktionalität der Umvergabe von bereits vergebenen Funkkanälen [14] oder des Einreihens von Kanalansforderungen, die temporär nicht bedient werden können, in eine Warteschlange [35] ergänzt werden. Eine weitere HCA-Strategie, die Funkkanäle in fest zugewiesene und flexible unterteilt, ist FICA³¹ [37].

Ein wichtiger Parameter bei HCA-Verfahren ist das Verhältnis der fest zugewiesenen zu den dynamisch zu vergebenden Funkkanälen. Da das Verkehrsangebot in einem Mobilfunksystem zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen ist, führt eine dynamische Anpassung dieses Verhältnisses an das aktuelle Verkehrsangebot zu einer Leistungssteigerung des Mobilfunksystems. Dabei könnten die Vorteile eines DCA-Verfahrens bei geringen und nicht gleichverteilten Verkehrsangeboten und die eines FCA-Verfahrens bei hohen gleichverteilten Verkehrsangeboten genutzt werden [24].

²⁸Dynamic Channel Selection

²⁹Sequential Channel Search

³⁰Minimum Signal-to-Interference Ratio

³¹Flexible Channel Allocation

7.2 Das statische Kanalvergabeverfahren MSS-FCA

Das als Referenz dienende Kanalvergabeverfahren *MSS-FCA* basiert auf einer statischen Zuordnung von Frequenzkanalgruppen zu Funkzellen. Durch die gewählte Zuordnung wird sichergestellt, daß die resultierenden Gleichkanalstörpegel auch bei hohen Verkehrsangeboten ausreichend niedrig sind. Die Frequenzkanalzuordnung basiert auf einem 12er-Cluster. In der Abbildung 7.2 ist die Zuordnung der Frequenzkanalgruppen F_i zu den einzelnen Zellen eines Clusters vorgestellt, wobei $1 \leq i \leq 12$ ist und jede Frequenzkanalgruppe aus zwei Frequenzkanälen besteht ($F_i = \{f_{2i-1}, f_{2i}\}$). Die Clustering wird über die einzelnen Satellitenausleuchtungen hinweg im gesamten Referenz-MSS vollzogen.

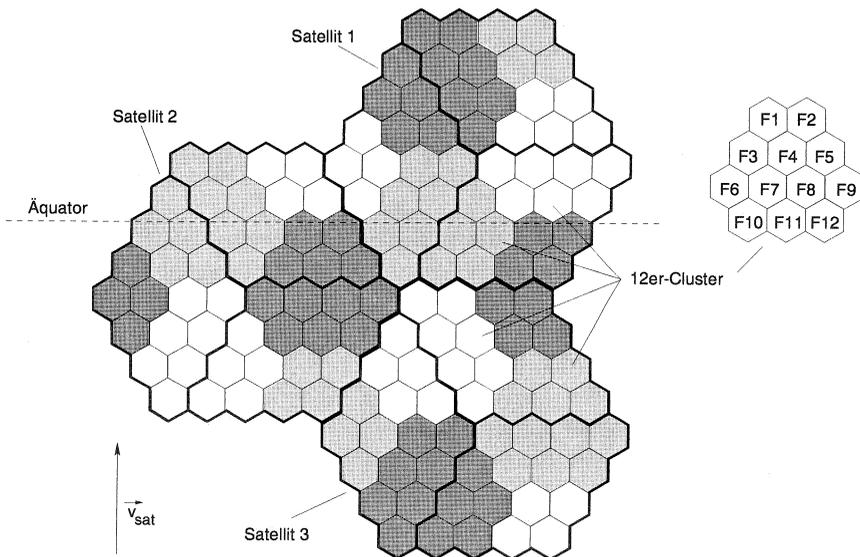


Abbildung 7.2: 12er-Cluster bei MSS_FCA

Es wird angenommen, daß jeder Referenzsatellit ein Feld von $N_t = 96$ Transceivern enthält. Jeweils zwei Transceiver werden einer Funkzelle fest zugeordnet und auf die in der Frequenzkanalzuordnung festgelegten Frequenzkanäle eingestellt.

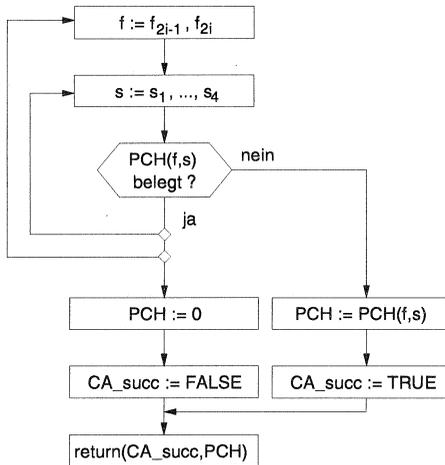


Abbildung 7.3: Das statische Referenzkanalvergabeverfahren MSS_FCA

Damit stehen in jeder Funkzelle sowohl die Funk- als auch die Satellitenressourcen für acht Teilnehmerverbindungen bereit. Ein Referenzsatellit hat somit eine maximale Kapazität von 384 Teilnehmern.

Entsprechend der Abbildung 4.17 fordert eine Mobilstation beim Verbindungsaufbau einen PCH in der Funkzelle mit dem höchsten BCCH-Empfangspegel, ohne jedoch eine PCHlist zu erstellen und mitzuschicken. Der Satellit versucht nach Erhalt der Funkkanalanforderung (siehe Abbildung 4.18), der Mobilstation einen PCH entsprechend dem in der Abbildung 7.3 dargestellten Algorithmus zu vergeben.

Dazu werden alle vier Zeitschlitz auf den beiden Frequenzkanälen, die der gewählten Funkzelle zugeordnet sind, durchsucht, bis ein nicht belegter PCH gefunden wird oder alle potentiellen PCH durchsucht worden sind. Wird ein PCH gefunden, wird die logische Variable CA_succ auf TRUE gesetzt. Im Falle eines Mißerfolges wird CA_succ auf FALSE gesetzt.

7.3 Interferenzbasierte DCA-Verfahren für MSS

Die Ausführungen in Kapitel 7.1.3 zusammenfassend läßt sich die These aufstellen, daß zentral gesteuerte DCA-Verfahren, die einen Funkkanal unter

Berücksichtigung bestehender Verbindungen und basierend auf dezentralen Störpegelmessungen und Schätzungen der resultierenden Gleichkanalstörpegelabstände auswählen, in realen Mobilfunksystemen eine optimale Kanalvergabe gewährleisten.

Dem entgegengestellt werden muß der Aufwand für Störpegelmessungen, die über Signalisierungskanäle ausgetauschte Informationsmenge und die Durchsuchungs- und Berechnungszeit der jeweiligen Algorithmen.

Im folgenden werden drei neu entwickelte, unterschiedlich komplexe interferenzbasierte DCA-Verfahren für MSS vorgestellt (siehe auch [7], [2], [8] und [3]), die bei der Auswahl des zu vergebenden PCH auch die Sendeleistungsbegrenzungen des Referenz-MSS berücksichtigen.

Die Vergabe eines PCH erfolgt in drei Schritten: Der erste ist die Erstellung einer PCH-Liste durch die Mobilstation, die mit der Kanalanforderung an den Satelliten geschickt wird, der zweite die Erstellung einer ZSL³² durch den Satelliten und der dritte die Auswahl und Vergabe eines PCH anhand der Kriterien des verwendeten Kanalvergabeverfahrens.

7.3.1 Erstellung der PCH-Liste

Bei einem Verbindungswunsch wählt eine Mobilstation aufgrund von BCCH-Messungen die Zelle mit der höchsten Signalpegel aus. Anschließend mißt sie die Gleichkanalstörpegel auf allen PCH und erstellt die *PCH-Liste*. Diese enthält alle im Interferenzbereich nicht belegten PCH sortiert nach Priorität, beginnend mit dem PCH mit dem geringsten Gleichkanalstörpegel und damit der höchsten Priorität, und die entsprechenden gemessenen Pegel (siehe Abbildung 7.4). Die PCH-Liste wird mit der Kanalanforderung an den gewählten Satelliten geschickt. Im folgenden wird auch die sogenannte PCH_c-Liste benötigt, in der die PCH anhand der geschätzten resultierenden CIR in abfallender Reihenfolge sortiert sind.

7.3.2 Erstellung der Zeitschlitzliste ZSL

Wie im Kapitel 4.6.3 erläutert wurde, ist die Anzahl der Teilnehmerverbindungen pro ZS³³ und eine Antenne bzw. einen Satelliten durch die maximalen BSL³⁴ pro Antenne, $P_{a\ max}$, bzw. Satellit, $P_{sat\ max}$, begrenzt.

³²Zeitschlitzliste

³³Zeitschlitz

³⁴Büschelsendeleistung

PCH-Nr.	empf. Störpegel
PCH 47	< -160 dB
PCH 36	< -160 dB
PCH 1	-152 dB
PCH 94	-150 dB
⋮	⋮
⋮	⋮
PCH 22	-149 dB

max. 96 Einträge

PCH-Nr.	gesch. result. CIR
PCH 47	> 25 dB
PCH 36	> 25 dB
PCH 1	22 dB
PCH 94	21 dB
⋮	⋮
⋮	⋮
PCH 22	16 dB

max. 96 Einträge

Abbildung 7.4: Beispiel für eine PCH-Liste und eine PCH_c-Liste

Damit bei einer Kanalanforderung möglichst viele der vier ZS zur Verfügung stehen, wird das Transceiver-Feld bezüglich der ZS gleichmäßig ausgelastet. Dies wird durch einen ZSL-Erstellungsalgorithmus gewährleistet.

Bei einer Kanalanforderung über die Antenne 1 wird, entsprechend der Abbildung 7.5, zuerst die BSL-Tabelle aktualisiert. Sie gibt Aufschluß über die BSL, die an jede der drei Antennen abgegeben werden, und die entsprechenden BSL, die an alle drei Satellitenantennen zusammen abgegeben werden.

Im Beispiel in der Abbildung 7.6 versorgt die Antenne 1 jeweils zwei Mobilstationen in ZS 1 und ZS 3, eine in ZS 2 und drei in ZS 4. Alle drei Antennen zusammen versorgen jeweils fünf Mobilstationen in ZS 1 und ZS 2, zwei in ZS 3 und sechs in ZS 4.

Der ZSL-Erstellungsalgorithmus entfernt aus der unsortierten ZSL 1, die die vier Elemente ZS 1, ZS 2, ZS 3 und ZS 4 enthält, die ZS, in denen die maximale BSL pro Satellit bereits erreicht ist. Hier ist dies der ZS 4.

