





# Untersuchungen zur Integration terrestrischer und satellitengestützter Mobilfunksysteme

Alexander Guntsch

# AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke

Guntsch, Alexander:

Untersuchungen zur Integration terrestrischer und satellitengestützter Mobilfunksysteme

1. Auflage Aachen:

Verlag der Augustinus Buchhandlung im Besitz des Verlags Mainz, 1998

(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 17)

ISBN 3-86073-626-4

© Alexander Guntsch

Verlag der Augustinus Buchhandlung im Besitz des Verlags Mainz

Süsterfeldstr. 83, 52072 Aachen

Telefon: 0241 / 2 39 48 oder 0241 / 87 34 34

Fax: 0241 / 87 55 77

Herstellung: Druckerei Mainz GmbH,

Süsterfeldstr. 83, 52072 Aachen

Tel. 0241 / 87 34 34; Fax: 0241 / 87 55 77

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

„D 82 (Diss. RWTH Aachen)“

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Seit dem Anfang der 80iger Jahre ist der Bedarf an Telekommunikationsinfrastruktur rasant gestiegen. Nachdem zunächst die Weiterentwicklung herkömmlicher Fernmeldenetze durch die Einführung neuer Technologien auf Glasfaser und Digitaltechnik im Vordergrund standen, ist seit Mitte der 80iger Jahre auch intensiv über neue Formen der mobilen Kommunikation nachgedacht worden.

Als Basis für die mobile Sprach-, Fax- und Datenübertragung entstand das heute in Europa am weitesten verbreitete, digitale zellulare Kommunikationssystem GSM (Global System for Mobile communication). Daneben existieren jedoch seit einigen Jahren auch weitere digitale zellulare Netze zum Beispiel auf Basis des DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) Standards.

Ab September 1998 werden erste, auf Satelliten in niedrigen Erdumlaufbahnen gestützte Mobilfunknetze diese terrestrischen zellularen Kommunikationsnetze ergänzen. Diese neuen Systeme basieren netzseitig meist auf GSM-Vermittlungstechnik, haben jedoch eine auf die veränderte Funkausbreitung angepasste Übertragungstechnik. Aufgrund der niedrigen Erdumlaufbahnen ist die Signallaufzeit der in terrestrischen Mobilfunknetzen ähnlich.

Immer dann, wenn an einem Ort sowohl GSM als auch ein netzseitig auf GSM-Technik basierendes satellitengestütztes Mobilfunknetz vorhanden sind, bietet sich die Möglichkeit zur festen Verbindung, d. h. zur Integration, beider Netze. Durch die Definition und Leistungsbewertung verschiedener Integrationszenarien liefert die vorliegende Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung und Analyse solcher integrierter Telekommunikationsnetze. Besonders die Mobilitätsverwaltung inklusive Handover werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert und bewertet.

Da satellitengestützte Mobilfunknetze der ersten Generation nur geringe Kanalkapazität zur Verfügung stellen, kommt eine Versorgung größerer Benutzerkreise nicht in Frage. Breitbandige satellitengestützte Kommunikationsnetze, wie sie für den Einsatz kurz nach der Jahrtausendwende geplant sind, müssen auf Frequenzen im 20–30 GHz Bereich (*Ka*-Band) ausweichen, um genügend freie Bandbreite ( $\approx 500$  MHz) zur Verfügung zu haben. Eine direkte Funkversorgung des mobilen Teilnehmers ist in diesem Frequenzband nur für niederrangige Dienste möglich, weil eine begrenzte Satellitensendeleistung, starke Dämpfung im Freiraum und zusätzliche Witterungseinflüsse die Wellenausbreitung behindern.

In der vorliegenden Arbeit wird eine alternative Möglichkeit, dennoch Teilnehmermobilität bei ISDN-artigen Datenraten zu erreichen (bis zu 64 kbit/s), vorgestellt. Es handelt sich dabei um die Verwendung eines integrierten, kaskadierten Systems, bei dem der Satellit nicht direkt den Endteilnehmer, sondern ein drahtloses Zugangsnetz versorgt, vgl. [32]. Das drahtlose Zugangsnetz seinerseits hat innerhalb seiner Funkreichweite vermittelnde Funktionalität und bündelt die nach außen gerichteten bzw. die von außen kommenden, über den Satelliten laufenden Verbindungen. Die Dimensionierung entsprechender Systeme und Vorhersage der zu erwartenden Dienstgüte dieses Ansatzes sind Inhalt und Ergebnis dieser Arbeit.

Zur Leistungsbewertung der integrierten und kaskadierten Mobilfunknetze ist im Rahmen dieser Arbeit das Simulationswerkzeug NeSSiE (Network Satellite Simulation Environment) entwickelt worden.

## ABSTRACT

---

Since the early 1980s there has been a sharp rise in the need for telecommunication infrastructure. At first this need was satisfied by technological advances in the field of optical fibre and digital communication. But already by the mid 1980s new means of providing mobile communication were being developed.

The basis for digital mobile communication in Europe today is the Global System for Mobile communication GSM. But also other systems, based e.g. on the DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) Standard are currently in operation.

Starting September 1998 first mobile satellite based communication systems will become operational and complement the existing terrestrial ones. Most mobile satellite communication systems will be based on GSM technology with respect to the network setup and design. The air interfaces though have been adapted to cope with the different propagation environments. Due to a low orbital height the propagation delay from the ground to a mobile satellite is similar to terrestrial propagation delays.

Every time that in one place both GSM and a mobile satellite system based on GSM network technology are available and integrated system approach based on terrestrial and mobile satellite communication can be taken. One of the main contributions of the presented work is the definition and performance evaluation of appropriate integration scenarios. Especially the results obtained in the analysis of several mobility management schemes including handover represent a unique new finding.

Due to the very limited capacity of first generation mobile communication systems a broad usage of telecommunication services within medium and large scale user groups is not envisaged. New broadband mobile communication systems will become available with the turn of the century. These new systems will make use of transmission in the 20–30 GHz band (*Ka*-Band) with up to 500 MHz bandwidth per system. Due to limited transmission power and large propagation losses because of distance and atmospheric conditions a direct link to small portable communication devices will only be available for low data rates.

In the work presented an alternative approach of providing mobile communication with ISDN like communication rates (up to 64 kbit/s) is provided. This approach is based on cascading a mobile satellite and a terrestrial communication system. The terrestrial system collects the terrestrial traffic where as the mobile satellite system provides the connectivity to the terrestrial communication backbone. Guidelines and rules for designing appropriate cascaded systems as well as means for estimating the resulting quality of service in the combined communication system are provided.

In order to evaluate integrated and cascaded communication systems an simulation tool by the name of NeSSIE (Network Satellite Simulation Environment) was developed within the framework of the work performed.

# INHALTSVERZEICHNIS

---

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Integration in bestehende Netze	2
1.2 Satellitengestützte Transportnetze	3
1.3 Ziel und Gliederung	3
<b>2 Zellulare Mobilfunknetze</b>	<b>5</b>
2.1 Einleitung	5
2.2 Terrestrische digitale Mobilfunknetze	6
2.2.1 Mobilfunksystem GSM	6
2.2.2 Mobilfunksystem DECT	12
2.3 Satellitengestützte Kommunikationsnetze	14
2.3.1 IRIDIUM-System	17
2.3.2 TELEDESIC-System	21
<b>3 Modellierung von Mobilfunkkanälen</b>	<b>27</b>
3.1 Einleitung	27
3.2 Physikalische Eigenschaften der Funkausbreitung	27
3.2.1 Signaldämpfung und -streuung	27
3.2.2 Wellenausbreitung um Hindernisse	29
3.2.3 Gleich- und Nachbarkanalstörungen	32
3.3 Einfache Kanalmodelle	32
3.3.1 Rice-Kanal	32
3.3.2 Rayleigh-Kanal	33
3.3.3 AWGN-Kanal	33
3.3.4 Gleichkanal-gestörter Kanal	34
3.4 GSM 900 MHz Mobilfunkkanal	35
3.4.1 Okumura-Hata Modell	35
3.4.2 GSM-Kanalmusterdateien	36
3.5 IRIDIUM 1600 MHz-(L/S-Band)-Mobilfunkkanal	36
3.5.1 DLR-Kanalmodell	37
3.6 TELEDESIC 20/30 GHz-(Ka-Band)-Mobilfunkkanal	41
3.6.1 Atmosphärische Dämpfung	41
3.6.2 Bestimmung der Paketfehlerwahrscheinlichkeit	45
<b>4 ISDN und Signalisierung</b>	<b>47</b>
4.1 Das Integrated Services Digital Network (ISDN)	47
4.2 Signalisierung in Telekommunikationsnetzen mittels SS 7	48
4.2.1 Merkmale des SS 7	49
4.2.2 Dienstgüteziele im ISDN	50
4.2.3 Signalisierungsablaufdiagramme	50

<b>5</b>	<b>Integration von terrestrischen und Satellitenfunknetzen</b>	<b>53</b>
5.1	Einleitung	53
5.2	Integrationszenarien	53
5.2.1	Anforderungen aus Teilnehmer- und Betreibersicht	54
5.2.2	Integration auf Endgeräteebene	55
5.2.3	Integration auf Netzebene	58
5.2.4	Integration auf Datenbankebene	63
5.2.5	UPT-Server Integrationskonzept	67
5.2.6	Kaskadierte Systeme	72
5.3	Zielsysteme	74
5.3.1	Integration von ISDN und Satellitensystemen	74
5.3.2	Integration von GSM und Satellitennetz	75
5.3.3	Integration von DECT/WLLs und Satellitennetz	75
<b>6</b>	<b>Der NeSSiE-Simulator zur Leistungsbewertung</b>	<b>77</b>
6.1	Einleitung	77
6.2	Softwareentwurfsmethoden und Werkzeuge zur Projektverwaltung	78
6.2.1	Technische Anforderungen	78
6.2.2	Modularität und Effizienz	78
6.2.3	SNiFF+	79
6.3	Software-Architektur	80
6.3.1	Mobilitätsmodul	80
6.3.2	Systemmodul	81
6.3.3	Kommunikationsmodul	81
6.3.4	Statistik und Ablaufsteuerung	82
6.3.5	Grafische Darstellung	83
<b>7</b>	<b>Verkehrstheoretische Analyse</b>	<b>85</b>
7.1	Verkehrstheoretische Referenzsysteme	85
7.1.1	M/M/n-Verlustsystem ohne Warteplätze	85
7.1.2	Handovermodellierung	87
7.1.3	Zweistufige Überlaufsysteme	90
7.1.4	Kaskadierte Verlustsysteme	94
7.2	Mobilitätsmodelle	95
7.2.1	Teilnehmermobilität	95
7.2.2	Satellitenmobilität	97
7.3	Analyse der Zielsysteme	101
7.3.1	Dienstgütedefinition und -untersuchung	102
7.3.2	Integration von ISDN und Satellitennetz	103
7.3.3	Integration von GSM und Satellitennetz	106
7.3.4	Integration von DECT/WLL und Satellitennetz	111
<b>8</b>	<b>Mobilitätsverwaltung</b>	<b>115</b>
8.1	Kalibrierung des Simulators	115
8.2	Aufenthaltsverwaltung	116
8.2.1	Satellitenbasierter Ansatz	116
8.2.2	Bodenstationsbasierter Ansatz	120
8.2.3	Teilnehmerbasierter Ansatz	123
8.2.4	Kostenvergleich	127

8.3	Inter-Netz Handover . . . . .	128
8.3.1	Untersuchte Szenarien . . . . .	128
8.3.2	Handoverauslösung . . . . .	132
8.3.3	Satellitenkanalcodierung . . . . .	133
8.3.4	Modifikation der LAPDm Parameter . . . . .	134
8.3.5	Simulationsergebnisse für den asynchronen Handover . . . . .	135
8.3.6	Verbesserung der Dienstgüte beim Handover . . . . .	137
8.3.7	Validierung der Simulationsergebnisse . . . . .	139
<b>9</b>	<b>Analyse satellitengestützter Transportnetze</b>	<b>141</b>
9.1	Definition der Referenzdienste und -funkübertragung . . . . .	141
9.1.1	Dienste . . . . .	141
9.1.2	Antennentechnik . . . . .	141
9.1.3	Übertragungsverfahren . . . . .	142
9.1.4	Leistungssteuerung . . . . .	142
9.1.5	Kanalvielfachzugriff . . . . .	143
9.1.6	Kanalvergabe . . . . .	143
9.2	Optimaler Konstellationsentwurf . . . . .	144
9.2.1	Randbedingungen . . . . .	144
9.2.2	Größe und Art der Funkzellen . . . . .	144
9.2.3	Anzahl der erforderlichen Satelliten und Umlaufbahnen . . . . .	145
9.2.4	Orbitalhöhe . . . . .	146
9.3	Einfluß der Witterung auf die Dienstgüte der Übertragung . . . . .	147
9.3.1	Parametrisierung des Klimamodells . . . . .	147
9.3.2	Untersuchungsmethodik . . . . .	148
9.3.3	Dienstgütedefinition und -berechnung . . . . .	149
9.4	Definition und Leistungsbewertung verschiedener Szenarien . . . . .	155
9.4.1	Kalibrierung des Simulators . . . . .	155
9.4.2	Breitbandige Funkversorgung . . . . .	156
9.4.3	Schmalbandige Funkversorgung . . . . .	158
9.4.4	Nomadische Funkversorgung . . . . .	159
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ergebnisse</b>	<b>163</b>
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>A</b>	<b>Herleitungen</b>	<b>173</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>179</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>181</b>
	<b>Nachwort</b>	<b>185</b>



## Einleitung

Die rasante Entwicklung des Mobilfunksektors in Europa und weltweit in den letzten zehn Jahren ist gekennzeichnet vom Wandel eines Marktes mit einst niedrigen Teilnehmerzahlen und kundenspezifischen Anforderungen hin zu einem Massenmarkt für mobile persönliche Telefonie. Mobile Kommunikation gehört mit steigender Tendenz besonders in industrialisierten Ländern zum persönlichen Lebensstandard auch im privaten Bereich.

Als Basis für die mobile Sprach-, Fax- und Datenübertragung fungiert das heute in Europa am weitesten verbreitete, digitale zellulare Kommunikationssystem GSM (Global System for Mobile communication). Daneben existieren jedoch auch noch herkömmliche analoge Netze, wie zum Beispiel das deutsche C-Netz, und weitere digitale zellulare Netze auf der Basis des DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) Systems. Die digitalen zellularen Netze finden in drahtlosen Zugangnetzen eine zusätzliche Verwendung, da sie die Möglichkeit bieten, die extrem hohen Kosten der individuellen Realisierung des Teilnehmerendanschlusses durch drahtgebundene Telefonie zu reduzieren.

Bereits seit dem Start des ersten kommerziellen Satelliten „Early Bird“ im Jahr 1965 werden, oft unbemerkt durch den Endteilnehmer, terrestrische Kommunikationsnetze durch satellitengestützte Kommunikationsnetze ergänzt. Mit Hilfe von Satelliten in verschiedenen Erdumlaufbahnen werden seitdem eine Reihe von Aufgaben unterschiedlichster Art erfüllt, die sich besondere Eigenschaften der Satelliten und ihrer Bahnen zu Nutze machen. Angebotene Dienste rangieren von der Telekommunikation über die Meteorologie und Positionsbestimmung auf der Erde mittels GPS (Global Positioning System, vgl. [76, 99]) bis hin zur Erd- und Weltraumerkundung. In den Telekommunikationsanwendungen, auf die sich diese Arbeit ausschließlich konzentrieren soll, bieten satellitengestützte Kommunikationssysteme durch ihre makrozellenartige Erreichbarkeit und fortgeschrittene Technik eine kostengünstige und zuverlässige Lösung zur Punkt-zu-Punkt bzw. Punkt-zu-Mehrpunkt Kommunikation.

Nach einer starken Konzentrierung von Satelliten in geostationären Bahnen<sup>1</sup> um die Erde sollen ab September 1998 erste Mobilfunknetze mit Satelliten in niedrigen Erdumlaufbahnen die terrestrischen zellularen Kommunikationsnetze ergänzen. Diese neuen Systeme bieten gegenüber den geostationären erhöhte Kanalkapazität und reduzieren die Signallaufzeit, die für mobile Kommunikation möglichst niedrig zu halten ist, signifikant. Als potentielle Benutzer solcher auf den Bereich der persönlichen Kommunikation ausgerichteten Kommunikationsnetze kommen zum einen Teilnehmer in Frage, die aufgrund mangelnder Telekommunikationsinfrastruktur mit einem Mindestmaß an Sprach-, Fax- und Datendiensten versorgt, zum anderen jedoch auch solche, deren vorhandene terrestrische zellulare Mobilfunknetze durch satellitengestützte komplementiert werden sollen.

---

<sup>1</sup>In geostationären Bahnen gleicht die Erdanziehungskraft der Zentrifugalkraft, so daß ein Satellit über einem festen äquatorialen Punkt auf der Erde stationär zu stehen scheint.

Bis zu fünf unabhängige, auf mobilem Satellitenfunk basierende Kommunikationssysteme (IRIDIUM, GLOBALSTAR, ICO, ODYSSEY, ELLIPSO) sollen hierfür in den nächsten drei Jahren in Betrieb gestellt werden. Diese Systeme bieten bei niedriger Kanalkapazität (100–550 Verkehrskanäle pro  $10^6$  km<sup>2</sup>) eine hohe globale Verfügbarkeit. Nach der Jahrtausendwende sollen breitbandigere satellitengestützte Kommunikationssysteme mit höherer Kapazität (bis zu  $0,63 \times 10^6$  Verkehrskanäle pro  $10^6$  km<sup>2</sup>) wie z. B. das TELEDESIC, M-Star und das CELESTRI System den Systemen der ersten Generation folgen.

## 1.1 Integration in bestehende Netze

Als man 1986 mit der Entwicklung satellitengestützter Mobilfunknetze begann, bestanden zwischen den einzelnen Systembetreibern kaum Bestrebungen, gemeinsame Standards für Luftschnittstelle und Netz zu verwenden. Im Bereich der Luftschnittstelle sind deshalb auch bis heute rein proprietäre Lösungen, meist basierend auf FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access) oder CDMA (Code Division Multiple Access) Technik spezifiziert und implementiert worden. Im Bereich des Netzes jedoch hat der weltweite Erfolg von GSM dazu geführt, daß eine netzseitige Kompatibilität zu diesem System spätestens seit der europaweiten Einführung von GSM Anfang der 90iger Jahre von großem Interesse für zukünftige Satellitennetzbetreiber war.

Heutzutage reichen die unterschiedlichen Lösungen einer GSM-Anpassung des eigenen Systems mit Hilfe von speziellen Protokollautomaten (IWU – Inter Working Unit) für einige Systeme (ODYSSEY, ELLIPSO) bis hin zur eigentlichen Verwendung von GSM-Technik im Vermittlungsknotenbereich für andere (IRIDIUM, GLOBALSTAR). Als Hauptgrund für diese angestrebte GSM-Kompatibilität steht der Wunsch zur Nutzung bereits existenter Netzmanagementfunktionalitäten nach GSM-Standard.

Immer dann, wenn an einem Ort sowohl GSM als auch ein netzseitig auf GSM-Technik basierendes Mobilfunknetz vorhanden sind, bietet sich die Möglichkeit zur festen Verbindung, d. h. zur Integration, beider Netze. Soll einem potentiellen Kunden eine möglichst vielfältige und global verfügbare Dienstpalette hoher Qualität angeboten werden, vgl. [12], so ist die Integration sogar erforderlich, vgl. [43]. Dabei muß jedoch keine physikalische Verbindung der Netze geschaffen werden. Es genügt, eine entsprechend konfigurierte Signalisierungsverbindung z. B. über das Zeichengabesystem Nr. 7 (SS 7) einzurichten, um zwischen den entsprechenden Netzinstanzen beider Systeme zu kommunizieren. Durch geeignete Verfahren besteht hier die Möglichkeit zur netzübergreifenden Nutzung von GSM-Diensten wie der Authentifizierung oder der Aufenthalts- und Mobilitätsverwaltung. Auch ist es denkbar, durch geeignete Verfahren einen in einem Netz begonnenen Ruf bei Bedarf in das andere Netz weiterzuleiten: „Handover“. Die gegenseitige Beeinflussung beider Systeme durch die Integration und besonders durch die Weiterleitung von Verkehr muß jedoch genau bekannt sein, um eine nachhaltige Beeinträchtigung eines oder beider Systeme zu vermeiden.

## 1.2 Satellitengestützte Transportnetze

Da die satellitengestützten Mobilfunknetze der ersten Generation ihrem potentiellen Benutzerkreis nur eine stark begrenzte Kanalkapazität zur Verfügung stellen, kommt eine Versorgung größerer Benutzerkreise nur in sehr engen Grenzen in Frage. Breitbandige satellitengestützte Kommunikationsnetze, wie sie für den Einsatz kurz nach der Jahrtausendwende geplant sind, müssen auf Frequenzen im 20–30 GHz Bereich (*K $\alpha$* -Band) ausweichen, um genügend freie Bandbreite ( $\approx 500$  MHz) zur Verfügung zu haben. Eine direkte Funkversorgung des mobilen Teilnehmers wie bei den Systemen der ersten Generation ist in diesem Frequenzband nur für niederrangige Dienste möglich, weil eine begrenzte Satellitensendeleistung, starke Dämpfung im Freiraum und zusätzliche Witterungseinflüsse die Wellenausbreitung behindern.

Eine alternative Möglichkeit, um dennoch Teilnehmermobilität bei ISDN-artigen Datenraten (bis zu 64 kbit/s) zu unterstützen, ist die Verwendung eines integrierten, kaskadierten Systems, bei dem der Satellit nicht direkt den Endteilnehmer, sondern alternativ ein drahtloses Zugangsnetz, z. B. auf DECT Basis versorgt, vgl. [32]. Das drahtlose Zugangsnetz seinerseits hat innerhalb seiner Funkreichweite vermittelnde Funktionalität und bündelt die nach außen gerichteten bzw. die von außen kommenden, über den Satelliten laufenden Verbindungen. Da die Bodenstation des drahtlosen Zugangsnetzes nicht mobil, sondern ortsfest ist, kann hier eine gerichtete satellitenmitführende Antenne installiert werden. Diese zeichnet sich durch einen hohen Antennengewinn ( $\approx 30$  dB) bei relativ schmaler Halbwertsbreite ( $\approx 3^\circ$ ) aus. Das Satellitennetz erfüllt somit die Aufgabe eines Transportnetzes bei ähnlicher Kapazität und Dienstgüte.

Der geeignete Entwurf eines integrierten kaskadierten Systems ermöglicht es, Telekommunikationsdienste sowohl in telekommunikationsinfrastrukturarmen Regionen der Erde, als auch in industrialisierten Ländern in Konkurrenz zu potentiellen Festnetz- und Mobilfunkanbietern anzubieten. Da die Funkbetriebsmittel der Satellitensysteme durch ihre eingeschränkte Batteriekapazität im Vergleich zu rein terrestrischen Lösungen leistungsbegrenzt sind, muß mit Hilfe von geeigneten Verfahren die gewünschte Dienstqualität und -verfügbarkeit stets überwacht werden, um im Bedarfsfall Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Da bis jetzt weder für kaskadierte Systeme speziell, noch für integrierte Mobilfunksysteme allgemein, die Verbindung von terrestrischen und satellitengestützten Mobilfunknetzen im Detail untersucht und bewertet worden ist, besteht hierfür eine Notwendigkeit in deren Konsequenz diese Arbeit entstand.

## 1.3 Ziel und Gliederung

Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation, Analyse und Bewertung von Zielsystemen zur Integration mobiler satellitengestützter Kommunikation mit terrestrischem Mobilfunk.

Dazu werden zunächst unterschiedliche Möglichkeiten der Integration eines terrestrischen (GSM) und eines satellitengestützten Mobilfunknetzes (IRIDIUM-ähnliches System) zu einem Zielsystem untersucht und bewertet. Es wird dabei davon ausgegangen, daß beide Systeme über eine separate Luftschnittstelle verfügen, jedoch ein intelligentes Endgerät (DMT – Dual Mode Terminal) existiert, welches mit beiden Systemen kommunizieren kann. Die bei dieser Integration auf Netze-

bene verfügbare Funktionalität, die gemeinsame Dienstpalette und -güte sowie die gegenseitige Beeinflussung beider Systeme werden mit Hilfe des ausgewählten Zielsystems analysiert und bewertet.

Des weiteren soll die kaskadierte Integration eines terrestrischen Zugangsnetzes auf DECT Basis mit einem breitbandigen satellitengestützten Kommunikationsnetz, hier einem TELEDESIC-artigen System, im Weitverkehr analysiert und bewertet werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt hier bei der Bestimmung der Systemkapazität in Abhängigkeit vom gewählten Satellitensystem und der angebotenen Dienstpalette und -güte sowie der potentiellen Benutzerverteilung. Eine solche Integration terrestrischer und satellitengestützter Technik steht in Konkurrenz zu rein terrestrischen Lösungen, die in der Regel nur unflexibel und mit hohen Kosten versehen sind.

### Gliederung der Arbeit

In **Kapitel 2** werden die terrestrischen zellularen Mobilfunknetze DECT und GSM sowie die satellitengestützten Mobilfunknetze IRIDIUM und TELEDESIC vorgestellt. Grundlagen, systemspezifische Charakteristika und Leistungsgrößen, die bei der Integration und der anschließenden Analyse der Systeme beachtet werden müssen, werden als solche identifiziert und diskutiert.

**Kapitel 3** beschreibt alle analytischen und statistischen Zusammenhänge zur Modellbildung, die für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mobilfunkkanäle erforderlich sind. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf den GSM 900 MHz Kanal sowie den 1600 MHz (L/S-Band) und 20–30 GHz (*Ka*-Band) Kanal für den mobilen Satellitenfunk gerichtet.

Eine Einführung in die Grundlagen des diensteintegrierenden digitalen Netzes ISDN und das zwischen Vermittlungsstellen benutzte Signalisierungszeichengabesystem Nr. 7 (SS 7) folgt in **Kapitel 4**.

In **Kapitel 5** werden detailliert die Struktur und Funktionalität unterschiedlicher Arten der Integration von terrestrischen und Satellitengestützten Mobilfunksystemen zu integrierten Zielsystemen sowie die hierzu erforderlichen Protokolle vorgestellt. Möglichkeiten zur Funkverbindungsleitung (Handover) sowie der gemeinsamen Mobilitätsverwaltung werden diskutiert und bewertet.

**Kapitel 6** beschreibt detailliert die Struktur und Komponenten des ereignisgesteuerten MoSSS+/NeSSiE Simulators, der zur Leistungsbewertung der unterschiedlichen Zielsysteme in C++ erstellt worden ist.

Eine verkehrstheoretische Analyse, die Aufschlüsse über die Vor- und Nachteile der in Kapitel 5 vorgestellten Zielsysteme liefert, folgt in **Kapitel 7**.

Die Ergebnisse der simulativen Untersuchungen zur Integration eines IRIDIUM-ähnlichen mobilen satellitengestützten Kommunikationssystems mit GSM sind in **Kapitel 8** aufgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt hierbei auf der Leistungsbewertung von Verfahren zur Weiterleitung von Gesprächen zwischen beiden Netzen sowie der Mobilitätsverwaltung im Satellitennetz.

In **Kapitel 9** folgt eine simulative Untersuchung verschiedener Szenarien zur Integration TELEDESIC-ähnlicher Satellitensysteme mit terrestrischen Zugangsnetzen. Der Einfluß der Witterung sowie verschiedener Satellitensystemkonstellationen auf die zu erwartende Dienstgüte wird hierzu untersucht.

Die Arbeit schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung und einem Ausblick in **Kapitel 10**.

---

## Zellulare Mobilfunknetze

### 2.1 Einleitung

In Europa haben die ersten Aktivitäten auf dem Gebiet mobiler Funksysteme Anfang der 50iger Jahre begonnen. Die Entwicklung in diesem Bereich ist zwischen 1950 und 1980 stark mit der Einführung der Halbleitertechnologie und deren zunehmender Miniaturisierung verbunden.

Dabei ist unter Miniaturisierung der Übergang zu immer kleineren, elektronischen Bauelementen zu verstehen, die in der integrierten, monolithischen Schaltungstechnik eine Steigerung der Anzahl dieser Elemente pro Flächeneinheit zur Folge hat. Gleichzeitig ging mit einer Vergrößerung der Schaltkreisfläche (Chip) ein überproportionaler Zuwachs der Bauelementezahl einher.

Konnten bei der MSI-Technik (Medium Scale Integration) um 1973 noch weniger als 1.000 Transistoren je Chip hergestellt werden, so war bei der LSI-Technik (Large Scale Integration) um 1976 eine Transistorzahl von 10.000 greifbar nahe, die schließlich von der gegenwärtigen VLSI-Technik (Very Large Scale Integration) mit ca.  $6 \cdot 10^6$  (Pentium Pro) bei weitem übertroffen wird. Erst durch VLSI-Schaltungen ist es möglich geworden, komplizierte Systeme wie Mikroprozessoren (Kombination von Rechen- und Steuerwerk) zu entwerfen, die eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung heutiger Mobilfunkbetriebsmittel darstellen [9].

Trotz der fortschreitenden technologischen Innovation in den 70iger Jahren gelang der entscheidende Durchbruch in der Mobilfunktechnik erst mit der Einführung zellulärer Netze, die eine effiziente Nutzung der knappen vorhandenen bzw. zugewiesenen Funkressourcen ermöglichen. Dazu wurden im Gegensatz zu Vorgängersystemen kleinere Sende-/Empfängerstationen (Basisstationen) entworfen, die nur der Übertragung dienen und über relativ geringe Funkreichweiten verfügen (0.03–30 km). Die zu betreibende Gesamtfläche des Netzes wird in kleine Funkzellen unterteilt, die meist nur von einer Antenne einer Basisstation ausgeleuchtet werden. Die Größe der Zelle wird durch die mobil- und festnetzseitige Sendeleistung und Übertragungstechnik sowie durch die topologische Funkfeldumgebung bestimmt. Ausstehende Steuerungs- und Vermittlungsfunktionen werden von übergeordneten Netzelementen wahrgenommen.

Der Vorteil einer solchen Struktur liegt in der regionalen Wiederverwendung gegebener Frequenzen und in der damit verbundenen Kapazitätserhöhung des Gesamtsystems. Jedoch bedarf es einer vorhergehenden, gründlichen Frequenzplanung sowie komplizierter Vermittlungseinheiten, die die Netzressourcen des Systems nach Bedarf optimal koordinieren. Darüber hinaus sind, aufgrund begrenzter Zellengrößen zwischen den einzelnen Netzkomponenten, geeignete Verfahren (Verbindungsweiterleitung, engl. Handover) zu implementieren, die eine sichere Gesprächsverbindung bei beliebiger Teilnehmermobilität gewährleisten.

Zum besseren Verständnis der Arbeit soll in diesem Kapitel auf die Grundlagen von je zwei Mobilfunksystemen terrestrischer sowie satellitengestützter Natur näher

eingegangen werden. Spezifische Informationen zu den erwähnten Systemen können jeweils der angegebenen Literatur entnommen werden.

## 2.2 Terrestrische digitale Mobilfunknetze

Aufgrund der mit analogen Mobilfunknetzen verbundenen Kosten- und Kapazitätsbeschränkungen, sowie der Inkompatibilität bestehender analoger Netze beschloß die CEPT (Conférences Européenne des Postes et Télécommunications) 1982 ein pan-europäisches zellulares digitales Mobilfunknetz zu entwerfen und zu standardisieren. Mit dieser Aufgabe wurde eine eigens dafür gegründete Arbeitsgruppe GSM (Groupe Spéciale Mobile) betraut. CEPT-Vorgabe war die Entwicklung eines digitalen Mobilfunksystems zum Betrieb in zwei 25 MHz-Frequenzbändern im 900 MHz-Band, das bereits seit 1978 für die europäische Mobilkommunikation vorgesehen war.

Am 7. September 1987 unterzeichneten 13 europäische Staaten das GSM-MoU (Memorandum of Understanding on the Introduction of the Pan-European Digital Mobile Communication Service), mit dem sie sich bereiterklärten, Mobilfunksysteme gemäß den Empfehlungen der GSM einzuführen [77, 103].

Mit Eingliederung der GSM im März 1989 in das im Vorjahr neu gegründete ETSI (European Telecommunications Standards Institute) wurden die technischen Normungsaktivitäten der CEPT im wesentlichen auf diese Körperschaft übertragen. Im Laufe der Standardisierungsphase wurde das Kürzel GSM als Bezeichnung für das entsprechende System übernommen. GSM steht seitdem für Global System for Mobile communications und ist ein eingetragenes Warenzeichen für das europäische 900 MHz- und später folgende 1800 MHz-System [103].

Im Jahre 1992 standardisierte die ETSI ein weiteres digitales Kommunikationssystem unter dem Namen DECT (Digital Enhanced (früher: European) Cordless Telecommunication) System. Das DECT System war in seiner ursprünglichen Verwendung für den Betrieb innerhalb von Gebäuden bzw. auf privaten Grundstücken konzipiert, bereits im Jahr 1994 wurde jedoch von der ETSI in Erwägung gezogen, den Einsatz von DECT auch auf den Bereich von drahtlosen Zugangsnetzen zu erweitern. Ein entsprechender Standard wurde im darauffolgenden Jahr, 1995, verabschiedet [2].

Mit der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes in Deutschland seit 1. Januar 1998 sind in letzter Zeit gerade drahtlose Zugangsnetze von steigendem Interesse, da sie sich besonders gut zu einer Überbrückung der mit hohen Investitionskosten versehenen „letzten Meile“ zwischen dem Festnetz und potentiellen Endteilnehmern eignen.

### 2.2.1 Mobilfunksystem GSM

Der unter Leitung der ETSI verabschiedete GSM-Standard wurde in Deutschland mit der Inbetriebnahme des D1-Netzes 1991 und des D2-Netzes 1992 erstmals in die Praxis umgesetzt. Mobilfunksysteme, die nach diesem recht umfangreichem Standard<sup>1</sup> im 900 MHz- oder 1800 MHz- Band arbeiten, verfügen über einen charakteristischen Satz von technischen Merkmalen:

- Zellulares Mobilfunksystem mit Zellradien zwischen 30 m und 35 km,

<sup>1</sup>Der GSM-Standard umfaßt heute ca. 10000 Seiten, die zur besseren Übersicht in 12 Sektionen aufgeteilt sind.

- digitale Übertragung auf der Funkschnittstelle, Abhörsicherheit durch Verschlüsselungsmechanismen,
- kombiniertes FDM/TDM Multiplexverfahren mit FDMA/TDMA Vielfachzugriff,
- Unterstützung der Teilnehmermobilität durch Handover bei Geschwindigkeiten bis zu 250 km/h,
- Zugang zu Festnetzen (z. B. ISDN, PSTN, PSDN),
- Unterstützung einer ISDN-artigen Dienstpalette mit Sprach-, Fax- und Datendiensten sowie Zusatzdiensten,
- Teilnehmeridentifikation durch SIM-Karte (**S**ubscriber **I**dentify **M**odule) und
- internationales Roaming (d. h. Erreichbarkeit im Ausland mit gleicher Rufnummer).

### 2.2.1.1 GSM-Architektur

In Abbildung 2.1 ist die Architektur des GSM-Netzes sowie seine Unterteilung in die einzelnen nach Funktionalität abgegliederten Teilsysteme dargestellt. Gemäß

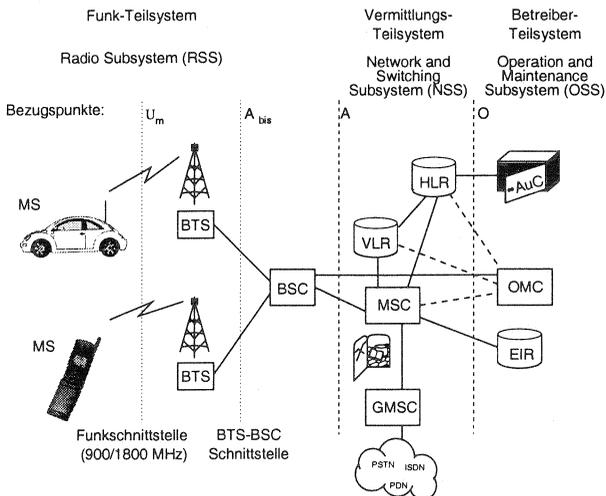


Abbildung 2.1: Architektur des GSM-Mobilfunknetzes

der GSM-Empfehlung 01.02 [4] unterteilt sich das GSM-System in drei autonome Teilsysteme:

- Funkteilsystem (BSS – **B**ase Station Subsystem),
- Vermittlungsteilsystem (NSS – **N**etwork and **S**witching Subsystem) und
- Betreibersteilsystem (OSS – **O**peration SubSystem).

Das Funkteilsystem (RSS) besteht aus den mobilen Endgeräten (MS – **M**obile Station) und dem Basisstationssystem (BSS). Mit Hilfe einer SIM-Karte (**S**ubscriber **I**dentify **M**odule) kann sich ein Teilnehmer über jede beliebige Mobilstation im Netz

identifizieren (SIM-Roaming). Um vor Diebstahl zu schützen, besitzt jede Mobilstation eine eindeutige Mobilgerätekennungsnummer EI (**E**quipment **I**dentity). Das Basisstationssystem umfaßt folgende Komponenten:

- Funkfeststation (BTS – **B**ase **T**ransceiver **S**tation) und
- Feststationssteuerung (BSC – **B**ase **S**tation **C**ontroller).

Die **Funkfeststation (BTS)** besitzt die Sende- und Empfangsanlage bezüglich der Funkschnittstelle ( $U_m$ ). Dazu gehört auch die TRAU (**T**ranscoder/**R**ate **A**daptor **U**nit), die sowohl für die Sprachcodierung und -decodierung als auch für die Ratenanpassung (Transcodierung) bei Datenübertragung verantwortlich ist.

Die **Feststationssteuerung (BSC)** hat die Aufgabe, mehrere BTS auf Seite der Funkschnittstelle sowie die Übertragung von verbindungsbezogenen Daten zum Vermittlungsteilsystem auf der A-Schnittstelle zu verwalten.

Bestandteile des Vermittlungsteilsystems sind:

- die Mobilvermittlungsstelle (MSC – **M**obile **S**witching **C**enter),
- die Heimatdatei (HLR – **H**ome **L**ocation **R**egister) und
- die Besucherdatei (VLR – **V**isitor **L**ocation **R**egister).

Die **Mobilvermittlungsstelle (MSC)** ist eine digitale Vermittlungsstelle, die mit mehreren Basisstationen verbunden ist. Sie hat einen fest umgrenzten geographischen Versorgungsbereich und vermittelt allen Mobilteilnehmern den Verbindungswunsch im eigenen und zu anderen PLMN<sup>2</sup>, sofern die Teilnehmer sich in diesem Bereich aufhalten. Der Aufgabenumfang der MSC besteht aus Signallisierungsvorgängen zum Aufbau, Abbau und Verwaltung von Verbindungen. Bei Störung oder Zellwechsel sorgt die MSC außerdem dafür, daß die Verbindung ohne Unterbrechung umgeschaltet wird (Handover).

Jeder Teilnehmer und dessen Daten sind in der **Heimatdatei (HLR)** registriert. Das sind sowohl statische Daten wie z. B. Rufnummer, EI, Geräteart, abonnierte Dienste,  $K_i$ , usw., als auch dynamische Daten wie beispielsweise die VLR-Nummer des aktuellen Aufenthaltsbereichs. Weiterhin wird in der HLR die Gebührenerfassung durchgeführt.

Jeder **Besucherdatei (VLR)** können mehrere MSC zugeordnet werden. Damit nicht so oft auf das HLR zugegriffen wird, werden Teilnehmerdaten in dem VLR registriert. Es handelt sich dabei um Informationen wie z. B. die Rufnummer oder den aktuellen Aufenthaltsbereich des jeweiligen Teilnehmers.

Folgende Netzelemente gehören zum Betreiber-Teilsystem (OSS):

- Betriebs- und Wartungszentrum (OMC – **O**perarion and **M**aintenance **C**entre),
- Authentifizierungszentrum (AuC – **A**uthentication **C**entre),
- Geräteidentifikationsregister (EIR – **E**quipment **I**dentity **R**egister).

Das Betriebs- und Wartungszentrum (OMC) steuert und überwacht die einzelnen Netzelemente des GSM, indem es alle Teilnehmer mit ihren Endgeräten verwaltet und den Zustand und die Auslastung der Netzelemente kontrolliert.

Das Authentifizierungszentrum (AuC) enthält alle Informationen zum Schutz der Teilnehmeridentität gegen Abhören und der Nutzungsberechtigung über die Funkschnittstelle  $U_m$ . Im AuC abgespeichert sind v.a. Authentifizierungsalgorithmus und Verschlüsselungscode.

Das **Geräteidentifikationsregister (EIR)** ist eine zentrale Datenbank, in der Teilnehmer- und Geräte-Kennungsnummer (IMEI – **I**nternational **M**obile

<sup>2</sup>Public Land Mobile Network

Equipment Identity) abgespeichert sind. Ist eine Mobilstation als gestohlen gemeldet, wird sie in einer sog. „Schwarzen Liste“ eingetragen und für alle Dienste gesperrt.

### 2.2.1.2 GSM-Schichtenmodell

Der GSM-Standard umfaßt die ersten drei Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells [77] wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Für den Betrieb im 900 MHz-Band ist

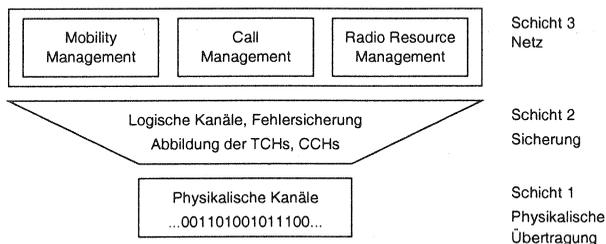


Abbildung 2.2: Schichtenmodell des GSM

für das GSM-System ein getrenntes Band für die Aufwärtsstrecke (Uplink) von 890–915 MHz und die Abwärtsstrecke (Downlink) von 935–960 MHz reserviert. Mit einem Nachbarkanalabstand von 200 kHz (18 dB Dämpfung) ergeben sich 124 Frequenzkanäle in jeder Richtung. Für die Frequenzen der Auf- und Abwärtsstrecke ergeben sich:

$$f_{Auf} = 890,2 \text{ MHz} + (i - 1) * 0,2 \text{ MHz}, i = 1..124 \text{ und} \quad (2.1)$$

$$f_{Ab} = f_{Auf} + 45 \text{ MHz.} \quad (2.2)$$

Die FDMA-Kanäle ihrerseits sind in acht sich periodisch wiederholende Zeitschlitz (Rahmen) unterteilt. Bei einer Periodendauer von 4,615 ms ergeben sich maximal 992 TDMA-Kanäle. In GSM werden die zu übertragenden Daten wie Sprache oder Signalisierung in Paketen mit fest vorgegebener Struktur, den sogenannten „Bursts“, übertragen. Es gibt fünf verschiedene Arten von Paketen:

- Normalpakete (Normal Bursts),
- Frequenzkorrekturpakete (Frequency Correction Bursts),
- Synchronisationspakete (Synchronisation Bursts),
- Blindpakete (Dummy Bursts) und
- Kanalerstzugriffspakete (Access Bursts).

Die Struktur des GSM-Rahmens und eines Normal Bursts sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Bei einer Modulationsdatensrate eines FDMA-Trägers von 270,9 kbit/s ergibt sich für die 114 GMSK<sup>3</sup> modulierten Nutzbits eines Normal Bursts in einem Zeitschlitz eine effektive Übertragungsrate von 22,8 kbit/s. Auf diese physikalischen Kanäle werden unter Verwendung von zusätzlicher Kanalcodierung zur Fehlersicherung die logischen Kanäle des Systems abgebildet.

<sup>3</sup>Gaussian Minimum Shift Keying

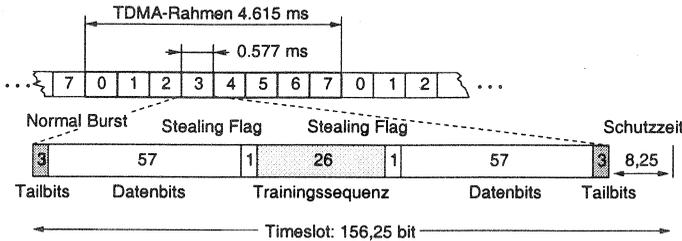


Abbildung 2.3: Physikalische Kanäle im GSM, Normal Burst

Die Logischen Kanäle des GSM lassen sich in Nutz- bzw. Verkehrskanäle (TCH – Traffic **C**hannel) für Teilnehmeranwendungen und Steuer- oder Signalisierungskanäle (CCH – Control **C**hannel) aufteilen, die vor allem von den Nachrichten der Systemverwaltung belegt werden. Diese Aufteilung zeigt eine enge Verwandtschaft zu dem ISDN-Konzept.

Zu erwähnen ist der **F**ast **A**ssociated **C**CH (FACCH), der bei Bedarf eingerichtet wird, dann TCH-Zeitschlitze markiert und zur schnellen Signalisierung z. B. beim Handover verwendet. Zur Sicherung der Signalisierungsdaten sowie der Informationsbits des Kurznachrichtendienstes auf dem Funkkanal wird in der Schicht 2, vgl. Abbildung 2.2, des GSM ein an das ISDN LAPD angelehntes LAPDm-Protokoll verwandt. Es handelt sich dabei um ein HDLC-ähnliches Sicherungsprotokoll mit variabler Fenstergröße  $< 61$ . In der Vermittlungsschicht des GSM werden Protokolle zur Mobilitäts-, Verbindungs- und Funkbetriebsmittelverwaltung des Systems angewandt. Sie dienen dem Aufbau und der Überwachung von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im GSM.

Die Funkbetriebsmittelverwaltung (RR – **R**adio **R**esource Management) setzt auf dem LAPDm Protokoll der Sicherungsschicht auf und verwaltet die physikalischen Kanäle des Systems und die darauf basierenden Sicherungsschichtverbindungen. Die angebotenen Dienste konzentrieren sich auf die Kanalzuweisung, die Leistungssteuerung und das Handover sowie auf den Aufruf von Mobilstationen.

Die Mobilitätsverwaltung (MM – **M**obility **M**anagement) beinhaltet die Dienste zur Unterstützung der Teilnehmermobilität, d. h. der regelmäßigen Aktualisierung seines im System gespeicherten Aufenthaltsortes, und zur Authentifizierung der Identität des mobilen Teilnehmers<sup>4</sup>.

Die Verbindungsverwaltung (CC – **C**all **C**ontrol) ist für den Aufbau, die Unterhaltung und die Auslösung einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung zu einer sich im GSM-befindlichen Mobilstation verantwortlich. Sie stellt diese Dienste der Transportschicht (ISO/OSI Schicht vier) zur Verfügung.

### 2.2.1.3 GSM-Handover

Die Möglichkeit, während einer aktiven Netzverbindung die Zelle ohne Verbindungsabbruch zu wechseln, ist eine der wichtigsten Funktionen in zellularen Netzsystemen, um die Mobilität des Teilnehmers zu unterstützen.

Es sind zwei Handovertypen in GSM zu unterscheiden:

<sup>4</sup>Im GSM wird nur von einer einseitiger Authentifizierung des mobilen Teilnehmers gegenüber dem Funknetz Gebrauch gemacht.

- Ein Inter-Cell Handover wird eingeleitet, wenn die Mobilstation einen Versorgungsbereich (von Zelle, BTS oder MSC) verläßt oder falls das Funkbetriebsmittel in der eigenen Zelle zu knapp wird, um so einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.
- Ein Intra-Cell Handover tritt ein, wenn der aktuelle Funkkanal zu schlecht wird.

Ein typischer Protokollablauf eines Handovers nach GSM 03.09, vgl. [5], bei dem ein Mobilterminal den Funkkanal zwischen zwei Zellen unterschiedlicher Vermittlungsteilsysteme (Inter-MSC Handover) wechselt, ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Zur

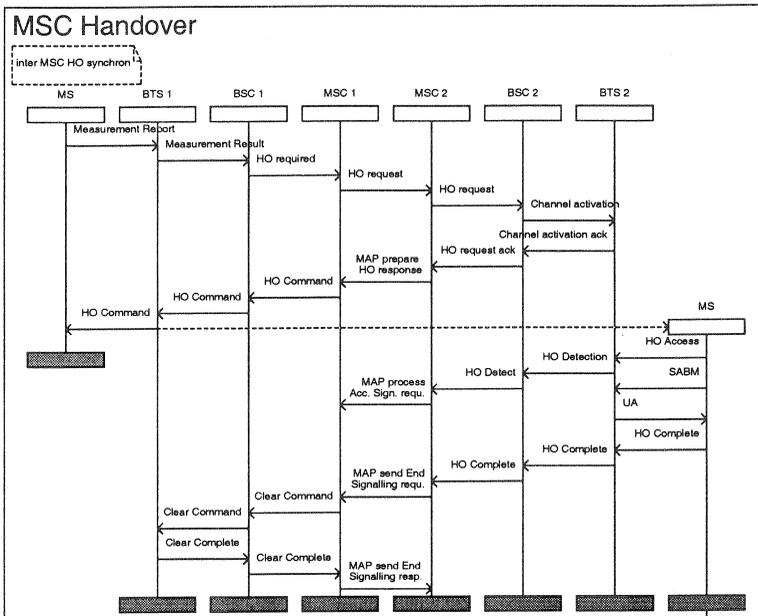


Abbildung 2.4: Inter-MSC Handover im GSM-System

Steuerung der Handovervorgänge wird im GSM das **Mobile Assisted HandOver** (MAHO) Verfahren verwendet. Die Entscheidung für einen Handover wird durch die Feststationssteuerung aus den unmittelbar von der Mobil- und Funkfeststation gemessenen Werten im Vergleich zu Referenzwerten bestimmt. Zu den Meß- und Referenzwerten zählen:

- Permanente Daten – dazu gehören die maximale Sendeleistung der Mobilstation selbst, der eigenen BTS und der benachbarten BTSs,
- Echtzeitdaten wie Signalqualität RXQUAL, Empfangspegel RXLEV der eigenen und der benachbarten Zellen auf dem Up- und Downlink und
- verkehrsorientierte Gesichtspunkte wie Zellkapazität, Zahl der freien Kanäle, Zahl neuer Verbindungen etc., die auf einem Verkehrskanal der BTS warten.

### 2.2.1.4 Zukünftige Entwicklung von GSM

Die zukünftige Entwicklung von GSM ist maßgeblich von der Einführung neuer Dienste geprägt. Diese neuen Dienste umfassen im wesentlichen einen Anwendungsbereich, der unter dem Begriff „mobiles Internet“ (WWW, ftp, E-Mail, Telnet) zusammengefaßt werden kann, vgl. [14]. Daneben werden jedoch auch Anwendungen aus dem Bereich der Verkehrstelematik (Autom. Gebührenerfassung, Verkehrsleitung, Flottenmanagement) und dem elektronischen Zahlungsverkehr diskutiert. Zur Realisierung der Anwendungen wird hierbei auf folgende bereits bestehende und neue Trägerdienste zurückgegriffen:

- Teilnehmer-zu-Teilnehmer Signalisierung (UUS – **U**ser-to-**U**ser **S**ignalling) nach GSM-Standard 02.87 und 03.87,
- Paket-Datenübertragung auf Signalisierungskanälen (PDS) nach GSM Phase 2+ Empfehlungen 02.63–04.63,
- die Nutzung virtueller Verbindungen (FMBS – **F**rame **M**ode **B**earer **S**ervice),
- Paket-Datenübertragung auf dedizierten Kanälen (GPRS – **G**eneral **P**acket **R**adio **S**ervice),
- erweiterte GSM-Sprachdienste (ASCI – **A**dvanced **S**peech **C**all **I**tems) und der
- hoch-bitratige kanalvermittelte Datendienst (HSCSD – **H**igh **S**peed **C**ircuit **S**witched **D**ata **S**ervice).

Für eine nähere Diskussion der einzelnen Trägerdienste wird auf die Literatur, vgl. [14], verwiesen. Die Implementierung der unterschiedlichen Anwendungen und der mit ihnen verbundenen Trägerdienste hängt im wesentlichen vom Realisierungsaufwand und Nutzen beim Betreiber ab.

### 2.2.2 Mobilfunksystem DECT

Der DECT Standard, der Mitte der 80iger Jahre konzipiert wurde, war ursprünglich als europaweiter Standard zur privaten schnurlosen Telekommunikation gedacht. Mit Hilfe digitaler Übertragung auf der Funkschnittstelle sollte die Sprachqualität verbessert, die Sicherheit gegen Lauschangriffe erhöht und die Interferenz von Nachbarstationen reduziert werden [103].

Als der Standard 1992 von der ETSI verabschiedet wurde [1], boten sich aufgrund des großen Interesses von Industrie und Endverbraucher zwei zusätzliche Anwendungsgebiete an. Zum einen ist der Standard auch für industriellen Einsatz im Rahmen der schnurlosen Telefonie und bei schnurlosen Nebenstellenanlagen (PBX<sup>5</sup>) von Interesse, zum anderen eignet er sich zum Betrieb von drahtlosen Zugangsnetzen (WLL/RLL – **W**ireless bzw. **R**adio in the **L**ocal **L**oop [2]).

Die Netz-Architektur eines DECT Systems für den industriellen Einsatz ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die unterschiedlichen DECT Netz-Komponenten sind:

- die Mobilstation (PP – **P**ortable **P**art) als Teilnehmerendgerät,
- die Feststation (FP – **F**ixed **P**art) als Basisstation,
- die DECT Netzverwaltung (DFS – **D**ECT **F**ixed **S**ystem) inklusive der Datenverwaltung und
- der Netzübergang, z. B. zum öffentlichen Fernmeldenetz PSTN (IWU – **I**nter **W**orking **U**nit).

---

<sup>5</sup>Private Branch Exchange

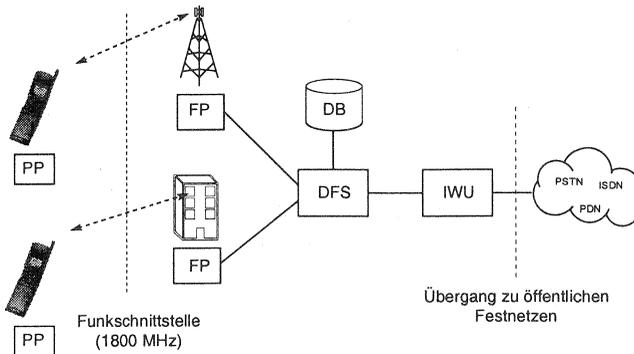


Abbildung 2.5: Architektur eines DECT-Systems

### 2.2.2.1 Eigenschaften und Kenngrößen von DECT Systemen

Nach DECT Standard ist sowohl die digitale Übertragung von Sprache als auch von Datensignalen mit einem Funk-Modem möglich [103]. Dabei ist die Übertragungreichweite, beschränkt durch eine maximale Sendeleistung von 250 mW, im Vergleich etwa zu GSM eher gering. Sie beläuft sich auf 20–50 m innerhalb von Gebäuden und bis zu 300 m im Freien. Für den Betrieb von DECT Systemen ist ein 20 MHz breites Spektrum von 1880–1900 MHz zugewiesen. Es ist in zehn Frequenzbänder unterteilt, die einen Trägerabstand von 1728 kHz haben und eine Übertragungsbandbreite von 576 kHz bieten. Die einzelnen Trägerfrequenzen  $f_c$  berechnen sich zu:

$$f_c = f_0 - i \cdot 1728 \text{ KHz}, \text{ mit } i = 0,1, \dots, 9 \text{ und } f_0 = 1897,344 \text{ MHz}. \quad (2.3)$$

Dabei sollte die Trägerfrequenzabweichung im aktiven Zustand maximal  $\pm 50$  kHz betragen. Bei der Verwendung des Modulationsverfahrens Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) mit einem Zeit-Bandbreitprodukt  $BT = 0,5$  bzw. des Modulationsverfahrens GMSK berechnet sich daraus eine Trägerdatenrate von 1152 kbit/s. Jede der 10 Frequenzen wird in 10 ms lange Rahmen unterteilt, die sich wiederum aus 24 äquidistanten Zeitschlitzeln zusammensetzen. Unter Verwendung eines TDMA/TDD (TDD – Time Division Duplexing) Kanalvielfachzugriffsverfahrens werden die ersten 12 Zeitschlitzeln für den Übertragungsweg von der Feststation zur Mobilstation und die restlichen 12 Zeitschlitzeln für den umgekehrten Weg verwandt.

In jedem Zeitschlitz können bis zu 480 bit (32 kbit/s) übertragen und für die Abbildung von Verkehrs- und Signalisierungskanälen genutzt werden. Hierzu finden für die gleichzeitige Nutzung eines Verkehrs- und Signalisierungskanals (Basic Physical Packet P32) und die alleinige Nutzung eines Signalisierungskanals (Short Physical Packet P00) unterschiedliche Datenpakete Verwendung. Die Daten in einem P32 Rahmen werden dabei zusätzlich durch einen kurzen CRC-Code zur Fehlererkennung geschützt. Sprache, die über einen Verkehrskanal übertragen werden soll, wird nach dem ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) Verfahren codiert.

Zur optimalen Nutzung der Funkbetriebsmittel verfügt das DECT System über eine Dynamische Kanalwahl (DCS – Dynamic Channel Selection). In einem dezentral organisierten Verfahren wählt dabei jede Mobilstation aus einer Kanalliste, die

in der Sicherungsschicht der Mobilstation verwaltet wird, selbständig den für sie besten Kanal aus. Dies geschieht, in dem von ihr zuerst die Feststation mit dem stärksten gemessenen Empfangspegel und danach der Kanal mit dem geringsten RSSI-Pegel (Radio Signal Strength Indicator) ausgewählt wird ( $-93\text{dB} < \text{RSSI-Pegel} < -33\text{ dB}$ ) [1]. Reduziert sich die Qualität einer bestehenden Verbindung bis unterhalb einer bestimmten Toleranzgrenze, so kann die Mobilstation eigenständig auf einen neuen Kanal besserer Qualität wechseln (Handover). Dabei ist nicht nur der Wechsel auf einen anderen Kanal derselben Feststation (Intra-Cell Handover) möglich, sondern auch ein Wechsel der Feststation (Inter-Cell Handover).

### 2.2.2.2 DECT-RLL/WLL Konzept

In Abbildung 2.6 ist die Architektur des DECT Systems zum Einsatz in funkgesteuerten Zugangsnetzen dargestellt. Dieses System zeichnet sich durch hohe Kapazitäten bei beschränkten Funkressourcen und Zellengrößen aus [2]. Als Unterschied zum

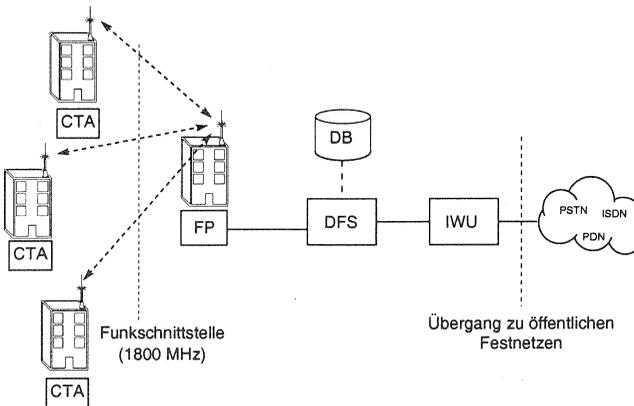


Abbildung 2.6: DECT als funkgesteuertes Zugangsnetz

Standard DECT Ansatz ist die Ausführung des Fixed und Portable Part, hier CTA (Cordless Terminal Adapter) für drahtloses Zugangsnetze, auf optimale Funkausleuchtung ohne Unterstützung von Teilnehmermobilität ausgerichtet. Antennen sind meist ortsfest und weisen nicht selten eine hohe Richtcharakteristik (z. B.  $60^\circ$  Sektor) auf. 1995 standardisierte die ETSI die herstellerunabhängigen Benutzerschnittstellen GAP (Generic Access Profile) und PAP (Public Access Profile), vgl. [1, 2, 3], um in Zukunft den öffentlichen Zugang auch zu herstellerfremden Systemen zu ermöglichen.

## 2.3 Satellitengestützte Kommunikationsnetze

Satellitengestützte Kommunikationsnetze haben in der Telekommunikation seit dem Start des ersten kommerziellen Systems mit Namen „Early Bird“ im Jahre 1965 kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Heutzutage werden allein im geostationären Bereich durch über 35 Satellitennetzbetreiber weltweit mehr als 120 GHz Transponder-

bandbreite für Telekommunikationsdienste aller Art genutzt [104]. Wurden anfangs diese Systeme noch hauptsächlich zum Betrieb von Punkt-zu-Punkt Verbindungen, z. B. für den Betrieb transatlantischer bzw. -pazifischer Telekommunikationsverbindungen, entworfen, folgte in den 80iger Jahren schon bald die Nutzung für Punkt-zu-Mehrpunkt Dienste, wie etwa dem satellitengestützten Fernsehen über die ASTRA und EUTELSAT Satelliten. Die Anzahl der entsprechenden Empfänger beläuft sich heute für Europa auf ca. 25 Millionen. Kommunikationstechnisch gesehen sind die meisten der geostationär betriebenen Satellitensysteme jedoch nichts weiter als Repeater (Transponder), die eine in der Aufwärtsstrecke auf einer Frequenz empfangene Nachricht verstärkt auf einer anderen Frequenz auf der Abwärtsstrecke wieder abstrahlen. Damit konzentriert sich die Hauptzahl der Funktionen solcher Systeme auf die physikalische und Sicherungsschicht des ISO/OSI Referenzmodells [98].

In Abbildung 2.7 ist die Summe der Signallaufzeit für eine Aufwärts- und Abwärtsstrecke einzeln sowie ihre Summe als Funktion der Orbitalhöhe dargestellt. Für geostationäre Systeme (GEO - Geostationary Earth Orbit) ist dabei zu erkennen, daß eine Signallaufzeit von 240 ms für eine Erde-Satellit-Erde Übertragung nicht unterschritten werden kann. Werden zu den Signallaufzeiten noch die Verarbeitungsverzögerungen in den Bodenstationen und im Satelliten addiert, können leicht 300–350 ms Gesamtverzögerung erreicht werden. Solche Verzögerungen machen den geostationären Betrieb von Satelliten gerade bei Sprachdiensten unattraktiv, da sie den menschlichen Dialog merklich störend beeinflussen [54].

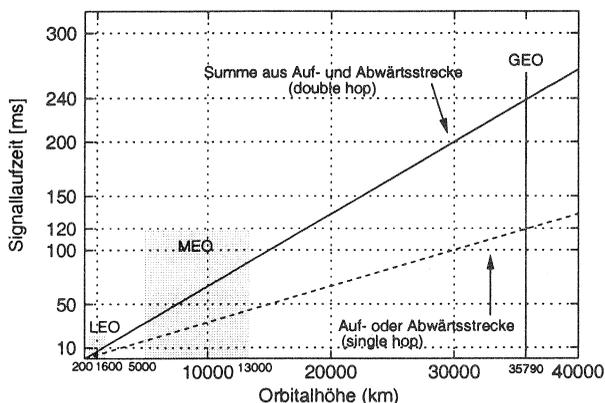


Abbildung 2.7: Signallaufzeit als Funktion der Orbitalhöhe

Alternativ zu satellitengestützten Kommunikationssystemen auf geostationären Bahnen werden bereits seit ca. zehn Jahren der Einsatz von Satellitensystemen auf anderen Erdumlaufbahnen diskutiert. Die bekanntesten sind Satellitensysteme auf sogenannten niedrigen (LEO - Low Earth Orbit) und mittleren (MEO - Medium Earth Orbit) zirkularen Bahnen. Von LEO-Satelliten spricht man bei Bahnhöhen zwischen 200 und 1600 km. Sie liegen damit zwischen der sogenannten Höhe konstanter atmosphärischer Dichte und dem ersten Van Allen Strahlungsgürtel<sup>6</sup>. LEO-

<sup>6</sup>Benannt nach James Alfred Van Allen, † 1914, amerik. Physiker. Die Van-Allen-Gürtel sind zwei Strahlungsgürtel der Erde (Zonen ionisierender Strahlung hoher Intensität).

Satellitensysteme zeichnen sich aufgrund der geringen Bahnhöhe durch relativ kleine Ausleuchtzonen einzelner Satelliten und hohe Satellitenbahngeschwindigkeiten aus (ca. 18000 – 22000 km/h). Deshalb werden für eine globale Abdeckung viele, in verschiedenen Orbits platzierte, Satelliten benötigt. Umlaufbahnen für MEO-Satelliten beginnen nach dem ersten Van Allen Gürtel bei über 5000 km und erstrecken sich bis zum zweiten Van Allen Gürtel bei 13000 km, vgl. Abbildung 2.8 und [74]. Bei

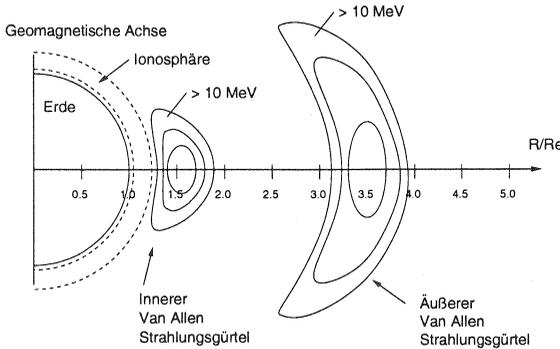


Abbildung 2.8: Die Van Allen Strahlungsgürtel

MEO-Systemen sind im Vergleich zu LEO-Systemen die Ausleuchtzonen bei geringerer Satellitenmobilität und höheren Signallaufzeiten etwas größer. Vorteile von LEO- und MEO-Systemen gegenüber GEO-Systemen sind:

- Geringe Signallaufzeit (vgl. Abb. 2.7),
- niedrige erforderliche Sendeleistungen durch geringe Entfernungen,
- hohe durchschnittliche Elevationswinkel,
- hohe Betriebssicherheit durch erhöhte Redundanz und
- die Möglichkeit einer guten Versorgung von Regionen mit hoher positiver und negativer geographischer Breite (z. B. Polarregionen).

Aufgrund der niedrigeren Bahnen ergeben sich aber auch Nachteile:

- Kurze Verbindung zu einem Satelliten unter sich ständig ändernden Elevationswinkeln,
- kleine Versorgungsgebiete pro Satellit und
- relativ großer Aufwand zur Systemkontrolle.

Gerade die sehr geringen Signallaufzeiten bei noch akzeptablen Elevationswinkeln ( $\alpha_{min} \approx 10^\circ$ ) von LEO-Satellitennetzen machen den Einsatz solcher Systeme für zeitkritische Telekommunikationsdienste möglich. In Abbildung 2.9 sind die drei Szenarien zur Realisierung von Telekommunikationsdiensten mittels niedrig fliegender Satellitensysteme dargestellt. Eine Kombination verschiedener Szenarien ist möglich. Als Szenarien für den Einsatz satellitengestützter mobiler Kommunikation ergeben sich:

1. Der Einsatz in schwer zugänglichen oder für terrestrische Systeme wenig lukrativen Gebieten (See, Luft, ländliche Gebiete) weltweit.

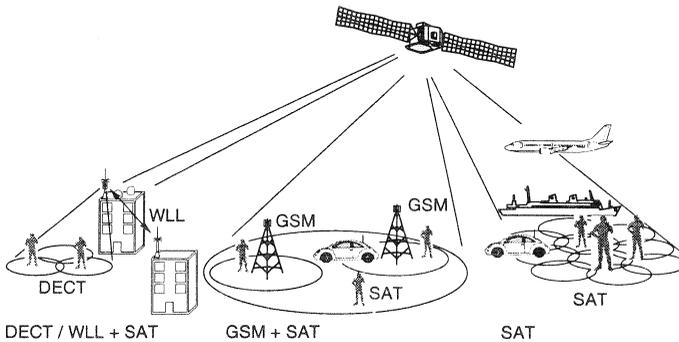


Abbildung 2.9: Szenarien mobiler satellitengestützter Kommunikation

2. Der Einsatz komplementär oder überbrückend (Inselbetrieb<sup>7</sup>) zu terrestrischen zellularen Mobilfunksystemen wie GSM.
3. Der Einsatz in Konkurrenz zu terrestrischem Richtfunk oder zu Festnetzen, zum Beispiel bei der Versorgung von drahtlosen Zugangssystemen (z. B. DECT).

Für jeden dieser Bereiche bieten LEO-satellitengestützte Kommunikationsnetze besondere satellitenspezifische Eigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf den Betrieb in Konkurrenz oder komplementär zu terrestrischen zellularen Systemen noch gesondert eingegangen. Im folgenden werden zwei LEO-satellitengestützte Kommunikationsnetze, die mit unterschiedlicher Übertragungstechnik ausgestattet sind, kurz vorgestellt.

### 2.3.1 IRIDIUM-System

Das IRIDIUM<sup>8</sup>-System ist ein auf niedrig fliegenden Satelliten basierendes globales Kommunikationsnetz für Sprach-(2,4/4,8 kbit/s), Fax-(2,4 kbit/s), und Datendienste (2,4 kbit/s) weltweit [27, 45]. Erklärterweise soll dies jedoch nicht in Konkurrenz zu bereits bestehenden terrestrischen Systemen geschehen.

#### 2.3.1.1 Eigenschaften und Kenngrößen des IRIDIUM-Systems

Das IRIDIUM-Kommunikationsnetz besteht aus 66 regulären und 6 Reserve-Satelliten, welche sich auf 11 quasipolaren Bahnen mit  $86,4^\circ$  Grad Bahninklination in 780 km Höhe über Normal Null (NN) um die Erde bewegen. Am Äquator ergibt sich eine minimale Elevation von  $8,2^\circ$  zum Satellit, woraus man einen zirkularen Teilnehmerfunkversorgungsbereich mit 2208 km Radius ( $15,5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) berechnet. Die Satellitenkonstellation sowie die einzelnen, sich überlappenden Funkversorgungsbereiche des IRIDIUM-Kommunikationsnetzes sind in Abbildung 2.10 dargestellt<sup>9</sup>.

<sup>7</sup>Inselbetrieb bedeutet hier den nicht flächenhaften Einsatz.

<sup>8</sup>IRIDIUM deutet auf die chemische Ordnungszahl 77 hin, die die ursprüngliche Anzahl von Satelliten im System bezeichnet.

<sup>9</sup>Die Abbildungen wurden mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten MoSSS+/NeSSiE Simulators berechnet, vgl. Kapitel 6.

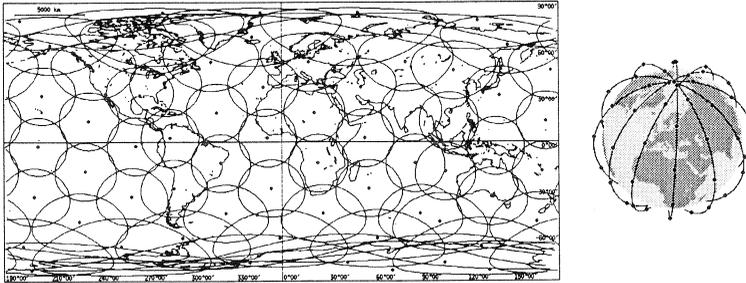


Abbildung 2.10: Funkversorgung und Konstellation des IRIDIUM-Systems

Da die Erdanziehungskraft umgekehrt proportional zur Bahnhöhe eines Satelliten wirkt, muß ihr bei niedrigeren Erdumlaufbahnen eine im Vergleich zu höheren Erdumlaufbahnen stärkere Zentripetalkraft entgegengesetzt werden, damit ein Satellit seine Bahn nicht verläßt. Die dafür erforderliche Umlaufgeschwindigkeit  $v_U$  eines IRIDIUM-Satelliten berechnet sich aus der Gravitationskonstante  $G$ , der Masse der Erde  $M_{Erde}$  sowie dem Erdradius  $R_{Erde}$  zu:

$$v_U = \sqrt{G \frac{M_{Erde}}{R_{Erde} + 780 \text{ km}}} = 7481,44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \tag{2.4}$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist  $\omega = 1,046 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$ . Die maximale Sichtbarkeitsdauer eines Satelliten bei direktem Überflug berechnet sich daraus – sie beträgt 662,9 sec. Das Teilnehmerfunkversorgungsgebiet eines jeden IRIDIUM-Satelliten wird, mit Hilfe von drei um  $120^\circ$  versetzten, phasengesteuerten Gruppenantennen (Phased Array) in 48 sich überlappende Funkzellen unterteilt (siehe Abbildung 2.11). Aufgrund von antennenbedingten Nachbarkanalstörungen ergibt sich ein mittlerer Frequenzwiederholabstand  $R_F$  von 12. Bei Annahme einer isotropen Antennencharakteristik

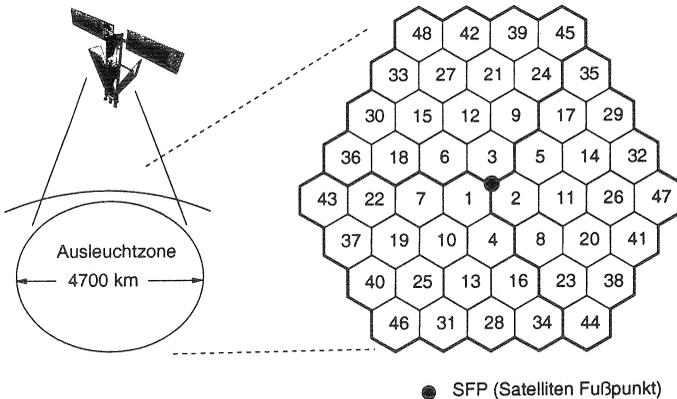


Abbildung 2.11: Phasengesteuerte Gruppenantenne eines IRIDIUM-Satelliten

ergeben sich Zellen mit einem Radius von ca. 330 km ( $3,42 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ ), wobei der Zellrand durch den 3 dB Abfall des Signalpegels definiert wird.

### 2.3.1.2 Architektur des IRIDIUM-Systems

In Abbildung 2.12 ist die Architektur des IRIDIUM-Systems sowie seine Unterteilung in die im folgenden gemäß [8] aufgeführten Netzelemente dargestellt:

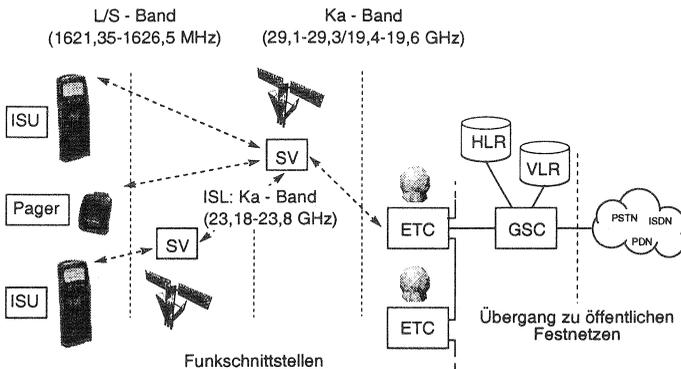


Abbildung 2.12: Architektur des IRIDIUM-Systems

- Teilnehmerendgerät (ISU – Individual Subscriber Unit bzw. Funkempfänger (Pager)),
- Satellitensubsystem (SV – Space Vehicle),
- Bodenstation (ETC – Earth Terminal Controller),
- Mobilvermittlungsstelle (GSC – Gateway Switching Centre) und
- Heimat- und Besucherdatei (HLR, VLR).

Das mobile Teilnehmerendgerät von IRIDIUM (s. Abb. 2.12) hat wie bei rein terrestrischen Systemen Taschenformat und eine maximale Sendeleistung von 7 W. Bei der Sende- und Empfangsantenne dieses Geräts handelt es sich um eine quadrifiliare Helix-Antenne, die einen Gewinn von bis zu 3,5 dB erreicht. Neben einer satelliten-spezifischen Version ist auch ein kombiniert für GSM- und Satellitenfunkempfang geeignetes Gerät (Dual-Mode) verfügbar.

Das Satellitensubsystem besteht aus 66 aktiven Satelliten, die die erforderlichen Verbindungen zwischen der Bodenstation und den mobilen Endgeräten herstellen. Dabei stehen der Auf- und Abwärtsstrecke zur Bodenstation 600 Verkehrskanäle zur Verfügung, die durch den vorhandenen Multiplexgewinn der paketisiert übertragenen Sprache bis zu 1300 Sprachkanäle tragen können. IRIDIUM-Satelliten sind vermittlungsfähig und können deshalb Verbindungen zwischen zwei gewünschten Nachrichtenendpunkten auch über Routen mit weiteren Satelliten über spezielle Inter-Satellitenrichtfunkverbindungen (ISL – Inter Satellite Link) bewerkstelligen. Diese Technik ermöglicht eine zielfähige Weitergabe des getragenen Verkehrs, wenn Übergänge zu terrestrischen Kommunikationsnetzen erforderlich sind. Zusätzliche Kosten durch terrestrische Gesprächsweiterleitung können bis auf einen Restbetrag

vermieden werden. Die Systemkontrolle des IRIDIUM-Systems ist von wenigen, stets erreichbaren Netzelementen aus möglich.

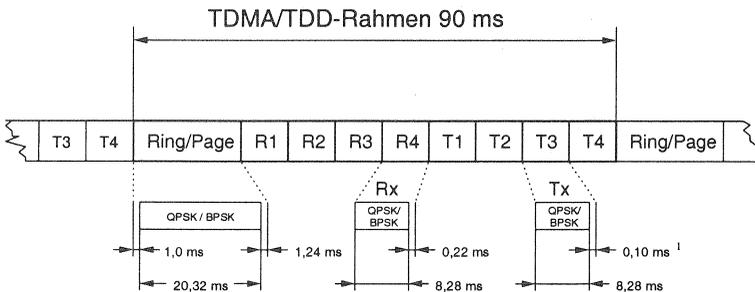
Die Bodenstationen des Systems stellen die Verbindung zwischen den Mobilvermittlungsstellen und dem Satellitensubsystem her. Sie erfüllen zusätzlich die Aufgabe der Protokolladaption, z. B. zwischen den GSM-Protokollen, den verwendeten Mobilvermittlungsstellen und dem IRIDIUM spezifischen Satellitensubsystem. Die Protokolle der Vermittlungsschicht werden unverändert systemweit eingesetzt [8].

Die Mobilvermittlungsstelle ist z. B. eine leicht modifizierte Version einer GSM Vermittlungsstelle. Innerhalb des IRIDIUM-Systems erfüllt sie analog zum GSM die Aufgabe der Funkbetriebsmittel-, Mobilitäts- und Verbindungsverwaltung [45]. Dem GSM entsprechende Datenbanken sind hierfür implementiert.

### 2.3.1.3 IRIDIUM-Funkschnittstellen

Die einzelnen Satelliten des Satellitensubsystems sind über drei verschiedene Funkschnittstellen mit den Teilnehmerendgeräten, den Bodenstationen und untereinander mit den jeweiligen Nachbarsatelliten verbunden. Jede der Funkschnittstellen verwendet einen proprietären Ansatz, der nur in Teilen bekannt ist. Von den jeweiligen Funkschnittstellen zwischen Satellit und Bodenstation sowie zu anderen Satelliten sind bis auf das Frequenzband (siehe Abbildung 2.12) keine weiteren Informationen verfügbar.

Die Funkschnittstelle zum Teilnehmerendgerät ist im Rahmen des FCC<sup>10</sup>-Genehmigungsverfahren zum Teil beschrieben und spezifiziert worden. Für die Übertragungen auf der Aufwärts- sowie der Abwärtsstrecke vom bzw. zum Endteilnehmer steht ein 5,15 MHz breites Frequenzband von 1621,35–1626,5 MHz (L/S-Band) zur Verfügung. Es ist in 124 Frequenzkanäle unterteilt, die einen Trägerfrequenzabstand von 41,67 kHz haben und eine Übertragungsbandbreite von 31,5 kHz bieten. Jedes der Frequenzbänder wird in 90 ms lange Rahmen unterteilt, die sich wieder aus einem 20,32 ms langem Funkrufzeitschlitz und acht äquidistanten, 8,28 ms langen Zeitschlitzern zur Übertragung von Teilnehmerdaten zusammensetzen (siehe Abbildung 2.13).



<sup>1</sup>Entfällt bei T4

Abbildung 2.13: Physikalische Kanäle im IRIDIUM-System

<sup>10</sup>Federal Communications Commission der USA

Auf der Funkschnittstelle wird in jedem Rahmen ein TDMA/TDD Zeitvielfachzugriffsverfahren benutzt, bei dem die ersten vier 8,28 ms Zeitschlitz für Übertragungen auf der Aufwärtsstrecke und die verbleibenden vier 8,28 ms Zeitschlitz für Übertragungen auf der Abwärtsstrecke vorgesehen sind. Die maximal resultierende Kanalzahl  $N_{max}$  pro Satellit berechnet sich dementsprechend zu:

$$N_{max} = 124 \frac{\text{Träger}}{5,15 \text{ MHz}} \cdot 4 \frac{\text{Kanäle}}{\text{Frequenz}} \cdot R_F = 1984 \quad (2.5)$$

Aufgrund einer auf 1400 W beschränkten Sendeleistung können laut Hersteller nur 1100 Verbindungen gleichzeitig betrieben werden. Unter Verwendung eines festen Schemas sich abwechselnder BPSK und QPSK Modulation pro Zeitschlitz wird eine effektive uncodierte Datenrate von 4800 bit/s je 8,28 ms Zeitschlitz pro Rahmen erzielt.

### 2.3.2 TELEDESIC-System

Das TELEDESIC-Kommunikationsnetz ist ein breitbandiges, aus niedrig fliegenden Satelliten bestehendes Kommunikationsnetz zur globalen Punkt-zu-Punkt Übertragung von Sprach- und Datendiensten. Die verbindungsorientierte Übertragung innerhalb des Systems erfolgt paketvermittelt basierend auf dem ATM<sup>11</sup> Standard [28, 94, 100]. Angebotene Dienste rangieren von 16 kbit/s für einfache Sprachanwendungen bis hin zu 2,048 Mbit/s ( $E_1$ ) für den hochratigen Datenverkehr. Für spezielle Anwendungen sollen auch Datenraten von 155,52 Mbit/s ( $OC - 3$ ) bis zu 1,24416 Gbit/s ( $OC - 24$ ) angeboten werden. Gerade durch die weltweite Unterstützung von hochratigen Datendiensten soll mit Hilfe von TELEDESIC ein globales „Internet in the Sky“-Konzept unterstützt und betrieben werden [100].

#### 2.3.2.1 Eigenschaften und Kenngrößen des TELEDESIC-Systems

Das TELEDESIC-Kommunikationsnetz besteht aus 840<sup>12</sup> regulären und bis zu 84 Reserve-Satelliten. Sie verteilen sich in einer Höhe von 700 km (über NN) auf 21 sonnensynchrone Bahnen mit 98° Grad Bahninklination gegen die Ekliptik. Durch diese Neigung entstehen zwei etwa 3° breite Lücken in der Abdeckung, die aber so weit nördlich bzw. südlich liegen, daß die Gebiete mit hohem Verkehrsangebot nicht davon betroffen werden. Eine Verfügbarkeit von 99,9% sowie ein Bitfehlerverhältnis von  $10^{-10}$  werden nach Herstellerangaben für Breitengrade bis zu  $\pm 70^\circ$  erreicht. Die hohe Anzahl von Satelliten auf den 21 vergleichsweise niedrigen Erdumlaufbahnen führt am Äquator zu einer minimal verfügbaren Elevation von 40°. Diese hohen minimalen Elevationen sind für das Erreichen der angebotenen Dienstgüte erforderlich, da hierdurch Witterungseinflüsse reduziert werden können, die im Ka-Band erheblichen störenden Einfluß haben. Die Satellitenkonstellation sowie die einzelnen, sich überlappenden Funkversorgungsbereiche des TELEDESIC-Kommunikationsnetzes sind in Abbildung 2.14 dargestellt<sup>13</sup>. In der Struktur der Funkzellen unterscheidet sich das TELEDESIC-System grundlegend von den satellitengestützten mobilen Kommunikationssystemen der ersten Generation (z. B. IRIDIUM). Beim TELEDESIC-System

<sup>11</sup>Asynchronous Transfer Mode

<sup>12</sup>Stand Okt. 1997. Seit kurzem wird auch eine alternative Lösung mit nur 288 Satelliten in 1400 km Höhe diskutiert.

<sup>13</sup>Die Abbildungen wurden mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten MoSSS+/NeSSiE Simulators berechnet, vgl. Kapitel 6.