Gleiches gilt für die ZS, in denen die maximale BSL für die entsprechende Antenne bereits erreicht ist. Hier wäre dies bei einer Kanalanforderung über Antenne 3 für den ZS 2 der Fall. Dieser würde aus der ZSL 3 entfernt werden. Nun werden die ZS der ZSL 1 in Abhängigkeit von der BSL, die an die Antenne 1 abgegeben wird, sortiert. Der ZS, in dem die geringste BSL benötigt wird, hat die höchste Priorität und steht am Anfang der ZSL. Bei gleicher BSL pro Antenne hat der ZS die höhere Priorität, in dem die BSL pro Satellit geringer ist. In der Abbildung 7.6 wird im ZS 1 und 3 die gleiche BSL an die Antenne 1 abgegeben. In der ZSL 1 steht der ZS 3 jedoch vor ZS 1,

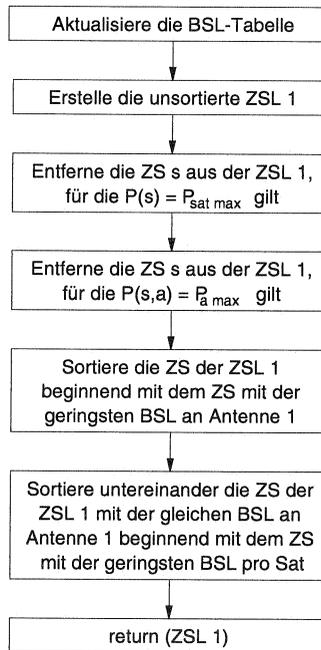


Abbildung 7.5: Algorithmus für die Erstellung einer ZSL.

da die Gesamt-BSL in ZS 3 nur 2 LE beträgt, und damit um 3 LE geringer ist als die Gesamt-BSL in ZS 1.

Bei einer Kanalanzahl von n ergeben sich entsprechend der Abbildung 7.6, abhängig von der versorgenden Antenne, jeweils die in der Abbildung 7.7 dargestellten ZSL. Die angeforderte ZSL 1 wird dem Kanalvergabealgorithmus zur Verfügung gestellt.

7.3.3 DCA-Min

Das störpegelbasierte Kanalvergabeverfahren *DCA-Min* sucht, unter Berücksichtigung der in der ZSL festgelegten Prioritäten, nach dem PCH mit dem geringsten Downlink-Störpegel I_{dn} , wobei sowohl der Downlink- als auch der Uplink-Störpegel des gefundenen PCH die vorgegebenen Maximalwerte nicht überschreiten dürfen.

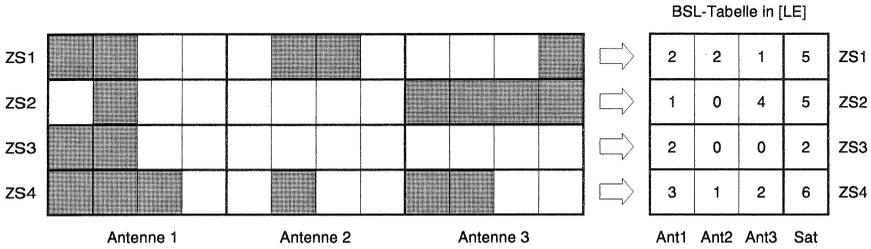


Abbildung 7.6: Beispiel für die Belegung der ZS bei $P_{a\ max} = 4$ und $P_{sat\ max} = 6$

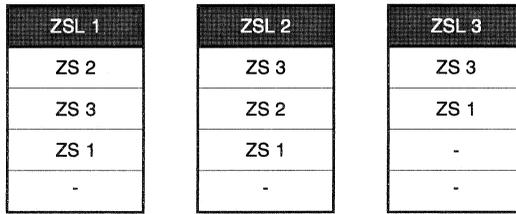


Abbildung 7.7: Beispiel für die drei resultierenden ZSL

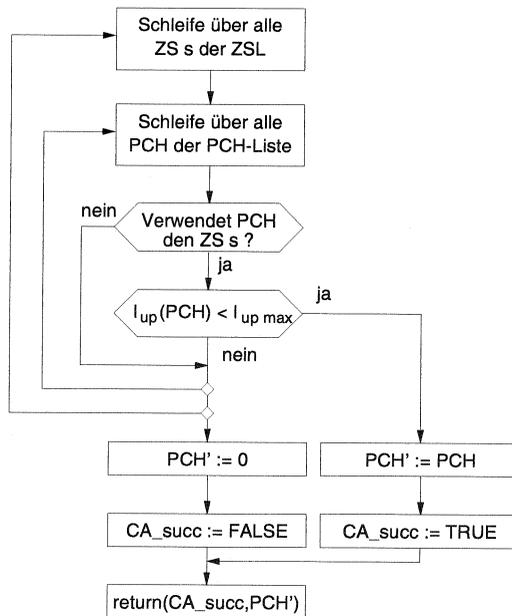
$$I_{dn}(PCH') = \min\{I_{dn}(PCH)\} \tag{7.3}$$

$$I_{dn}(PCH') < I_{dn\ max} \tag{7.4}$$

$$I_{up}(PCH') < I_{up\ max} \tag{7.5}$$

Der Algorithmus (siehe Abbildung 7.8) ist sehr einfach zu implementieren, da die PCH-Liste bereits von der Mobilstation nach (7.3) sortiert und dem Satelliten zur Verfügung gestellt wird.

Die Kanalauswahl findet im Satelliten statt. Er durchsucht die PCH-Liste nach dem bestmöglichen PCH, der den ZS mit der höchsten Priorität verwendet und die Kanalvergabekriterien (7.5) und (7.5) erfüllt. PCH auf anderen ZS werden vorerst nicht berücksichtigt. Wird ein entsprechender PCH gefunden, ist die Auswahlprozedur erfolgreich abgeschlossen. Wenn kein

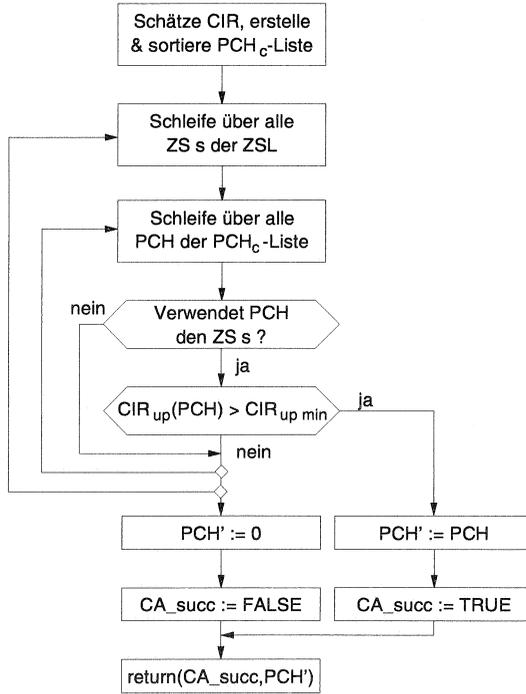
Abbildung 7.8: Kanalauswahl im Kanalvergabeverfahren *DCA-Min*

PCH, der den ZS mit der höchsten Priorität verwendet, die Kanalvergabe-kriterien (7.4) und (7.5) erfüllt, wird die PCH-Liste nach einem PCH, der den ZS mit der nächst niedrigeren Priorität verwendet, durchsucht. Erfüllt kein PCH die geforderten Kriterien, wird die Kanalauswahlprozedur ohne Erfolg beendet.

7.3.4 DCA-Max

Im störpegelabstands-basierten Kanalvergabeverfahren *DCA-Max* wird der resultierende Störpegelabstand anhand des *gemessenen* Störpegels und der relativen Position der Mobilstation zum Satellit *geschätzt*.

Unter Berücksichtigung der in der ZSL festgelegten Prioritäten wird nach dem PCH mit dem größten Downlink-Störpegelabstand CIR_{dn} gesucht, wobei der Downlink- und der Uplink-Störpegelabstand die Bedingungen (7.7) und (7.8) erfüllen müssen.

Abbildung 7.9: Kanalauswahl im Kanalvergabeverfahren *DCA-Max*

$$CIR_{dn}(PCH') = \max\{CIR_{dn}(PCH)\} \quad (7.6)$$

$$CIR_{dn}(PCH') > CIR_{dn min} \quad (7.7)$$

$$CIR_{up}(PCH') > CIR_{up min} \quad (7.8)$$

Wie in der Abbildung 7.9 dargestellt, erstellt der Satellit aus der PCH-Liste anhand der geschätzten Störpegelabstände CIR_{dn} die PCH_c-Liste und sortiert sie in abfallender Reihenfolge beginnend mit dem PCH mit dem größten CIR_{dn} .

Er durchsucht die PCH_c -Liste nach dem bestmöglichen PCH, der den ZS mit der höchsten Priorität verwendet und die Kanalvergabekriterien (7.7) und (7.8) erfüllt. PCH auf anderen ZS werden vorerst nicht berücksichtigt. Wird ein entsprechender PCH gefunden, ist die Auswahlprozedur erfolgreich abgeschlossen. Wenn kein PCH, der den ZS mit der höchsten Priorität verwendet, die Kanalvergabekriterien (7.7) und (7.8) erfüllt, wird die PCH-Liste nach einem PCH, der den ZS mit der nächst niedrigeren Priorität verwendet, durchsucht. Erfüllt kein PCH die geforderten Kriterien, wird die Kanalauswahlprozedur ohne Erfolg beendet.