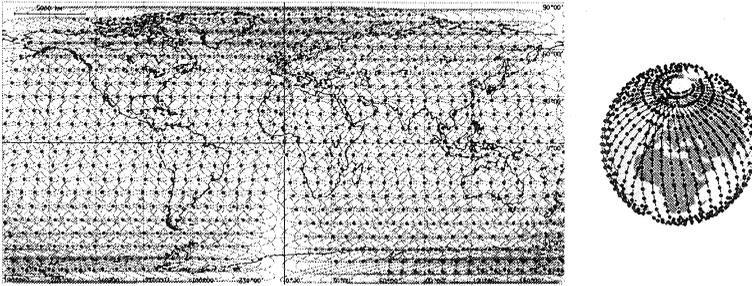


Abbildung 2.14: Funkversorgung und Konstellation des TELEDESIC- Systems

werden quadratische Funkzellen ortsfest definiert und bewegen sich nicht mit dem Funkversorgungsgebiet des Satelliten mit (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Die phasengesteuerten Gruppenantennen der TELEDESIC- Satelliten garantieren mittels elektronischer Strahlenschwenkung eine entsprechende Funkversorgung dieser Zellen während des Überfluges (vgl. Abbildung 2.15). Die Struktur der ortsfesten Zellen setzt sich aus

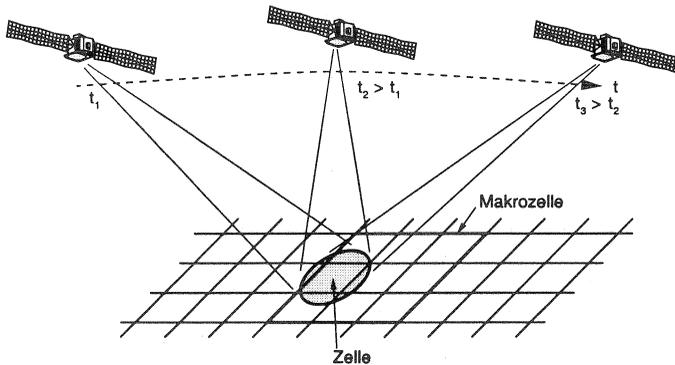


Abbildung 2.15: Funkversorgung ortsfester Zellen im TELEDESIC-System

einer globalen, flächendeckenden Anordnung von Mikrozellen zusammen, von denen jeweils neun zu einer Makrozelle zusammengefaßt sind. In Abbildung 2.16 ist neben der Geometrie der Mikro- und Makrozellen auch das Raumvielfachzugriffsverfahren (SDMA – Space Division Multiple Access) dargestellt, mit dem jeweils Mikrozellen gleicher Kennung in allen auf der Erde verteilten 20.000 Makrozellen synchron abgetastet werden. Da bei Bedarf die Funkversorgung (mit Hilfe von Antennendiversität<sup>14</sup> beim Empfänger) zwischen zwei Abtastungen von einem Satelliten auf den nächsten umgeschaltet werden kann, ist eine aufwendige Handover-Steuerung wie z. B. im IRIDIUM-System überflüssig.

<sup>14</sup>Da in der Regel gerichtete Antennen beim Empfänger zum Einsatz kommen sind entweder zwei mechanisch oder eine elektronisch schwenkbare Richtantenne zum störungsfreien Empfang erforderlich.

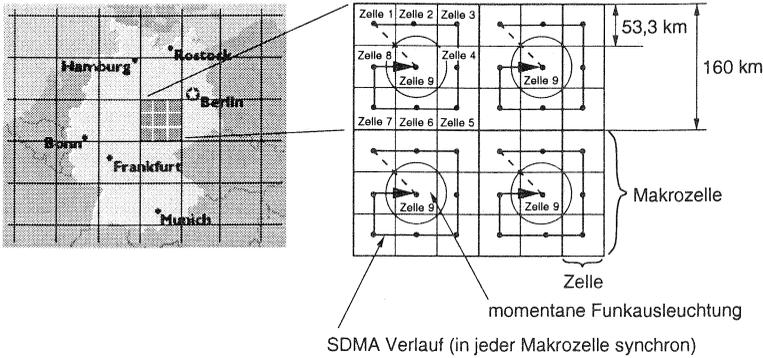


Abbildung 2.16: TELEDESIC-Zellenstruktur

### 2.3.2.2 Architektur des TELEDESIC-Systems

Abbildung 2.17 zeigt die Architektur des TELEDESIC-Systems sowie seine Unterteilung in die einzelnen Netzelemente.

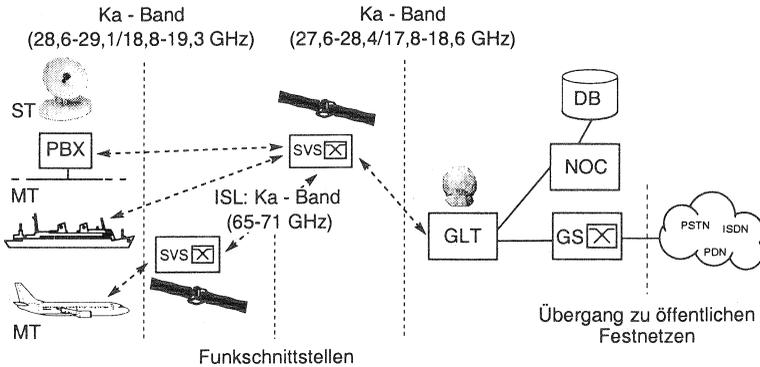


Abbildung 2.17: Architektur des TELEDESIC-Systems

Gemäß [100] unterteilt sich das TELEDESIC-System in die Netzelemente:

- Mobiles oder ortsfestes Endgerät (MT/ST – Mobile or Standard Terminal),
- Satellitensubsystem (SVS – Space Vehicle Switch),
- Bodenstation (GLT – Giga Link Terminal),
- Mobilvermittlungsstelle (GS – Gateway Switch),
- Netzbetriebs- und Kontrollzentrum (NOC – Network Operation and Control) und
- Datenbanken (DB – DataBase).

Endgeräte können sowohl ortsfest als auch mobil sein. Da die Übertragung der Auf- und Abwärtsstrecke im Ka-Band erfolgt, ist zum sicheren, fehlerfreien Empfang eine gerichtete Antenne mit bis zu 35 dB Antennengewinn in Abhängigkeit von der gewünschten Dienstdatenrate und -qualität erforderlich. Die mittlere Sendeleistung

kann im Endgerät zwischen 0,01 W und 4,7 W variiert werden. Alle Dienste, die von einem Endteilnehmer angefordert werden können, basieren auf ATM, so daß im Endgerät eine entsprechende Schnittstelle vorgesehen ist.

Das Satellitensubsystem besteht aus 840 aktiven Satelliten, die die erforderlichen Verbindung zwischen den Bodenstationen (GLT) und den Endgeräten (MT/ST) mit einer ATM-Vermittlungsstelle, wie sie sich in jedem Satelliten befindet, herstellen. Dabei stehen der Auf- und Abwärtsstrecke zur Bodenstation jeweils bis zu 1190 voll-duplex E1 Verkehrskanäle (2048 kbit/s) pro Satellit zur Verfügung. Wie im IRIDIUM-System können auch bei TELEDESIC-Verbindungen zwischen zwei gewünschten Nachrichtenzuständen mittels Inter-Satellitenverbindungen (ISL) über mehrere Satelliten geroutet werden. Bei TELEDESIC stehen insgesamt acht ISLs pro Satellit zur Verfügung. Zur Übertragung im Ka-Band ist jeder Satellit mit stark bündelnden, phasengesteuerten Gruppenantennen versehen.

Die Bodenstationen des TELEDESIC-Systems stellen die Verbindung zwischen den Mobilvermittlungsstellen und dem Satellitensubsystem her. Es steht hierfür an jedem Satellit und GLT eine Ka-Band Funkschnittstelle mit bis zu 1,24416 Gbit/s ( $OC - 24$ ) maximaler Datenrate zur Verfügung. Der Antennengewinn der Bodenstation ist vergleichbar mit der eines Endgerätes, die Sendeleistung kann zwischen 1 W und 49 W variiert werden.

Die Mobilvermittlungsstellen sowie das Netzbetriebs- und Kontrollzentrum übernehmen die Aufgabe der Funkbetriebsmittel-, Mobilitäts- und Verbindungsverwaltung. Entsprechende Vermittlungsschichtfunktionen und Datenbanken sind verteilt über das gesamte TELEDESIC-System implementiert [100].

### 2.3.2.3 TELEDESIC-Funkschnittstellen

Das TELEDESIC-System benutzt an der Teilnehmer- bzw. der Satellit-Bodenstations-Schnittstelle zwei unterschiedliche Protokollstapel zur Übertragung in jeweils versetzten Frequenzbändern für die Auf- und Abwärtsstrecke im Ka-Band (vgl. Abb. 2.17). Aufgrund der starken Bündelung der Sende- und Empfangsantennen können beide Frequenzbänder weltweit bis zu 20.000-fach wiederverwendet werden. Zur Verbindung der Satelliten untereinander wird eine Funkschnittstelle im Ku-Band benutzt (65–71 GHz). Wie auch beim IRIDIUM-System basieren alle drei Funkschnittstellen des TELEDESIC-Systems auf proprietären Protokollen, hier zur Übertragung von ATM-Datenpaketen. Bei der Beantragung der FCC Lizenz, vgl. [28], sowie aus Veröffentlichungen im Internet, vgl. [100], sind nähere Details der Teilnehmer-Funkschnittstelle bekannt geworden. Die beiden 500 MHz Frequenzbänder der Auf- und Abwärtsstrecke liegen bei 28,6–29,1 GHz bzw. 18,8–19,3 GHz. Auf der Aufwärtsstrecke ist das Frequenzband in 1800 FDMA/SDMA Kanäle unterteilt, die jeweils einem oder mehreren Benutzern fest zugeteilt werden können. Die Datenübertragung geschieht auf Basis von ATM-Zellen [50]. In Abbildung 2.18 ist die entsprechende Kanal- und Paketstruktur (UNI – User to Network Interface) dargestellt. In jedem Datenkanal ist während der Funkausleuchtung einer Mikrozone die Übertragung einer ATM-Zelle möglich. Alle Mikrozellen in einer Makrozone werden der Reihe nach abgetastet. Die Abtastperiode aller neun Mikrozellen beträgt 23,111 ms. Auf der Abwärtsstrecke ist das gesamte Frequenzband in 1800 ATDMA<sup>15</sup>/SDMA-Kanäle unterteilt. Die einzelnen Kanäle sind nicht fest zugeteilt, sondern es werden nur so viele benutzt, wie ATM-Zellen in eine Mikrozone übertragen

<sup>15</sup>Advanced TDMA wobei paketorientiert übertragen wird

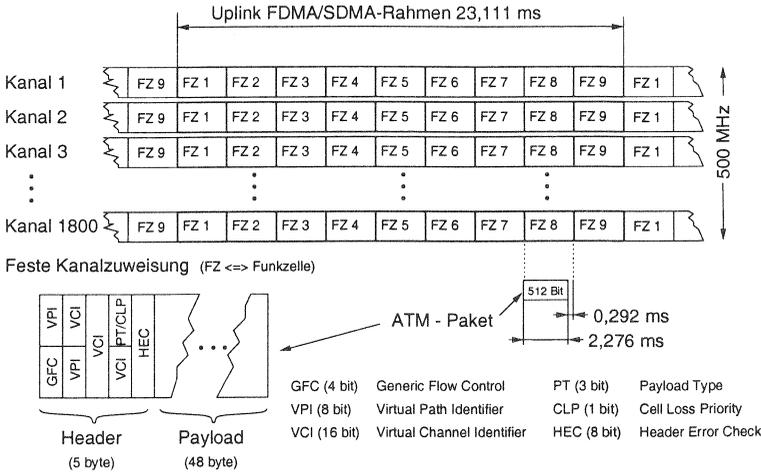


Abbildung 2.18: Schematische FDMA/SDMA Struktur der TELEDESIC-Aufwärtsstrecke

werden müssen. Jeder Teilnehmer identifiziert selbst anhand des ATM-Paketkopfes, ob eine Zelle für ihn bestimmt ist oder nicht. Die SDMA-Periode beträgt wie zuvor 23,111 ms, wobei die Verweilzeit pro Zelle 2,276 ms mit einer Schutzzeit von 0,292 ms ist. In Abbildung 2.19 ist die Kanalstruktur der Abwärtsstrecke dargestellt. Als Standardkanal wird basierend auf den 424 bit jeder ATM-Zelle

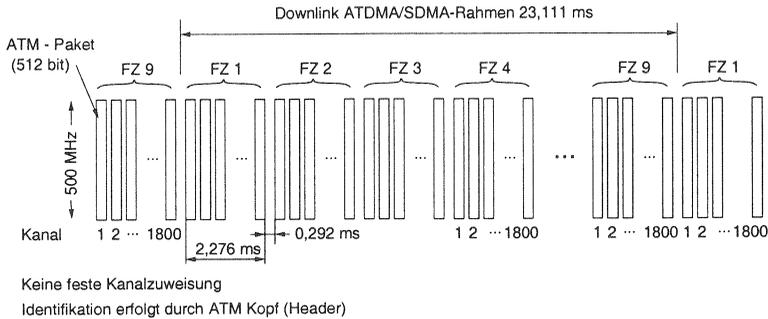


Abbildung 2.19: ATDMA/SDMA Struktur der TELEDESIC-Abwärtsstrecke

ein 16 kbit/s Datenkanal mit einem 2 kbit/s zugeordneten Signalisierungskanal abgebildet. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Redundanz zur Fehlererkennung und -korrektur resultiert eine Paketgröße von 512 bit pro Burst. Diese dem ISDN ähnliche B+D Kanalstruktur ist gewählt worden, um Kompatibilität zu ISDN Systemen zu ermöglichen.

Eine genaue Behandlung der Mobilfunkkanäle und ihrer typischen Übertragungsfehlerwahrscheinlichkeit folgt im nächsten Kapitel.



## Modellierung von Mobilfunkkanälen

### 3.1 Einleitung

Beim Übergang von drahtgebundener ortsfester zu drahtloser mobiler Kommunikation wird die feste Verbindung zwischen Vermittlungsstelle und Endgerät durch eine Funkschnittstelle ersetzt.

Die anfängliche Nutzung von rein analogen Signalen zur Übertragung von Sprache ist inzwischen durch digitale Signale abgelöst worden, wie z. B. beim GSM. Zur Charakterisierung der Anforderungen an Signalqualität und -verfügbarkeit bei digitaler Übertragung ist eine genaue Beschreibung der physikalischen Effekte sowie der statistischen Eigenschaften der Funkübertragungsstrecken erforderlich.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Funkausbreitung sowie spezielle Aspekte von Mobilfunkkanälen der hier betrachteten Mobilfunksysteme beschrieben. Modelle für die einzelnen Funkkanäle, wie sie im später beschriebenen Simulationswerkzeug (Kapitel 6), benutzt worden sind, werden vorgestellt.

### 3.2 Physikalische Eigenschaften der Funkausbreitung

#### 3.2.1 Signaldämpfung und -streuung

Zunächst sollen die Leistungsverluste bestimmt werden, die aus der Ausbreitung des abgestrahlten Signals inner- und außerhalb der Erdatmosphäre resultieren.

##### 3.2.1.1 Freiraumdämpfung

Für eine Anordnung aus Sender und Empfänger, die sich im freien Raum im Abstand  $d$  voneinander ortsfest befinden, beträgt die effektive vom Sender abgestrahlte Signalleistung (EIRP – Equivalent Isotropic Radiated Power)

$$EIRP = P_S \cdot G_S, \quad (3.1)$$

wobei  $P_S$  die zugeführte Sendeleistung und  $G_S$  der Antennengewinn der Sendeanenne sind. Die empfangene Leistung  $P_E$  ergibt sich unter Annahme geradliniger Ausbreitung über eine Sichtlinie zu

$$P_E = (EIRP) \cdot G_E \cdot \underbrace{\left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2}_{L_0} \quad (3.2)$$

mit dem Antennengewinn der Empfangsantenne  $G_E$  und der Wellenlänge des Sendesignals  $\lambda$ . Der als  $L_0$  gekennzeichnete Faktor wird als Freiraumdämpfung bezeichnet. Neben Kopplungs- und Antennenausrichtungsverlusten, auf die hier nicht näher eingegangen wird, beeinflussen bei hochfrequenten Signalen zusätzlich atmosphärische Dämpfungseffekte die Übertragung.

### 3.2.1.2 Verbindungsbilanz

Zur Berechnung der Verbindungsbilanz zwischen Sender und Empfänger werden Verhältnisse von Träger- zur Rauschleistung benutzt, da sie eine höhere Aussagekraft besitzen als die reine Empfangsleistung. Außerdem sind diese Verhältnisse wichtig, um das Bitfehlerverhältnis für den Kanal zu ermitteln. Für das Träger (C) zu Rauschleistungs (N)-Verhältnis gilt:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_S G_S G_E}{k T B} \cdot L_0 \quad (3.3)$$

mit der Boltzmannkonstante  $k$ , der Rauschtemperatur  $T$  und der Empfängerbandbreite  $B$ . Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen in der Verbindungsbilanz werden die Werte üblicherweise in dB ausgedrückt:

$$\frac{C}{N} [dB] = EIRP - 10 \log(L_0) + 10 \log(G_E) - 10 \log(T) - 10 \log(k) - 10 \log(B). \quad (3.4)$$

Geht man bei digitaler Übertragung von Energie des gesendeten Bits ( $E_b$ ) aus, so ergibt sich das  $E_b/N_0$  bei einem M-PSK modulierten Signal zu:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} - \log(\log_2(M)). \quad (3.5)$$

Die Rauschleistungsdichte  $N_0$  kann physikalisch durch die Brownsche Molekularbewegung erklärt werden. Sie wird im allgemeinen durch die Aufsummierung aller einflussnehmenden Elementarrauschquellen beschrieben.

### 3.2.1.3 Troposphärische Streuung und ionosphärische Reflexion

Durch troposphärischer Streuung wird direkt einfallende Strahlung an Inhomogenitäten der Troposphäre reflektiert, wodurch bei einem erhöhten Anteil von Streuung in Vorwärtsrichtung typisch bei (100–1000 MHz) Überreichweiten bis zu 500 km entstehen können, vgl. [101]. Solche Überreichweiten sind in der Regel nicht erwünscht, da sie entfernte Funkverbindungen auf der gleichen Frequenz stören können<sup>1</sup>. Die Ionosphäre (vgl. Abbildung 2.8) besteht aus durch Sonnenstrahlen ionisierten Partikeln inklusive freier Elektronenwolken. Die durchdringende elektromagnetische Strahlung wird frequenzabhängig durch eine Vielzahl von Effekten beeinflusst, die die Signalamplitude, -polarisation, -frequenz und -verzögerung verändern. Für die Frequenzbänder satellitengestützter Kommunikation ist hauptsächlich die Drehung der Polarisationssebene sowie der Signalschwund durch Szintillation störend, vgl. [106].

### 3.2.1.4 Absorption in der Troposphäre

Signalschwund in der Troposphäre tritt durch Energieabsorption durch atmosphärische Gase und durch Dämpfung aufgrund von Regen und Nebel auf. In Abbildung 3.1 ist der spezifische Signalschwund für beide Effekte separat als Funktion der Übertragungsfrequenz dargestellt. Für den Frequenzbereich bis 100 GHz sind für die Energieabsorption zwei lokale Maxima vorhanden. Sie liegen bei 22,3 GHz und 60 GHz

<sup>1</sup>Erste transatlantische Funkexperimente mit Reflexion an der Ionosphäre wurden zwischen St. John's Newfoundland und Cornwall England am 12. Dezember 1901 von Marconi durchgeführt.

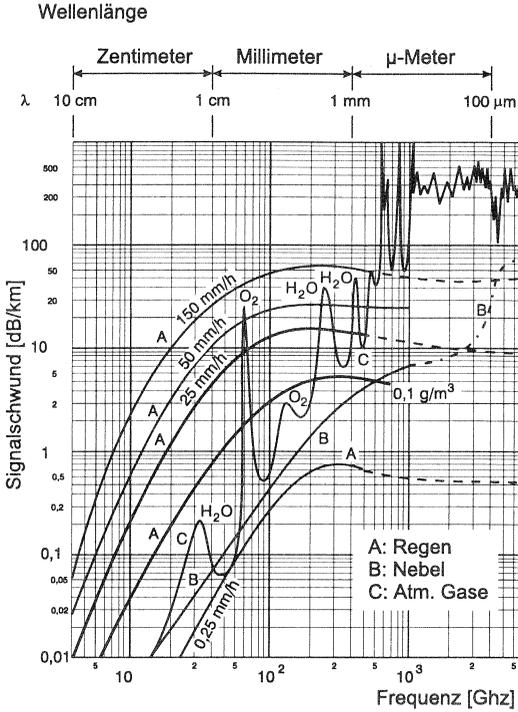


Abbildung 3.1: Frequenzspezifischer Signalschwund nach CCIR-Report 719, 721

(vgl. Abb. 3.1) und sind auf Resonanzerscheinungen von Wasserdampf ( $H_2O$ ) bzw. Sauerstoff ( $O_2$ ) zurückzuführen. Für einen großen Bereich des Frequenzspektrums ist der Schwund aufgrund von Energieabsorption jedoch wesentlich geringer als der witterungsbedingte Schwund durch Nebel und Regen. Dabei entsprechen die in Abbildung 3.1 eingezeichneten Dämpfungsverläufe von 25 mm/h bzw. 50 mm/h denen von mittelstarkem und starkem Regen. Eine Regenrate von 150 mm/h ist nur in tropischen Gebieten, etwa beim Monsun-Regen im tropischen Regenwald, zu erwarten. Eine genaue Betrachtung der Regenhäufigkeit sowie der Übergänge zwischen einzelnen Regenraten und den damit verbundenen Auswirkungen auf die satelliten-gestützte Kommunikation folgt in Abschnitt 3.6.1.1.

### 3.2.2 Wellenausbreitung um Hindernisse

Wird eine Funkübertragungsstrecke in Bodennähe betrieben, oder befinden sich Hindernisse in unmittelbarer Umgebung oder sogar direkt zwischen Sender und Empfänger, so ist mit einer Dämpfung der Wellenausbreitung und verminderter Übertragungsqualität des Funksignals zu rechnen. Nachfolgend soll auf die Beugung und Mehrwegeausbreitung sowie auf die Abschattung von Funkwellen gesondert eingegangen werden.

### 3.2.2.1 Beugung

Nach dem von Huygensischen Prinzip werden gerade Wellenfronten, die auf Hindernisse wie zum Beispiel eine Mauer, Straßenecke oder Anhöhe treffen, um das Hindernis herum gebeugt, so daß rein geometrisch scheinbar unerreichbare Gebiete eine Funkversorgung erfahren (vgl. Abbildung 3.2). Der Beugungsschwund, den eine Welle bei der Beugung um eine Kante erfährt, ist abhängig vom Winkel zur Original-einfallrichtung der Wellenfront und der Wellenlänge des Signals. Als Kennwert der Beugung gilt der Fresnel-Kirchhof Beugungsparameter  $\nu$  mit

$$\nu = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}, \quad (3.6)$$

der sich als Funktion der Abstände  $d_1$  des Senders und  $d_2$  des Empfängers zur Beugungskante sowie dem Betrachtungswinkel  $\alpha$  zur Ausbreitungsrichtung der Wellenfront darstellen läßt, vgl. [81]. Da die Beugungsdämpfung proportional zu  $\nu$  steigt, zeigt Gl. 3.6, daß bei steigender Frequenz die Beugungsdämpfung bei festem Winkel  $\alpha$  zunimmt. Aufgrund komplexer Einflüsse der genauen Geometrie und Materialbeschaffenheit von Beugungskanten ist eine Bestimmung der Dämpfung nur näherungsweise möglich. In [81] wird eine Übersicht über die unterschiedlichen Verfahren und Szenarien gegeben.

### 3.2.2.2 Mehrwegeausbreitung

Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen unmittelbar über der Erdoberfläche oder in der Nähe von Hindernissen existieren, bedingt durch Reflexionen der Ursprungswelle, mehrere Übertragungspfade zwischen Sender und Empfänger (Abb. 3.2). Als Funktion der relativen Phasendifferenz der einzelnen Teilwellen

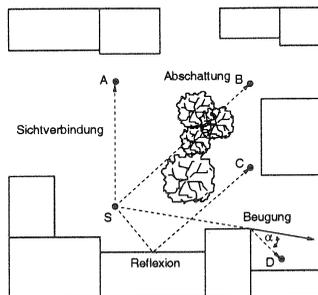


Abbildung 3.2: Ausbreitungsphänomene

kommt es beim mobilen Empfänger zu einer für seinen momentanen Aufenthaltsort charakteristischen, konstruktiven oder destruktiven Überlagerung zu einem Gesamtempfangssignal. Die durch unterschiedlich lange Pfade hervorgerufene Verteilung der Wellenlaufzeiten (DS – Delay Spread) führt dabei zusätzlich zu einer Verlängerung der Kanalstoßantwort, welche bei der Dimensionierung von empfangsseitigen Kanalentzerrern (Equalizer) berücksichtigt werden muß. Da durch eine Veränderung des Empfängerstandortes sowie der ihn umgebenden Reflektionspunkte sich auch die

jeweilige Überlagerung zum Gesamtsignal verändert, kommt es zu einem ortsspezifischen Verlauf des Empfangspegels, der auch Kurzzeitschwund (Short Term Fading) oder Mehrwegeschwund genannt wird. Für eine statistische Beschreibung der Amplitude  $S$  der Einhüllenden des Empfangssignals muß zwischen den folgenden zwei Fällen unterschieden werden:

1. Zwischen Sender und Empfänger besteht eine direkte Sichtverbindung – das Empfangssignal besteht aus einer Überlagerung der direkten und der reflektierten Wellen. Die Amplitude  $S$  der Einhüllenden des Empfangssignals ist hierbei Rice-verteilt, weshalb ein Kanal in diesem Zustand auch als Rice-Kanal bezeichnet wird. Die entsprechende Dichtefunktion  $p(S)$  ergibt sich zu

$$p_{Ri}(S) = 2 \cdot S \cdot \sqrt{1+K} \cdot e^{-K-(1+K) \cdot S^2} \cdot I_0 \cdot \left( 2S\sqrt{K(K+1)} \right) \quad (3.7)$$

mit  $I_0$  Besselfunktion 1. Art und 0. Ordnung sowie dem Rice-Faktor

$$K = A^2/2\psi_{Ri}^2, \quad (3.8)$$

der das Verhältnis von direkt empfangener Leistung  $A^2$  zur Streuleistung  $\psi_{Ri}^2$  beschreibt. Der Mittelwert  $m_{Ri}$  und die Varianz  $\sigma_{Ri}^2$  berechnen sich zu

$$m_{Ri} = E\{S\} = \bar{A} + \sqrt{\frac{\pi}{2}\psi_{Ri}^2} \quad \text{und} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{Ri}^2 = E\{S^2\} - m_{Ri}^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\psi_{Ri}^2. \quad (3.10)$$

2. Zwischen Sender und Empfänger besteht keine direkte Sichtverbindung – das Empfangssignal besteht aus einer reinen Überlagerung von reflektierten und gebeugten Wellen. In diesem Fall ist die Amplitude  $S$  des resultierenden Empfangssignals Rayleigh-verteilt. Die entsprechende Dichtefunktion  $p(S)$  ergibt sich zu

$$p_{Ra}(S) = \frac{S}{\psi_{Ra}^2} \cdot e^{-\frac{S^2}{2\psi_{Ra}^2}}. \quad (3.11)$$

Der Mittelwert  $m_{Ra}$  und die Varianz  $\sigma_{Ra}^2$  berechnen sich für die Rayleigh-Verteilung zu

$$m_{Ra} = E\{S\} = \sqrt{\frac{\pi}{2}\psi_{Ra}^2} \quad \text{und} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{Ra}^2 = E\{S^2\} - m_{Ra}^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\psi_{Ra}^2. \quad (3.13)$$

Die Rice-Verteilung nach Gl. 3.7 geht für  $K \rightarrow 0$  in die Rayleigh-Verteilung (direkter Signalanteil  $A = 0$ ) und für  $K \rightarrow \infty$  in die Gauß-Verteilung über (gestreuter Signalanteil  $\psi_{Ri} = 0$ ).

### 3.2.2.3 Abschattung

Hindernisse innerhalb des Pfades der Funkübertragungsstrecke, wie z. B. Bäume und Berge in ländlicher oder Gebäude in städtischer Umgebung, verhindern die direkte Wellenausbreitung zwischen Sender und Empfänger. Infolge zusätzlicher Bewegung der mobilen Empfangsstationen kommt es zu Schwankungen des Abschattungsgrades

und damit der lokalen Mittelwerte der Empfangsleistung. Diese Änderungen vollziehen sich langsamer als das Rayleigh-Fading und werden deshalb Langzeitschwund (Long Term Fading) oder Abschattungsschwund genannt. Die mittlere Empfangsleistung  $S_0$  läßt sich statistisch durch eine Log-Normalverteilung beschreiben. Für die entsprechende Dichtefunktion  $p(S_0)$  ergibt sich

$$p_{LN}(S_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\psi_{LN}S_0} \cdot e^{-\frac{(\ln S_0 - \mu)^2}{2\psi_{LN}^2}} \quad (3.14)$$

mit dem lokalen Mittelwert der direkten Komponente  $S_0$  und der Standardabweichung  $\sigma$  sowie dem Mittelwert  $\mu$  der zugehörigen Gaußverteilung. Der Mittelwert  $m_{LN}$  und die Varianz  $\sigma_{LN}^2$  berechnen sich für die *Log-Normal*verteilung zu

$$m_{LN} = E\{S_0\} = e^{(\mu + \frac{\psi_{LN}^2}{2})} \quad \text{und} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{LN}^2 = E\{S_0^2\} - m_{LN}^2 = e^{(2\mu + 2\psi_{LN}^2)} - e^{(2\mu + \psi_{LN}^2)}. \quad (3.16)$$

### 3.2.3 Gleich- und Nachbarkanalstörungen

Bedingt durch das zellulare Prinzip der Frequenzwiederverwendung nach einem gewissen Abstand  $D$  sowie nichtidealer Sende- und Empfangsfilter in den Funkstationen kommt es bei Mobilfunksystemen zu Kanalstörungen durch andere Kommunikationsteilnehmer. Die Störungen werden hierbei in der Regel nach der Quelle ihrer Herkunft in Gleich- bzw. Nachbarkanalstörungen untergliedert. Beide Arten ergeben sich aus der Frequenz- und Zellplanung eines Kommunikationsnetzes und werden durch zusätzliche Ausbreitungsphänomene wie vorhandene Überreichweiten, Reflexion und Beugung verstärkt. Bei interferenzbegrenzten Systemen (limitiertes Spektrum, GSM) führen sie zu stärkeren Störungen als zum Beispiel das vorhandene Hintergrundrauschen.

Als Gütemaß wird für Mobilfunksysteme das empfangsseitige Signal-zu-Interferenzverhältnis  $C/I$  (Carrier to Interference Ratio) definiert, welches eine Aussage über das Leistungsverhältnis von Nutz- und Interferenzsignal macht. Um ein gewünschtes Maß an Dienstgüte zu erreichen, muß aufgrund der Proportionalität von Dienstgüte und  $C/I$  ein Mobilfunknetzbetreiber einen gewissen Mindestwert  $C/I_{MIN}$  in einem gewissen Prozentsatz der Verbindungszeit garantieren. Dieses kann durch eine entsprechende Zell- und Frequenzplanung sowie durch geeignete Verfahren zur Leistungssteuerung der einzelnen Funkstationen des Systems erreicht werden.

## 3.3 Einfache Kanalmodelle

### 3.3.1 Rice-Kanal

In einem Kanal, dessen statistische Signalamplitude durch eine Rice-Verteilungsfunktion beschrieben wird, vgl. Abschnitt 3.2.2.2, lautet die obere Grenze für das Symbolfehlerverhältnis bei MPSK-Signalen nach [60]:

$$p_b = 1 - \left( 1 - \frac{e^{-\frac{E_b/N_0}{2 + \frac{1}{K} E_b/N_0}}}{2 + 2\frac{1}{K}} \right)^3 \quad (3.17)$$

### 3.3.2 Rayleigh-Kanal

In einem Rayleigh-Kanal, vgl. Abschnitt 3.2.2.2, ist die mittlere Bitfehlerwahrscheinlichkeit für BPSK und QPSK geschlossen beschreibbar [82]:

$$p_b[BPSK] = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_b/N_o}{1 + E_b/N_o}} \right) \quad \text{und} \quad (3.18)$$

$$p_b[QPSK] = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_b/N_o}{2 + E_b/N_o}} \right). \quad (3.19)$$

### 3.3.3 AWGN-Kanal

Der AWGN – Kanal (Additive White Gaussian Noise) ist dadurch gekennzeichnet, daß das Nutzsignal nur auf direktem Wege am Empfänger ankommt und dabei durch additives Gaußsches Rauschen gestört wird. Der Gauß-Kanal ist durch die folgenden Eigenschaften definiert, vgl. [68]:

- Idealer Tiefpaß der Grenzfrequenz  $f_g = f_B$  oder idealer Bandpaß der Bandbreite  $f_\Delta = f_B$ ,
- additive Störung durch weißes, gaußsches Rauschen der Leistungsdichte  $N_0$  am Kanaleingang und damit der Leistung  $N = 2f_B N_0$  am Kanalausgang und
- begrenzte Signalleistung  $S$  am Kanalausgang.

Ein MPSK-moduliertes Signal läßt sich allgemein darstellen als:

$$s(t) = A \cos \left( \omega_c t + \frac{2\pi}{M} (m-1) \right) \quad \text{mit} \quad (m-1)T_s \leq t \leq mT_s, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.20)$$

Ein empfangenes MPSK-Signal  $r$  mit  $m = 0$  hat unter mittelwertfreiem AWGN-Rauschen ( $E(n_Q) = E(n_I) = 0$ ) und  $\sigma_n = \frac{1}{2}N_0$  folgende Inphase- und Quadraturkomponenten:

$$\begin{aligned} r_I &= \sqrt{E_s/N_0} + n_I \quad \text{und} \\ r_Q &= n_Q. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Die Verteilungsdichtefunktion ergibt sich zu:

$$p_r(r_Q, r_I) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} e^{-\left( \frac{(r_I - \sqrt{E_s/N_0})^2 + r_Q^2}{2\sigma_n^2} \right)}. \quad (3.22)$$

Diese Gleichung muß nun in Kreiskoordinaten  $V, \theta$  umgerechnet werden. Die Symbolfehlerrate läßt sich über die Wahrscheinlichkeit berechnen, daß das Signal im QPSK-Phasendiagramm außerhalb des Winkelbereichs der richtigen Entscheidung liegt:

$$p_b = 1 - \int_{-\frac{\pi}{M}}^{\frac{\pi}{M}} p_r(\theta_r) d\theta_r. \quad (3.23)$$

Bezeichnet  $Q(x)$  die Q-Funktion

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right), \quad (3.24)$$

so ergibt sich die Bitfehlerwahrscheinlichkeit für BPSK und QPSK zu:

$$P_{AWGN} = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (3.25)$$

In Abbildung 3.3 ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Signalstörabstandes  $E_b/N_0$  bei QPSK-modulierten Signalen für den Gauß-, Rayleigh- und Rice-Kanal nach Gl. 3.17, 3.18 und 3.25 für verschiedene Werte von  $K$  aufgetragen. Für die Fälle  $K = 20$  dB und  $K = 0$  dB ist die Qualität der Rice-Kanalnäherung zu

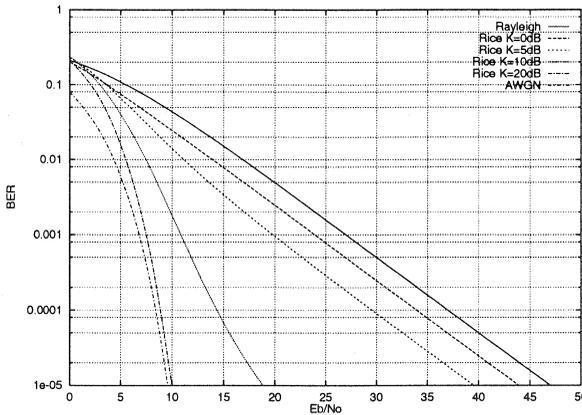


Abbildung 3.3: BER für ein QPSK-Signal (AWGN-, Rice- und Rayleigh-Kanal)

erkennen, da die entsprechenden Kurvenverläufe bereits weitgehend den Kurvenverläufen des Gauß- bzw. dem Rayleigh-Kanal entsprechen (vgl. Abschnitt 3.2.2).

### 3.3.4 Gleichkanal-gestörter Kanal

Wird ein Frequenzband mit mehr als einem Funksignal belegt, so kommt es in Abhängigkeit von den Amplituden der einzelnen Signale zu Störungen beim Empfang der Signale. Es liegt ein Gleichkanal-gestörter Funkkanal vor, wobei die Störungen „Interferenzen“ genannt werden.

Neben bewußt in Kauf genommenen Interferenzen in Mobilfunksystemen die durch Wiederverwendung des Spektrums innerhalb eines bestimmten geometrischen Frequenzwiederholabstandes  $R_F$  entstehen, führen auch Störungen von Funksystemen in benachbarten Frequenzbändern zu Interferenzen im zugewiesenen Spektrum [87].

Interferenzen können als eine Art Rauschen betrachtet werden, deren Größe wie beim Rauschen durch das Verhältnis von Signalleistung zu Störleistung, in diesem Falle durch die Leistung des gewünschten Trägers ( $C$ ) zu dem des Störträgers ( $I$ ),  $C/I$  angegeben wird, vgl. [87]. In Abhängigkeit von der effektiven abgestrahlten Sendeleistung des Trägers ( $EIRP$ ) $_T$  und Störträgers ( $EIRP$ ) $_S$ , der Pfaddämpfung zur Empfangsstation ( $a_{Aus,T}$ ,  $a_{Aus,S}$ ), des Antennengewinns der Empfangsstation in Richtung des Trägers ( $G_T$ ) und Störträgers ( $G_S$ ) sowie der Polarisationsdämpfung

zwischen Träger und Störträger ( $a_{Pd}$ ) wird C/I am Eingang des Empfängers wie folgt bestimmt:

$$\frac{(C/I)}{dB} = \frac{(EIRP)_T}{dBW} - \frac{(EIRP)_S}{dBW} - \frac{a_{Aus,T}}{dB} + \frac{a_{Aus,S}}{dB} + \frac{G_T}{dB} - \frac{G_S}{dB} + \frac{a_{Pd}}{dB}. \quad (3.26)$$

Für viele Mobilfunksysteme wird ein C/I von mehr als 11 dB, vgl. [87], als akzeptabel angesehen.

### 3.4 GSM 900 MHz Mobilfunkkanal

Um die Übertragung von Signalisier- und Nutzdaten im GSM geeignet nachzubilden und die Übertragungsgüte bewerten zu können, müssen die Störeinflüsse auf dem GSM-Funkkanal modelliert und untersucht werden. Neben einer von der Bebauung und der Distanz abhängigen Dämpfung sind dabei auch der Kurzzeitschwund und die Interferenz aufgrund von Gleichkanalstörungen zu berücksichtigen. Beide Faktoren beeinflussen die Übertragung auf dem Funkkanal und können in guter Näherung durch normalverteilte unabhängige Zufallsprozesse modelliert werden (vgl. [58]).

#### 3.4.1 Okumura-Hata Modell

Die heute unter dem Namen „Okumura-Hata“ bekannten analytischen Beschreibungen für den Pfadverlust in unterschiedlichen Geländetypen gehen auf Feldmessungen von Okumura in den 60iger Jahren im Ballungsraum von Tokio zurück. Die damals gewonnenen Ergebnisse wurden in Form von Regressionskurven in Abhängigkeit von verschiedenen Kenngrößen wie z. B. der Höhe von Sende- und Empfangsantennen und ihrem Abstand voneinander festgehalten, vgl. [58].

Hata veröffentlichte 1980 einen Satz analytischer Näherungsgleichungen [44], die seitdem als gute Abschätzung für die Funkfelddämpfung gelten, und vielfach angepaßt auch für nicht in den Originalmessungen berücksichtigte Frequenzen und Geländetypen verwandt werden.

Hatas Modell gilt für eine Frequenz  $f$  von 150–1500 MHz, einen Abstand  $d$  zur Basisstation von 1–20 km, einer (effektiven) Antennenhöhe der Basisstation  $h_b$  von 30–200 m und einer (effektiven) Antennenhöhe der Mobilstation  $h_m$  von 1–10 m. Der Pfadverlußt  $L_{urban}$  in städtischer Umgebung berechnet sich innerhalb dieser Grenzen zu

$$\begin{aligned} L_{urban}[dB] = & 69,55 + 26,16 \cdot \log \frac{f}{[MHz]} - 13,82 \cdot \log \frac{h_b}{[m]} \\ & - a(h_m) + \left( 44,9 - 6,55 \cdot \log \frac{h_b}{[m]} \right) \cdot \log \frac{d}{[m]}, \end{aligned} \quad (3.27)$$

wobei  $a(h_m)$  ein Korrekturterm ist, der in kleinen und mittelgroßen Städten

$$a(h_m) = (1,1 \cdot \log \frac{f}{[MHz]} - 0,7) \cdot \frac{h_m}{[m]} - (1,56 \cdot \log \frac{f}{[MHz]} - 0,8) \quad (3.28)$$

beträgt. In Großstädten gilt:

$$a(h_m) = \begin{cases} 8,29 \cdot \left[ \log \left( 1,54 \cdot \frac{h_m}{[m]} \right) \right]^2 & : f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2 \cdot \left[ \log \left( 11,74 \cdot \frac{h_m}{[m]} \right) \right]^2 & : f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (3.29)$$

Für vorstädtische Gebiete (suburban) mit weniger dichter Bebauung ist ein weiterer Korrekturterm erforderlich, so daß sich für den Pfadverlust  $L_{suburban}$  ergibt

$$L_{suburban}[dB] = L_{urban} - 2 \cdot \left[ \log \frac{1}{28} \frac{f}{[MHz]} \right]^2 - 5,4. \quad (3.30)$$

Für ländliche Umgebungen (rural/open) mit nur wenig Bebauung ergibt sich für den Pfadverlust  $L_{open}$  analog

$$L_{open}[dB] = L_{urban} - 4,78 \cdot \left[ \log \frac{f}{[MHz]} \right]^2 + 18,33 \cdot \log \frac{f}{[MHz]} - 40,94. \quad (3.31)$$

### 3.4.2 GSM-Kanalmusterdateien

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Modellierung des GSM-Empfängers und der Paketfehlerhäufigkeit, die sich aus einem gestörten Bitstrom ergibt, Kanalmusterdateien eingesetzt. Diese von der ETSI zum Zwecke der Standardisierung veröffentlichten Messungen des GSM-Funkkanals sind sowohl für RLP<sup>2</sup>-Rahmen als auch für GSM-Normalbursts für unterschiedliche feste C/I Werte verfügbar. Für die RLP-

C/I	3 dB	5 dB	7 dB	9 dB	11 dB
Paketfehlerwahrscheinlichkeit ohne „Fire“-Code					
$E\{P_o\}$	0,5716	0,2204	0,0483	0,0065	0,0005
Korrigierbar durch „Fire“-Code					
$E\{P_f\}$	0,1412	0,0991	0,0288	0,0051	0,0005
Resultierende Paketfehlerwahrscheinlichkeit					
$E\{P_E\}$	0,4306	0,1213	0,0195	0,0014	0

Tabelle 3.1: Auswertung der Fehlermusterdateien

Fehlermuster, die im Rahmen dieser Arbeit zur Simulation der Übertragung von FACCH/F-Rahmen verwendet wurden, stehen 14995 Datensätze à 240 bit (entspricht einer 5 min Messung) bei C/I Verhältnissen von 3, 5, 7, 9 und 11 dB sowie unter Einfluß einer typisch städtischen Bebauung bei 50 km/h (TU-50) zur Verfügung.

Die als Bitstrom der Physikalischen Schicht interpretierten RLP-Rahmen wurden mit Hilfe eines „Fire“-Codes zusätzlich kanalcodiert, wie beim FACCH/F zur Fehlersicherung üblich. Die Ergebnisse für die mittlere Fehlerhäufigkeit  $E\{P_E\}$  dieser Untersuchung sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Der Einfluß der größeren Interleaving-Tiefe von  $I=19$  beim RLP- gegenüber von  $I=8$  beim FACCH/F-Rahmen ist bei niedrigeren C/I Werten von 3 dB und 5 dB aufgrund der relativ hohen Bitfehlerhäufigkeit recht begrenzt und wurde deshalb innerhalb der Meßgenauigkeit der Ergebnisse vernachlässigt, vgl. auch [14].

## 3.5 IRIDIUM 1600 MHz-(L/S-Band)-Mobilfunkkanal

Zur Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Protokolle und Verfahren IRIDIUM-artiger Systeme ist es erforderlich, die Eigenschaften des Satellitenfunkkanals bei 1600 MHz (L/S-Band) zu modellieren. Mit dem DLR-Modell, welches hier

<sup>2</sup>Radio Link Protocol des GSM

vorgestellt werden soll, steht als Grundlage für die Untersuchungen ein einfaches, zugleich realitätsnahes Kanalmodell zur Verfügung.

### 3.5.1 DLR-Kanalmodell

Die Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat in den Jahren von 1984 bis 1987 mehrere Satelliten-Kanal Meßreihen mit dem geostationären Satelliten MARECS im L-Band bei 1,54 GHz aufgenommen. Dazu wurde ein landmobiler Empfänger eingesetzt, mit dessen Hilfe Messungen für unterschiedliche Elevationswinkel, Morphostruktorklassen und Antennen durchgeführt wurden. Aus den statistischen Auswertungen der Meßergebnisse konnte anschließend ein analoges Kanalmodell abgeleitet werden, vgl. [13, 57, 69, 70, 71, 72].

#### 3.5.1.1 Analoges Kanalmodell

Die Entwicklung des analogen Kanalmodells basiert auf der Nachbildung der Mehrwegeausbreitung und der Abschattung des realen Satellitenkanals. Dabei werden Zeitintervalle mit großer Empfangsleistung einem „guten“ Kanalzustand zugeordnet. In diesem Zustand befindet sich der Kanal mit guter Näherung dann, wenn zwischen Satellit und landmobilem Benutzer eine direkte Sichtverbindung besteht (Rice-Kanal). Entsprechend werden Zeitintervalle mit geringer Empfangsleistung durch einen „schlechten“ Kanalzustand beschrieben, der bei Abschattung des direkten Satellitensignals durch die Morphostruktur eintritt (Rayleigh-Kanal).

Abbildung 3.4 zeigt das analoge DLR-Kanalmodell. Zuerst wird das Sendesi-

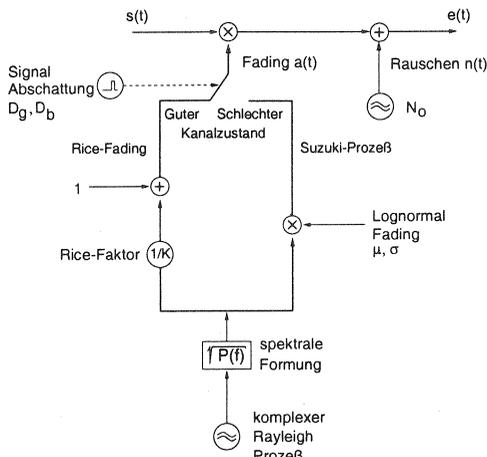


Abbildung 3.4: Das DLR-Kanalmodell

gnal  $s(t)$  mit dem Fadingprozeß  $a(t)$  multipliziert. Anschließend wird das AWGN-Rauschsignal  $n(t)$  der Rauschleistungsdichte  $N_0$  aufaddiert, es ergibt sich das Empfangssignal  $e(t)$ :

$$e(t) = s(t) \cdot a(t) + n(t) \tag{3.32}$$

Im DLR-Kanalmodell wird der Rice-Prozeß durch die Dämpfung des Rayleigh-Prozesses auf die Leistung  $1/\sqrt{K^2}$  und die Addition der Konstanten 1 (direktes Signal) beschrieben.

Im Falle der Abschattung des direkten Satellitensignals (schlechter Kanalzustand) wird für das Mehrwegesignal eine zusätzliche log-normale Dämpfung mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Varianz  $\sigma^2$  zugrundegelegt (Suzuki-Prozeß).

Die zufällige Abfolge von guten Kanalzuständen mit hoher Empfangsleistung und schlechten Kanalzuständen mit niedriger Empfangsleistung wird durch einen Schalter im Kanalmodell bewirkt, der von einem Markov-Zufallsprozeß gesteuert wird. Abbildung 3.5 zeigt das Zustandsdiagramm des Markov-Prozesses. Für eine

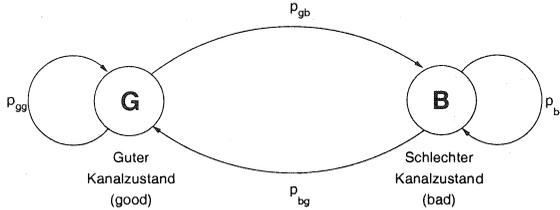


Abbildung 3.5: Zustandsdiagramm des Markov-Prozesses

gegebene Teilnehmer-Geschwindigkeit  $v$  [m/s] und eine Bitrate  $R$  [bit/s] können die Übergangswahrscheinlichkeiten  $p_{gb}$  und  $p_{bg}$  in Relation zur Dauer  $D$  in bit des guten bzw. schlechten Kanalzustands gesetzt werden; wenn die Dauer  $D$  der Wegstrecke in Meter bekannt ist:

$$D_g [\text{bit}] = \frac{1}{p_{gb}} = \frac{R}{v} D_g [\text{m}] \quad \text{und} \quad (3.33)$$

$$D_b [\text{bit}] = \frac{1}{p_{bg}} = \frac{R}{v} D_b [\text{m}]. \quad (3.34)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein guter bzw. schlechter Kanalzustand länger als  $n$  bit andauert, beträgt:

$$p_g(> n) = (1 - p_{gb})^n = p_{gg}^n \quad \text{und} \quad (3.35)$$

$$p_b(> n) = (1 - p_{bg})^n = p_{bb}^n. \quad (3.36)$$

Die Größen  $D_g$  und  $D_b$  kennzeichnen die mittleren Dauern der guten bzw. schlechten Kanalzustände. Sie stehen in direkter Beziehung zum Abschattungsfaktor  $B$ :

$$B = \frac{D_b}{D_b + D_g}. \quad (3.37)$$

Der prozentuale Anteil der Zeit ohne Abschattung  $(1 - B)$  nimmt mit steigenden Elevationswinkeln zu und ist für ländliche Umgebungen höher als für städtische.

Im „guten“ Kanalzustand (Rice-Kanal) ergibt sich für die Empfangssignalleistung  $S$  eine zentrale Chi-Quadrat-Verteilung

$$p_{gut}(S) = K e^{-K(S+1)} I_0(2K\sqrt{S}) \quad (3.38)$$

mit  $I_0$  Besselfunktion 1. Art, 0. Ordnung, und dem Rice-Faktor  $K$ , vgl. Gl. 3.7. Hohe Werte für  $K$  bedeuten geringes Fading durch Mehrwegeausbreitung und damit gutes Übertragungsverhalten.

Für den Fall der Abschattung wird angenommen, daß kein direkter Signalpfad vorhanden ist. Es tritt Fading durch Mehrwegeausbreitung auf, das eine Rayleigh-Charakteristik aufweist und die mittlere momentane Leistung  $S_0$  besitzt. Die Verteilungsdichtefunktion der empfangenen Leistung  $S$  bezogen auf die mittlere Leistung  $S_0$  lautet dann:

$$p_{\text{schlecht}}\left(\frac{S}{S_0}\right) = \frac{1}{S_0} e^{-\frac{S}{S_0}}. \quad (3.39)$$

Der langsame Signalschwund, der durch die wechselnden Abschattungsbedingungen der Umgebung des Teilnehmers hervorgerufen wird, bewirkt dabei Schwankungen der momentanen mittleren Leistung  $S_0$  mit der log-normalen Verteilungsdichtefunktion  $p_{LN}(S_0)$ .

Unter Berücksichtigung der Auftretens-Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände erhält man folgende Verteilungsdichtefunktion für die Empfangsleistung  $S$ , vgl. [84]:

$$p(S) = (1 - A) \cdot p_{\text{gut}} + A \cdot \int_0^{\infty} p_{\text{schlecht}}\left(\frac{S}{S_0}\right) p_{LN}(S_0) dS_0. \quad (3.40)$$

Die Abbildung 3.6 zeigt einen mit Hilfe des Modells berechneten Verlauf des Signalpegels in vorstädtischer Umgebung (Environment = suburban) für einen konstant gehaltenen Elevationswinkel von  $34^\circ$ . Zur Verdeutlichung der Pegleinbrüche wurde das ungestörte Signal hier zu Eins normiert (0 dB). Man erkennt deutlich das Durchlaufen der guten und schlechten Kanalzustände sowie den stark oszillierenden Pegelverlauf im schlechten Zustand aufgrund von Schwund durch Mehrwegeausbreitung. Die aktuelle Bitfehlerwahrscheinlichkeit  $p_B$  (BER – Bit Error Ratio) hängt ab

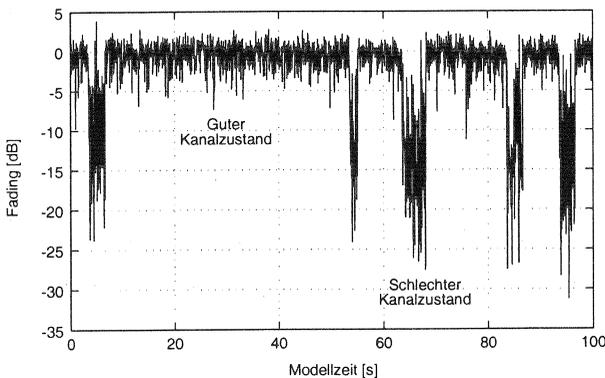


Abbildung 3.6: Fading (Environment=suburban, Elevation= $34^\circ$ )

von der momentanen Empfangsleistung  $S$ , vom Signalstörabstand des Empfangssignals ohne Schwund  $E_{\text{Link}}/N_0$  und von der benutzten Modulation [72]. Für DPSK

ergibt sich beispielsweise folgende Bitfehlerwahrscheinlichkeit:

$$p_B(S) = \frac{1}{2} e^{-S E_{L,ink}/N_0} \tag{3.41}$$

$$p_B = \int_0^\infty p_B(S) p(S) dS \tag{3.42}$$

### 3.5.1.2 Parametrisierung durch Meßwerte

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Parameter  $A$ ,  $K$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $D_g$  und  $D_b$  basieren auf den veröffentlichten Ergebnissen älterer als auch neuerer DLR-Meßkampagnen, vgl. [13] und [72]. Die Abbildungen 3.7 bis 3.10 zeigen die verwendeten Parameter  $D_g$ ,  $D_b$ ,  $K$ ,  $\mu$  und  $\sigma$  für ein typisches städtisches Gebiet in Abhängigkeit vom Elevationswinkel.

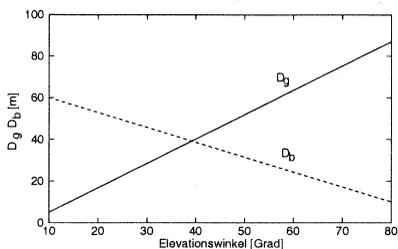


Abbildung 3.7: Parameter  $D_g, D_b$

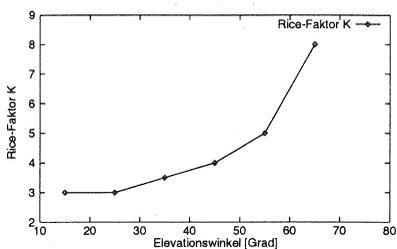


Abbildung 3.8: Rice-Faktor  $K$

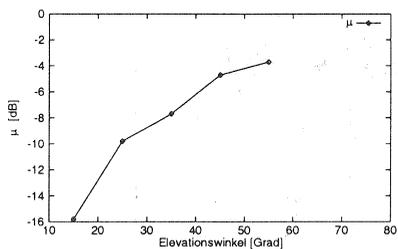


Abbildung 3.9: Parameter  $\mu$

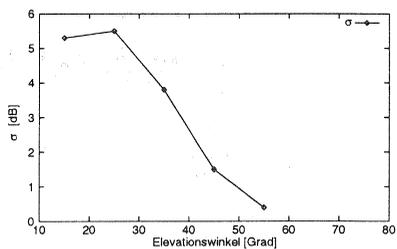


Abbildung 3.10: Parameter  $\sigma$

### 3.5.1.3 Paketfehlerwahrscheinlichkeit

Da über die Funkschnittstelle eines Mobilfunksystems die zu übertragenden Informationen nicht einzeln, Bit für Bit, sondern in Paketen (burst) zusammengefaßt übertragen werden, ist neben der Bitfehlerwahrscheinlichkeit auch die resultierende Paketfehlerwahrscheinlichkeit von Interesse.

Allgemein läßt sich die Paketfehlerwahrscheinlichkeit wie folgt formulieren:

$$P(m,n) = \sum_{(Z)} P(m,n|Z). \quad (3.43)$$

Sie gibt die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen von  $m$  Fehlerbits in einem Paket der Länge  $n$  an. Dabei steht  $Z$  für den jeweiligen Zustand (gut oder schlecht) und  $P_Z$  für seine Wahrscheinlichkeit. Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(m,n|Z)$  wird, ausgehend vom ersten Bit, rekursiv berechnet. Die Paketfehler-Wahrscheinlichkeitsdichte der aufgezählten Meßwerte kann direkt durch ein Fenster der Paketlänge  $n$  bestimmt werden, das über die Meßsequenz läuft und die Auftretswahrscheinlichkeit für  $m$  Fehler innerhalb des Fensters berechnet. Der Mittelwert über alle Fensterergebnisse ergibt eine sehr gute Näherung der Wahrscheinlichkeit  $P(m,n)$ .

Die Paketfehlerwahrscheinlichkeit beträgt dann:

$$P_F = \sum_{m=1}^n P(m,n). \quad (3.44)$$

Wird ein Blockcode zusätzlich zur Fehlersicherung verwendet, mit dem ein Empfänger bis zu  $t$  Fehler korrigieren kann, so lautet die Paketfehlerwahrscheinlichkeit:

$$P_F = \sum_{m=t+1}^n P(m,n). \quad (3.45)$$

## 3.6 TELEDESIC 20/30 GHz-(Ka-Band)-Mobilfunkkanal

Zur Analyse und Bewertung der Systemkapazität und Dienstgüte satellitengestützter breitbandiger Kommunikationsnetze, z. B. TELEDESIC, sind genaue Kenntnisse über den Funkkanal und seinen Einfluß von grundlegender Bedeutung. Bei Frequenzen ab 10 GHz gewinnt die frequenzabhängige atmosphärische Zusatzdämpfung an Bedeutung. Durch genaue Betrachtung des Einflusses von Regen auf die Signalübertragung im Ka-Band soll in diesem Kapitel gezeigt werden, mit welcher Verfügbarkeit und Güte eine Funkschnittstelle in diesem Frequenzbereich für die mobile satellitengestützte Kommunikation betrieben werden kann.

### 3.6.1 Atmosphärische Dämpfung

Neben der Freiraumdämpfung führen ab 10 GHz mit steigendem Maße gerade atmosphärische Störungen durch Gase und Hydrometeore (Nebel/Regen) zu einer signifikanten Dämpfung des Sendesignals (vgl. Abschnitt 3.2). Da speziell Regen den weitaus größten Einfluß auf die Verfügbarkeit und Güte des TELEDESIC- Systems im 20–30 GHz Frequenzband hat, soll die zu erwartende Dämpfung und die Auftretswahrscheinlichkeit von Regen bestimmt werden.

#### 3.6.1.1 Dämpfung durch Regen

Allgemein kann nach der ITU-R Empfehlung P 563-2, vgl. [48, 95], die Dämpfung  $A_{\text{Regen}}$  als Funktion der Regenrate  $R$  und der Weglänge  $L$  durch den Regen wie folgt dargestellt werden:

$$A_{\text{Regen}} = a(f) \cdot R^{b(f)} \cdot L \text{ [dB]}. \quad (3.46)$$

Dabei sind die Faktoren  $a(f)$  und  $b(f)$  frequenz- und polarisationsabhängige Konstanten. Die Weglänge berechnet sich für satellitengestützte Kommunikation aus der in Abbildung 3.11 dargestellten Geometrie. Hierbei muß für Regenraten ab 10 mm/h

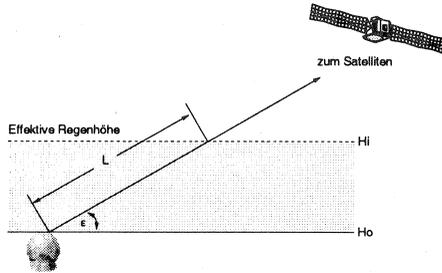


Abbildung 3.11: Regenhöhe und Pfadlänge durch den Regen

die Wegverkürzung durch Beugung berücksichtigt werden. Für die Weglänge  $L$  als Funktion der Regenrate ergibt sich:

$$L = \begin{cases} \frac{H_e - H_o}{\sin \epsilon} & \text{für } R \leq 10 \text{ mm/h} \\ \frac{1 - \exp(-\gamma b \ln(\frac{R}{10}) \cos \epsilon \frac{H_e - H_o}{\sin \epsilon})}{-\gamma b \ln(\frac{R}{10}) \cos \epsilon} & \text{für } R > 10 \text{ mm/h} \end{cases} \quad (3.47)$$

$H_e$  beschreibt die effektive Regenhöhe als Funktion der wirklichen Regenhöhe  $H_i$  -  $H_o$  (vgl. Abb. 3.11) Regenrate  $R$  und des Breitengrades  $\Xi$  mit

$$H_e = \begin{cases} H_i & \text{für } R \leq 10 \text{ mm/h} \\ H_i + \log\left(\frac{R}{10}\right) & \text{für } R > 10 \text{ mm/h} \end{cases} \quad (3.48)$$

und

$$H_i = \begin{cases} 4,8 & \text{für } \Xi \leq 30^\circ \\ 7,8 - 0,1 \cdot |\Xi| & \text{für } \Xi > 30^\circ \end{cases} \quad (3.49)$$

Für die Koeffizienten  $a(f)$  und  $b(f)$  ergeben sich nach ITU-R Empfehlung P 721-1, vgl. [46]

$$a(f) = \frac{a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2 \epsilon \cos 2\tau}{2} \quad (3.50)$$

$$b(f) = \frac{a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2 \epsilon \cos 2\tau}{2a(f)} \quad (3.51)$$

als Funktion des Elevationswinkels  $\epsilon$ , des Polarisationwinkel  $\tau$  ( $\tau = 45^\circ$  für zirkulare Polarisation) und ausgewählten Werten für  $a_h$ ,  $a_v$ ,  $b_h$  und  $b_v$  nach Tabelle 3.2. Die

Frequenz [GHz]	$a_h$	$a_v$	$b_h$	$b_v$
20	0,0751	0,0691	1,10	1,07
25	0,124	0,113	1,06	1,03
30	0,187	0,167	1,02	1,00

Tabelle 3.2: Spezifische Dämpfungskoeffizienten nach ITU-R P 721-1

nach ITU-R Empfehlung P 563-2 in Klimazonen (vgl. Abbildung 3.12) gegliederten Regenraten  $R$  können der zugehörigen Tabelle 3.3 entnommen werden.

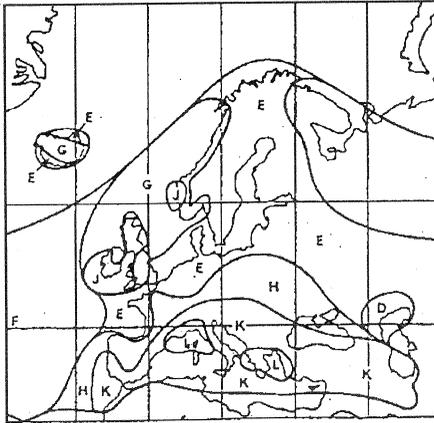


Abbildung 3.12: Regenzone in Europa

Nr.	Zeitlicher Anteil [%]	Regenrate [mm/h]					
		E	G	H	K	L	M
1	1,0	1	-	-	2	-	4
2	0,3	3	7	4	6	7	11
3	0,1	6	12	10	12	15	22
4	0,03	12	20	18	23	33	40
5	0,01	22	30	32	42	60	63
6	0,003	41	45	55	70	105	95
7	0,001	70	65	83	100	150	120

Tabelle 3.3: Regenrate [mm/h] nach Regenzone

### 3.6.1.2 Regen-Transienten

Der Einfluß von Regen auf den Funkkanal beschränkt sich nicht auf die mögliche Verhinderung eines Erstzugriffs aufgrund zu hoher Dämpfung, sondern das dynamische Verhalten des Regens kann auch zur Unterbrechung einer bereits bestehenden Verbindungen führen. Besonders bei satellitengestützter Kommunikation ist die vorhandene Schwundreserve sehr gering, da sowohl die Batterie- als auch die Ladeleistung durch die Solarpanele limitiert sind. Die Häufigkeit von Regenereignissen, die die Schwundreserve überschreiten und einen Verbindungsabbruch hervorrufen ist eine wichtige Kenngröße für die Dimensionierung von satellitengestützten Kommunikationssystemen.

Da eine rein kumulative Betrachtung des Regens in den einzelnen Klimazonen (vgl. Tabelle 3.3) ungeeignet ist, um das dynamische Verhalten ausreichend zu charakterisieren, wird hier ein Zustandsübergangsmodell vorgestellt, welches im folgenden zur Untersuchung der Regendynamik verwendet wird.

### 3.6.1.3 Zustandsübergangmodell

Das zeitdiskrete Zustandsübergangmodell, bei dem die Zustände zusammenhängend vollständig jeweils einzelne Teilbereiche der Regenintensität abbilden, ist in Abbildung 3.13 gezeigt. Basierend auf Meßergebnissen, vgl. [10] und [102], kann angenommen werden, daß ein Zustandswechsel nur zu benachbarten Zuständen mit unmittelbar höherer oder niedriger Regenrate möglich ist. Es resultiert eine zeitdiskrete Markov-Kette eines „Geburts- und Sterbeprozesses“. Formuliert man die

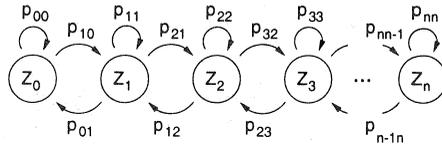


Abbildung 3.13: Reduziertes zeitdiskretes Zustandsübergangmodell

vorhandenen Zusammenhänge mit Hilfe des Zustandsvektors  $\vec{P}$  und der stochastischen Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten  $\mathcal{M}$ , so ergibt sich

$$\vec{P} = \mathcal{M} \cdot \vec{P} \quad (3.52)$$

bzw.

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & \cdots & p_{0n} \\ p_{10} & p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n0} & p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix}. \quad (3.53)$$

Mit Hilfe der für jeden Zustand  $i$  geltenden Vollständigkeitsbedingung der Wahrscheinlichkeiten

$$\sum_{j=0}^n p_{ji} = 1 \quad (3.54)$$

und unter Berücksichtigung der Beziehung („local balance“, vgl. [62]):

$$\frac{P_i}{P_{i+1}} = \frac{p_{ii+1}}{p_{i+1i}} \quad (3.55)$$

können aus den Zustandswahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände  $P_i$  sowie der mittleren Verweildauer pro Zustand  $V_i$  und dem Zeitschritt  $\Delta t$  der diskreten Markov Kette die Zustandsverweilwahrscheinlichkeiten

$$p_{ii} = 1 - \frac{\Delta t}{V_i} \quad (3.56)$$

und daraus abgeleitet die Übergangswahrscheinlichkeiten  $p_{ij}$  berechnet werden, vgl. [62]. Die Anzahl der Übergänge  $N_{ij}$  zwischen zwei benachbarten Zuständen während des betrachteten Zeitraumes  $T$  kann anschließend über

$$N_{ij} = \frac{T}{\Delta t} \cdot P_j \cdot p_{ij} \quad (3.57)$$

	0	1	2	3	4	5	6
	Regenratenbereiche						
$R[mm/h]$	> 0	0 - 10	10 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 120	> 120
	Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten						
$P_i$	0,947798	0,050571	0,001147	0,000323	0,000105	0,000030	0,000026
	Zustandübergangswahrscheinlichkeiten						
$p_{i-1,i}$	0,0	0,000502	0,034667	0,055931	0,197068	0,160142	0,357143
$p_{i,i}$	0,999973	0,998711	0,949576	0,880188	0,756317	0,540357	0,642857
$p_{i+1,i}$	0,000027	0,000786	0,015757	0,063881	0,046615	0,299501	0,0

Tabelle 3.4: Modellparameter des Texas-Experiments

Zustandsübergänge $N_{i,i+1}$	$Z_0 \rightarrow Z_1$	$Z_1 \rightarrow Z_2$	$Z_2 \rightarrow Z_3$	$Z_3 \rightarrow Z_4$	$Z_4 \rightarrow Z_5$	$Z_5 \rightarrow Z_6$
	81	126	57	65	15	28

Tabelle 3.5: Anzahl der Zustandsübergänge während eines Jahres

bestimmt werden. Die Auswertung einer Meßkampagne, die von der University of Texas durchgeführt wurde, ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Die Anzahl der Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen innerhalb des Betrachtungszeitraumes eines Jahres ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Ein beispielhafter simulativer<sup>3</sup> Verlauf eines Regenereignisses ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

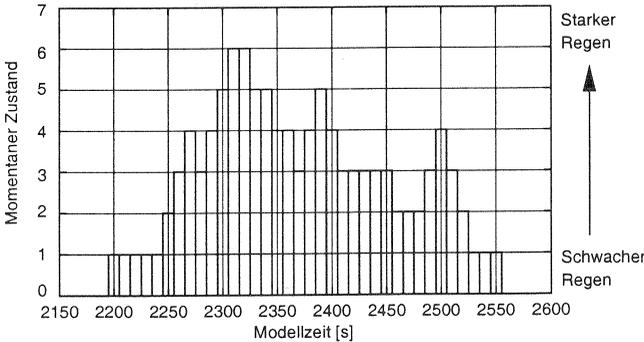


Abbildung 3.14: Simulativer Verlauf eines Regenereignisses

Der Einfluß der jeweiligen Zustandsübergänge kann nun mit der Auftrittshäufigkeit gewichtet untersucht und entsprechend der Auswirkungen bewertet werden.

### 3.6.2 Bestimmung der Paketfehlerwahrscheinlichkeit

Da beim TELEDESIC-System gerichtete Antennen mit hohem Antennengewinn zum Einsatz kommen, vgl. Abschnitt 2.3.2, wird für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, daß entweder Sichtverbindung einer Bodenstation mit einem AWGN-artigem Funkkanalverhalten besteht, oder daß durch Abschattungen (Regen) bedingt keinerlei Kommunikation möglich ist.

Die Bit- bzw. Paketfehlerwahrscheinlichkeiten berechnen sich dann nach den in Abschnitt 3.3.3 und 3.5.1.3 erwähnten Zusammenhängen.

<sup>3</sup>Stochastische Simulation der diskreten Markovkette mit Hilfe der am Lehrstuhl verfügbaren Simulationsbibliothek CNCL (Communication Networks Class Library)



## ISDN und Signalisierung

Zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion werden analoge Telekommunikationsnetze national und weltweit durch digitale Netze ersetzt. Mit der Einführung von diensteintegrierenden digitalen Netzen nach ISDN (Integrated Services Digital Network) Standard wird hier der Einsatz von bitorientierten Zeichengabesystemen zwischen den Vermittlungsstellen möglich, vgl. [103]. Im folgenden werden ISDN und das Zeichengabesystem Nr. 7 (SS 7) beschrieben.

### 4.1 Das Integrated Services Digital Network (ISDN)

Ziel des ISDN ist es, Dienste bisheriger Telekommunikationsnetze in einem diensteintegrierenden Ansatz mit nur einer Benutzerschnittstelle dem Endteilnehmer zur Verfügung zu stellen. Dienste folgender Netze werden im ISDN abgewickelt:

- Fernsprechen inkl. analoger Datenübertragung,
- Telex,
- Teletex,
- Temex und
- Paketdatenübertragung z. B. im Datex-P.

Die international standardisierten Merkmale des ISDN werden in der I-Gruppe der ITU-T Empfehlungen festgelegt. Jeder Teilnehmer im ISDN verfügt über eine digitale Benutzerschnittstelle, über die Daten wahlweise mit bis zu 64 kbit/s (Basisanschluß) oder 2 Mbit/s (Primärratenanschluß) übertragen werden. Bisher sind folgende digitale Dienste an einem ISDN Basisanschluß standardisiert, vgl. [103]:

- Fernsprechen mit einer Bandbreite von 3,1 kHz (PCM),
- Fernsprechen mit einer Bandbreite von 7 kHz (ADPCM),
- Telefax (Gruppe 4),
- Datenübertragung von Text und Bildern gemischt,
- BTX mit einer Datenrate bis zu 64 kbit/s,
- Videotelephonie und
- Datenkommunikation.

Zeitgleich mit der Digitalisierung der Verkehrskanäle wird im ISDN ein Zeichengabesystem eingeführt, welches der Steuerung des Verkehrskanalnetzes dient, um z. B. eine Verbindung zwischen zwei Teilnehmern herzustellen. Diese neue Art der Signalisierung ersetzt herkömmliche Ansätze, die z. B. wie bei der „Inband“-Signalisierung die Signalisierungsinformation in Form von Impulsen oder Tönen während und nach einer Gesprächsverbindung übertragen. Anforderungen wie flexibles Routing und kurze Verbindungsaufbauzeiten können von dieser herkömmlichen Signalisierung nicht erfüllt werden, vgl. [103]. Das im ISDN eingeführte Zeichengabesystem Nr. 7 (SS 7) führt die netzinterne Signalisierung zwischen einzelnen Vermittlungsknoten in einem vom Netz der Verkehrskanäle logisch getrennten Netz. Davon zu unterscheiden ist die Teilnehmersignalisierung, vgl. Abb. 4.1, die im ISDN durch das

D-Kanal Protokoll E-DSS.1 (Q930/31) betrieben wird. Durch die erweiterten Signalisierungsmöglichkeiten mittels SS 7 und Teilnehmersignalisierung ergeben sich neue Dienstmerkmale für den ISDN-Teilnehmer, vgl. [103]. U. a. sind dies:

- Anklopfen mit Anzeige,
- Rufweiterleitung,
- Automatischer Rückruf bei Teilnehmer besetzt und
- Kurzwahl.

Da in der Übergangszeit weiterhin auch analoge Anschlüsse zur Ortsvermittlungsstelle OVSt betrieben werden, sind dort Terminaladapter erforderlich um Kompatibilität zu gewährleisten.

## 4.2 Signalisierung in Telekommunikationsnetzen mittels SS 7

Das Zeichengabesystem Nr. 7 (SS 7) ist ein globaler Telekommunikationsstandard, der durch die ITU-T seit 1988 in den Empfehlungen Q.700-Q.795 festgelegt worden ist. Im Standard sind die Verfahren und Protokolle definiert mit denen Netzelemente des öffentlichen Telekommunikationsnetzes (PSTN) Informationen über ein digitales Signalisierungsnetz austauschen um Gesprächsauf- und -abbau sowie Gesprächsleit- und Kontrollfunktionen wahrzunehmen. Es kann sich hier sowohl um drahtgebundene als auch Mobilkommunikation handeln. SS 7 wird zur netzinternen Signalisierung benutzt und ist von dem zu steuernden Netz unabhängig, vgl. Abb. 4.1. Die Protokollstruktur des SS 7 unterteilt sich in vier Ebenen, die zeitlich vor dem

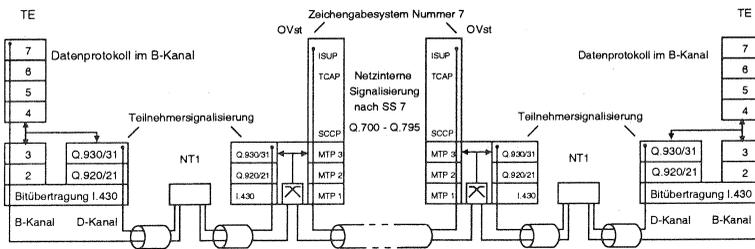


Abbildung 4.1: Teilnehmersignalisierung (E-DSS.1) und Zeichengabesystem (SS 7)

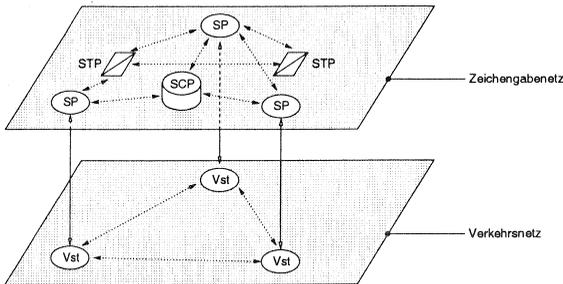
OSI-Schichtenmodell standardisiert worden sind, so daß die Funktionalitäten der einzelnen Schichten nur zum Teil mit der Struktur des Schichtenmodells übereinstimmt. Die Ebenen des SS 7 haben folgende Aufgaben, vgl. [103]:

- Ebene 1 (OSI-Schicht 1) legt die physikalischen und elektrischen Eigenschaften des SS 7 fest. Z. Zt. werden 64 kbit/s-Kanäle eingesetzt; 2 Mbit/s Kanäle sind bereits geplant.
- Ebene 2 (OSI-Schicht 2) sichert Reihenfolge und Inhalt der übermittelten Informationen.
- Ebene 3 (OSI-Schicht 3) dient dem Message-Handling und Netz-Management.

- Ebene 4 (OSI-Schicht 3-7) wird von den Anwendungen des Signalisierungsnetzes benutzt. Diese sind hauptsächlich der **ISDN User Part (ISUP)** zur Gesprächssteuerung sowie der **Signalling Connection Control Part (SCCP)** und die **Transaction Capabilities Application (TCAP)**, die die Integration der SS 7 Protokollarchitektur in das OSI-Schichtenmodell sicherstellen.

Im SS 7 sind drei verschiedene Arten von Netzknoten vorhanden, vgl. Abb. 4.2 und [76, 103]:

- Der **Signalling Point (SP)** stellt alle vier Ebenen des SS 7 zur Verfügung. Er ist in Vermittlungsstellen vorhanden und stellt über ISUP den Zugriff auf das SS 7 sicher.
- Der **Service Control Point (SCP)** stellt Datenbankdienste zur Verfügung, um eine optimale Gesprächsleitung zu gewährleisten.
- Der **Signal Transfer Point (STP)** ist ein Router (Ebenen 1-3), der zur Verkehrslenkung eingesetzt wird.



**Abbildung 4.2:** Relationen zwischen Zeichengabe- und Verkehrsnetz

Eine Zeichengabeverbindung hat stets seinen Ursprung und Ende in einer Vermittlungsstelle mit Signalling Point (SP). Dabei wird die Signalisierungsverbindung (vgl. Abb. 4.2: Zeichengabenez) zur Steuerung der Verkehrskanäle (vgl. Abb. 4.2: Verkehrsnetz) verwendet, die nicht notwendiger Weise denselben Weg zwischen den Vermittlungsstellen nehmen.

#### 4.2.1 Merkmale des SS 7

Durch die Funktionen und Protokolle des SS 7 werden folgende Merkmale erreicht, vgl. [76]:

- eine höhere Transaktionsgeschwindigkeit als vorherige Signalisierungsnetze (Inband-Signalisierung), die in kürzeren Gesprächsaufbauzeiten resultieren,
- effiziente Nutzung der Sprachkanäle,
- Unterstützung von Diensten **Intelligenter Netze (IN)**, die verkehrskanalunabhängige Signalisierungsverbindungen zu einzelnen Netzelementen erfordern und
- Schutz vor dem Eingriff durch Dritte (Mißbrauch).

### 4.2.2 Dienstgüteziele im ISDN

Als Dienstgüte bezeichnet man das Tupel der Leistungsmerkmale eines Dienstes aus Sicht des Dienstbenutzers. Im ISDN werden nach ITU-T Empfehlung E.721 folgende Leistungsmerkmale als wesentlich bezeichnet:

- D-Kanal-Zugriffszeit – Zeitdauer zwischen Versenden des ersten Bits des SETUP-Kommandos bis zum Eintreffen des letzten Bits der SETUP-ACK-Quittung im selben Endgerät (bei Normallast<sup>1</sup> im Mittel 0,6 s).
- Antwortverzögerungszeit – Zeitdauer zwischen dem Versenden und Empfang der CONNECT-Quittung (bei Normallast im Mittel 0,75 s für lokale, 1,5 s für nationale und 2,5 s für internationale Verbindungen).
- Verbindungsaufbauzeit – Zeitdauer zwischen dem Versenden des SETUP-Kommandos bis zum Empfang einer Nachricht über den Rufzustand (bei Normallast im Mittel 3,0 s für lokale, 5,0 s für nationale und 8,0 s für internationale Verbindungen).
- Verbindungsabbauzeit – Zeitdauer zwischen dem Versenden des ersten Bits des DISCONNECT-Kommandos bis zum Eintreffen des letzten Bits der RELEASE-Quittung im selben Endgerät.
- Wahrscheinlichkeit von „Gassenbesetzt“ – Wahrscheinlichkeit, daß beim Verbindungsaufbau alle Verkehrskanäle bereits belegt sind (bei Normallast im Mittel 2,0 % für lokale, 3,0 % für nationale und 5,0 % für internationale Verbindungen).

Weitere Leistungsmerkmale sind in den ITU-T Empfehlungen I.352 und Q.766 vorhanden.

### 4.2.3 Signalisierungsablaufdiagramme

Zur Steuerung der ISDN-Kanäle tauschen die Vermittlungsstellen entlang des Signalisierungsweges zwischen ISDN-Teilnehmern Nachrichten über SS 7 aus. Die Nachrichten werden durch den ISUP festgelegt. Für den erfolgreichen Verbindungsauf- und -abbau, vgl. Abb. 4.3 werden hierbei u.a. die folgenden Nachrichtentypen des SS 7 ausgetauscht, vgl. [78, 103]:

- IAM – Die **I**nitial **A**ddress **M**essage wird vom rufenden Teilnehmer A zum gerufenen Teilnehmer B geschickt, um einen Verkehrskanal zwischen den beiden Teilnehmern zu reservieren. Neben der Nummer des rufenden und gerufenen Teilnehmers enthält die IAM die Verkehrskanalidentifikationsnummer und weitere Parameter.
- ACM – Die **A**ddress **C**omplete **M**essage wird von der Teilnehmervermittlungsstelle B zurück an die Teilnehmervermittlungsstelle A geschickt, um den fehlerfreien Empfang der Rufnummer des Teilnehmers B zu quittieren.
- CPG – Die **C**all **P**ro**G**ress **M**essage teilt der TVSt-A den Zustand des Verbindungsaufbaues mit.
- ANM – Die **A**nswer **M**essage zeigt der TVSt-A an, daß der Teilnehmer den Hörer abgenommen hat und daß der Verkehrskanal aktiviert werden soll.
- REL – Die **R**ELease **M**essage zeigt den beteiligten Vermittlungsstellen an, daß der zur Zeichengabebeziehung gehörige Nutzkanal freigegeben werden kann.

<sup>1</sup>Normallast entspricht 100%

- RLC – Als Reaktion auf eine REL Nachricht sendet eine VSt. nach erfolgreichem Verkehrskanalabbau eine ReLease Complete Message.

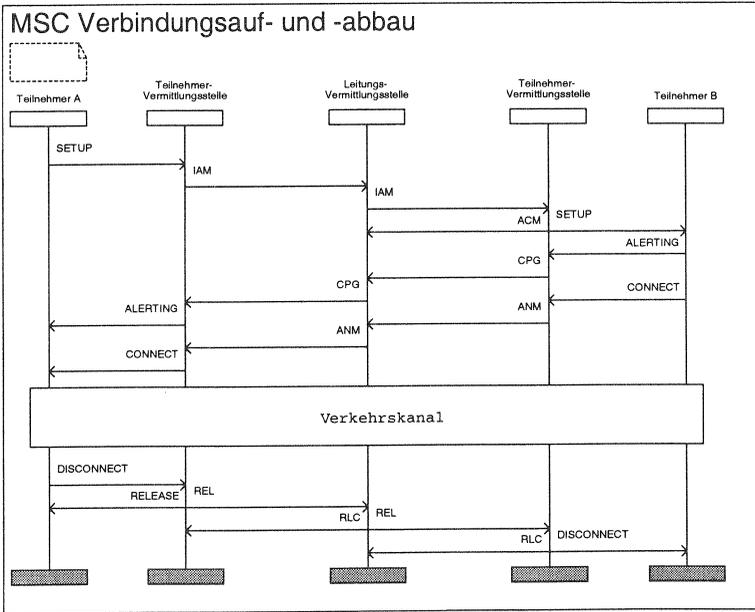


Abbildung 4.3: Erfolgreicher Verbindungsauf- und -abbau im ISDN mit SS 7



## Integration von terrestrischen und Satellitenfunknetzen

### 5.1 Einleitung

Jedes Mobilfunknetz stellt bezüglich Entwurf und Realisierung einen Kompromiß zwischen verschiedenen geometrieabhängigen und technischen Betriebsparametern dar. Die gewünschte geographische Funkausleuchtung, die tolerierbare Teilnehmermobilität sowie die angebotene Dienstpalette als Funktion der gewählten Übertragungstechnik und verfügbaren Funkbetriebsmittel führen zu einer Einschränkung der maximal möglichen Netzfunktionalität.