7.3.5 DCA-MaxMin

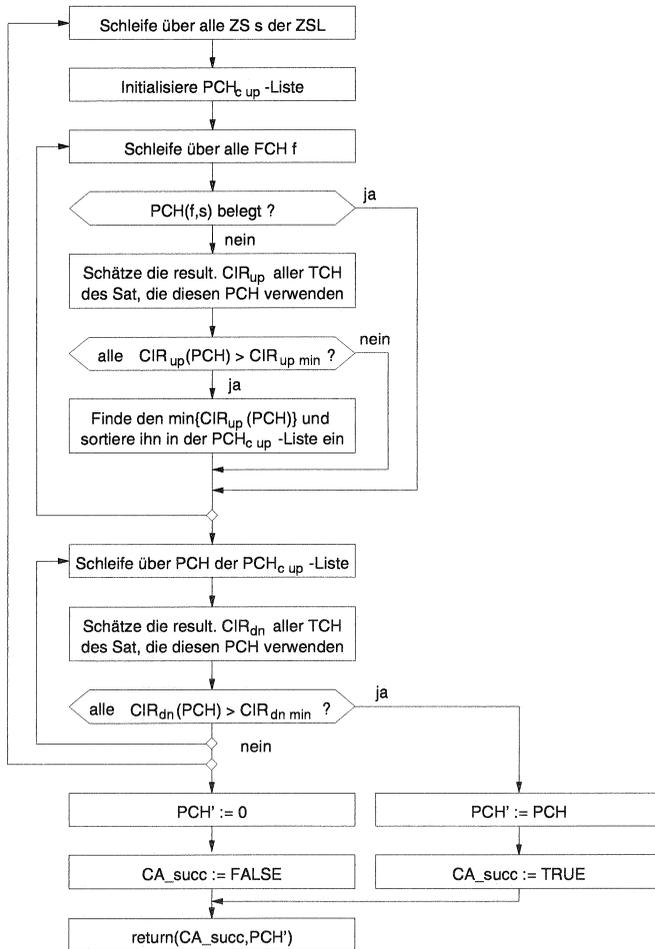
Während die beiden bisher vorgestellten DCA-Verfahren bei einer Kanal-anforderung nur die Qualität der neuen Verbindung bewerten, analysiert die Kanalvergabestrategie *DCA-MaxMin* zusätzlich den Einfluß der PCH-Vergabe auf bestehende Verbindungen, die den gleichen PCH verwenden. Der neuen Mobilstation wird der PCH zugewiesen, der das Minimum der zu erwartenden Störpegelabstände aller Mobilstationen, die in diesem Moment den gleichen PCH verwenden, einschließlich der neuen Mobilstation, maximiert (siehe (7.9)). Dabei werden die in der ZSL festgelegten Prioritäten berücksichtigt. Auch müssen die resultierenden Downlink- und Uplink-Störpegelabstände die Bedingungen (7.10) und (7.11) erfüllen.

$$CIR_{up}(PCH') = \max\{\min[CIR_{up}(PCH)]\} \quad (7.9)$$

$$\forall CIR_{up}(PCH') > CIR_{up\ min} \quad (7.10)$$

$$\forall CIR_{dn}(PCH') > CIR_{dn\ min} \quad (7.11)$$

Die Kanalvergabestrategie *DCA-MaxMin* durchsucht in einer Schleife über alle Frequenzkanäle, ob der diesem Frequenzkanal und dem ZS der höchsten Priorität entsprechende PCH bereits belegt ist (siehe Abbildung 7.10). PCH auf anderen ZS werden vorerst nicht berücksichtigt. Ist der PCH nicht belegt, schätzt der Satellit die resultierenden CIR_{up} aller Verbindungen, die ebenfalls diesen PCH verwenden. Sind alle CIR_{up} ausreichend groß, wird der minimale CIR_{up} für diesen PCH gefunden und der PCH in die PCH_c -Liste einsortiert.

Abbildung 7.10: Kanalauswahl im Kanalvergabeverfahren *DCA-MaxMin*

Wurden alle PCH, die den ZS der höchsten Priorität verwenden, durchlaufen, werden in der durch die sortierte PCH_c -Liste vorgegebenen Reihenfolge auch die resultierenden CIR_{dn} aller Verbindungen, die den gleichen PCH verwenden, geschätzt. Der erste PCH, der die geforderten Bedingun-

gen erfüllt, wird vergeben.

Erfüllt kein PCH, der den ZS mit der höchsten Priorität verwendet, die Kanalvergabekriterien (7.10) und (7.7), werden die PCH, die den ZS mit der nächst niedrigeren Priorität verwenden, durchsucht. Erfüllt kein PCH die geforderten Kriterien, wird die Kanalauswahlprozedur ohne Erfolg beendet. Dieses Kanalvergabeverfahren garantiert, daß ein PCH nur vergeben wird, falls dadurch keine bestehende Verbindung unterbrochen wird. Dazu müssen jedoch viele Daten verarbeitet und ausgetauscht werden. Werden hierbei auch Nachbarsatelliten einbezogen, verbessert sich die Leistungsfähigkeit des Kanalvergabeverfahrens durch eine genauere Abschätzung der resultierenden CIR, jedoch auf Kosten des Signalisierungs- und Rechenaufwandes.

7.4 Leistungsbewertung der Kanalvergabeverfahren

Bei einer Gleichverteilung des Verkehrsangebotes in einer Satellitenausleuchtzone würde, bei 96 Transceivern pro Satellit, ein 12er-Cluster resultieren. Das entsprechende MSS wäre in diesem Falle ausschließlich kapazitätsbegrenzt.

Unter der gleichen Annahme wäre ein MSS mit 192 Transceivern pro Satellit ausschließlich interferenzbegrenzt, da die Hardware-Ressourcen des Satelliten aufgrund der resultierenden Gleichkanalinterferenz im MSS nie vollständig genutzt werden würden. Es ist offensichtlich, daß die Verkehrskapazität des MSS im zweiten Fall durch den Einsatz eines leistungsfähigen interferenzbasierten DCA-Verfahrens, wie z.B. *DCA-MaxMin*, maximiert werden kann.

Im folgenden soll untersucht werden, ob sich der Einsatz solch leistungsfähiger, aber aufwendiger DCA-Verfahren unter der realitätsnahen Annahme eines nicht gleichverteilten Verkehrsangebots innerhalb einer Satellitenausleuchtzone auch in primär nicht interferenzbegrenzten MSS lohnt.

Im Rahmen der simulativen Leistungsuntersuchung von DCA-basierten MSS wurde die Abhängigkeit der resultierenden mittleren Gesprächsverlustwahrscheinlichkeiten, P_n , Gesprächsabbruchwahrscheinlichkeiten, P_d , und Gesamtgesprächsblockierwahrscheinlichkeiten, P_g , von der Verkehrsangebotsdichte in einem begrenzten Teilnehmergebiet untersucht. Dabei wurde die Anzahl der Transceiver pro Satellit jeweils zu 96, 120 und 192 gewählt. Alle drei zuvor vorgestellten DCA-Verfahren, *DCA-Min*, *DCA-Max* und *DCA-MaxMin*, wurden simulativ untersucht.

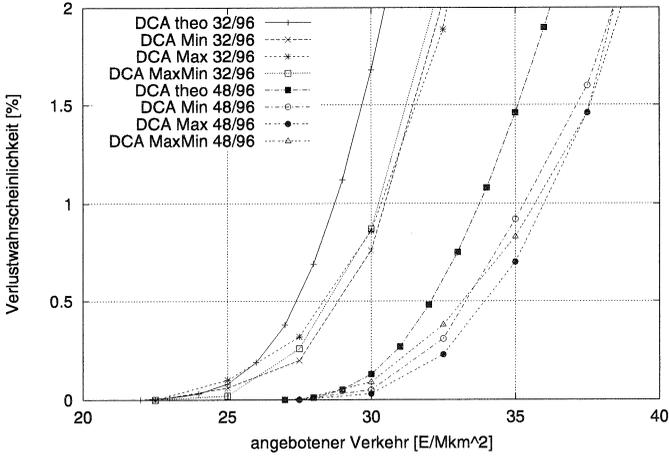


Abbildung 7.11: Gesprächsverlustwahrscheinlichkeit (96 Transceiver/Satellit; maximal 32 bzw. 48 Transceiver/Antenne)

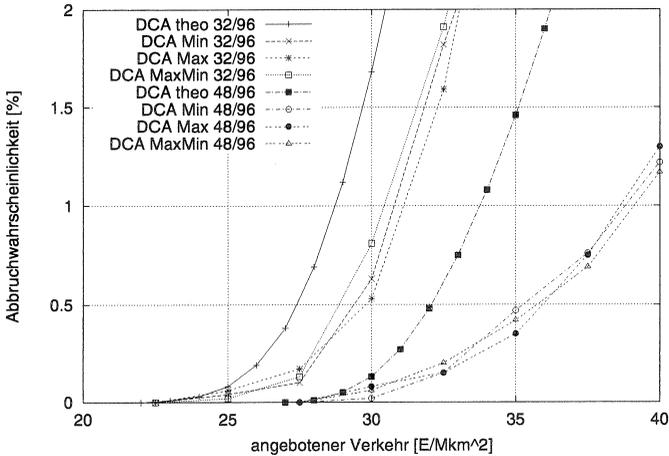


Abbildung 7.12: Gesprächsabbruchwahrscheinlichkeit (96 Transceiver/Satellit; maximal 32 bzw. 48 Transceiver/Antenne)

Wie aus den Abbildungen 7.11 bis 7.13 ersichtlich ist, ist die mittlere Verkehrskapazität eines DCA-basiertes MSS mit 96 Transceivern ausschließlich von der maximalen Anzahl von Transceivern, die pro Antenne eingesetzt werden können, abhängig. Sie ist jedoch unabhängig vom eingesetzten interferenzbasierten DCA-Verfahren. Durch die Erhöhung der Flexibilität bei der Transceiver-Vergabe von maximal 32 auf 48 Transceiver pro Antenne wird die Verkehrskapazität um 17% gesteigert. Eine weitere Erhöhung der Flexibilität auf maximal 96 Transceiver pro Antenne führt zu keiner weiteren Verbesserung der Verkehrskapazität des MSS (siehe Kapitel 6.7.4). Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den theoretischen Werten, *DCA theo 32/96* und *DCA theo 48/96*, in Abbildung 7.13.