Wird von einem Teilnehmer ein besonderer Dienst, wie z. B. die garantierte oder weltweite Erreichbarkeit unabhängig von seinem möglichen Aufenthaltsort, gewünscht, so ist zur Zeit als Lösung nur eine Inanspruchnahme mehrerer Mobilfunksysteme gleichzeitig mit jeweiligem Endgerät möglich. Für den Fall einer weltweiten Erreichbarkeit müßte ein Teilnehmer eine Mischung aus mehreren analogen sowie digitalen Systemen verwenden. Selbst mit Hilfe geostationärer Satellitentelefonie ist aufgrund zu geringer Elevationswinkel und einer daraus resultierenden häufigen Abschattung keine globale Erreichbarkeit möglich.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, werden ab Herbst 1998 globale satellitengestützte Kommunikationsnetze in polaren Erdumlaufbahnen wie z. B. das IRIDIUM-System diese Lücke füllen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist zu untersuchen, wie zukünftige satellitengestützte Kommunikationssysteme in terrestrische zellulare Mobilfunknetze integriert werden können, damit einem potentiellen Endteilnehmer nur noch ein Endgerät mit erweiterter Funktionalität zur Verfügung gestellt werden kann.

### 5.2 Integrationszenarien

Der mobile Satellitenfunk, der z. Zt. als alleinstehender Dienst existiert, bedarf grundsätzlich keiner Integration in andere Mobilfunknetze, abgesehen von einem Anschluß an das internationale Telefonnetz. Im Hinblick auf zukünftige Satellitensysteme, die den Gebrauch von kleinen, mobilen Endgeräten ähnlich denen in modernen terrestrischen Mobilfunknetzen in Aussicht stellen, ergibt sich nun die Möglichkeit, beide Zugangstechniken in einem Gerät zu kombinieren.

Ein Teilnehmer kann die Versorgung durch Satelliten auch als Ergänzung zu terrestrischen Mobilfunksystemen (z. B. nach GSM Standard) sehen und eine wahlweise Nutzung beider Netze ohne großen Aufwand erreichen.

Wie das erfolgen kann, und welche technischen und anwenderspezifischen Nebenbedingungen dabei berücksichtigt werden müssen, ist Thema dieses Kapitels. Entsprechend den Ansätzen der zukünftigen Satellitenmobilfunknetzbetreiber wird hier das GSM als terrestrisches Netz betrachtet, mit dem die Integration angestrebt wird, da dies der weltweit verbreitetste Mobilfunkstandard ist.

### 5.2.1 Anforderungen aus Teilnehmer- und Betreibersicht

Besondere Aufmerksamkeit muß beim Entwurf technischer Systeme den Bedürfnissen des Anwenders gelten. Die Akzeptanz einer technischen Neuerung und somit ihr kommerzieller Erfolg hängt im wesentlichen davon ab, in welchem Maße die Wünsche und Anforderungen des Benutzers erfüllt werden.

In den hier betrachteten Szenarien ist der Anwender ein Telefonkunde, der bereits Teilnehmer in einem Mobilfunknetz ist. Eine ausreichende Dienstgüte vorausgesetzt, möchte er immer und überall preisgünstig und bequem telefonieren und Datendienste, FAX und Zusatzdienste nutzen. Mit welchen technischen Mitteln diese Anforderungen erfüllt werden und welche Systeme dahinter stehen, wird für den Teilnehmer als unerheblich angesehen.

Da kein einziges Mobilfunksystem alleine globale Erreichbarkeit erfüllen kann, muß dem Teilnehmer sowohl der terrestrische als auch der Satelliten-Mobilfunk angeboten werden. Die einfache aber ungünstige Methode, dies technisch zu realisieren, ist die Ausrüstung mit zwei Mobiltelefonen.

Ein sog. „Dual Mode“ Handgerät für die Benutzung beider Netze ist wesentlich besser geeignet. Allerdings sind mit der Bereitstellung eines solchen Gerätes nicht alle Anforderungen automatisch erfüllt. Die Auswahl des „richtigen“ Netzes soll Wünsche des Kunden berücksichtigen, z. B. die Wahl des situationsspezifisch preiswertesten Netzes. Außerdem soll eine bestmögliche Erreichbarkeit (über welches Netz auch immer) gewährleistet sein. Erreichbarkeit bedeutet Festlegung der Rufnummer(n) unter welcher der Teilnehmer jeweils Netzkontakt hat.

Aus Praktikabilitätsgründen möchte jeder Teilnehmer meist nur eine netzunabhängige Rufnummer besitzen. Damit sollte einhergehen, daß er nur einen Vertrag bei einem Netzbetreiber abschließen muß. In zukünftigen Netzen mit Diensten nach UPT<sup>1</sup> Standard ist bereits beim Aufbau des Netzes die Berücksichtigung der Satellitenkomponente erforderlich.

Zusammenfassend ergeben sich aus Teilnehmersicht folgende Anforderungen:

- Globale Versorgung mit freier Netzwahl,
- hohe Dienstgüte,
- einheitliche Benutzerschnittstelle und Diensthandhabung,
- preiswerte Verbindung,
- Ausweichmöglichkeit bei Blockierung eines Netzes,
- einfaches Nummernschema (eine Rufnummer) und
- einfache Abrechnung (ein Betreiber/Provider).

Die Gründe für einen GSM- oder Satellitennetzbetreiber, einen integrierten Dienst anzubieten, liegen in der Erweiterung seines Kundenkreises sowie des Angebotes für bestehende Kunden. Er gewinnt damit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Anbietern. Dabei sollte der Aufwand, insbesondere im technischen Bereich, gering sein, d. h. am verwendeten Standard (GSM) darf sich im wesentlichen nichts ändern, um Inkompatibilitäten und Neuimplementierungen zu vermeiden. Im Widerspruch zu den Wünschen der beiden beteiligten Netzbetreiber steht der selbstverständliche Anspruch jedes Netzbetreibers auf hohe Priorität bei der Wahl des eigenen Netzes durch den Teilnehmer. Durch die Integration soll zwar die Freizügigkeit des Teilnehmers verbessert, aber möglichst wenig Verkehr aus dem eigenen Netz abgezogen werden (genügend Kapazität vorausgesetzt).

<sup>1</sup>Universal Personal Telecommunication

Folgende Forderungen der Netzbetreiber lassen sich zusammenfassen:

- Keine oder geringe technische Änderungen im eigenen Netz,
- Steigerung der Attraktivität durch Integration mit dem Partnernetz,
- hohe Priorität des eigenen Netzes bei der Netzwahl und
- Sicherstellung der Abrechnung von Gesprächen.

Nachdem die Anforderungen der verschiedenen Beteiligten an der Integration herausgestellt sind, stellt sich die Frage der technischen Realisierung. Grundsätzlich wird dabei von der Benutzung eines Dual-Mode Endgerätes ausgegangen, das in beiden Netzen betrieben werden kann. Erfolgt die Zusammenführung der Netze nur im Endgerät, so spricht man von Integration auf Terminalebene. Desweiteren werden die Integration auf Netz- und Datenbankebene sowie die Integration mit Hilfe eines UPT-Servers vorgestellt.

Schließlich wird der Integrationsansatz eines kaskadierten Systems beschrieben, bei dem die beiden integrierten Netze nicht wahlweise benutzt werden, sondern in Serie dazu beitragen, die Funkausleuchtung und den Weitverkehrstransport der dienstspezifischen Daten zu bewerkstelligen.

Die nachfolgend diskutierten Vorschläge werden zunächst als Alternative entwickelt und werden z. T. später (vgl. Kapitel 7, 8 und 9) als Grundlage für den Vorschlag eines integrierten Systems benutzt.

### 5.2.2 **Integration auf Endgeräteebene**

Abbildung 5.1 zeigt die einfachste Möglichkeit, ein Satellitenmobilfunknetz mit einem GSM-Netz zu kombinieren. Die Integration erfolgt im Endgerät. Es existieren keine zusätzliche Verbindungen zwischen den Elementen der beiden Netze. Damit ist auch keine zusätzliche Signalisierung vorgesehen.

Auf administrativer Ebene bedeutet dies, daß der Teilnehmer zwei Verträge mit zwei Netzbetreibern abschließen muß. Somit ist keine zentrale Abrechnung der Gebühren möglich. Das Endgerät muß sowohl im GSM- als auch im Satellitennetz betriebsfähig sein (DMT – **D**ual **M**ode **T**erminal), dies erfordert die Beherrschung der beiden unterschiedlichen funkschnittstellen und Protokollstapel. Als Betriebsmodi kommen sowohl einfache als auch duale Bereitschaft in Frage.

Im Falle der einfachen Bereitschaft ist das Endgerät immer nur in einem Netz eingebucht und kann auch nur von dort Gespräche empfangen. Ein Anruf über das andere Netz wird entweder abgewiesen oder muß per Rufumleitung entsprechend verzögert in das jeweils aktuelle Netz gelangen. Die netzspezifischen Baugruppen der Mobilstation (DMT) können für diesen Betrieb unabhängig voneinander aufgebaut werden, da immer nur die Funktionalität eines Netzes auf einmal bereitgestellt werden muß. Realisiert man im Endgerät eine ständige Bereitschaft in beiden Netzen (duale Bereitschaft), so können aus beiden jederzeit Anrufe entgegengenommen werden. Dies hat den Vorteil, daß im Falle einer entsprechenden Funkversorgung keine Rufe umgeleitet werden müssen und ein schnellstmöglicher Verbindungsaufbau garantiert ist.

#### 5.2.2.1 **Verwaltung der Benutzerdaten**

Die Verwaltung der Benutzerdaten inklusive der Aufenthaltsinformation wird völlig getrennt im GSM und im Satellitennetz durchgeführt. Ein Austausch von Informationen erfolgt nicht. Für jedes Netz ist somit eine eigene Rufnummer erforderlich.

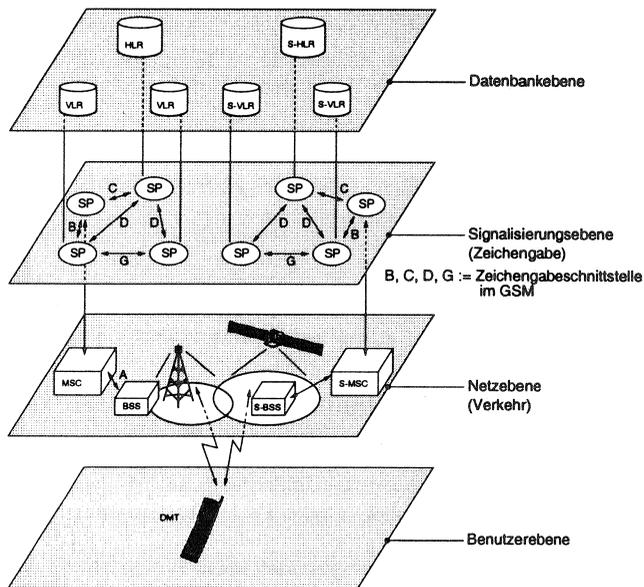


Abbildung 5.1: Integration auf Endgeräteebene

### 5.2.2.2 Sicherheitsanforderungen

Als Folge der separaten Verwaltung der Benutzerdaten in jedem Netz ist eine Benutzung von zwei SIM-Karten (vgl. Abschnitt 2.2.1) zur getrennten Authentifizierung in beiden Netzen erforderlich. Die Verschlüsselungs- und Authentifizierungsverfahren der einzelnen Netze werden je nach Bedarf in jedem Netz separat angewandt. Eine Zusammenarbeit beider Netze erfolgt nicht.

### 5.2.2.3 Netzwechsel und Handover

Der Wechsel des versorgenden Netzes kann automatisch oder manuell erfolgen. Bei manuellem Wechsel (teilnergesteuert) kann bei abgehenden Rufen immer die preisgünstigere Verbindung gewählt werden. Auch ein manueller Wechsel während eines bestehenden Gesprächs in ein billigeres Netz ist denkbar. Ist das momentan benutzte Netz überlastet oder verschlechtert sich seine Funkversorgung unter eine gewisse Mindestqualität, so ist auch ein automatisch initiiertes Wechsel (Handover) bei der Integration auf Terminalebene denkbar. Ein solcher Handover ist jedoch nur mit Endgeräten möglich, die eine duale Bereitschaft bieten. Da bei der Integration auf Endgeräteebene keine zusätzliche Signalisierung zwischen Netzelementen unterschiedlicher Netze möglich ist, muß zum Wechsel des Netzes während einer bestehenden Verbindung eine Verkettung von Zusatzdiensten benutzt werden.

Das Verfahren hierfür (das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird) basiert auf den Zusatzdiensten CALL HOLD und CALL WAITING nach ITU-T Empfehlung (Q.733 und Q.734, vgl. [55, 56]). Der Ablauf des resultierenden Protokolls ist

in Abbildung 5.2 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, daß eine Verbindung zwi-

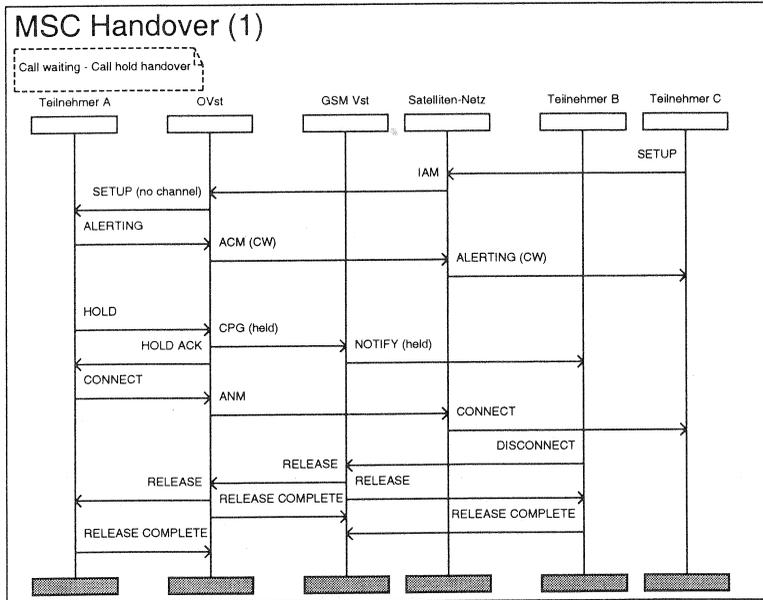


Abbildung 5.2: Handover mit Hilfe der Zusatzdienste CALL HOLD/WAITING

schen Teilnehmer A und B bereits besteht, und daß alle beteiligten Teilnehmer die entsprechenden Zusatzdienste abonniert haben. Teilnehmer B und C repräsentieren den GSM- und Satellitennetzteil des DMT Endgerätes.

Ist ein Wechsel zwischen GSM- und Satellitennetz erforderlich, so wird zuerst eine zusätzliche Verbindung von Teilnehmer C zu Teilnehmer A aufgebaut. Teilnehmer A quittiert den Verbindungsaufbau mit der Zusatzinformation CALL WAITING (CW). Nachdem die ursprüngliche Verbindung mit Teilnehmer B in den Haltezustand (HOLD) versetzt worden ist, kann das wartende Gespräch mit Teilnehmer C aktiviert werden (CONNECT). Die gehaltene Verbindung mit Teilnehmer B kann nun ausgelöst werden (DISCONNECT/RELEASE).

In der Praxis kann der Wechsel des Netzes sowohl manuell als auch automatisch initiiert werden. Die Umschaltung zwischen dem GSM- und Satellitennetz erfolgt anschließend z. B. manuell über das kurze Betätigen der Telefongabel oder einer speziellen Taste am Endgerät. Für eine automatische Umschaltung kommen zwei Verfahren in Frage:

- Beim Gesprächsaufbau (z. B. über GSM) wird dem gerufenen Endgerät die alternative Telefonnummer (z. B. vom Satellitennetz) mitgeteilt, so daß ein ankommender Ruf von dieser Nummer automatisch angenommen werden kann. Als Dienste hierfür eignen sich die verbindungslose Teilnehmersignalisierung sowie z.B die „Sub-Address“ der CALLING PARTY IDENTIFICATION.

- Mit Hilfe eines DTMF<sup>2</sup>- Signals kann bei einem Handover dem gerufenen Endgerät signalisiert werden, auf die bereits aufgebaute, aber wartende Verbindung zum alternativen Netz umzuschalten. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, daß DTMF Signale über fast jedes Netz störungsfrei übertragen werden.

Als weitere Möglichkeit zum Netzwechsel kann die Erweiterung eines bestehenden Gesprächs zwischen Teilnehmer A und B zu einem Konferenzgespräch mit allen drei Teilnehmern A, B und C genutzt werden. Nach Auslösung der Verbindung mit B besteht nur noch eine Verbindung zwischen Teilnehmer A und C. Jedoch muß der Ort der Konferenzschaltung, die Konferenzbrücke, stets beim bestehenden Teilnehmer A eingerichtet werden. Das Einfügen eines neuen Teilnehmers, hier C, in eine Konferenzschaltung erfolgt mit wenigen Ausnahmen ebenfalls manuell. Zur automatischen Einrichtung und Gesprächssteuerung der Konferenzbrücke müssen somit auch für dieses Verfahren neue Funktionalitäten im Endgerät des Teilnehmers A realisiert werden. Diese erschweren die Integration auf Terminalebene.

### 5.2.3 Integration auf Netzebene

Bei der Integration auf Netzebene werden GSM und Satellitensystem zu einem Netz auf der Basis von GSM-Technik kombiniert. Da bis jetzt ein solcher Ansatz nicht bekannt ist, sollen in diesem Abschnitt die netztechnischen Voraussetzungen und erforderlichen Protokolle einschließlich des Inter-Netz Handover entwickelt werden.

Die bestehenden Signalisierungsprotokolle (vgl. Abbildung 5.3) und die Schnittstellen zwischen den einzelnen Netzelementen ( $U_m$ , Abis, A und B-G) des GSM-Standards sollen nicht verändert werden. Folgende GSM-Schnittstellen stehen für

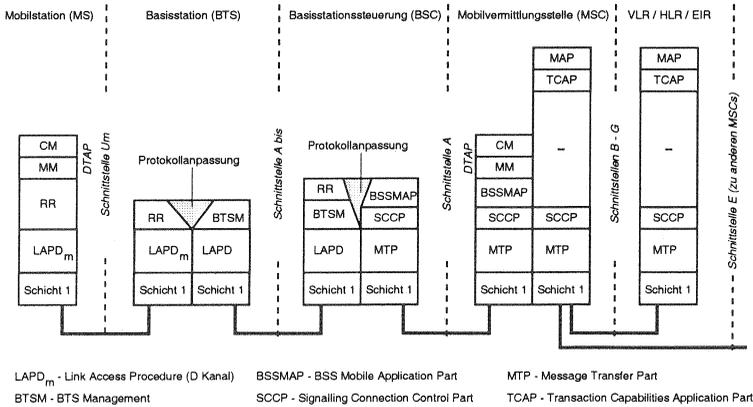


Abbildung 5.3: GSM-Protokollstapel für Teilnehmer und Netzsignalisierung

die Integration auf Netzebene zur Auswahl:

- $U_m$ -FUNKSchnittstelle  
Die FUNKSchnittstelle  $U_m$  des GSM (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) und die eines mobilen Satellitensystems z. B. von IRIDIUM (vgl. Abschnitt 2.3.1.3) unterscheiden

<sup>2</sup>Dual Tone Multi-Frequency

sich wesentlich in Burst- und Rahmenstruktur, im verwendeten Kanalzugriffsverfahren sowie in Art und Rate der Sprachcodierung. Da beide Definitionen fest spezifiziert und Änderungen im nachhinein nicht mehr möglich sind, kommt die  $U_m$ -Funkschnittstelle zur Integration nicht in Frage.

- $A_{bis}$ -Schnittstelle

Die  $A_{bis}$ -Schnittstelle zwischen BTS und BSC dient im GSM dem Austausch von Steuerinformation zur Verwaltung der Funkschnittstelle, also der Teilnehmersignalisierung und ist deshalb funkschnittstellenspezifisch. Die Steuerung des Funkkanals und der Sendefrequenzen, aber auch andere Funktionen wie z. B. die Festlegung der vom Endgerät zu messenden Nachbarbasisstationen (BTS), sind GSM spezifisch und deshalb nicht gleichzeitig für ein mobiles Satellitensystem geeignet. Die  $A_{bis}$ -Schnittstelle des GSM ist deshalb zur Integration mit einem mobilen Satellitensystem ebenfalls nicht geeignet.

- A-Schnittstelle

Die A-Schnittstelle des GSM dient der Übertragung von Daten zur Netzsignalisierung gemäß Signalisierungssystem Nr. 7 (SS 7) sowohl zwischen MSC und BSC als auch zwischen MSC und der Mobilstation (MS) sowie allen übrigen Netzelementen. Als Netzschichtprotokolle des SS 7 kommen das BSSMAP (**BSS MAnagement Part**) und das DTAP (**D**irect **T**ransfer **A**pplication **P**art) Protokoll zum Einsatz, wobei DTAP aus Funktionen zur Verbindungssteuerung (CM) und der Mobilitätsverwaltung (MM) besteht (vgl. Abbildung 5.3). Da alle notwendigen Steuerinformationen zur Verwaltung der Funkschnittstelle von BSC und BTS übernommen werden, sind hier nur netzspezifische Funktionen vorhanden.

Auf der physikalischen Schicht der A-Schnittstelle erfolgt die Übertragung der Signalisierungsdaten mittels 15 voll duplex B-Kanälen über PCM-30-Systeme nach ISDN Standard (vgl. ITU-T G.732 [51]). Auf der Sicherungsschicht kommen die SS 7 Protokolle MTP (**M**essage **T**ransfer **P**art) und SCCP (**S**ignalling **C**onnection **C**ontrol **P**art) zur Einrichtung und Verwaltung der unterschiedlichen Sicherungsschichtverbindungen zum Einsatz.

In einem auf GSM-Technik basierenden mobilen Satellitensystem werden ähnliche Netzschichtprotokolle wie die DTAP Protokolle auf der A-Schnittstelle des GSM benötigt. Mit Hilfe eines Protokollanpassungsautomaten (IWU) ist es daher möglich, eine Integration zwischen GSM und mobilen Satellitensystem über die Netzsignalisierung durchzuführen. Aus Sicht der MSC verhalten sich IWU und Satellitennetz wie ein BSS. In Abbildung 5.4 ist ein entsprechendes Szenarium dargestellt.

Eine Interworking Unit zwischen GSM und mobilem Satellitensystem hat an der A-Schnittstelle folgende Aufgabe:

- Umsetzung der DTAP Protokolle CM und MM (Anpassung der Signalisierung):

Die Protokolle der Verbindungssteuerung (CM) und Mobilitätsverwaltung MM müssen bezüglich ihrer Inhalte in die Protokollsyntax des jeweils anderen Netzes übersetzt werden.

- Transcodierung von Sprachdaten (Anpassung der Quellcodierung der Netzdatenübertragung):

Evtl. müssen die Sprachdaten des GSM, die an der A-Schnittstelle u. U. PCM codiert mit einer Datenrate von 64 kbit/s nach ISDN Standard oder als GSM-Sprache in Satellitensprache transcodiert werden und umgekehrt.

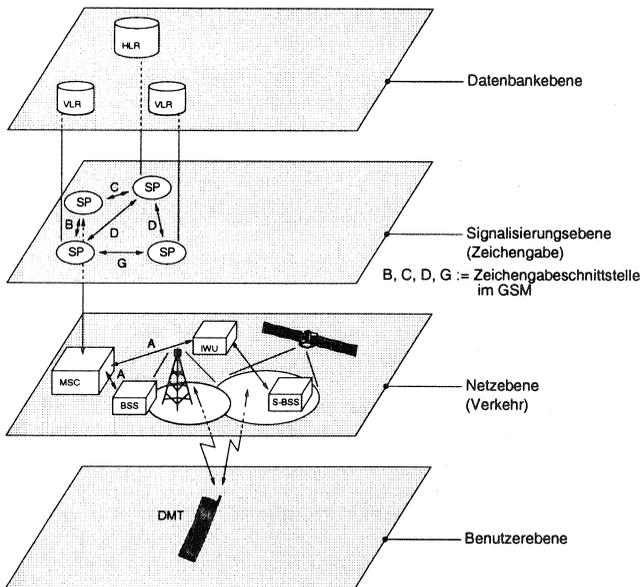


Abbildung 5.4: Integration auf Netzebene mit Interworking Unit (IWU)

Alle satellitenteilnetzspezifischen Funktionen, Protokolle und Verfahren können unabhängig von der IWU-Schnittstelle realisiert werden.

- *E*-Schnittstelle

Zwischen MSCs liegt im GSM die *E*-Schnittstelle. Dort werden die Protokolleneinheiten des SS 7 MAP/E Netzschichtprotokolls ausgetauscht, das für alle Aspekte des inter-MSC Handovers zuständig ist. Eine Integration eines mobilen Satellitensystems, repräsentiert als quasi-MSC an der *E*-Schnittstelle ist mit Hilfe einer IWU oder unter Verwendung einer GSM-MSC als Satellitennetz-Mobilvermittlungsstelle möglich (vgl. z. B. IRIDIUM-System). Zusätzlich müssen in der IWU folgende weitere MAP Teilprotokolle implementiert werden:

- das MAP/B Protokoll zwischen MSC und VLR<sup>3</sup>,
- das MAP/F Protokoll zwischen MSC und EIR,
- das MAP/H Protokoll zwischen MSC und dem SMS<sup>4</sup>-Gateway und eventuell
- das MAP/C Protokoll zwischen MSC und HLR, falls Gateway-MSC Funktionalität erwünscht ist (vgl. [77]).

Die netztechnische Realisierung einer solchen Integration ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Ab der *E*-Schnittstelle abwärts ist somit eine satellitennetzoptimierte Anpassung der verwendeten GSM-ähnlichen Struktur möglich.

<sup>3</sup>Nach GSM-Standard

<sup>4</sup>Short Message Service

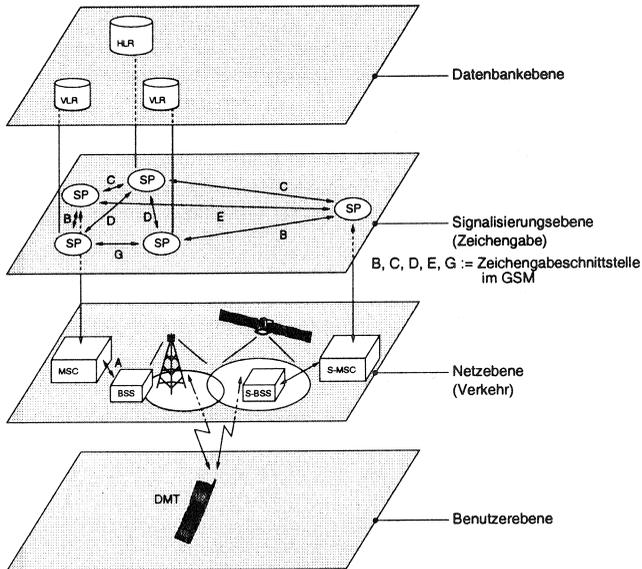


Abbildung 5.5: Integration auf Netzzebene ohne Interworking Unit (IWU)

### 5.2.3.1 Verwaltung der Benutzerdaten

Das Satellitensystem ist als Teil des GSM-Netzes integriert, daher ergeben sich zwei mögliche Szenarien zur Benutzerverwaltung:

- Die gesamte Benutzerverwaltung der Teilnehmer des Satellitensystems erfolgt im GSM mit der gleichzeitigen Verwaltung der Aufenthaltsgebiete.
  - Vorteil: Durch geringere Funktionalität ist der Satellitennetzaufbau vereinfacht.
  - Nachteil: Erhöhter Signalisierungsaufwand im GSM und Speicherplatzbedarf in den VLR/HLR Datenbanken.
- Die Benutzerverwaltung ist aufgeteilt zwischen GSM und mobilem Satellitensystem. Satellitennetzteilnehmer werden zwar im GSM VLR/HLR verwaltet, sind aber alle für ein GSM-Aufenthaltsgebiet gemeldet. Die genaue Aufschlüsselung und Verwaltung der Teilnehmeraufenthaltsgebiete wird im Satellitensegment separat durchgeführt.
  - Vorteile: Die Signalisierungslast im GSM ist geringer, satellitenteilnetzspezifische Verfahren zur Aufenthaltsverwaltung sind möglich.
  - Nachteile: Die Funktionalität im Satellitennetz ist vergrößert, d. h. im Satellitennetzaufbau ist mehr Aufwand nötig.

Teilnehmer, die in beiden Netzen registriert sind, können direkt über das Satellitenteilnetz nach Abbildung 5.5 mit eigenem VLR und HLR verwaltet werden. Da die maximale Signalisierungskapazität eines mobilen Satellitennetzes auf der Funkschnittstelle weit unter der des GSM liegt (vgl. Abschnitt 2.3.1.3), wirkt sich diese Lösung nachteilig auf die Kapazität des Satellitensystems aus. Bei der Integration auf Netzebene handelt es sich um die Integration zu einem gemeinsamen Netz, deswegen ist nur eine SIM-Karte mit einer Rufnummer erforderlich.

### 5.2.3.2 Sicherheitsanforderungen

Teilnehmerauthentifizierungsinformation gegenüber dem GSM-Netz sowie GSM-Sprachdaten werden auf der Funkschnittstelle des GSM nach dem Leumundprinzip<sup>5</sup> chiffriert übertragen und in der Funkfeststation dechiffriert (vgl. Abbildung 5.6 und [77]). Die Chiffrierung ist beim GSM auf die Funkschnittstelle  $U_m$  begrenzt.

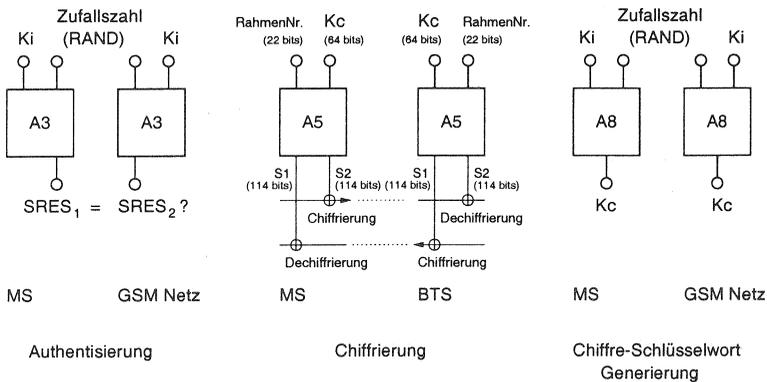


Abbildung 5.6: Authentifizierung, Chiffrierung und Schlüsselgenerierung im GSM

Bei einer Integration auf Netzebene an der A bzw. E-Schnittstelle muß somit nur die einseitige GSM Authentifizierungsfunktion mittels Ki, RAND und der Transformationsvorschrift A3 (vgl. Abbildung 5.6) unterstützt werden. Da A3 vom Netzbetreiber frei gewählt werden kann, jedoch stets auf der SIM-Karte des Endgerätes gespeichert wird<sup>6</sup>, ist keine besondere Absprache zwischen GSM und Satellitennetzbetreiber erforderlich.

### 5.2.3.3 Handover

Bei der Integration auf Netzebene kann man abhängig von der gewählten Integrationschnittstelle zwei unterschiedliche Protokolle zur Handoversteuerung nach GSM unterscheiden. Die genaue Synchronisation zwischen GSM und Satellitenteilnetz zur

<sup>5</sup>Erzeugung eines Codewortes mit Hilfe einer geheimgehaltenen Einwegtransformation und einem geheimen (Ki, Kc) sowie einem öffentlichen Schlüssel (RAND).

<sup>6</sup>Für unterschiedliche Netze können auch mehrere A3 Transformationsvorschriften gespeichert werden.

Durchführung eines synchronen Handovers ist nur sehr aufwendig realisierbar, daher wird hier vom asynchronen Handover ausgegangen, bei dem Daten der Verbindung verloren gehen. Für eine Integration an der A-Schnittstelle ergibt sich die in Abbildung 5.7 dargestellte Signalabfolge. Das benutzte Protokoll basiert auf dem

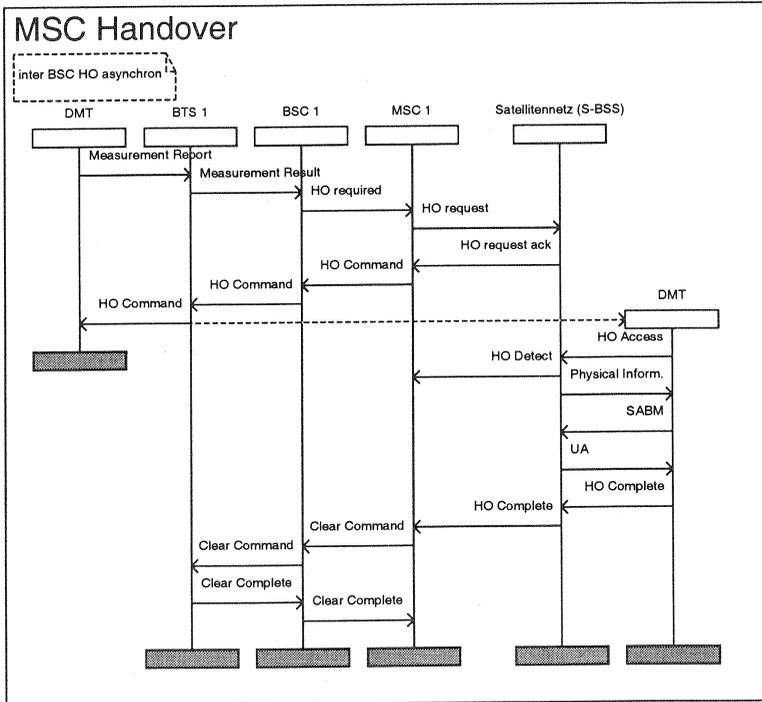


Abbildung 5.7: Asynchroner Inter-BSC Handover

Inter-BSC Handover nach GSM 03.09 [5] und ist bezüglich der Nachrichten, die den Kanalzugriff auf das Satellitennetz betreffen, identisch mit denen zum Zugriff auf eine BTS.

Für die Integration an der E-Schnittstelle kann vom Inter-MSC Handover (vgl. GSM 03.09) Gebrauch gemacht werden. Da die Verteilung der Funktionen auf die Netzelemente des Satellitennetzes nicht bekannt ist, wird es logisch zu einem Netzelement zusammengefasst (vgl. Abbildung 5.8). Der Empfang von Synchronisierungsinformation innerhalb der „Physical Information“ Nachricht entspricht für die dargestellten Signalverläufe dem asynchronen Verhalten des Handoverprotokolls.

#### 5.2.4 Integration auf Datenbankebene

Bei einer Integration auf Datenbankebene folgt die Systemarchitektur des Satellitensystems der Architektur des GSM. Dazu gehört u.a. die Einrichtung von HLRs und VLRs, die sich gegenüber anderen Netzelementen gemäß GSM-Standard verhalten.

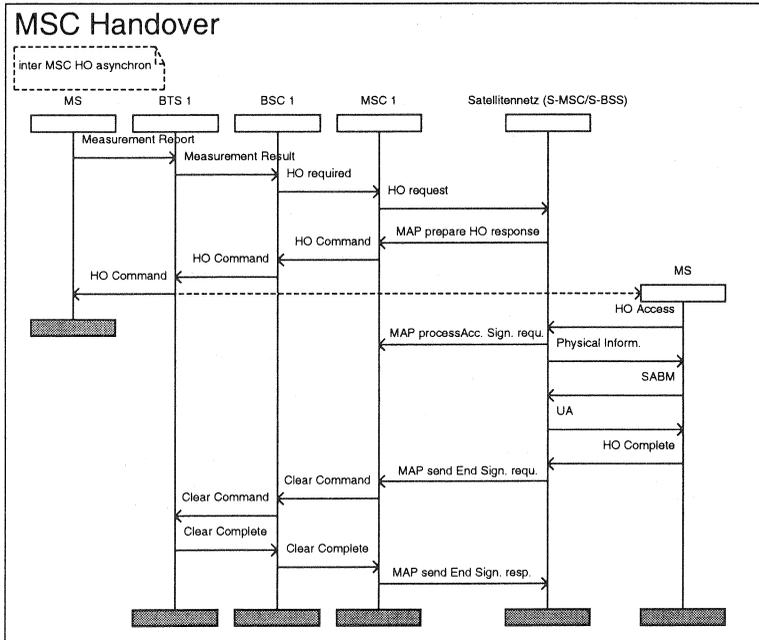


Abbildung 5.8: Asynchroner Inter-MSC Handover

Der Aufbau dieser kompatiblen Datenbanken mit den entsprechenden Schnittstellen erlaubt das Zusammenwirken von Satellitennetz und GSM wie beim internationalen Roaming zwischen verschiedenen GSM-Netzen (PLMN Interworking über MAP). Die Integration auf Datenbankebene ermöglicht keine Signalisierung zwischen einzelnen Netzelementen (außer den Datenbanken). Da dennoch die Mobilität der Benutzer mittels Handover zwischen den Netzen unterstützt werden soll, ist ein zusätzliches Netzelement, der **Mobility-Server** (MobS), erforderlich (vgl. Abbildung 5.9). Der Mobility-Server ist eine Interworking Unit (IWU) auf MSC-Ebene, welche als eigener Signalisierungspunkt im SS 7 verfügbar ist. Logisch gesehen ist der Mobility-Server Teil aller angeschlossenen Netze und bildet eine Schnittstelle mit entsprechenden Sicherheits- und Kontrollfunktionen. Um die Aufenthaltsverwaltung und Inter-MSC-Signalisierung nötig sind, zwischen den beiden Netzen abzubilden, ist ein Aufbau des Mobility-Servers, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, erforderlich. Seine wesentlichen Aufgaben sind:

- Die Abbildung der MAP Nachrichten CHECK\_IMEI, ATTACH\_IMSI, DETACH\_IMSI, ACTIVATE\_TRACE\_MODE, AUTHENTICATE, FORWARD\_NEW\_TMSI und SET\_CIPHERING\_MODE bei der Aufenthaltsaktualisierung. Dabei müssen Parameter wie z. B. der LAI notfalls mit Hilfe von Tabellen von einem Netz in das Format des jeweils anderen Netzes transponiert werden.

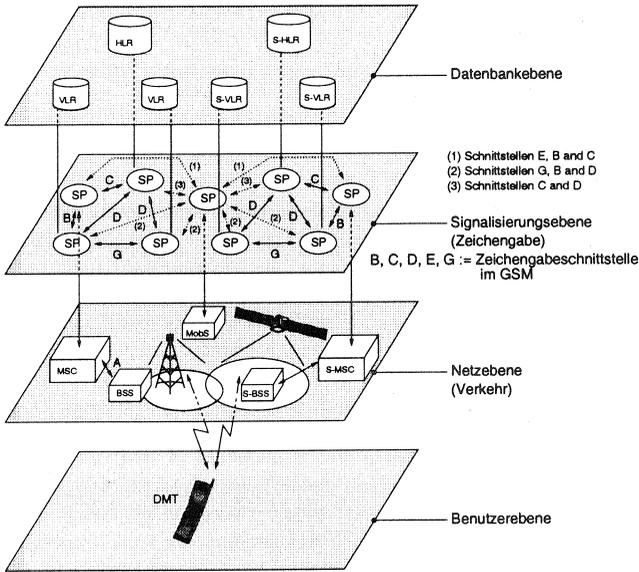


Abbildung 5.9: Integration auf Datenbankebene

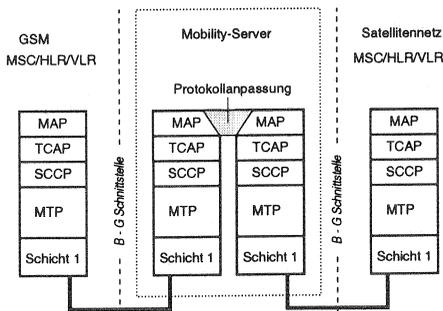


Abbildung 5.10: Protokollstapel des Mobility-Servers (MobS)

- Die Abbildung der MAP Nachrichten PREPARE\_HO, PROCESS\_ACCESS\_SIGNAL und SEND\_END\_SIGNAL beim Inter-MSC (Netz) Hand-over.

Der Mobility-Server ist somit Teil beider Netze und damit eine Vorstufe eines UPT-Server Konzepts (vgl. Abschnitt 5.2.5).

### 5.2.4.1 Verwaltung der Benutzerdaten

Die Benutzerdaten können bei der Integration auf Datenbankebene mit zwei unterschiedliche Strategien verwaltet werden (duale Bereitschaft):

1. Falls beide Netze verfügbar sind, wird die Aufenthaltsaktualisierung in beiden Netzen getrennt durchgeführt.
2. Falls beide Netze verfügbar sind, wird die Aufenthaltsaktualisierung für beide Netze in einem vorher ausgewählten Netz, z. B. GSM, durchgeführt.

Um das Satellitensystem von unnötiger Signalisierung zu entlasten, ist die zweite Strategie von Vorteil und soll im folgenden näher untersucht werden. Damit ein Teilnehmer nicht nur im eigenen Netz, sondern auch in einem Partnernetz die momentane Aufenthaltsinformation erneuern kann, kommen zwei unterschiedliche Verfahren in Frage:

1. Das GSM MAP-Protokoll wird verändert, um gleichzeitig im eigenen (VLR1) und im Partnernetz (VLR2) die Aufenthaltsinformation erneuern zu können. Dies könnte z. B. durch das Versenden von zwei unterschiedlichen MAP\_UPDATE\_LOCATION\_AREA Nachrichten mit den entsprechenden Aufenthaltsbereichennungen (LAI – Location Area Identifier) sowie der Betreuung des weiteren Protokollablaufs bewerkstelligt werden (vgl. Abbildung 5.11).

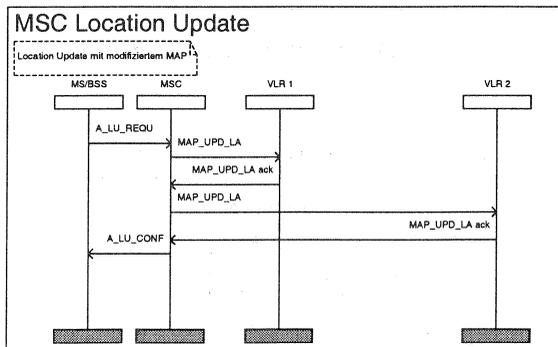


Abbildung 5.11: Aufenthaltsverwaltung mit Verändertem MAP Protokoll

2. Die Aufenthaltsinformation im GSM- und Satellitennetz mit Mobility-Server (MobS) wird alternierend aktualisiert (vgl. Abbildung 2).

Das erste Verfahren ist mit einer Modifikation der Signalisierungsprotokolle des GSM verbunden; falls dies nicht erwünscht ist, sollte die zweite Option verwendet werden. Beide Verfahren erfordern wie bei der Integration auf Endgeräteebene getrennte GSM- und Satellitennetz-Nutzungsverträge des Teilnehmers, mit entsprechenden, unterschiedlichen Rufnummern.

### 5.2.4.2 Sicherheitsanforderungen

Bei der Integration auf Datenbankebene müssen beide Partner das GSM MoU unterzeichnet haben, um die gemeinsamen Authentifizierungsverfahren benutzen zu

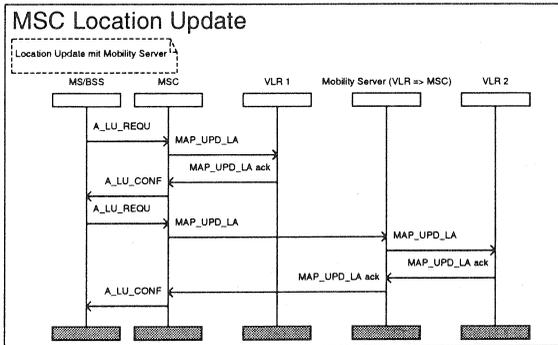


Abbildung 5.12: Alternierende Aufenthaltsverwaltung mit Mobility Server

können. Die Sicherheit innerhalb des integrierten Netzes ist dann analog zur Integration auf Netzebene gewährleistet, vgl. Abschnitt 5.2.4.

### 5.2.4.3 Handover

Beim Handover zwischen GSM- und Satellitennetz ermöglicht der Mobility-Server die Übertragung von MAP/E-Signalisierungsnachrichten und schafft damit die Verbindung zwischen Anker- und Ziel-MSC. Der entsprechende Verlauf des Inter-MSC Handoverprotokolls ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Mit Hilfe des Mobility-Servers (MobS) ist selbst ein Handover zu Systemen möglich, die keinen Inter-MSC Handover unterstützen. Von GSM-Seite wird hierbei zwar ein Inter-MSC Handover ausgelöst, aber mit einem Gesprächsaufbau zum Dual-Mode Endgerät (DMT) fortgesetzt. Ein entsprechender Protokollablauf ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Der Handover kann für diesen Fall ohne merkbare Unterbrechung ausgeführt werden. Abhängig vom Signalisierungssystem, d. h. der Geschwindigkeit des Gesprächsaufbaus des Zielnetzes, vgl. [61], beträgt die gesamte Handoverdauer zwischen 0,5 und 5 Sekunden (bei analogen Signalisierungsnetzen bis zu 15 Sekunden).

### 5.2.5 UPT-Server Integrationskonzept

Im Dezember 1991 wurde von der ETSI ein Konzept zur Erweiterung der Telekommunikationsdienste vorgeschlagen, das unter dem Namen UPT (Universal Personal Telecommunications) geführt wird, vgl. [22]. Mit der Einführung der in Phase 1 spezifizierten UPT Dienste, vgl. [25], wird eine entsprechende Veränderung der bestehenden Telekommunikationsnetze erforderlich. Durch eine Verbesserung der bestehenden Vermittlungsstellen (UPT-Server) kann ein erweitertes Angebot an Zusatzdiensten zur Gesprächssteuerung in Anspruch genommen werden. Abhängig von der Identität des anrufenden Teilnehmers, der Ortszeit sowie benutzerspezifischer Präferenzen kann z. B. ein Anruf entgegengenommen oder entsprechend umgeleitet werden. Den im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Einsatz eines solchen UPT-Servers zusammen mit GSM und einem Satellitennetz zeigt Abbildung 5.15. Durch die nichttransparente Verbindung mit dem UPT-Server<sup>7</sup> (UPTS) werden bei

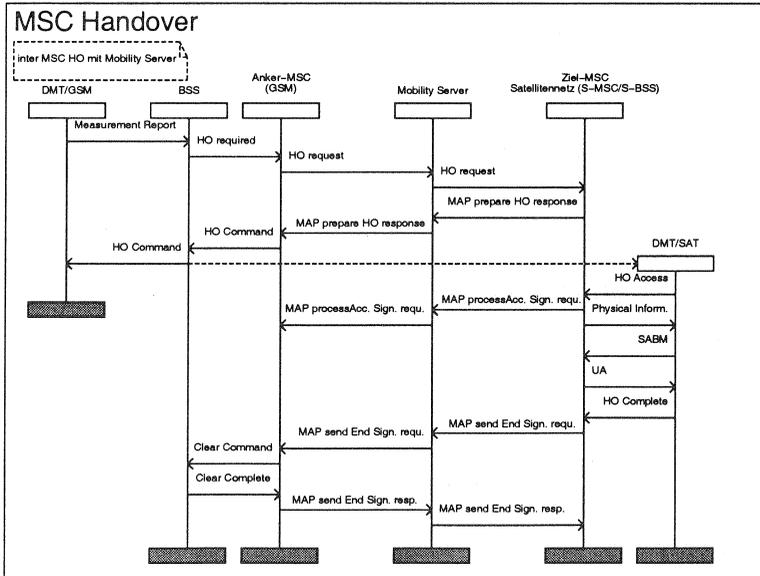


Abbildung 5.13: Inter-MSC Handover mit Hilfe des Mobility-Servers (MobS)

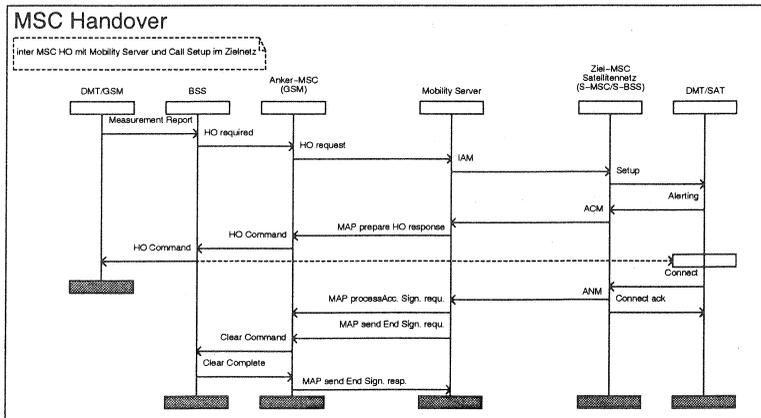


Abbildung 5.14: Inter-MSC Handover mit neuem Gesprächsaufbau im Zielnetz

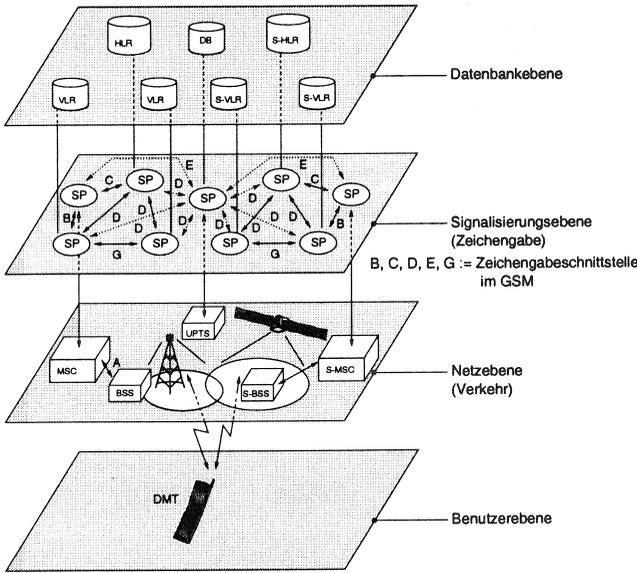


Abbildung 5.15: Integration mit UPT-Server

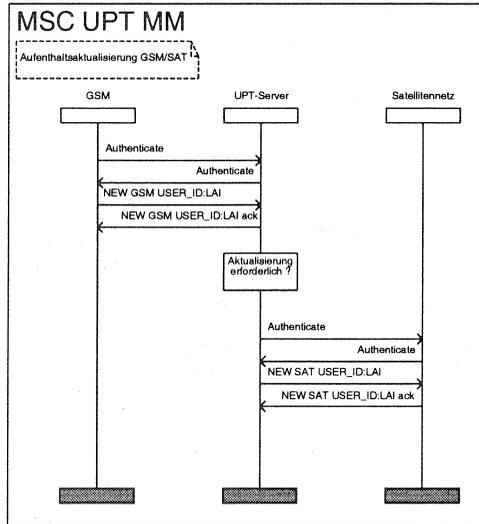
der Integration von GSM und Satellitennetz neue Funktionen zur Unterstützung von gemeinsamer Mobilitätsverwaltung und Handover erforderlich wie nachfolgend beschrieben wird.

### 5.2.5.1 Verwaltung der Benutzerdaten

Der Einsatz eines UPT-Servers ermöglicht die netzübergreifende Mobilitätsverwaltung. Mit Hilfe entsprechender UPT-Funktionen können bei jeder Aktualisierung der Aufenthaltsinformation in einem Netz auch automatisch die Besucherdatei (VLR) anderer Netze von der Veränderung des Aufenthaltsbereichs in Kenntnis gesetzt werden. Abbildung 5.16 zeigt ein Beispiel für ein GSM und ein Satellitennetz. Eine entsprechende Abbildung der einzelnen Aufenthaltsbereiche sowie die Verwaltung von Netzen, die für die Benutzer aktualisiert werden sollen, werden als Dienst vom UPT-Server erbracht. Nur bei nichteindeutiger Abbildung ist eine separate Aufenthaltsaktualisierung in einem Partnernetz erforderlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß mit UPTS im Mittel ein für alle Netze signalisierungssparender Betrieb möglich ist. Als vorteilhafte Besonderheit des UPT-Ansatzes verfügt ein potentieller Teilnehmer zur Nutzung aller Netze nur über einen Vertrag mit dem UPT Service Provider. Er kann in allen Netzen unter einer vom momentan verwendeten Netztyp unabhängigen UPT Rufnummer erreicht werden. Das jeweilige Umsetzen der UPT Rufnummer auf die netzinternen Kennungen wird als Dienst vom UPT-Server erbracht.

<sup>7</sup>Schnittstelle zu beiden MSCs erforderlich



**Abbildung 5.16:** Automatische Aufenthaltsaktualisierung mit gegenseitiger Authentisierung

### 5.2.5.2 Sicherheitsanforderungen

Um den Zugriff von Dritten zu unterbinden, werden bei UPT Diensten zusätzlich zu der UPT-Nummer nach ITU-T Standard E.164 [53] noch eine PUI-Kennung (**P**ersonal **U**ser **I**dentification) sowie bei Bedarf eine PIN-Kennung (**P**ersonal **I**dentification **N**ummer) verwandt, vgl. [25]. Durch entsprechende Verfahren wird die Übertragung dieser sicherheitsrelevanten Informationen geschützt und abhörsicher gemacht. Die Sicherheit ist vergleichbar mit der von GSM-Netzen.

### 5.2.5.3 Handover

In Abbildung 5.17 ist für den Handover-Fall die Funktionalität des UPT-Servers dargestellt. Da alle Gespräche via UPT-Server abgewickelt werden, ist ein Weiterreichen von Gesprächen (Handover) einfach zu bewerkstelligen. Hierzu muß jedoch der Wunsch zum Netzwechsel vom jeweiligen Quellnetz unter Angabe des Zielnetzes an den Server mit Hilfe zusätzlicher Funktionen (im Fall von GSM: MAP-Funktionen) angezeigt werden. Der Server entscheidet dann aufgrund des vorliegenden Benutzerprofils, ob diesem Wunsch nachzugehen ist oder nicht. Entsprechende UPT-Mechanismen zur Authentifizierung sowie zur Veränderung des eigenen Benutzerprofils sind hierfür Voraussetzung. In Abbildung 5.18 ist ein entsprechender Protokollablauf für einen UPT-gesteuerten Inter-Netz Handover dargestellt. Der Handover wird vom Teilnehmer mit dem Dual Mode Endgerät (DMT) über Netz B initiiert und schaltet die aktive Verbindung zwischen einem Endgerät (TE) im Netz A und dem DMT in Netz B zu Netz C um.

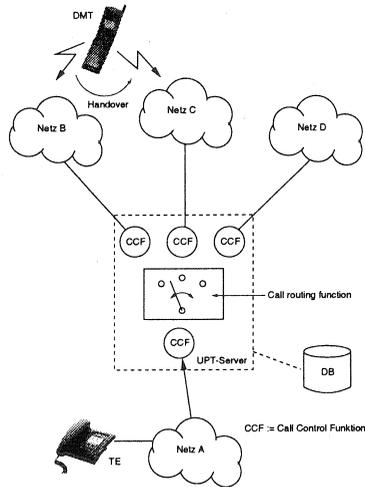


Abbildung 5.17: UPT Gesprächssteuerung und Handover

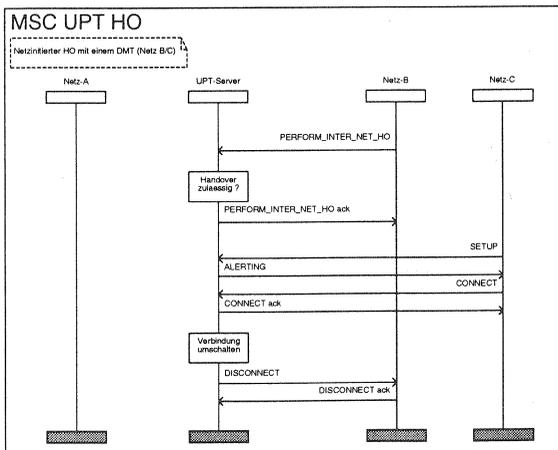


Abbildung 5.18: UPT-Server gesteuerter Inter-Netz Handover

### 5.2.6 Kaskadierte Systeme

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Integrationslösungen werden beim Betrieb eines kaskadierten Systems die integrierten Netze nicht wahlweise benutzt, sondern tragen in Serie dazu bei, die Funkausleuchtung und den Weitverkehrstransport der dienstspezifischen Daten zu bewerkstelligen. Bei der Kombination eines Zugangs- und eines Weitverkehrsnetzes ist es möglich, jedes Netz für sich zu optimieren, um über ein optimales Gesamtsystem zu verfügen. Die maximale Kapazität des Weitverkehrsnetzes muß stets über der des Zugangsnetzes liegen, um Blockierungen zu vermeiden. Die Integration eines drahtlosen Zugangsnetzes auf DECT (WLL) Basis (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) und eines satellitengestützten Transportnetzes im Weitverkehr ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Als Zugangsnetz eignen sich an-

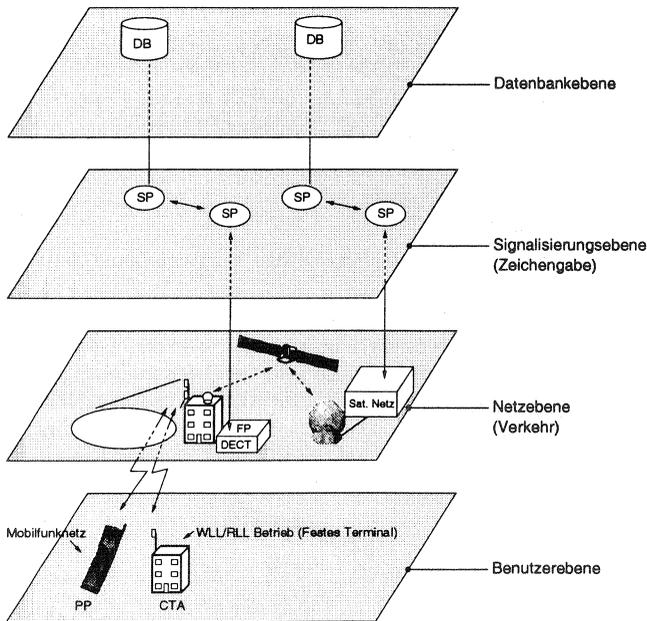


Abbildung 5.19: Kaskadierte Systeme

stelle von DECT auch Netze nach GSM oder anderen zellularen Standards, vgl. [2]. Besonders das DECT System liefert bei gleichzeitiger Unterstützung von Fußgänger-Teilnehmermobilität einen guten Kompromiß zwischen Aufwand und Nutzen beim Netzaufbau und Betrieb. Die hausinterne Nutzung ist bei DECT-Systemen hier die Regel, der Betrieb als Mobilfunknetz<sup>8</sup> auch außerhalb von Gebäuden die Ausnahme.

Werden Dienste über kaskadierten Systeme in Konkurrenz zu Festnetzverbindungen angeboten, ist anzustreben, eine ähnliche Qualität zu erreichen. Um Fest-

<sup>8</sup>Erste Mobilfunknetze auf DECT-Basis werden derzeit in Italien eingesetzt.

und Mobilfunknetze miteinander vergleichen zu können, ist die Definition einer geeigneten Qualitätskenngröße erforderlich (vgl. Gl. 7.55).

### 5.2.6.1 Verwaltung der Benutzerdaten

Entsprechend dem mehrstufigen Ansatz kaskadierter Systeme müssen auch die Benutzerdaten in mehreren Stufen verwaltet werden. Für ein zweistufiges DECT-Satellitensystem nach Abbildung 5.19 müssen die Zuordnung der einzelnen Teilnehmer zu den jeweiligen DECT-Funkfeststationen (FP) sowie die Zuordnung dieser Stationen zu den jeweiligen Satelliten durchgeführt werden.

Sind die einzelnen Funkfeststationen des Zugangsnetzes netzintern miteinander verbunden, so kann ihre Zuordnung zu den Teilnehmern auch innerhalb des Zugangsnetzes in einer Datenbank vorgenommen werden. Die Satelliten, die jeweils zum Bedienen des Zugangsnetzes erforderlich sind, werden als Funktion der Zeit vom Satellitensubsystem ermittelt.

Sind die einzelnen Funkfeststationen des Zugangsnetzes nur über das Satellitensubsystem miteinander verbunden, ergeben sich zwei Möglichkeiten zur Verwaltung der Zuordnungsdatenbank. Zum einen kann die Verwaltung im Zugangsnetz erfolgen. Bei einem ankommenden Ruf müssen dann alle Subsysteme einzeln gerufen werden, da sie sich untereinander nur mit beträchtlichem Signalisierungsaufwand bezüglich des Aufenthaltsortes eines speziellen Teilnehmers verständigen können. Alternativ kann die Zuordnung zusätzlich zur Zuordnung der Funkfeststationen zu den Satelliten zentral im Satellitensubsystem erfolgen. Dies ist jedoch mit erhöhtem Signalisierungsaufwand bei der Aufenthaltsaktualisierung verbunden. Welches Verfahren für ein geplantes Netz optimal ist, hängt vom konkreten Aufbau des Zugangs- und Weitverkehrsnetzes sowie der Wichtung der Signalisierungslast durch Funkruf und Aufenthaltsaktualisierung ab. Eine pauschale Aussage kann deshalb nicht gemacht werden.

### 5.2.6.2 Sicherheitsanforderungen

Eine Authentifizierung der Teilnehmer, der Funkfeststationen sowie des Satellitensystems erfolgt in jedem Subsystem nach dem jeweiligen Standard getrennt, so daß keine zentrale Verwaltung von sicherheitsrelevanten Daten erforderlich ist.

### 5.2.6.3 Handover

Ein Handover ist in einem kaskadierten System auf verschiedenen Ebenen erforderlich. Wechselt z. B. ein Teilnehmer während eines Gesprächs den Funkversorgungsbereich eines drahtlosen Zugangsnetzes<sup>9</sup>, so wird ein Handover durchgeführt, falls dies vom System aus zugelassen wird.

Bewegen sich die Satelliten, so müssen bestehende Verbindungen u. U. von einer Funkfeststation zur nächsten weitergereicht werden. Da die jeweiligen Handover im Zugangs- und Weitverkehrsnetz jeweils netzintern stattfinden, können sie auch am effektivsten durch das jeweilige Netz ohne Einbeziehung fremder Netze durchgeführt werden.

---

<sup>9</sup>Nur bei mobilen Teilnehmern, nicht bei WLL

### 5.3 Zielsysteme

Entsprechend der Aufgabenstellung dieser Arbeit sollen verschiedene Zielsysteme mit Integration verschiedener terrestrischer und satellitengestützter Kommunikation entwickelt und bewertet werden. Dabei werden die in Abschnitt 5.2 beschriebenen, in dieser Arbeit entwickelten Konzepte zur Mobilitätsverwaltung vorausgesetzt.

Die im folgenden vorgestellten Zielsysteme basieren auf der Integration von ISDN, GSM oder DECT und satellitengestützten Systemen wie IRIDIUM bzw. TELEDESIC. Sie werden im Rückgriff auf die oben genannte Einteilung und die Funktionalitäten integrierter Kommunikationsnetze entworfen und stellen ausschließlich Neukonzeptionen dar, da derartige Zielsysteme bisher nicht bekannt sind. Ihre verkehrstheoretische und simulative Bewertung erfolgt in den Kapiteln 7, 8 und 9.

Die betrachteten Zielsysteme sind wie erwartet u.a. für entlegene Gebiete dieser Welt von Interesse, denen überhaupt keine Telekom-Infrastruktur verfügbar ist oder Inselnetze bestehen. Das trifft für weite Teile Asiens (China, Indien und Indonesien), Afrikas, Mittel- und Südamerikas usw. zu.

#### 5.3.1 Integration von ISDN und Satellitensystemen

Netze nach ISDN Standard (vgl. [78]) bieten als Basisanschluß dem Teilnehmer eine Kombination aus zwei 64 kbit/s Datenkanälen, den B-Kanälen, und einem 16 kbit/s Signalisierungskanal, dem D-Kanal, an. Die Datenkanäle sind u. U. in Form einer passiven Busleitung ausgeführt und erlauben dann den wahlweisen Anschluß von bis zu acht Endgeräten mit verschiedenen Endziffern. Gleichzeitig können jedoch nur zwei (bei Nutzung des D-Kanals zur Datenübertragung drei) Geräte eine Verbindung betreiben. Der Bus darf maximal 1000 m lang sein. Gerade in Gebieten ohne sonstige Telekommunikationsinfrastruktur ist es deshalb von großem Interesse, Netze nach ISDN Standard zu nutzen und z. B. über satellitengestützte Kommunikation untereinander, aber auch mit dem nationalen und internationalen Fernsprechnetz zu verbinden.

Ein Szenarium zur Integration einer ISDN Nebenstellenanlage (PABX – Private Automatic Branch Exchange) mit einem IRIDIUM- oder TELEDESIC-artigen Satellitensystem ist in Abbildung 5.20 dargestellt. In diesem Zielsystem (kaskadiert)

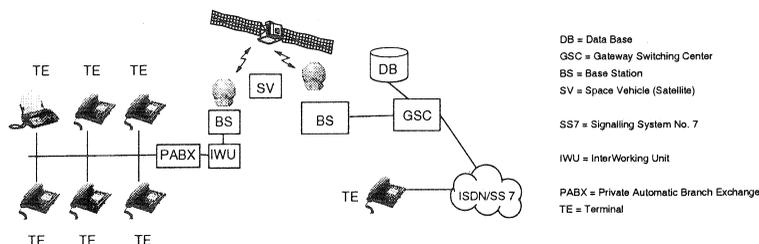


Abbildung 5.20: Kaskadierte ISDN und satellitengestützte Kommunikation

wird das im ISDN erzeugte Verkehrsangebot durch eine Interworking Unit (IWU) über die Luftschnittstelle des Satellitensystems zum Satelliten (SV) und von dort aus zur nächsten Bodenstation (BS) übertragen (und umgekehrt). Mit Hilfe eines

Gateway Switching Centers (GSC) wird die Bedienung der nationalen und internationalen Fernmeldenetze ermöglicht. Derartige Anordnungen unter Nutzung geostationärer Satelliten sind schon seit etwa 20 Jahren im Gebrauch, z. B. via DFS Kopernikus. Die maximale und mittlere Kapazität und Dienstgüte des bedienbaren ISDN Verkehrs pro km<sup>2</sup> steht in direktem Zusammenhang mit der maximalen und mittleren Kapazität und Dienstgüte des Satellitensystems. Für eine genaue Analyse wird auf Kapitel 7 und 9 verwiesen.

### 5.3.2 Integration von GSM und Satellitennetz

In der Praxis können Systeme nach GSM-Standard mit satellitengestützten Kommunikationsnetzen auf zwei Arten zu einem Zielsystem integriert werden.

Zum einen besteht die Möglichkeit, eine Integration auf Terminal-, Netz oder Datenbankebene durchzuführen. Da bei den ersten satellitengestützten Mobilfunknetzen (IRIDIUM, GLOBALSTAR) ein eigenständiger Netzaufbau und -betrieb angestrebt wird, scheidet die Integration auf Netzebene aus. Um dennoch durch die Integration ein Maximum an Funktionalität zu erhalten (vgl. Abschnitt 5.2.4), bietet sich die in Abbildung 5.21 dargestellte Integration auf Datenbankebene an. Eine ge-

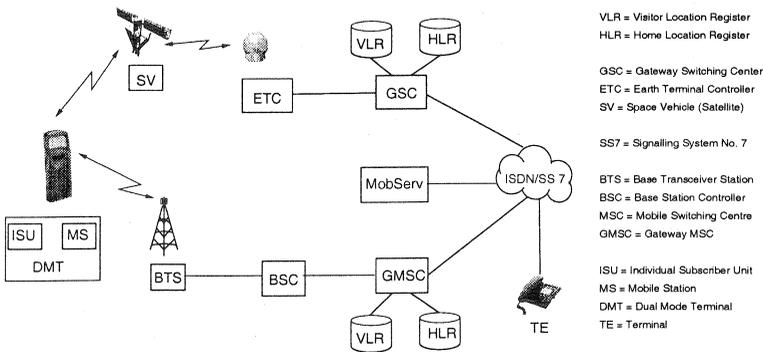


Abbildung 5.21: Integriertes GSM und Satellitennetz-Zielsystem

naue Leistungsbewertung dieses Zielsystems bezüglich der wechselseitigen Beeinflussung der Kapazität und Dienstgüte beider Systeme sowie der Mobilitätsverwaltung und des Zeitbedarfs für Handover folgen in Kapitel 7 und 9.

Zum anderen besteht die Möglichkeit, das Verkehrsangebot eines gesamten GSM-Netzes (vgl. Abbildung 5.22A) oder nur einer lokalen, schwer zugänglichen BTS (vgl. Abbildung 5.22B) mit Hilfe eines kaskadierten Systems unter Verwendung satellitengestützter Kommunikation zu bedienen. Welche Kapazität und Dienstgüte bei einem solchen Zielsystem zu erwarten sind, wird im Rahmen dieser Arbeit analog zur Analyse des ISDN Zielsystems untersucht (vgl. Kapitel 7 und 9).

### 5.3.3 Integration von DECT/WLLs und Satellitennetz

Als ein neuartiges, für die Praxis sehr interessantes Zielsystem ergibt sich die Integration eines drahtlosen Zugangsnetzes (WLL) auf DECT Basis (vgl. Abschnitt 2.2.2.2)

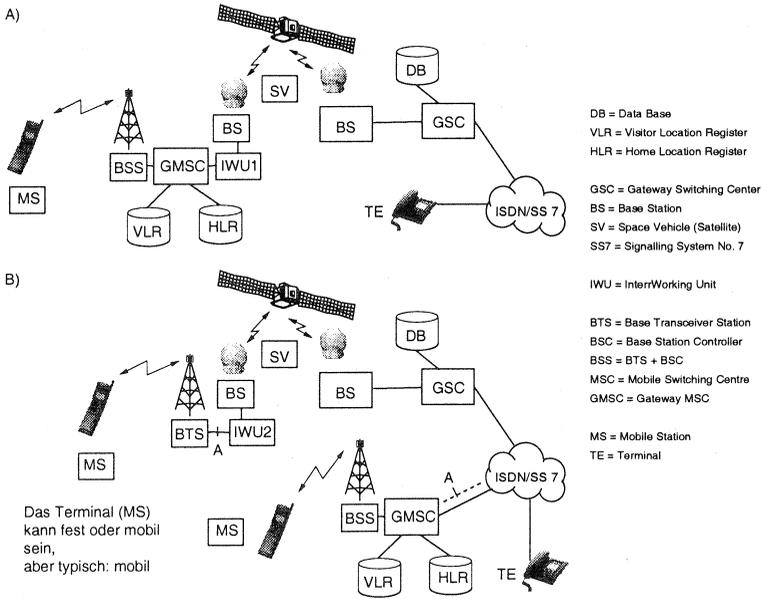


Abbildung 5.22: Kaskadierte GSM und Satellitennetz-Zielsysteme

mit einem satellitengestützten Mobilfunknetz. Da DECT-Systeme aufgrund ihrer geringen Komplexität sehr schnell und preiswert aufgestellt und betrieben werden können (vgl. [2]), ergibt sich eine attraktive Lösung zur Versorgung mit drahtloser Kommunikation, nicht nur für Gebiete ohne feste Telekommunikationsinfrastruktur. In Abbildung 5.23 ist die netztechnische Realisierung eines solchen Zielsystems dargestellt. Die verfügbare Dienstgüte und Kapazität bei der Integration eines draht-

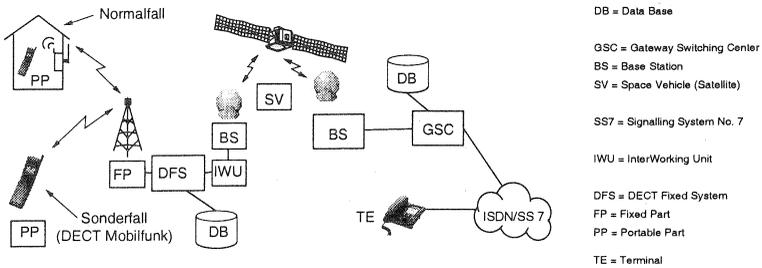


Abbildung 5.23: Kaskadiertes DECT/WLL und Satellitennetz-Zielsystem

losen Zugangnetzes auf DECT Basis und einem satellitengestützten Mobilfunknetz werden in Kapitel 7 und 9 untersucht.

## Der NeSSiE–Simulator zur Leistungsbewertung

### 6.1 Einleitung

Der NeSSiE<sup>1</sup>- Simulator wurde speziell für die Leistungsbewertung integrierter, terrestrischer und satellitengestützter Kommunikationsnetze dieser Arbeit entwickelt. Das Simulationswerkzeug beruht auf ereignisgesteuerten Zustandsautomaten, mit einer Systemarchitektur, die neben technischen Randbedingungen auch strenge softwaretechnische Entwurfskriterien erfüllt. Zu nennen sind hier:

- Modularität und Erweiterbarkeit,
- Multifunktionalität,
- Speicher- und Laufzeiteffizienz.

Die Modularität und Erweiterbarkeit des Gesamtsystems wird dadurch sichergestellt, daß der Simulator strukturell aus fünf nach logischen Gesichtspunkten getrennten Funktionsmodulen besteht (vgl. Abbildung 6.1).

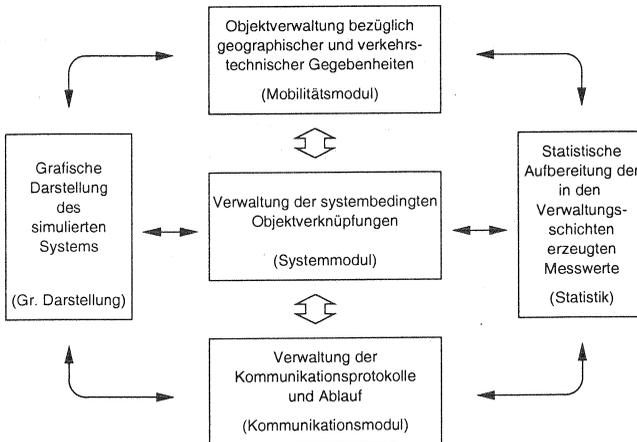


Abbildung 6.1: Struktur des NeSSiE Simulators

Jedes Modul erfüllt genau festgelegte Aufgaben (vgl. Abschnitt 6.3), der Datentransfer zwischen den einzelnen Modulen erfolgt über genau definierte Schnittstellen.

Die Multifunktionalität des Simulators ermöglicht eine Untersuchung terrestrischer und satellitengestützter Kommunikationsnetze. Unterschiedliche Systeme mit

<sup>1</sup>Network Satellite Simulation Environment

verschiedenartigen Kanalmodellen, Funkschnittstellen, Funkbetriebsmittelverwaltungen und Kommunikationsprotokollen sind für die folgenden Untersuchungen implementiert worden.

In diesem Kapitel werden die Entwurfsmethodik und die Projektverwaltungswerkzeuge sowie die Softwarearchitektur des Simulators NeSSiE kurz vorgestellt. Die simulativ erzielten Meßergebnisse, die in Kapitel 8 und 9 beschrieben werden, stammen aus der Anwendung des Simulators für die verschiedenen neu erstellten Protokolle und Szenarien (vgl. Kapitel 5).

## 6.2 Softwareentwurfsmethoden und Werkzeuge zur Projektverwaltung

Beim Entwurf eines Simulationswerkzeuges müssen unter Beachtung von Randbedingungen wie Modularität, Laufzeit- und Speichereffizienz die technischen Anforderungen eines Zielsystems in Softwarestrukturen übertragen werden. Die wesentlichen technischen Merkmale eines fiktiven oder real existierenden Systems sollen damit schnell und kostengünstig in Bezug auf gewünschte Eigenschaften untersucht und bewertet werden können.

### 6.2.1 Technische Anforderungen

Der NeSSiE-Simulator beruht auf technischen Anforderungen die aus den in dieser Arbeit untersuchten Themenbereichen und Funktionalitäten folgen:

- Leistungsbewertung unterschiedlicher Verfahren zur Mobilitätsverwaltung integrierter GSM und IRIDIUM-artiger Mobilfunksysteme,
- Leistungsbewertung unterschiedlicher Handoververfahren in integrierten GSM- und IRIDIUM-artigen Mobilfunksysteme und
- Leistungsbewertung von Übertragungsqualität und -güte kaskadierter terrestrischer und satellitengestützter Mobilfunknetze.

Als konkrete technische Anforderungen ergeben sich hieraus:

- Modellierung der Mobilität von Teilnehmern und Satelliten,
- Modellierung der verwendeten Funkschnittstellen,
- Modellierung der Funkbetriebsmittelverwaltung (Kanalvergabe und Handover) in den betrachteten Systemen,
- Modellierung der Kommunikationsprotokolle,
- Modellierung der Mobilitätsverwaltungs-, Handover- und Aufenthaltsverwaltungsstrategien,
- Bereitstellung von Simulationsüberwachungsmechanismen und
- Bereitstellung statistischer Verfahren zur Auswertung der Ergebnisse.

### 6.2.2 Modularität und Effizienz

Abhängig vom simulierten Szenarium kommt in der Regel nur ein Teil der maximal möglichen Funktionalität pro Simulationslauf zum Einsatz. Daraus ergibt sich die Forderung nach einem modular konfigurierbaren Aufbau des Simulators. Der auf der Basis der Klassenbibliothek CNCL<sup>2</sup> objektorientiert in C++ implementierte NeSSiE-

<sup>2</sup>Am Lehrstuhl verfügbare Communication Networks Class Library [59]

Simulator verfügt deshalb über weitreichende Möglichkeiten zur individuellen szenarioabhängigen Konfiguration. Ein Kompromiß zwischen den gegensätzlichen Forderungen nach Laufzeit- und Speichereffizienz wurde durch eine transparente, aber dynamische Speicher- und Objektverwaltung gefunden.

### 6.2.3 SNIFF+

Das kommerziell erhältliche Programmpaket SNIFF+, das zur Projektverwaltung der Software des NeSSIE-Simulators benutzt wird, verfügt über eine umfangreiche Palette von Diensten, die das Erstellen und die Verwaltung von Softwarecode unterstützen. Neben einer benutzerfreundlichen grafischen Schnittstelle (vgl. Abbil-

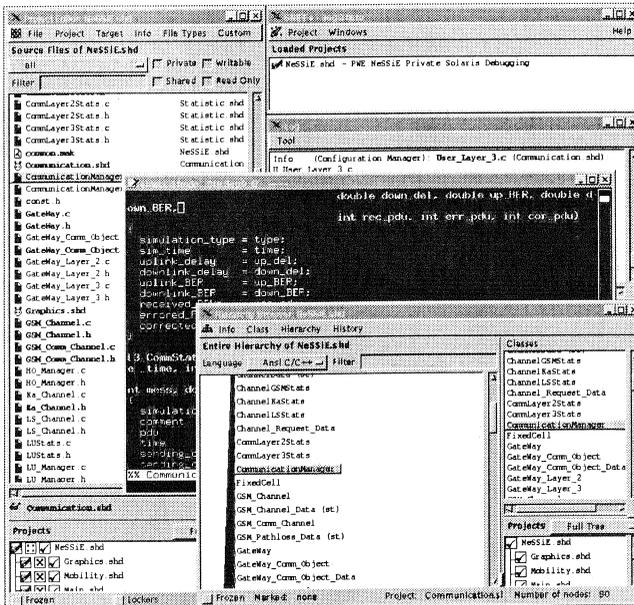


Abbildung 6.2: Die SNIFF+ Software-Projektverwaltung

dung 6.2) zur Versionsverwaltung mittels CVS<sup>3</sup> stellt SNIFF+ vielfältige Funktionen zur Bearbeitung von Softwarecode sowie zur Visualisierung von Programmverknüpfungen (Klassen, Methoden, Variablen) zur Verfügung. Auch die Dokumentation des in dieser Arbeit erstellten Simulators wurde mit Hilfe des SNIFF+ eigenen HTML<sup>4</sup>-Dokumentationsverwaltung erzeugt.

<sup>3</sup>Concurrent Version System (GNU Lizenz)

<sup>4</sup>HyperText Markup Language

## 6.3 Software-Architektur

Die Software-Architektur des NeSSiE-Simulators ist in fünf Hauptmodule unterteilt, nämlich Mobilität, System und Kommunikation sowie die graphische Darstellung und die statistische Auswertung der Ergebnisse des Simulators.

### 6.3.1 Mobilitätsmodul

Der Aufbau des Mobilitätsmoduls des NeSSiE-Simulators ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Das Modul ist zuständig für die dynamische Verwaltung der physikalischen

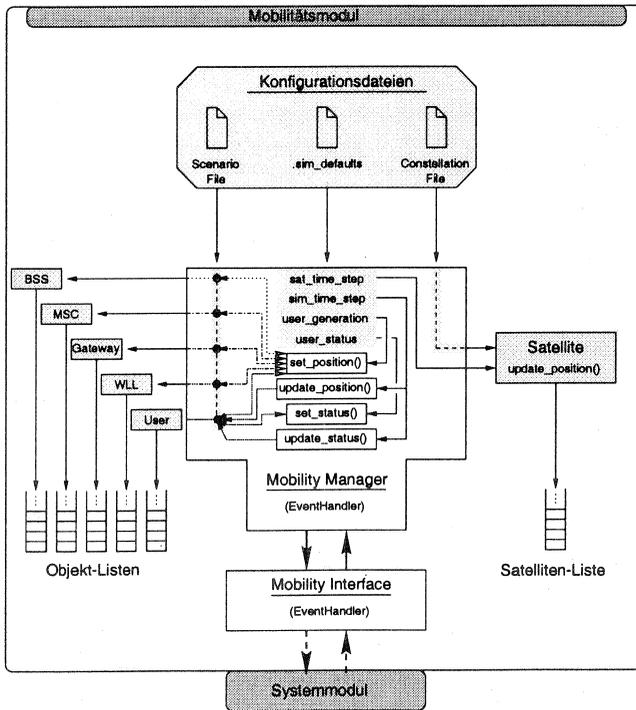


Abbildung 6.3: Mobilitätsmodul des NeSSiE-Simulators

Netzkomponenten im Simulationsmodell des Simulators. Folgende Funktionen sind implementiert:

- Dynamisches Erzeugen und Löschen der Datenobjekte für Teilnehmer, Satelliten, Bodenstationen, WLL-Knoten und GSM Komponenten (MSC, BSS),
- Verwaltung der konfigurierbaren geographischen Position jedes Netzelementes sowie der Veränderungen aufgrund vorhandener Mobilität je Simulationszeitschritt (Teilnehmer, Satelliten) und
- Verwaltung des angebotenen Verkehrs je Teilnehmer und WLL.

### 6.3.2 Systemmodul

In Abbildung 6.4 ist der Aufbau des Systemmoduls dargestellt. Neben der Ver-

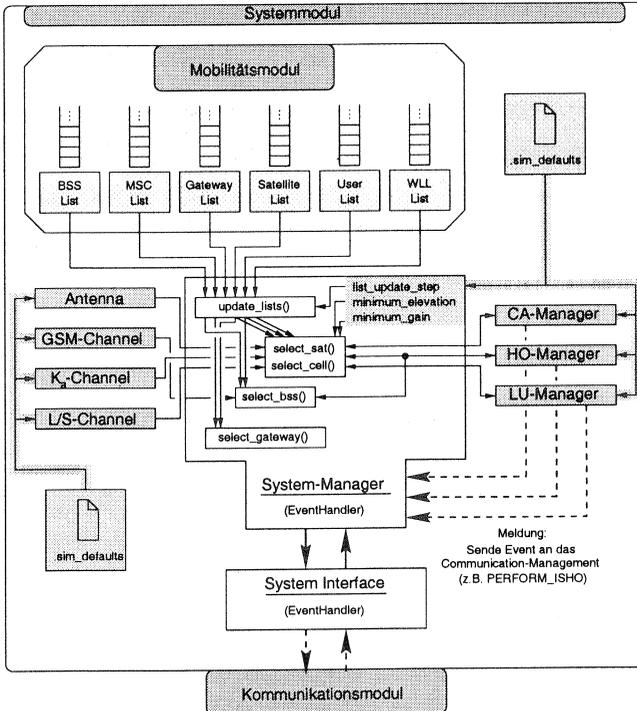


Abbildung 6.4: Systemmodul des NeSSiE-Simulators

waltung der Verbindungsdaten einzelner Netzelemente der Simulation (vgl. Abschnitt 6.3.1) sind in diesem Modul folgende Funktionalitäten implementiert:

- Konfiguration und Zugriff auf die jeweiligen Antennen der Netzelemente,
- Konfiguration und Zugriff auf die in dieser Arbeit benutzten Funkschnittstellen (vgl. Kapitel 2 und 3),
- Funkbetriebsmittelverwaltung der Netzelemente,
- Handoversteuerung bei Handover ohne Kommunikationsprotokolle und
- Aufenthaltsverwaltungsstrategien.