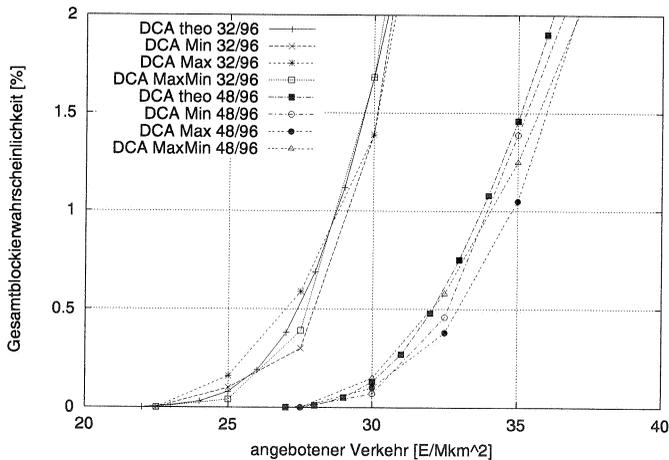


Abbildung 7.13: Gesamtblockierwahrscheinlichkeit (96 Transceiver/Satellit; maximal 32 bzw. 48 Transceiver/Antenne)

In den Abbildungen 7.14 bis 7.17 sind die Verteilungsdichtefunktionen und die Verteilungsfunktionen der Störpegelabstände auf dem Downlink und dem Uplink, $p(CIR_{dn})$, $p(CIR_{up})$, $P(cir_{dn} < CIR_{dn})$ und $P(cir_{up} < CIR_{up})$, in einem FCA- und einem DCA-basierten MSS bei

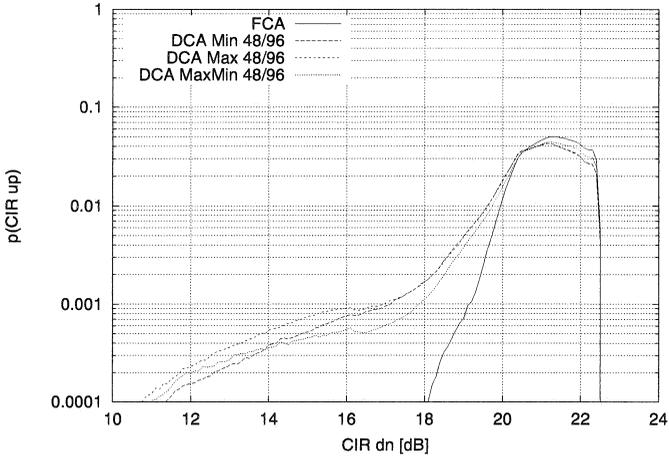


Abbildung 7.14: Downlink-Verteilungsdichtefunktion

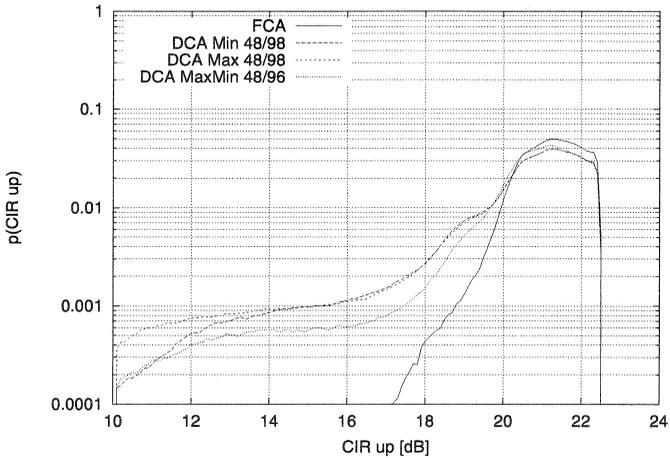


Abbildung 7.15: Uplink-Verteilungsdichtefunktion

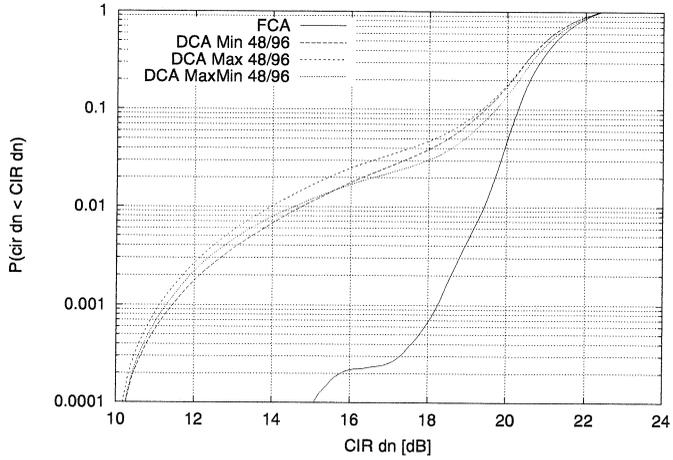


Abbildung 7.16: Downlink-Verteilungsfunktion

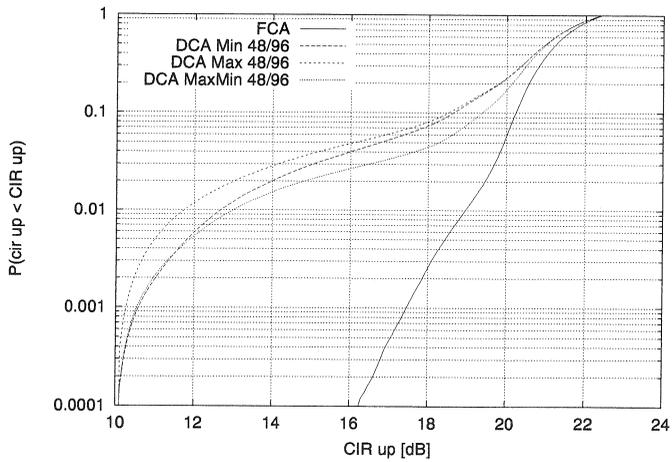


Abbildung 7.17: Uplink-Verteilungsfunktion

einer Gesamtblockierwahrscheinlichkeit von 0.5% dargestellt. Bei der Betrachtung ihrer Verläufe ist zu erkennen, daß die Verbindungsqualität in dem FCA-basierten MSS im Vergleich zum DCA-basierten MSS deutlich höher ist. Dies ist einleuchtend, da auch der getragene Verkehr und damit auch der resultierende Gleichkanalstörpegel im DCA-basierten MSS bei gleicher Gesamtblockierwahrscheinlichkeit bedeutend höher ist. Da die geforderte Verbindungsqualität in beiden Fällen eingehalten wird, wobei die Verkehrskapazität des DCA-basierten MSS um 175% größer ist als die des FCA-basierten MSS (siehe Kapitel 6.7.4), kann der prinzipielle Einsatz von dynamischen Kanalvergabeverfahren in MSS empfohlen werden.

Anhand der in den Abbildungen 7.18 bis 7.20 dargestellten Simulationsergebnisse kann die Transformation eines kapazitätsbegrenzten MSS zu einem interferenzbegrenzten MSS in folge einer Erhöhung der Anzahl der Transceiver pro Satellit auf 120 bzw. 192 und einer proportionalen Erhöhung der maximalen Anzahl der Transceiver pro Antenne auf 60 bzw. 96 illustriert werden.

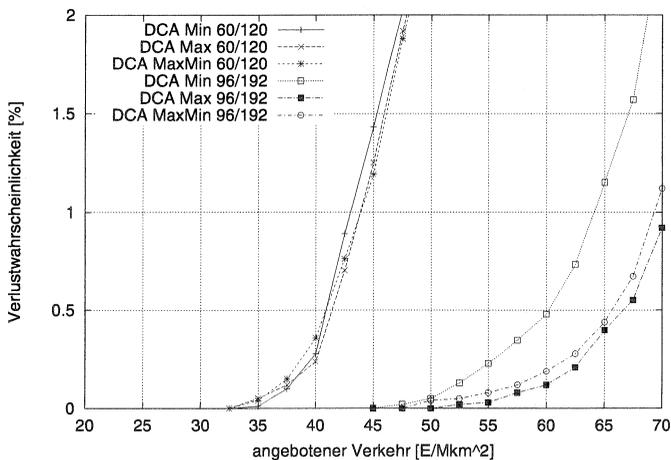


Abbildung 7.18: Gesprächsverlustwahrscheinlichkeit (120 bzw. 192 Transceiver/Satellit; maximal 60 bzw. 96 Transceiver/Antenne)

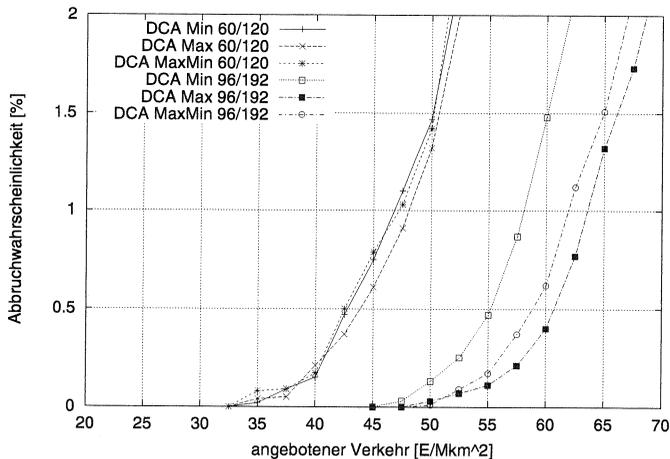


Abbildung 7.19: Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit (120 bzw. 192 Transceiver/Satellit; maximal 60 bzw. 96 Transceiver/Antenne)

Das DCA-basierte MSS mit 120 Transceivern pro Satellit und maximal 60 Transceivern pro Antenne kann, wie das zuvor beschriebene MSS, eindeutig als kapazitätsbegrenzttes MSS charakterisiert werden. Das DCA-basierte MSS mit 192 Transceivern pro Satellit und maximal 96 Transceivern pro Antenne ist dagegen ein interferenzbasiertes MSS. In einem derartigen MSS kommt erstmals auch der Leistungsunterschied der drei oben vorgestellten interferenzbasierten DCA-Verfahren zum tragen. Dabei sieht man, daß die beiden aufwendigeren DCA-Verfahren *DCA-Max* und *DCA-MaxMin*, die den resultierenden Störpegelabstand einer potentiellen Verbindung bzw. auch die resultierenden Störpegelabstände auf den bestehenden Gleichkanalverbindungen vor ihrer Einrichtung schätzen, zu einer um 13% bzw. 8% höheren Verkehrskapazität führen, als das DCA-Verfahren *DCA-Min*, das ein starres Störpegelkriterium verwendet. Daher kann der Einsatz dieser DCA-Verfahren in vorwiegend interferenzbegrenzten MSS empfohlen werden.

Anhand des Vergleichs der simulativen Ergebnisse mit der theoretisch berechneten Gesamtblockierwahrscheinlichkeit in der Abbildung 7.20 werden die Grenzen des theoretischen Modells aufgezeigt. Aufgrund des approxima-

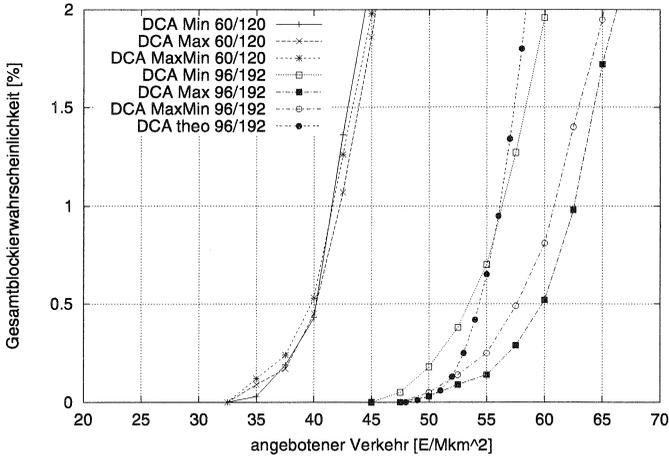


Abbildung 7.20: Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit (120 bzw. 192 Transceiver/Satellit; maximal 60 bzw. 96 Transceiver/Antenne)

tiven Interferenzmodells und der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der drei DCA-Verfahren ergibt sich anhand der theoretischen Berechnung eine im Vergleich zum Simulationsergebnis um bis zu 9% geringere Verkehrskapazität eines DCA-basierten MSS. Unter Berücksichtigung einer im Vergleich zur Simulation weitaus zeiteffizienteren Verkehrskapazitätsschätzung ist diese Abweichung jedoch durchaus tolerierbar.