### 6.3.3 Kommunikationsmodul

Das Kommunikationsmodul beinhaltet die Implementierung der untersuchten Kommunikationsprotokolle auf der Basis erweiterter endlicher Automaten (EFSM<sup>5</sup>). Die Struktur des Moduls ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Zum Zeitpunkt der Untersu-

<sup>5</sup>Extended Finite State Machine

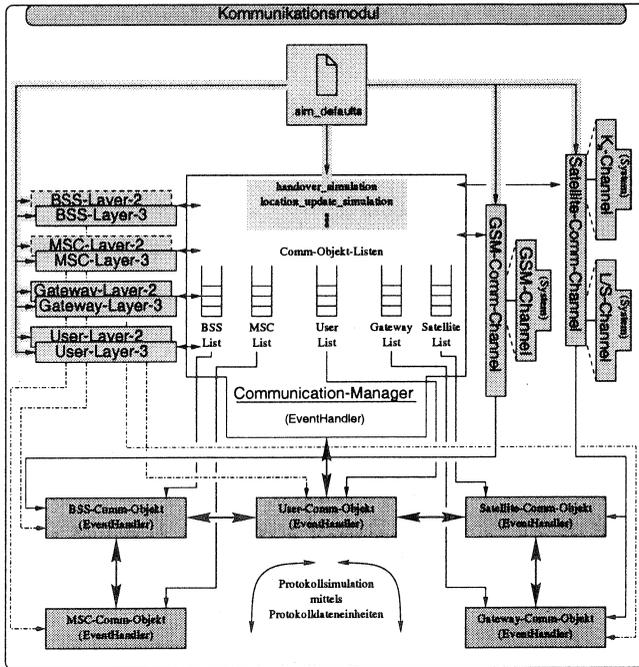


Abbildung 6.5: Kommunikationsmodul des NeSSiE-Simulators

chung zählen zu den implementierten Protokollen:

- Synchroner und Asynchroner Handover nach GSM 03.09 [5],
- Location Update (Aufenthaltsverwaltung) nach GSM 09.02 [7],
- modifiziertes LAPDm (vgl. GSM 04.06 [6]) für mobilen Satellitenfunk (LAPDs),
- Send-and-Wait-, Go-back-N- (REJ) und Selective-Rject-ARQ (SREJ) Verfahren, vgl. [29], und
- hybride ARQ (HARQ, vgl. [29]) Verfahren.

Aufgrund der sauberen Modularisierung des Simulators können bei Bedarf zusätzliche Protokolle hinzugefügt werden.

### 6.3.4 Statistik und Ablaufsteuerung

Im Statistik- und Ablaufsteuerungsmodul des NeSSiE-Simulators ist die Erfassung, Aufbereitung und Ausgabe aller statistischen Informationen, die während eines Simulationslaufes generiert werden, implementiert. Abbildung 6.6 stellt den prinzipiellen Aufbau des Moduls dar. Im NeSSiE-Simulator können statistische Daten über die folgenden im Simulator verwalteten Kennwerte, Verfahren und Protokolle erfasst werden:

- geographische Lage und Bewegung der einzelnen Netzelemente,

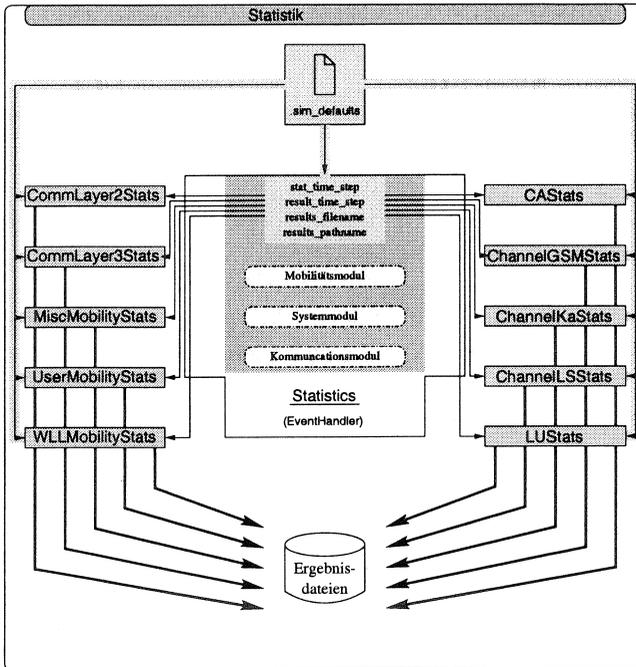


Abbildung 6.6: Statistik und Ablaufsteuerung des NeSSiE-Simulators

- Funkausleuchtung der verwendeten Funkstationen,
- momentaner Signalpegel und momentane Signalgüte (CIR,  $E_b/N_0$ , Abschattungsgrad) sowie Bit- und Paketfehlerrate (BER, PER),
- implementierte Verfahren zur Funkbetriebsmittelverwaltung,
- implementierte Verfahren zur Aufenthaltsverwaltung in mobilen Satellitensystemen und
- untersuchte Kommunikationsprotokolle der Sicherungs- und Netzschicht (vgl. Abschnitt 6.3.3).

Die Daten dienen dabei sowohl der Leistungsbewertung ausgewählter Verfahren und Protokolle als auch der Ablaufsteuerung des Simulationsprozesses während der Laufzeit. Um die jeweils gewünschte Signifikanz der Ergebnisse mit Sicherheit gewährleisten zu können, wird zur Simulationssteuerung der LRE<sup>6</sup> Algorithmus (vgl. [92]) verwandt. Damit können alle Simulationsergebnisse bis auf einen vorgegebenen statistischen Fehler genau bestimmt werden.

### 6.3.5 Grafische Darstellung

Zur Konfiguration, Demonstration und Visualisierung der simulierten Szenarien verfügt der NeSSiE-Simulator über eine graphische Benutzeroberfläche (vgl. Abbil-

<sup>6</sup>Limited Relative Error



## Verkehrstheoretische Analyse

Zur Untersuchung der komplexen Vorgänge in realen Mobilfunknetzen bedient man sich der Modellbildung und der Beschreibung des Verhaltens durch Zufallsprozesse. Verkehrstheoretische Modelle erlauben Aussagen über die Zufallsprozesse des Systems.

Bei der Untersuchung von Kommunikationsnetzen ist die Modellierung in Form von Bediensystemen vorteilhaft, die z. B. Aussagen über Verlustwahrscheinlichkeiten oder Wartezeiten von Verarbeitungswünschen erlauben.

Im folgenden soll für die in Kapitel 5 vorgestellten Zielsysteme eine verkehrstheoretische Analyse vorgenommen werden, die eine Aussage über die Leistungsfähigkeit integrierter Kommunikationssysteme ermöglicht. Die Zielsysteme werden hierbei auf eine Reihe von Referenzsystemen abgebildet, die zunächst vorgestellt werden.

### 7.1 Verkehrstheoretische Referenzsysteme

Um maßgebliche Aussagen über Zufallsprozesse von existierenden oder geplanten Zielsystemen machen zu können, muß ein zu untersuchendes System auf seine wesentlichen Eigenschaften und Verhaltensvorschriften reduziert werden. Diese können dann in einem mathematisch beschreibbaren (Referenz-)System modelliert und bewertet werden. Man geht dabei von unabhängigen (nicht koordinierten) Teilnehmern aus, deren Verbindungswünsche als „Rufe“ zufällig im Modell auftreten und einen Kommunikationskanal (Bediener) für eine zufällige Dauer belegen.

#### 7.1.1 M/M/n-Verlustsystem ohne Warteplätze

Das M/M/n-Verlustsystem besteht aus gedächtnislosen Ankunfts- und Bedienprozessen mit  $n$  gleichartigen Bedienern, wobei die Eingabeabstände zweier aufeinanderfolgender Ankünfte (Rufe)  $\tau_a$  sowie die Bediendauern  $\tau_b$  exponentiell mit folgenden Dichtefunktionen verteilt sind:

$$f(\tau_a) = \lambda e^{-\lambda \tau_a} \quad (7.1)$$

$$f(\tau_b) = \mu e^{-\mu \tau_b} \quad (7.2)$$

Die Parameter  $\lambda$  und  $\mu$  beschreiben die mittlere Ankunfts- und Bedienrate.

Da es sich um ein Verlustsystem ohne Warteplätze handelt, werden nicht bedienbare Ankünfte abgewiesen. Der mittlere angebotene Verkehr berechnet sich aus dem Verhältnis von mittlerer Ankunfts- zu Bedienrate<sup>1</sup>:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\mu} \quad (7.3)$$

In Abbildung 7.1 ist das Wartemodell des Verlustsystems dargestellt. Wie aus der

<sup>1</sup>Es wird von einer genügend großen Teilnehmerzahl  $N$  im System ausgegangen, so daß die mittlere Ankunftsrate  $\lambda$  unabhängig von der momentanen Belegung der  $n$  Bediener ist.

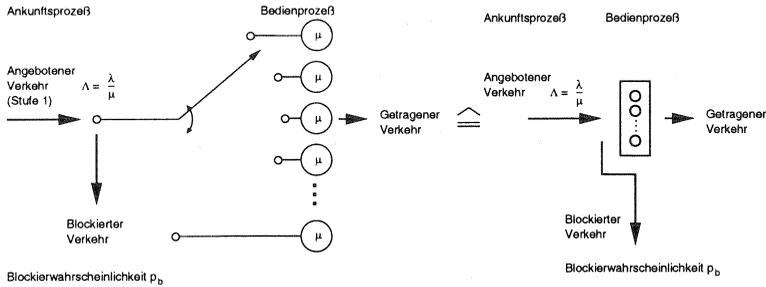


Abbildung 7.1: M/M/n-Verlustsystem ohne Warteplatze

Literatur bekannt [63], läßt sich das M/M/n -Verlustsystem ohne Warteplatze als Markov-Kette modellieren, womit man die Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  eines ankommenden Rufes als sog. Erlang-B Formel berechnet:

$$p_b = E_1(\Lambda, n) = \frac{(\Lambda^n/n!)}{\sum_{i=0}^n \Lambda^i/i!}. \tag{7.4}$$

Gl. 7.4 kann auch genutzt werden, um bei bekannter Bedienerzahl  $n$  und gewünschter Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  den maximal zulässigen mittleren angebotenen Verkehr  $\Lambda$  zu berechnen. In Abbildung 7.1.1 ist die Blockierwahrscheinlichkeit als Funktion der Bedienerzahl  $n$  und des mittleren angebotenen Verkehrs in Erlang dargestellt.

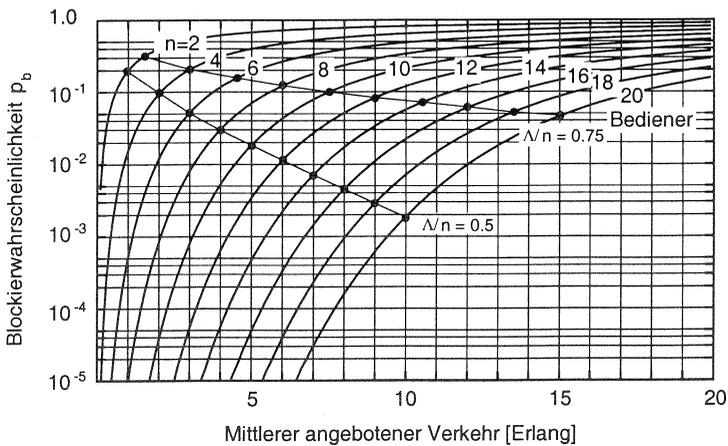


Abbildung 7.2: Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  nach Erlang

Es ist zu erkennen, daß bei steigender Anzahl von Bedienern ( $n$ ) für ein konstantes Verhältnis ( $\Lambda/n$ ) von angebotenen Verkehr zur Anzahl der Bediener die

Blockierwahrscheinlichkeit abnimmt. Diese Tatsache wird als „Bündelungsgewinn“ bezeichnet.

### 7.1.2 Handovermodellierung

In zellularen Mobilfunknetzen wird zur Unterstützung der Teilnehmermobilität eine bestehende Verbindung bei Bedarf von Zelle zu Zelle weitergereicht (Handover). Ist die Anzahl der Teilnehmer pro Zelle groß sowie das Verhalten der einzelnen Teilnehmer näherungsweise unkorreliert, so läßt sich der Ankunftsprozeß in jeder Zelle für Handoverwünsche durch einen Poissonprozess mit Parameter  $\lambda_h$  modellieren.

Durch Handoverwünsche von bestehenden Verbindungen in Nachbarzellen entsteht in jeder Zielzelle ein zusätzliches Verkehrsangebot, das bevorzugt berücksichtigt werden muß, um Verbindungen nicht zu unterbrechen. Bei erfolgreichem Handover in eine Nachbarzelle wird die Ursprungszelle entlastet, so daß im Mittel der zuströmende dem abgehenden Handoververkehr entspricht.

Abbildung 7.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines entsprechenden verlustbehafteten Wartemodells. Wie bereits erwähnt, wird vom statistischen Gleichgewichtsfall

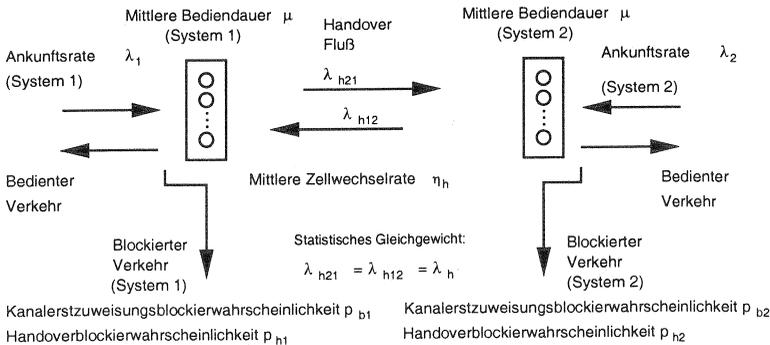


Abbildung 7.3: Handover-Wartemodell mit Verlust

ausgegangen, so daß:  $\lambda_{h21} = \lambda_{h12} = \lambda_h$  gilt. Die Aufenthaltsdauer  $\tau_h$  eines mobilen Teilnehmers innerhalb einer Zelle wird negativ exponentiell verteilt angenommen mit einem Mittelwert  $1/\eta_h$ :

$$f(\tau_h) = \eta_h e^{-\eta_h \tau_h} \tag{7.5}$$

$\eta_h$  beschreibt die mittlere Zellwechselrate eines mobilen Teilnehmers.

Werden in den einzelnen Zellen für den zu erwartenden Handoververkehr keine Kanäle exklusiv reserviert, so läßt sich die zu erwartende Kanalblokkierwahrscheinlichkeit ( $p_b$ ) mit Hilfe der in Abbildung 7.4 dargestellten Markov-Kette berechnen. Ein Zustand  $Z_i$  des Modells wird durch die gleichzeitige Belegung von  $i$  Bedientern definiert. Die Ankunftsrate wird aus der Summe der mittleren Ankunftsraten von neuentstandenen und Handover-Verbindungen gebildet:  $\lambda + \lambda_h$ . Als Bedienrate resultiert die Summe aus mittlerer Zellwechsel- und Gesprächsrate:  $\mu + \eta_h$ .

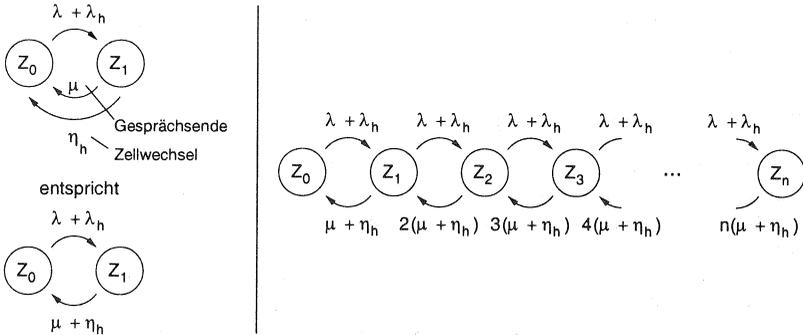


Abbildung 7.4: M/M/n-Markov-Kette ohne Reservierung von Bedienern für Handover für ein Verlustsystem mit  $n$  Bedienern

Für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten  $P(Z_i)$  folgt aus den Vollständigkeitsbedingungen für jeden Zustand  $Z_i$ :

$$P(Z_1) = \frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h} \cdot P(Z_0) \tag{7.6}$$

$$P(Z_2) = \frac{\lambda + \lambda_h}{2(\mu + \eta_h)} \cdot P(Z_1) = \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}\right)^2}{2} \cdot P(Z_0)$$

⋮

$$P(Z_i) = \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}\right)^i}{i!} \cdot P(Z_0)$$

Aus Gl. 7.4 ergeben sich unmittelbar die Erstzuteilungs- ( $p_b$ ) und Handoverblockierwahrscheinlichkeit ( $p_h$ ), die für dieses System gleich groß sind:

$$p_b = p_h = E_1\left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}, n\right) = \frac{P(Z_n)}{\sum_i P(Z_i)} = \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}\right)^n / n!}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}\right)^i / i!} \tag{7.7}$$

Reserviert man in jeder Zelle einige Kanäle, um Handoververbindungen mit hoher Wahrscheinlichkeit bedienen zu können, ändert sich die Situation. Für Erstzuteilungs- und Handoveranfragen stehen eine unterschiedliche Bedienerzahl zur Verfügung. Unterschiedliche Erstzuteilungs- und Handoverblockierwahrscheinlichkeiten sind als Resultat zu erwarten.

Im folgenden soll deshalb untersucht werden, wie sich die Erstzuteilungs- und Handoverblockierwahrscheinlichkeiten verändern, wenn oberhalb einer bestimmten Belegung  $k$  des Systems die Kanäle rein für Handoververkehr reserviert sind. Es ergibt sich das in Abbildung 7.5 dargestellte Zustandsübergangsmodell, vgl. auch [80].

Für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten  $P(Z_i)$  der einzelnen Zustände  $Z_i$  ergibt sich analog zu Gl. 7.7:

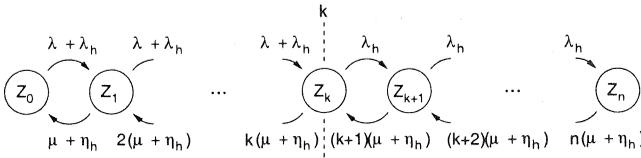


Abbildung 7.5: M/M/n Markov-Kette mit reservierten Bedienern für Handover

$$P(Z_i) = \begin{cases} \left( \frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h} \right)^i \cdot P(Z_0) & 0 < i \leq k \\ \left( \frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h} \right)^k \cdot \frac{(\lambda_h)^{i-k}}{\prod_{j=k+1}^i j} \cdot P(Z_0) & k < i \leq n \end{cases} \quad \text{für} \quad (7.8)$$

Aus der Vollständigkeitsbedingung  $\sum_i P(Z_i) = 1$  folgt für  $P(Z_0)$ :

$$P(Z_0) = \left[ \sum_{i=0}^k \frac{(\lambda + \lambda_h)^i}{i!} + \sum_{i=k+1}^n \frac{(\lambda + \lambda_h)^k}{k!} \cdot \frac{(\lambda_h)^{i-k}}{\prod_{j=k+1}^i j} \right]^{-1} \quad (7.9)$$

Die Blockierwahrscheinlichkeit neuer Verbindungswünsche entspricht der Summe aller stationären Zustandswahrscheinlichkeiten von Zuständen in denen nur Handoververbindungen berücksichtigt werden, das sind die Zustände  $Z_k$  bis  $Z_n$ :

$$p_b = \sum_{i=k}^n P(Z_i). \quad (7.10)$$

Die Blockierwahrscheinlichkeit von Handoverwünschen ist:

$$p_h = P(Z_n). \quad (7.11)$$

Die Parameter  $k$  und  $n$  können in Grenzen nun so gewählt werden, daß die jeweils angestrebten Blockierwahrscheinlichkeiten erreicht werden. Hierbei ist zu beachten, daß bei fester Kanalanzahl die Reservierung von Kanälen für Handoververbindungen zu einer Erhöhung der Blockierwahrscheinlichkeit neuer Verbindungswünsche führt.

In Abbildung 7.6 sind exemplarisch die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung mit den folgenden Annahmen dargestellt:

1. Die mittlere Bedienrate eines Bediener  $\mu$  sowie die mittlere Handoverrate im System  $\eta_h$  betragen  $1/180$  s und  $1/280$  s, d. h. die mittlere Gesprächsdauer ist im Mittel 180 s und ein Terminal hält sich im Mittel 280 s in einer Zelle auf, bevor ein Zellwechsel erfolgt.
2. Das mittlere Verkehrsangebot pro Zelle  $\Lambda = \frac{\lambda + \lambda_h}{\mu + \eta_h}$  variiert zwischen 0 und 20 Erlang.
3. Es entstehen im Mittel 0,1 Handover pro Gespräch.
4. Die Zahl der Bediener ist  $n = 20$ .
5. Es können kein ( $k = 20$ ), ein ( $k = 19$ ) oder zwei ( $k = 18$ ) Kanäle für Handover reserviert werden, vgl. Abbildung 7.5.

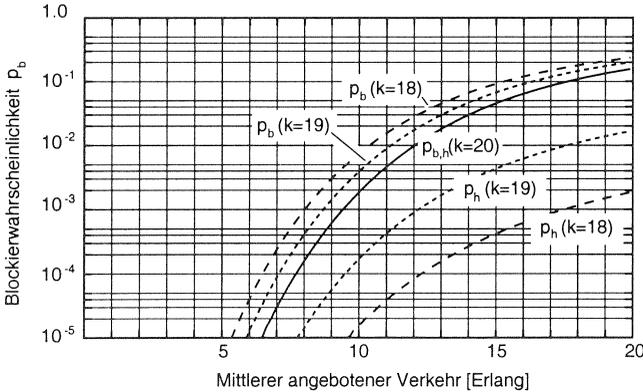


Abbildung 7.6: Handover- und Erstzuteilungsblockierwkt. mit Reservierung

Die Vergrößerung der Erstzuteilungsblockierwahrscheinlichkeit bei gleichzeitiger Verkleinerung der Handoverblockierwahrscheinlichkeit ist hier deutlich für einen Handoverkanal ( $k = 19$ ) sowie für zwei ( $k = 18$ ) reservierte Handoverkanäle zu erkennen. Der Fall  $k = 20$ , d. h. ohne Reservierung, stellt das Referenzergebnis der Bedienergruppe mit Blockierrate nach Erlang dar.

Werden Erstzuteilungsblockierwahrscheinlichkeit ( $p_b$ ) und Handoverblockierwahrscheinlichkeit ( $p_h$ ) jeweils mit dem anteiligen Verkehrsangebot neuer Verbindungswünsche ( $x$ ) und von Handoverwünschen ( $y$ ) gewichtet, so resultiert für die Summe der beiden gewichteten Anteile stets das Referenzergebnis:

$$x \cdot p_b + y \cdot p_h = p_{p,h}(k = 20) \tag{7.12}$$

### 7.1.3 Zweistufige Überlaufsysteme

Verfügt ein mobiler Teilnehmer über ein Endgerät (DMT), welches sowohl für GSM (Mikrozelle) als auch mobilen Satellitenfunk (Makrozelle) geeignet ist, so hat er bei Nichtverfügbarkeit<sup>2</sup> eines Netzes, z. B. GSM, die Möglichkeit auf das alternative Netz, z. B. Satellitenfunk, auszuweichen. Die resultierende Dienstgüte einer Verbindung soll im folgenden modelliert und untersucht werden.

Wird der blockierte Verkehr einer Bedienergruppe oder mehrerer unabhängiger (mikrozellulärer) Gruppen einer zusätzlichen, unabhängigen (makrozellulären) Bedienergruppe angeboten, so spricht man von einem zweistufigen Überlaufsystem. Ein zusätzlicher Poisson-Ankunftsstrom<sup>3</sup> ( $L_M(t)$ ) mit einem mittleren Verkehrsangebot  $\Lambda_M$  für die unabhängige Bedienergruppe kann berücksichtigt werden. Das entsprechende Wartemodell ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Um die einzelnen Blockierwahrscheinlichkeiten der Bedienergruppen sowie die Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit des Überlaufsystems berechnen zu können, wird davon ausgegangen, daß

<sup>2</sup>mangelnde Funkausleuchtung oder Vollaustlastung

<sup>3</sup>Teilnehmer, die direkt auf den Satelliten zugreifen

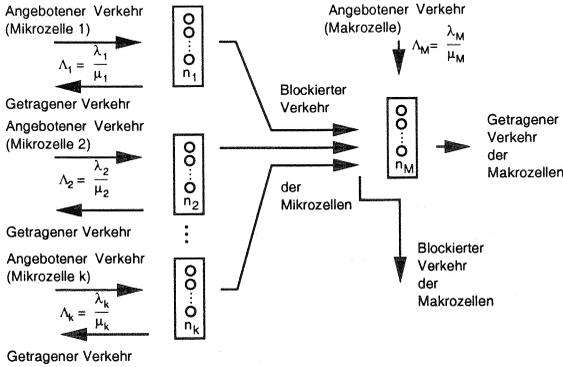


Abbildung 7.7: Wartemodell eines zweistufigen Überlaufsystems

- die zellularen Ankunftsprozesse bis auf den Überlaufverkehr unabhängige Poissonsströme mit einer mittleren Ankunftsrate  $\lambda_i$  sind,
- die Bediendauer jedes Bedieners um einem Mittelwert  $\beta_i = \mu_i^{-1}$  negativ exponentiell verteilt ist,
- die Anzahl der Bediener je Bedienergruppe in der ersten Stufe  $n_i$ , in der zweiten Stufe  $n_M$  ist und
- sich das System im statistischen Gleichgewicht befindet.

Die Wahrscheinlichkeit, daß eine mikrozellulare Bedienergruppe blockiert, ist aus Gl. 7.4 bekannt:

$$p_b(\text{Mikro}_i) = E_1\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i}, n_i\right) = E_1(\Lambda_i, n_i) \tag{7.13}$$

Nach [64] existiert für die Überlagerung der einzelnen mikrozellularen Bedienergruppen mit ihrem jeweils angebotenen Verkehr eine äquivalente einzelne Bedienergruppe, die den gleichen Erwartungswert  $E = \alpha$  und die gleiche Varianz  $V = \sigma^2$  des überlagerten mikrozellularen Überlaufverkehrs besitzt. Nach Kosten berechnen sich Erwartungswert und Varianz des Überlaufverkehrs jeder einzelnen mikrozellularen Bedienergruppe zu:

$$\alpha_i = \Lambda_i \cdot E_1(\Lambda_i, n_i) \tag{7.14}$$

und

$$\sigma_i^2 = \alpha_i \cdot \left(1 - \alpha_i + \frac{\Lambda_i}{n_i + 1 + \alpha_i - \Lambda_i}\right). \tag{7.15}$$

Da die einzelnen mikrozellularen Bedienergruppen unabhängig voneinander sind, gilt für den Erwartungswert und die Varianz des Überlaufverkehrs ( $L_{\bar{U}}(t)$ ) des gesamten mikrozellularen Netzes:

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \tag{7.16}$$

und

$$\sigma^2 = \sum_i \sigma_i^2. \tag{7.17}$$

Nach [18, 85] lassen sich der angebotene Verkehr  $\Lambda$  und die Anzahl der Bediener  $n$  einer äquivalenten Bedienergruppe wie folgt berechnen:

$$\Lambda = \sigma^2 + 3z(z - 1), \quad (7.18)$$

$$n = \frac{\Lambda \cdot (\alpha + z)}{\alpha + z - 1} - \alpha - 1 \quad (7.19)$$

Hierbei beschreibt  $z = \sigma^2/\alpha$  die Spitzigkeit des angebotenen Verkehrs. Da nur ganze Werte für  $n$  in Frage kommen, läßt sich bei gleichbleibender Spitzigkeit der entsprechende angebotene Verkehr  $\Lambda$  für einen auf seinen ganzzahligen Anteil gerundeten  $n \rightarrow [n]$  berechnen:

$$\Lambda = \frac{([n] + \alpha + 1)(\alpha + z - 1)}{\alpha + z}. \quad (7.20)$$

Im folgenden beschreibe  $\Lambda_M = \lambda_M/\mu_M$  das mittlere Verkehrsangebot der zusätzlichen Bedienergruppe. Für den Fall  $\Lambda_M = 0$  folgt aus den Kennwerten der äquivalenten mikrozellularen Bedienergruppe direkt die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit des Überlaufsystems:

$$p_b = \frac{\Lambda \cdot E_1(\Lambda, n + n_M)}{\sum_i \Lambda_i}. \quad (7.21)$$

Für den Fall  $\Lambda_M \neq 0$  kann die Blockierwahrscheinlichkeit der makrozellularen Überlaufgruppe mit Hilfe der allgemeinen Blockierwahrscheinlichkeitsformel nach Erlang berechnet werden, vgl. [66]:

$$p_{bM} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{n_M} \binom{n_M}{j} \frac{1}{C_j(0)}} \quad (7.22)$$

mit  $C_0 = 1$  und

$$C_j(\zeta) = \prod_{i=0}^j \frac{\phi(i\mu + \zeta)}{1 - \phi(i\mu + \zeta)}. \quad (7.23)$$

Der Ausdruck  $\phi(s)$  beschreibt die Laplace-Stieltjes Transformierte der Zwischenankunftszeitverteilungsdichte  $\frac{d}{dt}F_G(t)$  des überlagerten makrozellularen Ankunftsprozesses:

$$\phi(s) = \int_0^\infty e^{-st} dF_G(t). \quad (7.24)$$

Er wird aus der Überlagerung des mikrozellularen Überlaufverkehrs ( $L_{\bar{V}}(t)$ ) sowie des unabhängigen makrozellularen Verkehrs ( $L_M(t)$ ) gebildet. Nach einem Vorschlag von Kuczura, vgl. [66], läßt sich der Überlaufstrom durch einen geschalteten Poissonprozeß ( $L(t)$ ) nachbilden, vgl. Abbildung 7.8. Hierbei beschreiben  $1/\gamma$  und  $1/\omega$  die mittlere Verweildauer in den Ein- und Ausschaltzuständen des Schalters. Für  $\omega$  und  $\gamma$  gilt:

$$\omega = \frac{\alpha}{\Lambda} \left( \frac{\Lambda - \alpha}{z - 1} - 1 \right) \text{ und} \quad (7.25)$$

$$\gamma = \omega \left( \frac{\Lambda}{\alpha} - 1 \right). \quad (7.26)$$

Die Verteilungsfunktion  $F_{\bar{V}}(t)$  der Zwischenankunftszeiten der Ereignisse des Überlaufprozesses (Blockierung der Mikrozellen) läßt sich basierend auf einer

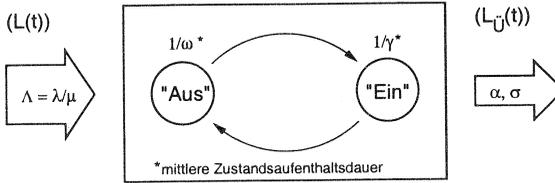


Abbildung 7.8: Geschalteter Poissonprozess

Modellierung durch den geschalteten Poissonprozess näherungsweise durch eine  $H_2$ -Verteilung mit Parametern  $a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2$  und  $\lambda = \mu\Lambda$  approximieren, vgl. [66, 97]:

$$F_{\bar{U}}(t) = a_1(1 - e^{-\lambda_1 t}) + a_2(1 - e^{-\lambda_2 t}), \quad (7.27)$$

mit

$$\lambda_1 = \frac{1}{2}[\lambda + \omega + \gamma + \sqrt{(\lambda + \omega + \gamma)^2 - 4\lambda\omega}], \quad (7.28)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2}[\lambda + \omega + \gamma - \sqrt{(\lambda + \omega + \gamma)^2 - 4\lambda\omega}], \quad (7.29)$$

$$a_1 = \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \text{ und} \quad (7.30)$$

$$a_2 = 1 - a_1. \quad (7.31)$$

$$(7.32)$$

Für die resultierende Verteilungsfunktion  $F_G(t)$  der Überlagerung von Überlauf- und Ankunftsprozess der Makrozelle gilt unter der Annahme, daß sich der Überlaufprozess bei der Überlagerung in erster Näherung wie ein Poissonprozess verhält, vgl. [90]:

$$F_G(t) = 1 - \sum_{n=1}^2 (1 - F_n(t)) = 1 - (1 - F_{\bar{U}}(t))(1 - F_M(t)) \quad (7.33)$$

$$= a_1(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_M)t}) + a_2(1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_M)t}). \quad (7.34)$$

Für die Laplace-Stieltjes Transformierte  $\phi(s)$  folgt:

$$\phi(s) = \frac{a_1(\lambda_M + \lambda_1)}{s + \lambda_M + \lambda_1} + \frac{a_2(\lambda_M + \lambda_2)}{s + \lambda_M + \lambda_2}. \quad (7.35)$$

Der Kehrwert der Blockierwahrscheinlichkeit der makrozellularen Überlaufgruppe resultiert daraus zu:

$$p_{bM}^{-1} = \sum_{j=0}^{n_M} \binom{n_M}{j} \prod_{i=1}^j \frac{i^2 \mu^2 + i\mu(\lambda_M + a_2\lambda_1 + a_1\lambda_2)}{i\mu(\lambda_M + a_1\lambda_1 + a_2\lambda_2) + (\lambda_1 + \lambda_M)(\lambda_2 + \lambda_M)}, \quad (7.36)$$

und die Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit des zweistufigen Überlaufsystems beträgt:

$$p_b = \frac{(\Lambda + \Lambda_M) \cdot p_{bM}}{\sum_i \Lambda_i + \Lambda_M}. \quad (7.37)$$

Die Anwendung des zweistufigen Überlaufsystems und ein Vergleich der analytischen Näherung mit simulativ gewonnenen Ergebnissen erfolgt in Abschnitt 7.3.3.

Vollständigkeitshalber wird auf einen alternativen Vorschlag zur Ermittlung des Überlaufverkehrs und seiner Kennwerte verwiesen. Basierend auf Untersuchungen von Kuczura, vgl. [65], und Rappaport, vgl. [86], ist es möglich, für ein Überlaufsystem ein mehrdimensionales Zustandsübergangsmodell aufzustellen, bei dem die Anzahl der Dimensionen und Zustände mit der Anzahl der betrachteten Bedienergruppen und der Bedienerzahl überproportional zunimmt. In der Literatur, vgl. [18, 67, 85], ist jedoch vermerkt, daß dieses Zustandsmodell nur für kleine Systeme mit wenigen Bedienergruppen und einer jeweils geringen Bedienerzahl geeignet ist.

### 7.1.4 Kaskadierte Verlustsysteme

Ein kaskadiertes Verlustsystem liegt vor, wenn der Verkehr, den eine Bedienergruppe eines Verlustsystems trägt, einer in Serie geschalteten Bedienergruppe eines anderen Verlustsystems angeboten wird. Ein solches System kommt z. B. bei der Versorgung eines funkgesteuerten Zugangsnetzes mit Hilfe eines drahtlosen Transportnetzes mit Vielfachzugriff zum Einsatz. Das entsprechende Wartemodell unter Annahme von M/M/n Modellen in Stufe 1 und 2 ist in Abbildung 7.9 dargestellt.

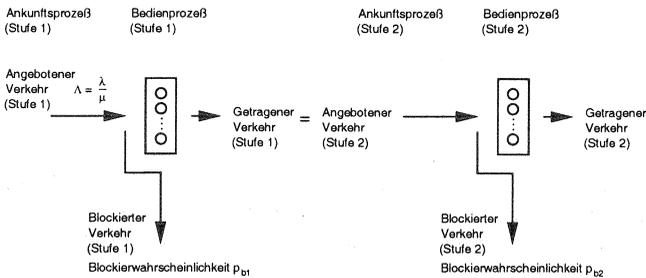


Abbildung 7.9: Wartemodell eines kaskadierten Verlustsystems

Die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit im kaskadierten Verlustsystem berechnet sich zu

$$p_b = p_{b,Stufe1} + (1 - p_{b,Stufe1}) \cdot p_{b,Stufe2}, \tag{7.38}$$

da die beiden Bedienergruppen in Serie geschaltet sind und damit nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können.

Unter der Annahme, daß der getragene Verkehr der ersten Bedienergruppe in guter Näherung ein Poissonprozeß ist<sup>4</sup>, berechnet sich die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit zu

$$p_b = E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right) + (1 - E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right)) \cdot E_1\left(\frac{\lambda_2}{\mu_2}, n_2\right). \tag{7.39}$$

Mit

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot (1 - E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right)) \tag{7.40}$$

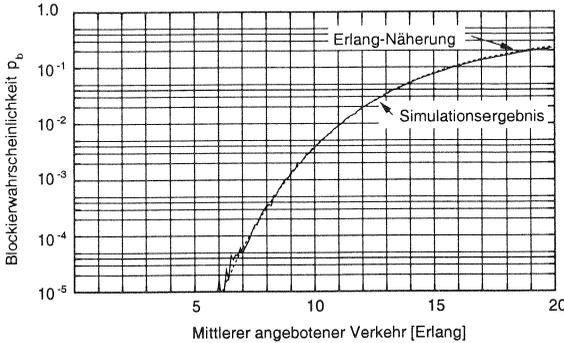
<sup>4</sup>Annahme trifft bei  $p_b \ll 1$  zu

resultiert hieraus abhängig von  $\lambda_1, \mu_1, \mu_2, n_1, n_2$ :

$$p_b = E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right) + (1 - E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right)) \cdot E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_2}, (1 - E_1\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}, n_1\right)), n_2\right). \quad (7.41)$$

wobei  $\lambda_1, \mu_1, \mu_2, n_1$  und  $n_2$  in der Regel bekannt sind.

Für die Näherungslösung sowie für eine Simulation<sup>5</sup> des realen Systems sind die Ergebnisse in Abbildung 7.10 dargestellt. In diesem konkreten Beispiel galt  $n_1 =$



**Abbildung 7.10:** Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  im kaskadierten Verlustsystem

$n_2 = 20$  und  $\mu_1 = \mu_2$ . Der angebotene Verkehr  $\Lambda_1 = \lambda_1/\mu_1$  wurde zwischen 0 und 20 Erlang variiert. Der Unterschied zwischen der Näherungslösung und den Simulationsergebnissen ist verschwindend gering. Es liegt somit eine gute Näherung des realen Verhaltens vor.

## 7.2 Mobilitätsmodelle

Zur Bestimmung der Handoverhäufigkeit und -verteilung sollen nun Modelle für Teilnehmer- und Satellitenmobilität eingeführt werden.

### 7.2.1 Teilnehmermobilität

Der Teilnehmermobilitätsprozeß in zellularen Mobilfunknetzen entspricht der Summe einer Vielzahl zufällig gerichteter Bewegungen der einzelnen Teilnehmer mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und von unterschiedlicher Dauer. Näherungsweise, vgl. [75], läßt sich die Mobilität eines einzelnen Teilnehmers durch den in Abbildung 7.11 dargestellten Sachverhalt approximieren. Im folgenden sei davon ausgegangen, daß sich der Mobilitätsprozeß der Mobilfunkeinsteiger im statistischen Gleichgewicht befindet, d. h. daß im Mittel pro Zeitschritt genau so viele Teilnehmer eine Funkzelle verlassen wie betreten.

Unter der Annahme einer negativ exponentiell verteilten Zellaufenthaltsdauer (vgl. Abschnitt 7.1.2) läßt sich das zu erwartende Handoververkehrsangebot  $\Lambda_h$  pro

<sup>5</sup>Die Simulation wurde mit dem Satellitensimulator NeSSiE, vgl. Kapitel 6 durchgeführt.

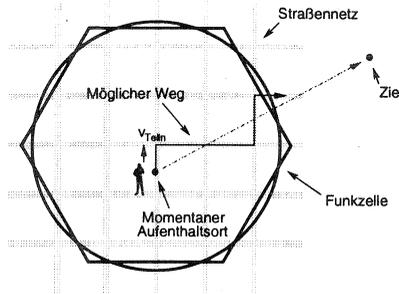


Abbildung 7.11: Teilnehmermobilität in Mobilfunksystemen

Zelle wie folgt berechnen:

$$\Lambda_h = \frac{\lambda_h}{\mu + \eta_h} = \frac{\rho a \cdot \pi R^2}{1 + \frac{\mu}{\eta_h}} \tag{7.42}$$

Hierbei beschreibt  $\mu^{-1}$  die mittlere Gesprächsdauer,  $\eta_h^{-1}$  die mittlere Aufenthaltsdauer in der Funkzelle,  $R$  den Radius der Funkzelle,  $a$  den mittleren angebotenen Verkehr je Mobilfunkteilnehmer und  $\rho$  die Mobilfunkteilnehmerdichte in der Zelle.