Handover in mobilen Satellitensystemen

Unter einem *Handover* versteht man den unterbrechungsfreien Wechsel des physikalischen Kanals bzw. die unterbrechungsfreie Weitergabe einer Teilnehmerverbindung an eine benachbarte Funkzelle eines Mobilfunksystems. Die Handover-Funktionalität gewährleistet, daß die einem Mobilfunkteilnehmer angebotenen Dienste innerhalb der gewünschten Kommunikationsdauer in ausreichender Qualität bereitgestellt werden. Sie ist somit ein wesentliches Leistungsmerkmal eines Mobilfunksystems.

In einem MSS führt die hohe Satellitengeschwindigkeit von $v_s = 26900 \text{ km/h}$ dazu, daß eine Mobilstation während eines Gesprächs mehrere Handover durchführen muß. Dabei kann ihre Eigengeschwindigkeit, sofern sich der Teilnehmer nicht gerade in einem Flugzeug befindet, gegenüber der Geschwindigkeit, mit der sich der Satellitenfußpunkt SSP über die Erdoberfläche bewegt, $\vec{v}_{ssp} = 22000 \text{ km/h}$, vernachlässigt werden. Die im Vergleich zu einem terrestrischen Mobilfunksystem hohe Anzahl von Handovern pro Gespräch beeinflußt über die Handover-Blockierwahrscheinlichkeit entscheidend die Gesamblockierwahrscheinlichkeit eines MSS.

Aufgrund der Erdrotation existiert in dem polaren Referenzkoordinatensystem eine weitere Geschwindigkeitskomponente, $\vec{v}_{rot\ rel}$, die der Erdrotation entgegengesetzt ist und von der momentanen geographischen Breite der Satellitenposition φ_s abhängt. $\vec{v}_{rot\ rel}$ ist am Äquator maximal und an den Polen gleich Null (siehe Abbildung 8.1).

8.1 Handover-Arten in MSS

In einem MSS wird, abhängig von der Zuordnung der beiden betroffenen Funkzellen zu den Antennen- bzw. Satellitenausleuchtungszonen, zwischen drei Handover-Arten unterschieden (siehe Abbildung 8.2):

- *Intra-Cell Handover*: Handover innerhalb derselben Funkzelle.

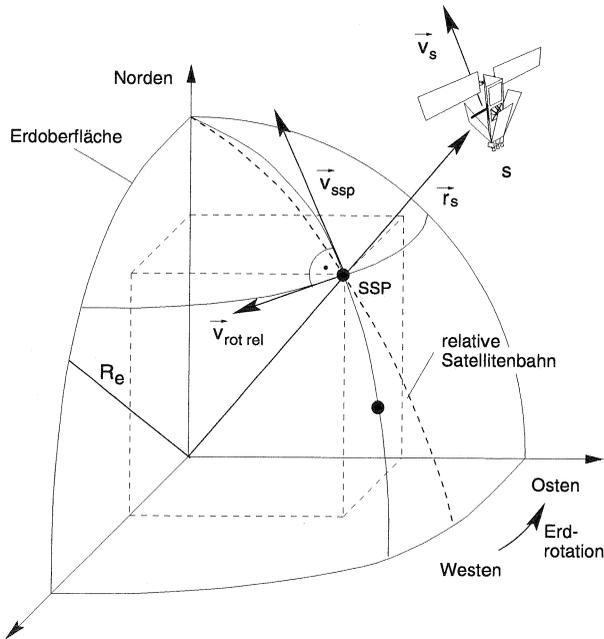


Abbildung 8.1: Komponenten der relativen Satellitengeschwindigkeit

- *Inter-Cell Handover*: Handover zwischen zwei Funkzellen eines Satelliten.
- *Inter-Satellite Handover*: Handover zwischen den Funkzellen zweier benachbarter Satelliten.

In einem realen MSS treten die verschiedenen Handover-Arten unterschiedlich häufig auf. Anhand von simulativen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Anteile der *Inter-Cell Handover* und der *Inter-Satellite Handover* im FCA-basierten Referenz-MSS jeweils 81% und 19% betragen. Da in dem Referenz-MSS keine Pegelbrüche aufgrund von Abschattungen auftreten und das zugrundeliegende 12er-Cluster zu einer geringen Gleichkanalinterferenz im System führt, treten hier keine *Intra-Cell Handover* auf.

Dieses Ergebnis kann anhand der in (6.48) gegebenen mittleren Anzahl von Funkzellen-Handovern pro Gespräch, \bar{n}_z , und der in (6.58) gegebene-

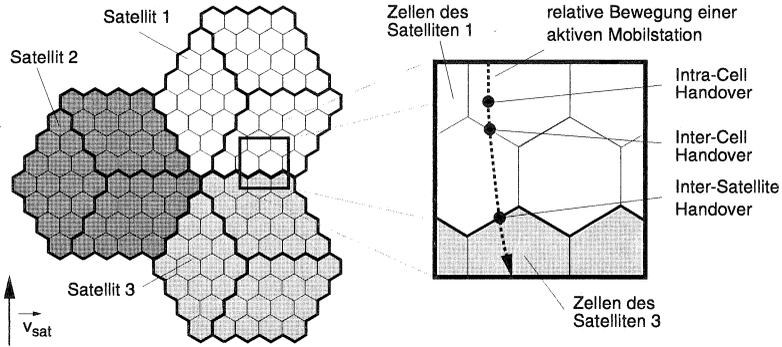


Abbildung 8.2: Handover-Arten in MSS

nen mittleren Anzahl von Satelliten-Handovern pro Gespräch, \bar{n}_s , die im Rahmen dieser Arbeit anhand des analytischen Modells berechnet worden sind, bestätigt werden. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß \bar{n}_z **alle** Funkzellen-Handover, also auch die Handover zwischen den Funkzellen benachbarter Satelliten, oben als *Inter-Satellite Handover* definiert, beinhaltet, und somit die Gesamtanzahl der Handover darstellt.

Der Anteile der *Inter-Satellite Handover*, $a_{\text{inter-sat}}$, und der *Inter-Cell Handover*, $a_{\text{inter-cell}}$, an der Gesamtanzahl der Handover sind demnach mit

$$a_{\text{inter-sat}} = \frac{\bar{n}_s}{\bar{n}_z} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R_z}{R_s} \quad (8.1)$$

und

$$a_{\text{inter-cell}} = \frac{\bar{n}_z - \bar{n}_s}{\bar{n}_z} = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R_z}{R_s} \quad (8.2)$$

gegeben. Da $R_z/R_s \approx 1/6$ ist, berechnen sich die beiden Anteile zu $a_{\text{inter-sat}} \approx 19\%$ und $a_{\text{inter-cell}} \approx 81\%$, was das Simulationsergebnis mit beeindruckender Genauigkeit bestätigt.

In der Abbildung 8.3 ist der prozentuale Anteil der drei Handover-Arten in Abhängigkeit von der Verkehrsangebotsdichte für ein MSS mit 192 Transceivern pro Satellit und maximal 96 Transceivern pro Antenne, daß das im Kapitel 7.3 vorgestellte DCA-Verfahren *DCA-MaxMin* verwendet, dargestellt.

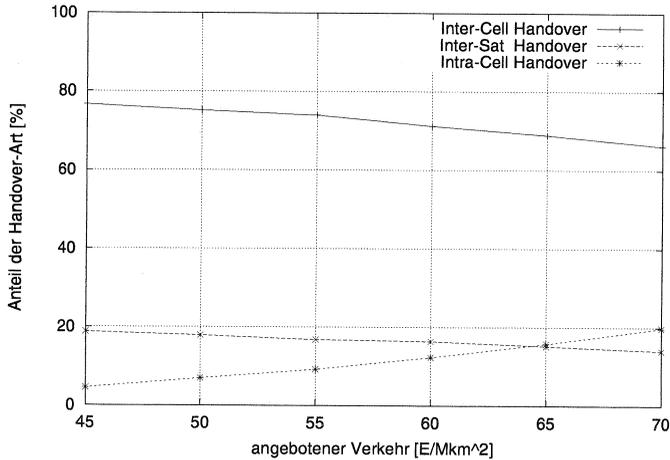


Abbildung 8.3: Prozentueller Anteil der Handover-Arten in einem DCA-basierten MSS

In diesem interferenzbegrenzten MSS steigt bei hohen Verkehrsangeboten auch die Gleichkanalinterferenz im System. Sinkt die Qualität einer Verbindung unter die vorgegebene Schwelle, wird ein Handover ausgelöst, ohne daß die entsprechende Mobilstation in eine andere Funkzelle eingetreten ist. In dieser Situation fordert die Mobilstation einen Kanal mit einer besseren Qualität in derselben Zelle an; es kommt zu einem *Intra-Cell Handover*. Aus der Abbildung 8.3 ist ersichtlich, daß sich der Anteil der *Intra-Cell Handover* mit steigendem Verkehrsangebot primär auf Kosten des Anteils der *Inter-Satellite Handover* vergrößert und bei einem sehr hohen Verkehrsangebot sogar größer wird als der Anteil der *Inter-Cell Handover*.

8.2 Handover-Steuerung

Die Steuerung des Handover-Prozesses in einem MSS kann sowohl dezentral durch die Mobilstationen als auch zentral durch die in den Satelliten implementierte Netzfunktionalität erfolgen. Optional kann die nicht steuernde Instanz den Handover-Prozeß dabei unterstützen. Anhand der Zuständig-

keit für die Einleitung und Durchführung eines Handovers unterscheidet man

- *Network Controlled HandOver (NCHO)*: Die Satelliten steuern den Handover-Prozeß, ohne dabei auf Funktionalitäten der Mobilstationen angewiesen zu sein.
- *Mobile Assisted HandOver (MAHO)*: Die Satelliten steuern den Handover-Prozeß, werden jedoch von den Mobilstationen, z.B. durch die Bereitstellung von Downlink-Meßreports, unterstützt.
- *Mobile Controlled HandOver (MCHO)*: Jede Mobilstation sucht während eines Gesprächs den geeignetsten PCH, baut die neue Verbindung auf und die alte ab, ohne dabei auf Funktionalitäten der Satelliten bzw. des Netzes angewiesen zu sein.
- *Network Assisted HandOver (NAHO)*: Die Mobilstationen steuern dezentral den Handover-Prozeß, werden jedoch von den Satelliten, z.B. durch die Bereitstellung von Uplink-Meßreports, unterstützt.

Wie aus der Beschreibung des Handover-Protokolls des Referenz-MSS im Kapitel 4.5.2 ersichtlich ist, handelt es sich hierbei um einen *NAHO*.

8.3 Handover-Ablauf

Eine Handover-Prozedur ist in drei Phasen unterteilt: die Vorbereitungsphase, die Entscheidungsphase und die Ausführungsphase. Wird gegen einen Handover entschieden, entfällt die Handover-Ausführung, und die Mobilstation verwendet weiterhin denselben Funkkanal in der derselben Funkzelle wie zuvor (siehe Abbildung 8.4).

Die Qualität einer Verbindung wird ständig durch Messungen auf dem Uplink und Downlink überwacht. Im Rahmen der Handover-Vorbereitungsphase werden

- Meßwerte über Empfangspegel und die Verbindungsqualität aktualisiert
- optional Informationen über die Auslastung der versorgenden und der benachbarten Funkzellen, Antennen und Satelliten eingeholt, sowie
- optional Sichtbarkeitsdauern des versorgenden und der benachbarten Satelliten berechnet.

Basierend auf dem im Referenz-MSS verwendeten Handover-Protokoll wird ein Handover eingeleitet, wenn

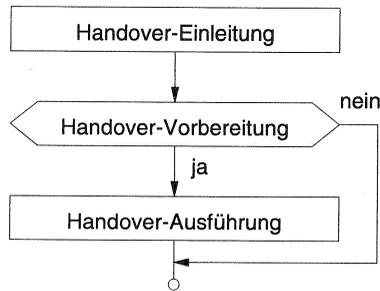


Abbildung 8.4: Handover-Ablauf

- Die Verbindungsqualität, repräsentiert durch die Bitfehlerrate bzw. den CIR, eine bestimmte Schwelle unterschreitet.
- Der Empfangspegel auf dem Uplink oder Downlink in der versorgenden Funkzelle unter einer bestimmten Schwelle liegt.
- Eine benachbarte Funkzelle einen höheren Empfangspegel aufweist und damit eine bessere Verbindungsqualität bzw. eine ähnlich gute Verbindungsqualität bei geringerer Sendeleistung bereitstellen kann.

Um Mehrfach-Handover, auch *Ping-Pong Handover* genannt, zwischen benachbarten Funkzellen oder gar Satelliten, zu verhindern, werden bei der Handover-Entscheidung *Hysterese-Verfahren* verwendet. Bei dem in der Abbildung 8.5 illustrierten Leistungshysterese-Verfahren erfolgt die Handover-Einleitung erst, wenn der mittlere Empfangspegel des Bakensignals der neuen Funkzelle bedeutend größer ist als der der versorgenden Funkzelle.

Der Hysterese-Wert, in der Abbildung 8.5 *Handover-Schwelle* genannt, muß sorgfältig gewählt werden, da ein zu großer Hysterese-Wert zu einer verzögerten Handover-Einleitung führen würde. Diese würde eine höhere Sendeleistungen implizieren, um eine Mobilstation, die sich bereits außerhalb des Kernbereichs der Zelle befindet, mit ausreichender Qualität zu versorgen, was wiederum zu einer ungünstigen Interferenzsituation und damit zu einer Verringerung der Verkehrskapazität des MSS führen würde. Bei Intra- und Inter-Cell Handovern ist jeweils nur ein Satellit vom Handover-Vorgang betroffen. Ein Inter-Satellite Handover ist komplexer, da der neue Satellit sowohl teilnehmerseitig als auch netzseitig eine Verbindung aufbauen bzw. durchschalten muß.

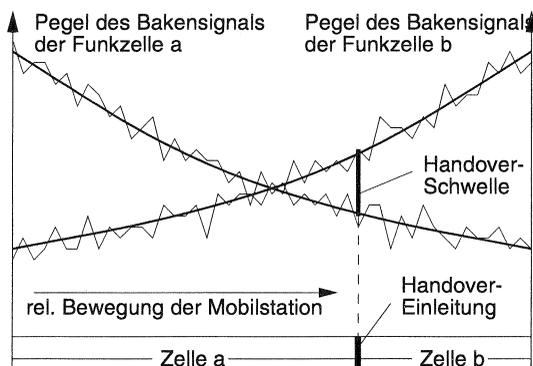


Abbildung 8.5: Handover mit Leistungshysterese

Um einen unterbrechungsfreien Handover zu bewerkstelligen, muß die alte Verbindung aufgrund der höheren Signallaufzeiten in MSS und der resultierenden Dauer des gesamten Handover-Vorgangs so lange gehalten werden, bis die neue Verbindung aufgebaut ist. Dies impliziert, besonders bei Inter-Satellite Handovers, eine rechtzeitige Einleitung und zeiteffiziente Entscheidungsprozedur, damit für die Dauer des Handover-Vorgangs eine ausreichende Verbindungsqualität über die alte Verbindung gewährleistet werden kann.

8.4 Handover-Strategien für MSS

Die folgenden Strategien haben zum Ziel, den optimalen Zeitpunkt für einen Inter-Satellite Handover und den Satelliten, der das Gespräch übernehmen soll, zu bestimmen. Sie ergänzen die pegel- und verbindungsqualitätsbasierte Handover-Entscheidung um geometriebasierte Kriterien.

- *Maximierung des Elevationswinkels*: Sobald ein neuer Satellit einen größeren Elevationswinkel aufweist als der versorgende, wird ein Inter-Satellite Handover eingeleitet. Es wird immer der Satellit mit dem z.Zt. größten Elevationswinkel ausgewählt. Damit wird die Abschattungswahrscheinlichkeit minimiert, jedoch wird das MSS mit

der Ausführung vieler zu diesem Zeitpunkt möglicherweise unnötiger Inter-Satellite Handover belastet.

- *Maximierung der Restsichtbarkeitsdauer:* Ein Inter-Satellite Handover wird angefordert, kurz bevor der versorgende Satellit den geforderten Elevationswinkel unterschreitet. Die Verbindung wird an den Satelliten, der am längsten sichtbar sein wird, übergeben. Dadurch kann die Handover-Rate auf Kosten der durchschnittlich geringeren Verbindungsqualität niedrig gehalten werden.
- *Maximierung des Elevationswinkels und der Dauer bestehender Verbindungen:* Ein Inter-Satellite Handover wird angefordert, kurz bevor der versorgende Satellit den minimalen Elevationswinkel unterschreitet. Die Verbindung wird an den Satelliten mit dem größten Elevationswinkel übergeben. Diese Strategie ist relativ effizient und einfach zu implementieren. Ein Inter-Satellite Handover muß aber rechtzeitig eingeleitet werden, damit die alte Verbindung nicht abbricht, bevor eine neue aufgebaut ist.

Das Referenz-MSS ist so ausgelegt, daß bei einem Inter-Satellite Handover durch den Vergleich der Empfangspegel der Bakensignale implizit die Strategie *Maximierung des Elevationswinkels und der Dauer bestehender Verbindungen* verwendet wird.

8.5 Verfahren zur Senkung der Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit

Aus der Sicht eines Mobilfunkteilnehmers ist der Abbruch eines laufenden Gesprächs weitaus unerwünschter als die (einmalige) Rückweisung eines neuen Gesprächswunsches. Daher müssen Mechanismen gefunden werden, die Wahrscheinlichkeit eines Gesprächsabbruchs, P_d , im Vergleich zur Wahrscheinlichkeit einer Gesprächsrückweisung, P_n , klein zu halten.

Führt eine Handover-Rückweisung gleichzeitig zum Gesprächsabbruch, ist P_d gleich der Handover-Blockierwahrscheinlichkeit, P_h . Da während eines Gesprächs meist mehrere Handover auftreten, führt dies unter der Annahme, daß $P_h = P_n$ gilt, zu $P_d \gg P_n$. Um dies zu verhindern, führt eine Rückweisung eines rechtzeitig eingeleiteten Handovers in einem realen MSS nicht gleichzeitig zum Gesprächsabbruch, wenn die Verbindungsqualität noch ausreichend ist.

Um die Handover-Blockierwahrscheinlichkeit und damit auch die Gesprächsrückweisungswahrscheinlichkeit zu senken, bieten sich die folgenden Verfahren für die Bevorzugung von Handover-Rufen gegenüber neuen Rufen an:

- Heraufsetzen der Störpegelabstandsschwelle für die Kanalzuteilung an einen neuen Ruf im Vergleich zum minimal geforderten Störpegelabstand für die Kanaluweisung an einen Handover-Ruf.
- Halten von Verbindungen trotz mangelhafter Verbindungsqualität.
- Reservierung von Ressourcen exklusiv für Handover-Rufe

8.5.1 Heraufsetzen der Störpegelabstandsschwelle für neue Gespräche

Bei einer Kanalanforderung wird zwischen neuen Rufen und Handover-Rufen unterschieden. Um bei hohen Verkehrslasten Handover-Rufe zu bevorzugen, wird der minimale Störpegelabstand¹, den eine neue Verbindung aufweisen muß, $CIR_{n\ min}$, im Vergleich zum minimal geforderten Störpegelabstand für einen Handover-Ruf, $CIR_{h\ min}$, so gewählt, daß

$$CIR_{n\ min} > CIR_{h\ min} \tag{8.3}$$

gilt. Dabei müssen beide Schwellenwerte größer als der minimale Störpegelabstand, bei dem eine laufende Verbindung ohne Qualitätseinbußen unterhalten werden kann, sein.

Schwelle	geforderter CIR ...
CIR_{min} [dB]	um eine Verbindung aufrechtzuerhalten
$CIR_{n\ min}$ [dB]	für die Annahme eines neuen Rufes
$CIR_{h\ min}$ [dB]	für die Annahme eines Handover-Rufes

Tabelle 8.1: Schwellenwerte des Referenz-MSS

Da die Störpegelabstandsschwelle für neue Rufe höher ist als die entsprechende Schwelle für Handover-Rufe, sinkt bei höheren Verkehrslasten P_h und damit auch P_d auf Kosten von P_n . Die Schwierigkeit bei diesem Ansatz

¹ Abhängig von implementierten Handover-Protokoll können statt der Störpegelabstandsschwellen auch Störpegelschwellen verwendet werden

ist, die Schwellenwerte so festzulegen, daß die Verkehrskapazität des MSS optimal wird.

8.5.2 Halten von Verbindungen trotz mangelhafter Verbindungsqualität

Die Einrichtung von *Warteschlangen für Handover-Rufe* erlaubt es, mit einer Verzögerung auch Handover-Anforderungen zu bedienen, selbst wenn bei ihrem Eintreffen keine Funkkanäle verfügbar sind. Diese Verzögerung darf jedoch nicht zu groß sein, wenn gefordert wird, daß die vorgegebene Verbindungsqualität zu keiner Zeit unterschritten werden darf, da die Qualität der bestehenden Verbindung zu stark abfallen würde, was den Abbruch des Gesprächs zur Folge hätte.

Darf die Verbindungsqualität eine gewisse Zeit, im folgenden *Verbindungshaltezeit* genannt, unterschritten werden, bis eine Funkkanal mit einer ausreichenden Verbindungsqualität bereitgestellt werden kann, steigt die Verkehrskapazität des MSS.

In der Abbildung 8.6 ist die Abhängigkeit der Gesprächsrückweisungswahrscheinlichkeit, P_n , der Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit, P_d , und der Gesamtblockierwahrscheinlichkeit, P_g , von der maximalen Verbindungshaltezeit für ein FCA-basiertes MSS dargestellt.

8.5.3 Reservierung von Ressourcen exklusiv für Handover-Rufe

Mit den Verfahren *Cutoff Priority Scheme* und *Guard Channel Scheme* [25] werden Ressourcen exklusiv für Handover-Rufe reserviert. Um diese Verfahren anwenden zu können, müssen zuvor die Systemressourcen, die die Verkehrskapazität eines MSS hauptsächlich begrenzen, identifiziert werden. Entsprechend wird dann ein Teil dieser *kritischen* Ressourcen, wie z.B. bestimmte PCH, eine gewisse Sendeleistungsreserve oder einige Transceiver, exklusiv für Handover-Rufe reserviert.

Da dadurch weniger Ressourcen für neue Gespräche zur Verfügung stehen, führt die Verringerung der Gesprächsabbruchswahrscheinlichkeit, P_d , zu einer höheren Gesprächsrückweisungswahrscheinlichkeit, P_n . Abhängig von der Parametrisierung kann die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit, P_g , dadurch aber erheblich verbessert werden.

Bei der Reservierung von Ressourcen ist darauf zu achten, ob es sich bei dem betrachteten MSS um ein vorwiegend kapazitäts- oder interferenzbegrenztes

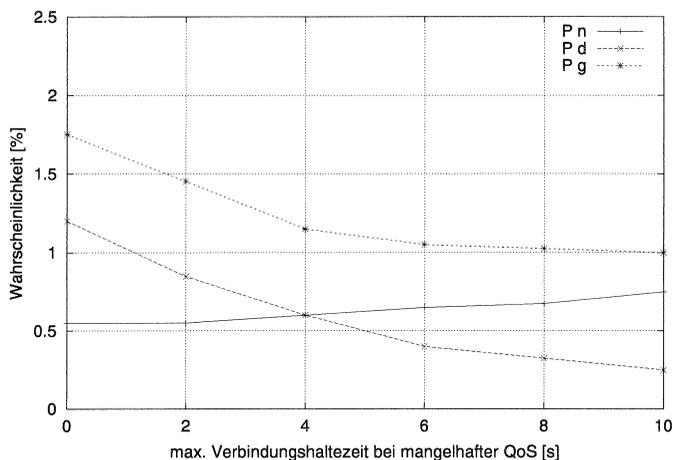


Abbildung 8.6: P_n , P_d und P_g in Abhängigkeit von der maximalen Haltezeit einer Verbindung

System handelt. Aufgrund der Art der Kapazitätsbegrenzung des MSS sollte ein Teil der folgenden Ressourcen exklusiv für Handover-Rufe reserviert werden:

- Bei vorwiegend *kapazitätsbegrenzten* MSS sollte eine Sendeleistungsreserve vorgesehen oder eine gewisse Anzahl von Transceivern reserviert werden.
- Bei vorwiegend *interferenzbegrenzten* MSS können z.B. bestimmte PCH, Frequenzkanäle oder Zeitschlitze reserviert werden.

Wie bei den anderen beiden Ansätzen besteht die Schwierigkeit, das Verfahren optimal zu parametrisieren.

Zusammenfassung

Ziele dieser Arbeit waren, simulative und analytische Modelle zu entwickeln, die es ermöglichen, die Leistungsfähigkeit von mobilen Satellitensystemen mit dynamischer Kanalvergabe zu bewerten, und neue dynamische Kanalvergabeverfahren und Handover-Strategien zu entwickeln, um die Verkehrskapazität von mobile Satellitensystem zu steigern.

Als Grundlage für das Simulationsmodell und die analytischen Modelle dient ein Referenzsystem, das anhand detaillierter Analysen des mobilen Satellitensystems IRIDIUM entwickelt wurde. Das Referenz-MSS beschreibt alle für die Leistungsbewertung relevanten Komponenten eines auf niedrigfliegenden Satelliten basierenden Mobilfunksystems, wie z.B. ein realitätstreuens Mobilitätsmodell, ein neu entwickeltes, komplexes Antennen- und Funkkanalmodell für die Berechnung der Zellstruktur einer Satellitenausleuchtzone und der im System resultierenden Gleichkanalinterferenzen, eine detaillierte Spezifikation der Funkschnittstelle und der entsprechenden Protokolle, sowie ein neu entwickeltes Verkehrslastmodell.

Basierend auf dem Referenz-MSS wurden analytische und verkehrstheoretische Modelle für die Berechnung der Einkanalkapazität von mobilen Satellitensystemen, der Form und Flächengröße von Satellitenausleuchtzonen, und der Verteilung der Kanalbelegungsdauer in Funkzellen entwickelt. Anhand eines neu entwickelten Verkehrsmodells eines IRIDIUM-ähnlichen Satelliten wurde ein Verfahren für die Berechnung der mittleren Blockierwahrscheinlichkeit in einem Teilnehmergebiet beschrieben, das sich vor allem durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Kapazitäts- und der Interferenzbegrenzung auszeichnet. Mit diesem Verfahren ist eine genaue und zeiteffiziente Abschätzung der Verkehrskapazität von FCA- und DCA-basierten mobilen Satellitensystemen möglich.

Um die simulative Leistungsbewertung von mobilen Satellitensystemen zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit basierend auf dem Referenz-MSS ein ereignisgesteuertes Simulationswerkzeug für mobile Satellitensysteme, *MoSSS*, entwickelt.

Die simulative Leistungsbewertung von FCA- und DCA-basierten mobilen Satellitensystemen bestätigte zum einen die Genauigkeit der analytischen und verkehrstheoretischen Modelle, ermöglichte zum anderen aber auch, grundsätzliche Aussagen über den Einsatz von dynamischer Kanalvergabe in mobilen Satellitensystemen zu machen. So zeigte sich, daß der Einsatz von dynamischen Kanalvergabeverfahren in mobilen Satellitensystemen der ersten Generation, die primär kapazitäts- und nur lokal interferenzbegrenzt sind, große Verkehrskapazitätssteigerungen ermöglicht, sich der Einsatz von komplexen DCA-Verfahren jedoch nur bedingt lohnt.

Aufgrund der hohen Satellitenmobilität muß dem Handover-Vorgang in mobilen Satellitensystemen eine große Bedeutung zugemessen werden. In diesem Sinne wurden in der vorliegenden Arbeit mehrere Handover-Strategien vorgestellt und diskutiert, die die Verbindungsqualität und Verkehrskapazität eines mobilen Satellitensystems erhöhen bzw. steigern können.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] L. Anderson. *A Simulations Study of Dynamic Channel Allocation Algorithms in High Capacity Mobile Telecommunication Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-22, pp. 210, 1973.
- [2] B. Bjelajac. *Adaptive-ALOHA Multiple Access Protocol for Mobile Satellite Systems*. Proceedings 46th IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, U.S.A., April 1996.
- [3] B. Bjelajac. *Performance Analysis of Handover Resource Reservation in Mobile Satellite Systems with Dynamic Channel Allocation*. Proceedings EPMCC'97 and 3. ITG-Fachtagung Mobile Kommunikation, Bonn, Germany, pp. 601-606, September 1997.
- [4] B. Bjelajac. *CIR based Dynamic Channel Allocation Schemes and Handover Strategies for Mobile Satellite Systems*. Proceedings 1995 IEEE Wireless Communication System Symposium, New York, U.S.A., pp. 103-108, November 1995.
- [5] B. Bjelajac. *Personal Mobile Satellite Systems: Facts, Markets and Regulations*. Proceedings IV. Telecommunications Forum, PTT Serbia, Belgrade, Yugoslavia, November 1996.
- [6] B. Bjelajac and A. Guntsch. *Service Definition in the Integrated UMTS Environment*. Proceedings Tenth International Conference On Digital Satellite Communications, IEE, Brighton, United Kingdom, May 1995.
- [7] B. Bjelajac and A. Nöllchen. *Dynamic Transceiver, Carrier and Time-Slot Allocation Strategies for Mobile Satellite Systems*. Mobile and Personal Satellite Communications 2, Proceedings of the Second European Workshop on Mobile/Personal Satcoms '96, Springer-Verlag, pp. 270-286, 1996.
- [8] B. Bjelajac, A. Nöllchen, and T. Christochowitz. *Traffic Capacity and QoS of Personal Mobile Satellite Systems with Dynamic Channel Assignment*. Proceedings 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, AZ, U.S.A., pp. 1143-1147, May 1997.

- [9] B. Bjelajac, C.-H. Rokitansky, A. Guntsch, and C. Wietfeld. *SIMCO 3++: SIMulation of Mobile COmmunications for Performance Evaluation of Cellular Networks, Short-Range and Satellite Communications*. Proceedings RACE Mobile Workshop 1994, Amsterdam, Netherlands, pp. 578-584, May 1994.
- [10] A. Bohrmann. *Bahnen künstlicher Satelliten*. Hochschultaschenbücher, Bibliographisches Institut, 2. Auflage, Mannheim, 1966.
- [11] L. J. Cimini and Foschini G. J. *Single-Channel User-Capacity for Self-Organizing Cellular Systems*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 42, pp. 3137-3142, December 1994.
- [12] D.C. Cox and D.O. Reudnik. *Dynamic Channel Assignment in Two Dimension Large-Scale Mobile Radio Systems*. Bell Sys. Tech. J., Vol. 51, pp. 1611-1628, 1972.
- [13] D.C. Cox and D.O. Reudnik. *Dynamic Channel Assignment in High Capacity Mobile Communications Systems*. Bell Sys. Tech. J., Vol. 50, pp. 1833-1857, 1971.
- [14] D.C. Cox and D.O. Reudnik. *Increasing Channel Occupancy in Large Scale Mobile Radio Systems: Dynamic Channel Reassignment*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 21, pp. 1302-1306, 1973.
- [15] J.S. Engel and Peritsky. *Statistically Optimum Dynamic Server Assignment in Systems with Interfering Servers*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-22, pp. 203-209, 1973.
- [16] D. Everitt and N.W. MacFadyen. *Analysis of Multicellular Mobile Radio Telephone Systems with Loss*. BT Tech. J., Vol. 2, pp. 37-45, 1983.
- [17] M. Fithian. *Iridium System Overview*. Iridium Inc., 1995.
- [18] Y. Furuya and Y. Akaiwa. *Channel Segregation: A Distributed Channel Allocation Scheme for Mobile Communication Systems*. IEICE Transaction, Vol. 74, pp. 1531-1537, 1991.
- [19] D. Goodman, J. Grandhi, and A. Sudheer. *Distributed Channel Assignment Schemes*. Proceedings 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 532-535, 1993.
- [20] C.L. I and P.-H. Chao. *Local Packing - Distributed Dynamic Channel Allocation at Cellular Base Station*. IEEE Globecom 93, 1993.

- [21] C.L. I and P.-H. Chao. *Distributed Dynamic Channel Allocation Algorithms with Adjacent Channel Constraints*. IEEE PIMRC 94, pp. 169-175, 1994.
- [22] Motorola Satellite Communications Inc. *Application for IRIDIUM before the FCC*. including the 1992, 1994 and 1996 Amendments, 1990.
- [23] W. Jingyu and Y. Y. Yongyang. *A Model for the Handover Traffic and Channels Occupancy Time in LEO Satellite Networks*. Journal of the China Institute of Communications, No. 2, Vol. 16, pp. 14-18, July 1995.
- [24] T.J. Kahwa and N. Georganas. *A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large Scale Cellular Mobile Communication Systems*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 26, pp. 432-438, 1978.
- [25] I. Katzela and M. Naghshineh. *Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey*. IEEE Personal Communications, pp. 10-31, June, 1996.
- [26] Gernot D. Kleiter. *Bayes-Statistik: Grundlagen und Anwendungen*. de Gruyter, 1980.
- [27] IRIDIUM LCC. *IRIDIUM-Homepage im WWW*. <http://www.iridium.com>, 1997.
- [28] H.D. Lüke. *Signalübertragung*. Springer-Verlag, 1992.
- [29] G. Maral and M. Bousquet. *Satellite Communications Systems*. Wiley, second edition, 1993.
- [30] K. Okada and F. Kubota. *On Dynamic Assignment Assignment in Cellular Mobile Radio Systems*. Proc. IEEE Int'l. Symp. on Circuits and Sys., Vol. 2, pp. 938-941, 1991.
- [31] K. Okada and F. Kubota. *On Dynamic Assignment Assignment Strategies in Cellular Mobile Radio Systems*. IEICE Trans. Fundamentals, Vol. 75, pp. 1634-1641, 1992.
- [32] J.B. Punt and D. Sparreboom. *Mathematical Models for the Analysis of Dynamic Channel Selection or Indoor Mobile Wireless Communication Systems*. Proceedings IEEE PIMRC'94, pp. 1081-1085, 1994.

- [33] D. Roddy. *Satellitenkommunikation: Grundlagen - Satelliten - Übertragungssysteme*. Informationstechnik/Nachrichtentechnik. Hanser, Prentice-Hall, 1991.
- [34] M. Serizawa and D. Goodman. *Instability and Deadlock of Distributed Dynamic Channel Allocation*. Proceedings 43rd IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 528-531, 1993.
- [35] J. Sin and N. Georganas. *A Simulation Study of a Hybrid Channel Assignment Scheme for Cellular Land-Mobile Radio Systems with Erlang-C Service*. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-9, pp. 143-147, 1981.
- [36] R. Singh, S.M. Elnoubi, and C. Gupta. *A New Frequency Channel Assignment Algorithm in High Capacity Mobile Communications Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-31, 1982.
- [37] J. Tajima and K. Imamura. *A Strategy for Flexible Channel Assignment in Mobile Communication Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-37, pp. 92-103, 1988.
- [38] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1998.
- [39] M. Zhang. *Comparisons of Channel Assignment Strategies in Cellular Mobile Telephone Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-38, pp. 211-215, 1989.
- [40] M. Zhang and T.S. Yum. *The Non-Uniform Compact Pattern Allocation Algorithm for Cellular Mobile Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-40, pp. 387-391, 1991.

NACHWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kommunikationsnetze der RWTH Aachen. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke für die Anregungen zum Thema der Dissertation, die sehr gute, fortwährende Betreuung und Förderung der Arbeit, sowie die kritische Durchsicht des Textes.

Dem Mitberichter, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Remboldt, danke ich für die wertvollen Hinweise zum Manuskript.

Bedanken möchte ich mich bei allen Diplomanden, besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Axel Nöllchen, sowie allen Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften, die durch ihre Arbeit zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Besonders danken möchte ich meinen lieben Eltern, Herrn Dipl.-Ing. Rade Bjelajac und Frau Dipl.-Ing. Ruzica Bjelajac, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben, sowie meiner Frau, Dipl.-Ing. Jelena Bjelajac, für ihre Unterstützung in der Endphase der Erstellung meiner Dissertation.

Bad Soden am Taunus, September 1999

Branko Bjelajac

*Je mehr man schon weiß,
je mehr hat man noch zu lernen.
Mit dem Wissen nimmt das Nichtwissen
in gleichem Grade zu, oder vielmehr
das Wissen des Nichtwissens.*

Friedrich von Schlegel

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

ABMT Band 1

Herrmann, C.

Stochastische Modelle für ATM-Konzepte,
1. Auflage 1995, 138 Seiten;
ISBN 3-86073-380-X

ABMT Band 2

Lawniczak, D. R.

Modellierung und Bewertung der Datenverwaltungskonzepte in UMTS,
1. Auflage 1995, 230 Seiten;
ISBN 3-86073-381-8

ABMT Band 3

Junius, M.

Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme,
1. Auflage 1995, 208 Seiten;
ISBN 3-86073-382-6

ABMT Band 4

Steffan, H.

Stochastische Modelle für den Funkkanal und deren Anwendung,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-383-4

ABMT Band 5

Böhmer, S.

Entwurf eines ATM-basierten Funknetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung,
1. Auflage 1996, 172 Seiten;
ISBN 3-86073-384-2

ABMT Band 6

Guntermann, M.

Universelle Benutzermobilität auf der Basis des Intelligenten Netzes - Entwurf, Bewertung und Implementierung -,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-385-0

ABMT Band 7

Kleier, S.

Neue Konzepte zur Unterstützung von Mobilität in Telekommunikationsnetzen,
1. Auflage 1996, 204 Seiten;
ISBN 3-86073-386-9

ABMT Band 8

Decker, P.

Entwurf und Leistungsbewertung hybrider Fehlersicherungsprotokolle für paketierte Sprach- und Datendienste im GSM-Mobilfunksystem,
1. Auflage 1997, 232 Seiten;
ISBN 3-86073-387-7

ABMT Band 9

Hußmann, H.

Algorithmen zur Kapazitätsoptimierung schnurloser Mobilfunksysteme nach DECT-Standard,
1. Auflage 1997, 180 Seiten;
ISBN 3-86073-388-5

ABMT Band 10

Plenge, C.

Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme,
1. Auflage 1997, 258 Seiten;
ISBN 3-86073-389-3

ABMT Band 11

Kennemann, O.

Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmeßdaten,
1. Auflage 1997, 162 Seiten;
ISBN 3-86073-620-5

ABMT Band 12

Wietfeld, C. M.

Mobilfunksysteme für die europäische Verkehrsleittechnik - Leistungsanalyse des CEN-DSRC-Standards -,
1. Auflage 1997, 210 Seiten;
ISBN 3-86073-621-3

ABMT Band 13

Görg, C.

Verkehrstheoretische Modelle und stochastische Simulationstechniken zur Leistungsanalyse von Kommunikationsnetzen,
1. Auflage 1997, 220 Seiten;
ISBN 3-86073-622-1

ABMT Band 14

Shahbaz, M.

Zufallsgesteuerte Verfahren zur Topologieoptimierung von Telekommunikationsnetzen,
1. Auflage 1998, 208 Seiten;
ISBN 3-86073-623-X

ABMT Band 15

Frohlich, H. M.

Mehrwertdienste intelligenter Netze zur Realisierung der universellen, persönlichen Mobilität,
1. Auflage 1998, 208 Seiten;
ISBN 3-86073-624-8

ABMT Band 16

Geulen, E.

Modelle zur Realisierung offener Dienste in zellularen Mobilfunknetzen nach dem GSM-Standard,
1. Auflage 1998, 224 Seiten;
ISBN 3-86073-625-6

ABMT Band 17

Guntsch, A.

Untersuchungen zur Integration terrestrischer und satellitengestützter Mobilfunksysteme,
1. Auflage 1998, 200 Seiten;
ISBN 3-86073-626-4

ABMT Band 18

Petras, D.

Entwicklung und Leistungsbewertung einer ATM- Funktionsschnittstelle,

1. Auflage 1999, 240 Seiten;

ISBN 3-86073-627-2

ABMT Band 19

Brasche, G. Ph.

Prototypische Bewertung und Implementierung von neuen Paket-Datendiensten für das GSM- Mobilfunksystem,

1. Auflage 1999, 272 Seiten;

ISBN 3-86073-628-0

ABMT Band 20

Walke, Th.

Markteintritt in lokale Telekommunikationsmärkte - Eine Untersuchung aktuellen, potentiellen und substitutiven Wettbewerbs im deutschen Teilnehmeranschlußnetz,

1. Auflage 1999, 424 Seiten;

ISBN 3-86073-629-9

ABMT Band 21

Bjelajac, B.

Modellierung und Leistungsbewertung von mobilen Satellitensystemen mit dynamischer Kanalvergabe,

1. Auflage 1999, 176 Seiten;

ISBN 3-86073-822-4