Für die unterschiedlichen Verhältnisse  $\mu/\eta_h$  ist in Abbildung 7.12 das mittlere Handoververkehrsangebot  $\Lambda_h$  pro Zelle über dem Zellradius  $R$  aufgetragen. Das

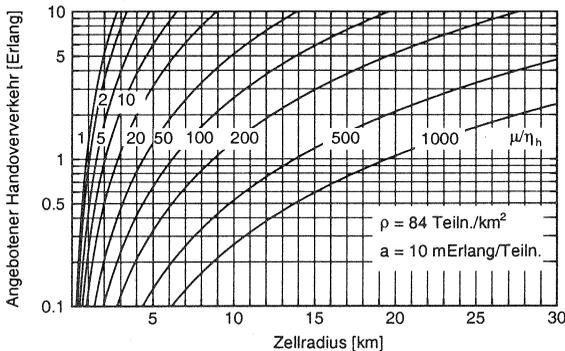


Abbildung 7.12: Mittlerer Handoververkehr  $\Lambda_h$  pro Zelle als Funktion des Zellradius

Verhältnis  $\mu/\eta_h$  beschreibt das Verhältnis von mittlerer Zellaufenthaltsdauer zur mittleren Gesprächsdauer und damit den Kehrwert der Wahrscheinlichkeit eines Zellwechsels während einer Verbindung. Für den gesamten angebotenen Verkehr in

einer Funkzelle mit Radius  $R$  ergibt sich somit:

$$\Lambda = \Lambda_{neu} + \Lambda_h = \rho a \cdot \pi R^2 \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_h}{\mu}} + \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\eta_h}} \right) = \rho a \cdot \pi R^2. \quad (7.43)$$

## 7.2.2 Satellitenmobilität

Satelliten umkreisen die Erde nach denselben Gesetzen, die die Bewegung der Planeten um die Sonne bestimmen. Dieses am Anfang unseres Jahrhunderts gewonnene Erkenntnis basiert auf den bereits in den Jahren 1602, 1605 und 1618 von Johannes Kepler<sup>6</sup> postulierten Aussagen über die Bewegung der Planeten unseres Sonnensystems. Sie bilden die Basis für die mathematische Betrachtung der Satellitenbewegung, vgl. [73, 87].

### 7.2.2.1 Orbitalparameter und -position

Die in dieser Arbeit betrachteten Satellitensysteme bewegen sich auf geozentrischen Kreisbahnen um die Erde. Prinzipiell sind auch Satellitensysteme mit elliptischen Bahnen denkbar, sie finden in der Praxis bis jetzt aber kaum Anwendung. Für eine Diskussion solcher Bahnen sei deshalb auf die Literatur, vgl. [73, 87], verwiesen. In Abbildung 7.13 ist eine typische Satellitenbahn in einem geozentrischen Äquatorialkoordinatensystem um die Erde dargestellt. Die genaue Lage der Satellitenbahn

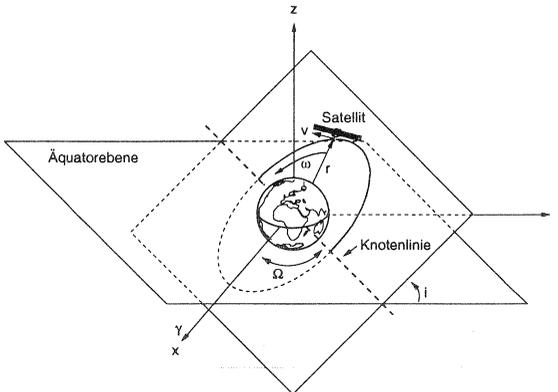


Abbildung 7.13: Geozentrisches Äquatorialkoordinatensystem mit Satellitenbahn

wird hierbei durch ihren Bahnradius  $r$ , die Inklination  $i$  sowie die rechte Aszensionaldifferenz des aufsteigenden Knoten  $\Omega$  bestimmt. Die Geschwindigkeit  $v$  sowie die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  eines die Erde umkreisenden Satelliten (vgl. Abbildung 7.13) berechnen sich zu:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot (M_E + m_{Sat})}{r_E + h}}, \quad (7.44)$$

$$\omega = \frac{v}{r_E + h} = \sqrt{\frac{G \cdot (M_E + m_{Sat})}{(r_E + h)^3}}, \quad (7.45)$$

<sup>6</sup>Johannes Kepler (1571-1630); deutscher Astronom

mit der Gravitationskonstante  $G$ , der Masse der Erde  $M_E$ , der Masse des Satelliten  $m_{sat}$ , dem Erdradius  $r_E$  und der Orbitalhöhe  $h$ . Die Geschwindigkeit eines Satelliten in seiner Bahn sowie über Grund ist in Abbildung 7.14 als Funktion der Bahnhöhe und -art dargestellt. Als Bezugspunkt für die Geschwindigkeit über Grund

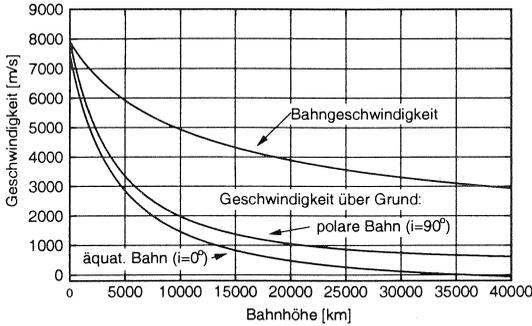


Abbildung 7.14: Satellitengeschwindigkeit

wurde der Punkt durch Null-Meridian und Äquator gewählt.

7.2.2.2 Satellitenposition und Ausleuchtzone

In Abbildung 7.15 ist das Funkversorgungsgebiet (Ausleuchtzone) einer Satellit-Erde-Konstellation dargestellt. Die zellartige Struktur der Ausleuchtzone entspricht hierbei der eines IRIDIUM-artigen Systems (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Als elementare

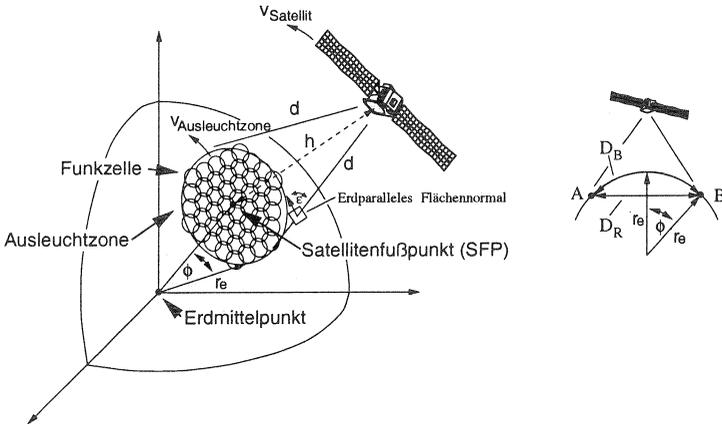


Abbildung 7.15: Satellitenposition und Ausleuchtzone

mathematische Beschreibung lassen sich die folgenden Kenngrößen definieren:

Der Zentriwinkel  $\phi$  der Ausleuchtzone definiert sich aus der Bogenlänge seines Durchmessers  $D_G$  sowie dem Erdradius  $r_e$  zu

$$\phi = \frac{2r_e}{D_B}. \quad (7.46)$$

Für den wahren Durchmesser  $D_R$ , vgl. Abbildung 7.15, folgt:

$$D_R = 2r_e \sin(\phi). \quad (7.47)$$

Die maximale Entfernung  $d$  zwischen Satellit und Funkversorgungsgebiet berechnet sich zu

$$d = \sqrt{\left(\frac{D_R}{2}\right)^2 + (h + r_e(1 - \cos(\phi)))^2}. \quad (7.48)$$

Als weitere wichtige Kenngröße folgt für den minimalen Elevationswinkel  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \arccos\left(\frac{r_e + h}{d} \sin(\phi)\right). \quad (7.49)$$

Die Geschwindigkeit des Satelliten  $v_{\text{Satellit}}$  entspricht der Bahngeschwindigkeit als Funktion der Art und Höhe  $h$  seiner Umlaufbahn, vgl. Abbildung 7.14. Für eine starre Satellitenantenne ist die Geschwindigkeit der Ausleuchtzone  $v_{\text{Ausleuchtzone}}$  gleich der Geschwindigkeit des Satelliten über Grund (vgl. Abbildung 7.14). Für mitführende, phasengesteuerte Gruppenantennen lassen sich hingegen ortsfeste Ausleuchtzonen realisieren ( $v_{\text{Ausleuchtzone}} = 0$ ), welche die Komplexität der Funkversorgung maßgeblich reduzieren. Auf diesen Effekt soll im folgenden Abschnitt sowie in Kapitel 9 noch gesondert eingegangen werden.

Als Antennenmodell für die einzelnen Funkzellen der Ausleuchtzone des Satelliten wird hier eine Näherung nach ITU-R-Report 672-3 verwandt, vgl. [49]. Für den

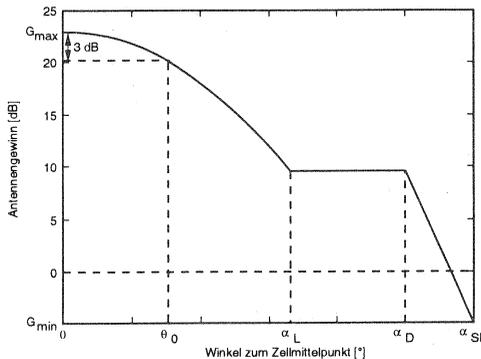


Abbildung 7.16: Antennenmodell nach CCIR-Report 672-3

Antennenazimuth  $\varphi$  zwischen  $0 \leq \varphi \leq \alpha_L$  hat die Charakteristik einen parabelförmigen Verlauf:

$$G(\varphi) = G_{max} - 3 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2 [dB]. \quad (7.50)$$

Tabelle 7.1: Beispielhafte Parametrisierung der Satellitenantenne

$G_{max}$	$G_{min}$	$\alpha_0$	$\alpha_L$	$\alpha_D$	$\alpha_{SL}$
23 dB	-999 dB	$3.2^\circ$	$10^\circ$	$12^\circ$	$14^\circ$

Für größere Winkel setzt dann ein konstanter Bereich bis  $\alpha_D$  ein. Durch ihn wird der Einfluß der Nebenkeulen der realen Antennencharakteristik berücksichtigt. Ab  $\alpha_D$  fällt der Antennengewinn linear ab und hat ab dem Winkel  $\alpha_{SL}$  keinen Einfluß mehr auf das Abstrahlungsverhalten.

In Tabelle 7.1 sind typische Werte für die Parametrisierung des Antennenmodells für ein IRIDIUM-artiges System dargestellt. Da die Erdkrümmung mit zunehmendem Abstand zum SatellitenFußpunkt (SFP) zu einer Verzerrung der Funkversorgungszellen führt, sei von einer idealen Phasen- und Leistungsregelung ausgegangen, die diesem Effekt entgegenwirkt.

### 7.2.2.3 Handover

Der durch die Bewegung der Ausleuchtzone verursachte Handoververkehr je Zelle soll im folgenden Abschnitt untersucht und berechnet werden. In Abbildung 7.17 sind vier Möglichkeiten zum zeitlichen Ablauf eines Mobilfunkgesprächs mit Bezug

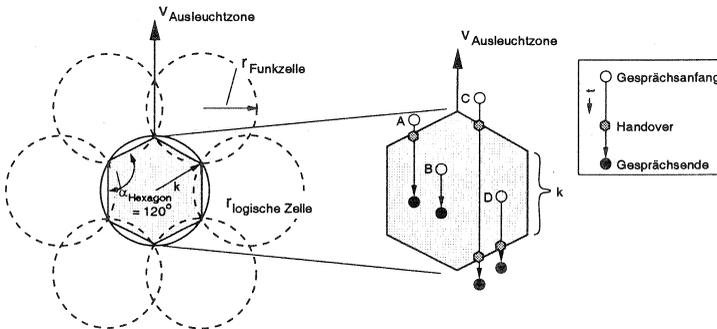


Abbildung 7.17: Handover aufgrund von Satellitenmobilität

auf die Zellbewegung des Satelliten dargestellt:

- A Gesprächsanfang außerhalb und Gesprächsende innerhalb der Funkzelle: Ein Handover ist erforderlich.
- B Gesprächsanfang und Gesprächsende innerhalb der Funkzelle: Ein Handover ist nicht erforderlich.
- C Gesprächsanfang und Gesprächsende außerhalb der Funkzelle mit zwischenzeitlicher Funkversorgung innerhalb der Funkzelle: Zwei Handover sind erforderlich.
- D Gesprächsanfang innerhalb und Gesprächsende außerhalb der Funkzelle: ein Handover ist erforderlich.

Um den Handoververkehr pro Zeiteinheit berechnen zu können, sei davon ausgegangen, daß die Benutzer innerhalb der Funkzelle mit einer Dichte von  $\rho_T$  Benutzer/ $km^2$

gleichverteilt sind, und daß  $a$  den mittleren angebotenen Verkehr pro Benutzer beschreibt. Aus dem Szenarium in Abbildung 7.17 folgt, daß pro Zeiteinheit  $\delta t$

$$n_H = \rho_T \cdot a \cdot 2k \cos(\alpha_{\text{Hexagon}}) \cdot v_{\text{Ausleuchtzone}} \cdot \delta t \quad (7.51)$$

$$= \sqrt{3}k \cdot \rho_T \cdot a \cdot v_{\text{Ausleuchtzone}} \cdot \delta t \quad (7.52)$$

Handover durchgeführt werden. In Abbildung 7.18 ist die Handoverfrequenz beispielhaft für eine Satellitengeschwindigkeit über Grund ( $v_{\text{Ausleuchtzone}}$ ) von 6 km/s

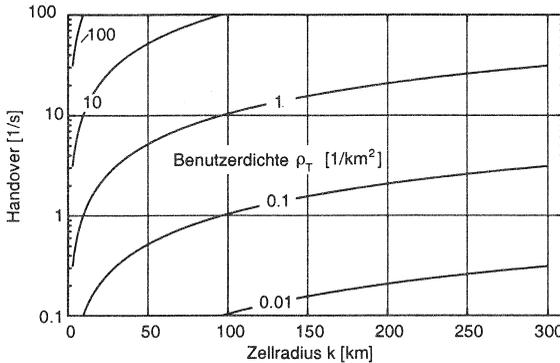


Abbildung 7.18: Handoverfrequenz als Funktion des Zellradius

und einem mittleren angebotenen Verkehr von 10 mE/Benutzer als Funktion des Zellradius  $k$  und der Benutzerdichte  $\rho_T$  dargestellt.

Aus der in Abbildung 7.17 dargestellten Zellgeometrie und der Geschwindigkeit  $v_{\text{Ausleuchtzone}}$  des Satelliten über Grund folgt die mittlere Verweildauer  $\eta_h^{-1}$  eines Mobilfunkteilnehmers in einer Satellitenzelle zu (s. a. Anhang A):

$$\eta_h^{-1} = \frac{1}{2} \cdot (k + 2k) \cdot \frac{1}{v_{\text{Ausleuchtzone}}} = \frac{3k}{2v_{\text{Ausleuchtzone}}} \quad (7.53)$$

Für die mittlere Anzahl  $n_h$  erforderlicher Handover pro Gespräch resultiert:

$$n_h = \frac{\eta_h}{\mu} = \frac{2v_{\text{Ausleuchtzone}}}{3k\mu} \quad (7.54)$$

wobei  $\mu^{-1}$  die mittlere Gesprächsdauer einer Verbindung ist. In Abbildung 7.19 ist für verschiedene Verhältnisse  $v/\mu$  die mittlere Anzahl der erforderlichen Handover pro Gespräch als Funktion des Zellradius dargestellt. Für ein IRIDIUM-ähnliches System ergibt sich mit der Geschwindigkeit über Grund von  $v = v_{\text{Ausleuchtzone}} = 6$  km/s und  $\mu^{-1} = 120$  s ein Wert von 1,6 Handover pro Gespräch für eine Funkzelle mit 300 km Radius.

### 7.3 Analyse der Zielsysteme

In diesem Kapitel sollen die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Zielsysteme mit Hilfe der oben vorgestellten Modelle verkehrstheoretisch untersucht und bewertet werden.

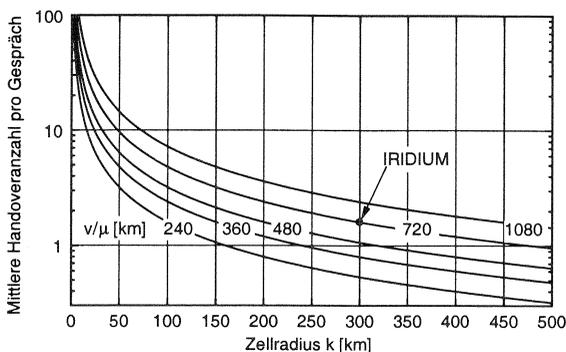


Abbildung 7.19: Handoveranzahl pro Gespräch als Funktion des Zellradius

Im Sinne der Abstraktion dieser Untersuchung werden die Einflüsse der Mobilfunkkanäle, wie z. B. abschattungsbedingte Übertragungsstörungen, an dieser Stelle vernachlässigt.

### 7.3.1 Dienstgütedefinition und -untersuchung

Als Dienstgütemaß der in den Zielsystemen angebotenen Telekommunikationsdienste wird in Anlehnung an das DECT System, vgl. [23, 24], ein Dienstgütemaß (GoS – Grade of Service) definiert:

$$GoS = p_b + 10 \cdot n_h \cdot p_h. \quad (7.55)$$

Die Größen  $p_b$  und  $p_h$  beschreiben die Blockierwahrscheinlichkeit für Kanalerst- sowie Handoverkanalzuweisungen,  $n_h$  folgt aus Gl. 7.54. Aufgrund von Reservierungsmechanismen sind  $p_b$  und  $p_h$  innerhalb derselben Zelle nicht notwendigerweise gleich groß. Mit Hilfe des GoS Dienstgütemaßes kann die Dienstgüte verschiedener Mobilfunksysteme untereinander, aber auch mit herkömmlicher Festnetztelefonie verglichen werden. In Tabelle 7.2 sind die hier für einen Nutzer als akzeptabel angenommenen Dienstgüten abhängig von der Art des Telekommunikationsnetzes aufgeführt.

Tabelle 7.2: GoS für Fest- und Mobilfunknetze

Telekommunikationsnetz	maximal zulässiger GoS
Mobilfunk [47]	0,01–0,02
Festnetz [47]	0,001–0,002

Der Unterschied zwischen den maximal zulässigen Dienstgüten für die aufgeführten Kommunikationsnetze resultiert aus den unterschiedlichen Erwartungen der Nutzer dieser Systeme.

In Kommunikationsnetzen mit fester Kanalvergabe kann die Dienstgüte mit und ohne Kanalreservierung für Handoverwünsche wie folgt berechnet werden:

**mit Reservierung** Mit Hilfe von Gl. 7.10 und Gl. 7.11 kann die Blockierwahrscheinlichkeit für Erstzuteilung und Handover berechnet werden. Aus Gl. 7.55 folgt die Dienstgüte (GoS).

**ohne Reservierung** Mit Hilfe von Gl. 7.7 kann die Blockierwahrscheinlichkeit für Erstzuteilung und Handover berechnet werden. Aus Gl. 7.55 folgt die Dienstgüte (GoS).

### 7.3.2 Integration von ISDN und Satellitennetz

Zur Bewertung von ISDN und Satellitennetz, vgl. Abb. 5.20, werden zwei Szenarien mit unterschiedlichem ISDN-Verkehrsangebot und verschiedenen Mechanismen zur Anpassung der Datenrate zwischen ISDN und Satellitensystem untersucht. Für beide Szenarien soll sowohl eine Lösung mit Kanalbündelung zur Übertragung der ISDN-Daten mit 64 kbit/s, als auch eine Lösung mit Ratenanpassung durch Transcodierung der 64 kbit/s PCM codierten ISDN-Sprachdaten auf 4,8 kbit/s Satellitensystem-Sprachcodec untersucht werden. Da die Dienstgüte für verschiedenen Dienste auf einmal betrachtet wird, dient als Bezugsgröße die Anzahl der Verbindungen pro Zelle bzw. pro  $\text{km}^2$ . Für jeden einzelnen Dienst folgt der mittlere tragbare Verkehr in  $\text{E}/\text{km}^2$  bzw.  $\text{E}/\text{Zelle}$  hieraus direkt.

**Szenarium 1:** 10% ISDN, 90% Satellitenteilnehmer und

**Szenarium 2:** 100% ISDN, 0% Satellitenteilnehmer. Im transcodierten Fall ist keine Datenübertragung  $r \geq 4,8$  kbit/s möglich.

Zur Analyse werden die vorgestellten Modelle für Verlustsysteme mit und ohne Reservierung nach Abschnitt 7.1 verwandt.

#### 7.3.2.1 IRIDIUM-artige Satellitensysteme

Als Basis für die Untersuchung der Integration eines LEO-Satellitensystems mit ISDN diene folgendes Satellitenreferenzsystem:

- IRIDIUM-artige Konstellation, vgl. Abschnitt 2.3.1.1,
- 48 Funkzellen pro Ausleuchtzone eines Satelliten, Radius einer Funkzelle  $r_{\text{Funkzelle}} = 300$  km,
- Geschwindigkeit des Satelliten über Grund  $v = 6$  km/s,
- FDMA/TDD Kanalvielfachzugriffsverfahren mit 92 Verkehrskanälen pro Zelle (FCA) und 4,8 kbit/s Übertragungsrate je Sprachkanal.

Für Betriebsmittelverwaltung und Dienste im System gelte darüberhinaus:

- Abbildung eines 64 kbit/s ISDN<sup>7</sup> Kanals auf 13 Satellitensystemverkehrskanäle mittels Kanalbündelung (KB)<sup>8</sup> oder auf einen Satellitensystemverkehrskanal durch Transcodierung (TC)<sup>9</sup>.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Es sind im Mittel 1,6 Handover je Gespräch notwendig (vgl. Abschnitt 7.2).

<sup>7</sup>Ein ISDN-Basisanschluß umfaßt zwei 64 kbit/s (B) Datenkanäle und einen 16 kbit (D) Teilnehmersignalisierungskanal.

<sup>8</sup>Verwendung mehrerer Verkehrskanäle eines Systems gleichzeitig, um den höherratigen Dienst zu bedienen.

<sup>9</sup>Kombination aus Decodierung mit anschließender Encodierung zur Veränderung der Art und/oder Rate der Codierung.

Als Ergebnis der Dienstgüteuntersuchung nach Abschnitt 7.3.1 resultieren die in Abbildung 7.20 dargestellten Kurvenverläufe sowie ausgewählte Ergebnisse in Tabelle 7.3.

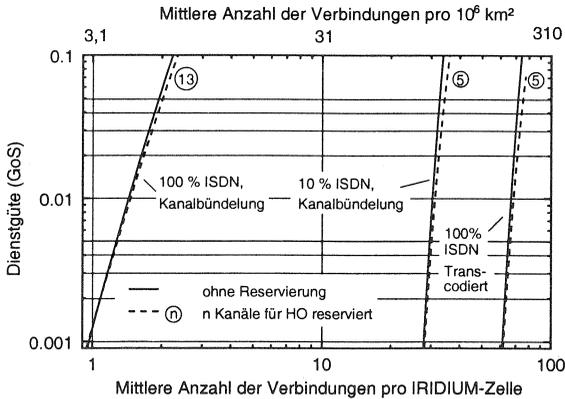


Abbildung 7.20: Dienstgüte bei Integration von ISDN und IRIDIUM

Tabelle 7.3: Dienstgüte bei Integration von ISDN und IRIDIUM

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle ohne/mit Reservierung	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% ISDN (KB)	1,45/1,47	0,97/0,95
10% ISDN (KB)	30,4/31,3	28,0/28,3
100% ISDN (TC)	66,8/68,7	61,5/62,2

Es ist deutlich zu erkennen, daß Kanalbündelung zwar ISDN-Verkehr (64 kbit/s) ermöglicht, die mittlere Anzahl gleichzeitiger Verbindungen aber stark eingeschränkt wird. Bereits bei einem Anteil von nur 10% ISDN Verbindungen wird die mittlere Anzahl gleichzeitig verfügbarer Verbindungen halbiert. ISDN Endgeräte sollten also nur mit geringer Datenrate angeschlossen werden. Um eine möglichst große mittlere Anzahl von Verbindungen pro Zelle zu ermöglichen, ist für Sprachdienste die ISDN-Datenrate auf die des Satellitensystems zu transcodieren. Die Reservierung von Kanälen ausschließlich für Handoveranfragen führt, wie dargestellt, zu einer leichten Verbesserung der Dienstgüte bei konstantem angebotenen Verkehr.

### 7.3.2.2 TELEDESIC-artige Satellitensysteme

Das Satellitenreferenzsystem, für die Analyse der Integration von ISDN und TELEDESIC-artigen Systemen hat folgende Eigenschaften:

- TELEDESIC-artige Konstellation (vgl. Abschnitt 2.3.2.1),

- 36 Makrofunkzellen pro Ausleuchtzone eines Satelliten, jede besteht aus je neun Mikrofunkzellen, wobei die Kantenlänge einer Mikrofunkzelle 53,33 km beträgt,
- SDMA/FDMA/ATDMA Kanalvielfachzugriffsverfahren mit 1800 Verkehrskanälen pro Zelle (FCA) und 16 kbit/s Übertragungsrate je Sprachkanal auf ATM-Basis.

Für Betriebsmittelverwaltung und Dienste im System gelte darüber hinaus:

- Ein ISDN Kanal wird durch Kanalbündelung auf vier Satellitensystemverkehrskanäle oder durch Transcodierung nur auf einen Satellitensystemverkehrskanal abgebildet.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Aufgrund der erdfesten Zellen sind keine Handover erforderlich.

Als Ergebnis der Dienstgüteuntersuchung nach Abschnitt 7.3.1 resultieren die in Abbildung 7.21 dargestellten Kurvenverläufe sowie ausgewählte Ergebnisse in Tabelle 7.4. Auch hier verursacht ISDN-Verkehr (64 kbit/s) eine merkliche Redu-

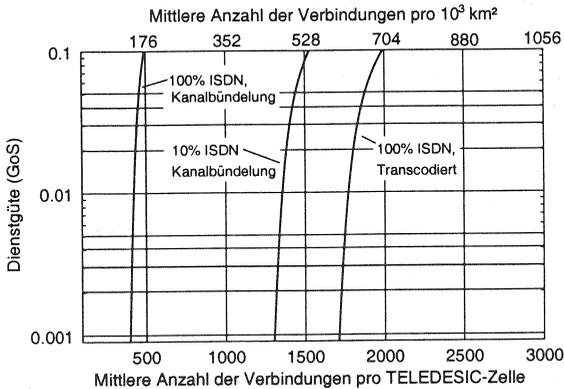


Abbildung 7.21: Dienstgüte bei Integration von ISDN und TELEDESIC

Tabelle 7.4: Dienstgüte bei Integration von ISDN und TELEDESIC

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% ISDN (KB)	425	401
10% ISDN (KB)	1356	1306
100% ISDN (TC)	1772	1711

zierung der mittleren Anzahl gleichzeitig bedienbarer Verbindungen pro Zelle. Bei einem 10%igen Anteil von kanalgebündelten ISDN-Verbindungen tritt z. B. eine Reduzierung der Kapazität des Satellitensystems auf 77% gegenüber der Lösung mit Transcodierung der Kanäle ein.

### 7.3.3 Integration von GSM und Satellitennetz

Wie bereits in Kapitel 5 vorgestellt, gibt es folgende Möglichkeiten zur Integration von GSM mit mobilen Satellitensystemen:

1. kaskadierter Betrieb einer MSC-Festnetz-Verbindung über Satellit,
2. kaskadierter Betrieb einer GSM BTS (A-Schnittstelle) über Satellit und
3. Integration auf Datenbankebene.

Der kaskadierte Betrieb einer MSC-Festnetz-Verbindung über Satellit entspricht dabei den Untersuchungen in Abschnitt 7.3.2, da zwischen MSC und Festnetz mittels ISDN-Kanälen kommuniziert wird. Auf eine erneute Untersuchung des Sachverhalts kann deshalb verzichtet werden.

Der kaskadierte Betrieb einer Basisstation sowie die Integration auf Datenbankebene ergeben neue Aspekte. Zur Analyse werden die vorgestellten Modelle für Verlustsysteme mit und ohne Reservierung sowie für Überlaufsysteme verwendet.

#### 7.3.3.1 IRIDIUM-artige Satellitensysteme

Die Untersuchungen zur Integration von GSM und LEO-Systemen basieren auf dem in Abschnitt 7.3.2 definierten Satellitenreferenzmodell sowie der GSM-Systemarchitektur (vgl. Kapitel 2). Für den kaskadierten Betrieb einer GSM-Basisstation und eines Satellitensystems gelte darüberhinaus für Betriebsmittelverwaltung und Dienste:

- Ein GSM-Sprachverkehrschanal (13 kbit/s zzgl. Signalisierung) wird auf 3 Satellitensystemverkehrschanäle durch Kanalbündelung bzw. auf einen Satellitensystemverkehrschanal durch Transcodierung abgebildet.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Es sind im Mittel 1,6 Handover je Gespräch notwendig, vgl. Abschnitt 7.2.

Das Ergebnis der Dienstgüteuntersuchung (vgl. Abschnitt 7.3.1) für den kaskadierten Betrieb der GSM-Basisstationen läßt sich durch die in Abbildung 7.22 gezeigten Kurvenverläufe darstellen. Weitere ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 7.5 angegeben. Bei 10% anteiligem GSM-Verkehr reduziert der kaskadierte Betrieb mit

**Tabelle 7.5:** Dienstgüte bei Integration von GSM und IRIDIUM

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle ohne/mit Reservierung	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% GSM (KB)	16,1/16,5	13,8/13,8
10% GSM (KB)	55,7/57,2	51,3/51,8
100% GSM (TC)	66,8/68,7	61,5/62,2

Kanalbündelung die Kapazität des Satellitensystems auf 91% der mittleren Anzahl gleichzeitig verfügbarer Verbindungen, die bei Transcodierung möglich sind. Für 100% GSM-Verkehr und Transcodierung beträgt die Reduktion der Kapazität 77%. Ohne signifikante Kapazitätseinbußen ist es möglich, z. B. neben 56 regulären Satellitenkanalverbindungen gleichzeitig bis zu 7 gebündelte GSM-Verbindungen zu

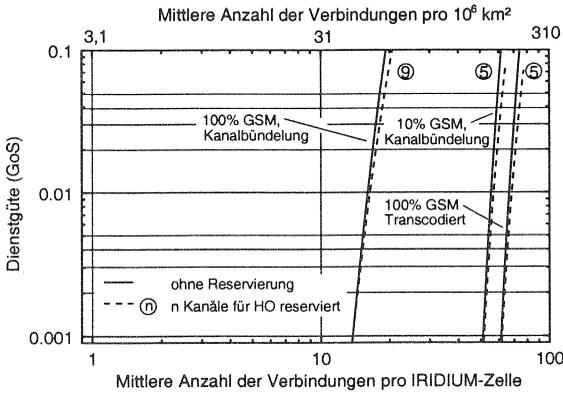


Abbildung 7.22: Dienstgüte bei Integration von GSM und IRIDIUM

betreiben. Dies entspricht etwa der Kapazität von zwei GSM-Transceivern pro Satellitenzelle die jede im Mittel mit 3,5 Verbindungen gleichzeitig betrieben werden dürfen, um eine mittlere Blockierwahrscheinlichkeit von  $p_b = 0,01$  zu erreichen, vgl. Abbildung 7.1.1.

Bei der Integration auf Datenbankebene wird nachfolgend sowohl der Handover als auch der Überlaufbetrieb analysiert und bewertet. Der logische Ablauf eines Protokolls für die Netzauswahl eines Dual Mode GSM und IRIDIUM-Endgeräts ist in Abbildung 7.23 dargestellt. Immer dann, wenn ein Teilnehmer sich in einer GSM-Zelle befindet, und sein Ruf blockiert wird, kommt es durch die alternative Wahl des Satellitennetzes zu einem Überlauf. Der resultierende Überlaufverkehr zeigt folglich ein geschaltetes Verhalten, vgl. Abschnitt 7.1.3, dessen Wechselhäufigkeit mit zunehmendem Überlaufverkehr abnimmt.

Das Satellitennetz seinerseits wird durch den Überlaufverkehr in seiner Dienstgüte beeinträchtigt. Abbildung 7.24 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchung.

Für zwei mittlere Verkehrsangebote ( $\Lambda_M = 61,49$ ,  $\Lambda_M = 66,77$ ) eines Poisson-Ankunftsstroms in der Satellitenzelle ist der Einfluß der Überlagerung mit Überlaufverkehr aus drei GSM-Zellen auf die Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  in Form der daraus resultierenden Dienstgüte (GoS) nach Gl. 7.55<sup>10</sup> in der Satellitenzelle berechnet und stochastisch simuliert worden.

Für ein mittleres Verkehrsangebot  $\Lambda_M = 66,77$  (GoS = 0,01) in der Satellitenzelle ist dabei zu erkennen, daß durch Übernahme der blockierten Rufe (Überlauf) aus den GSM-Zellen der mittlere bedienbare Verkehr pro GSM-Zelle von 9 E (Punkt A) auf 14,6 E (Punkt B) gesteigert werden kann (Simulation), wenn eine Verschlechterung der Dienstgüte in der Satellitenzelle durch Überlauf auf GoS = 0,02 in Kauf genommen wird. Ein angebotener Verkehr von 9 E pro GSM-Zelle (20 Kanäle) entspricht unter Annahme von  $p_b = p_h$  nach Gl. 7.55 einer Dienstgüte ohne Überlauf von 0,01. Die in Abschnitt 7.1.3 eingeführte mathematische Näherung ist gestrichelt eingezeichnet. Sie liefert einen akzeptablen konservativen Schätzwert für die zu er-

<sup>10</sup>Es gilt  $p_b = p_h$  sowie  $n_h = 1,6$  (IRIDIUM) und damit  $\text{GoS} = 17 \cdot p_b$  nach Gl. 7.55

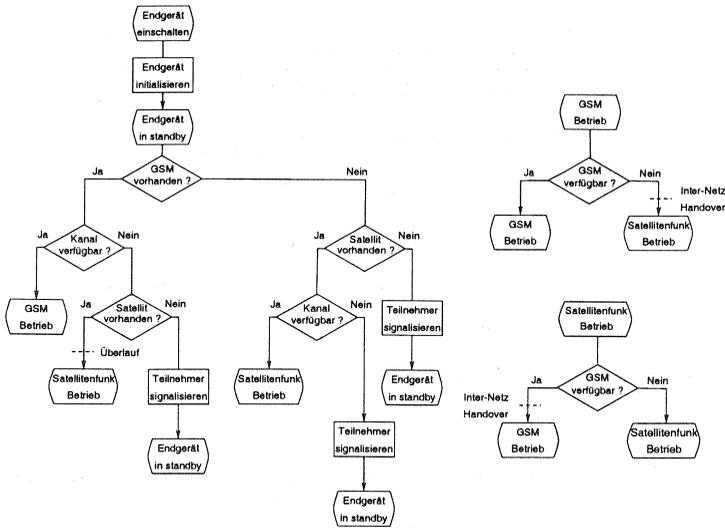


Abbildung 7.23: Netzauswahl des Dual Mode GSM-IRIDIUM Endgeräts

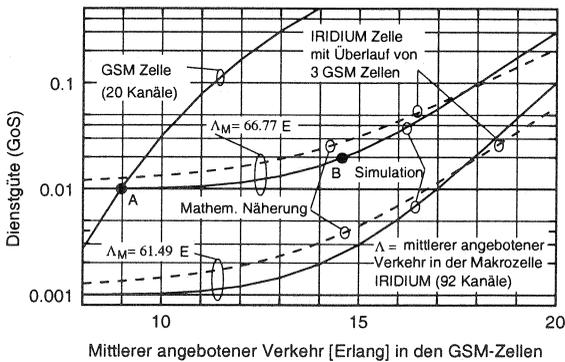


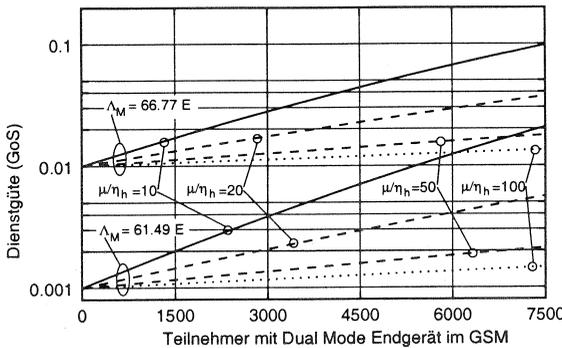
Abbildung 7.24: Dienstgüte (GoS) im Satellitensystem über dem GSM-Verkehrsangebot

wartende Dienstgüte. Exakte mathematische Lösungen sind zwar bekannt, führen aber wegen der Größe des Systems zu sehr hohen Rechenlaufzeiten.

Nun folgen Ergebnisse der Analyse des Inter-Netz Handovers, vgl. Abbildung 7.23, von GSM zum Satellitensystem und in beide Richtungen im quasi stationären Betrieb.

Teilnehmer mit Dual Mode Endgerät (DMT) können beim Verlassen des GSM Funkversorgungsbereichs auf ein anderes verfügbares mobiles Kommunikationssystem umschalten. Abhängig von der Anzahl der Teilnehmer mit Dual Mode Endgerät, dem mittleren Verkehrsangebot ( $a = 0,01E$ ) pro Teilnehmer und dem Verhältnis aus mittlerer Gesprächsdauer und Aufenthaltsdauer im GSM-Funkversorgungsgebiet  $\mu/\eta_h$  entsteht nach Gl. 7.42 ein zusätzliches Handoververkehrsangebot  $\Lambda_h$  im Satellitennetz. Für  $\Lambda_{gesamt} = \Lambda_M + \Lambda_h$  kann mit Hilfe von Gl. 7.4 die Blockierwahrscheinlichkeit in der Satellitenzelle  $p_b$  und für  $p_h = p_b$  die Dienstgüte (GoS) nach Gl. 7.55 berechnet werden.

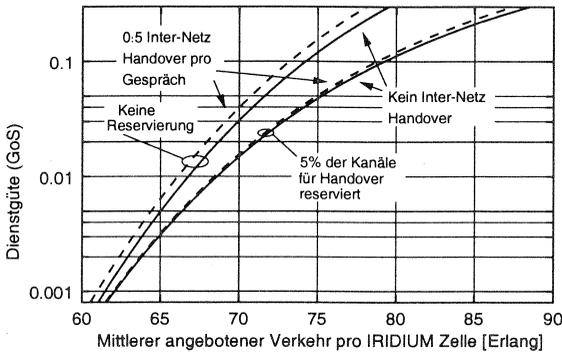
In Abbildung 7.25 ist die Dienstgüte im Satellitensegment als Funktion der Teilnehmerzahl im GSM dargestellt. Es werden nur Handover vom GSM zum Satelli-



**Abbildung 7.25:** Dienstgüte im Satellitensystem über der Teilnehmerzahl im GSM mit Dual Mode Endgerät

tennetz zugelassen. Ausgehend von zwei Grunddienstgüten, die aufgrund des unterschiedlichen angenommenen Verkehrs im Satellitensegment zustande kommen, läßt sich deutlich der Einfluß des durch die wachsende GSM-Teilnehmerzahl entstehenden Handoververkehrs erkennen. Für eine maximal zulässige Dienstgüte können anhand der Ergebnisse die maximalen Teilnehmerzahlen mit Dual Mode Endgerät im GSM als Funktion von  $\mu/\eta_h$  bestimmt werden.

Wird ein Verkehrsüberlauf in beide Richtungen zwischen GSM und Satellitennetz zugelassen, so sind im Mittel Überlauf in und aus der Satellitenzelle gleich groß. Es ergeben sich die in Abbildung 7.26 dargestellten gestrichelten Dienstgüteverläufe nach Gl. 7.7, 7.10, 7.11 und 7.55 als Funktion des mittleren Verkehrs pro IRIDIUM-Zelle. Als Kurvenschaarparameter ist die Reservierung von Verkehrskanälen für Handover aufgeführt. Die durchgezogenen Kurven stellen Referenzkurven ohne Überlauf dar. Aufgrund der hohen Mobilität des Satellitensystems ist der



**Abbildung 7.26:** Dienstgüte im Satellitensystem als Funktion des mittleren angebotenen Verkehrs

Einfluß des Netzüberlaufverkehrs auf die Dienstgüte des Satellitensystems zwar erkennbar, bei Reservierung von Kanälen für Handover aber vernachlässigbar. Netzüberlaufverkehr kann deshalb selbst bei einem relativ hohen angebotenen Verkehr im Satellitensegment noch unterstützt werden.

**7.3.3.2 TELEDESIC-artige Satellitensysteme**

Entsprechend der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Technik zukünftiger TELEDESIC-artiger Satellitensysteme besteht zwischen diesen und GSM weder Ähnlichkeit noch Übereinstimmung im verwendeten Netzaufbau und den Protokollen. Deshalb wird davon ausgegangen, daß der kaskadierte Betrieb solcher Systeme mit GSM möglich ist.

Die entsprechenden Untersuchungen basieren auf dem in Abschnitt 7.3.2 definierten Satellitenreferenzmodell und der in Abschnitt 2.2.1.1 vorgestellten GSM Systemarchitektur. Es gelte darüber hinaus:

- Ein 13 kbit/s GSM-Sprachverkehrschanal wird auf einen 16 kbit/s TELEDESIC-Verkehrschanal abgebildet.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Aufgrund der erdfesten Zellen sind keine Handover erforderlichlich.

Als Ergebnis der verkehrstheoretischen Dienstgüteuntersuchung in Abschnitt 7.3.1 resultiert der in Abbildung 7.27 dargestellte Kurvenverlauf. Weitere ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 7.6 angegeben. Bei einer mittleren akzeptablen Dienstgüte

**Tabelle 7.6:** Dienstgüte bei Integration von GSM und TELEDESIC

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% GSM	1772	1711

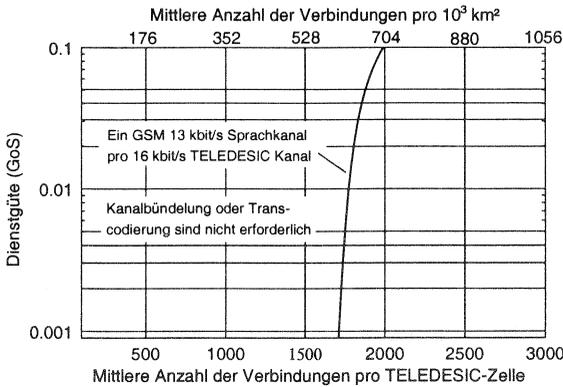


Abbildung 7.27: Dienstgüte bei Integration von GSM und TELEDESIC

von  $GoS = 0,01$  können demnach bis zu 1772 gleichzeitige GSM-Sprachverbindungen pro TELEDESIC-Zelle unterstützt werden. Selbst für dicht besiedelte Gebiete in Europa ist also ein satellitengestützter Betrieb von GSM möglich: bei  $0,623 \text{ E/km}^2$  im GSM ergibt sich ein Verkehr von 1772 E pro TELEDESIC-Zelle. Es kann also der Verkehr von 147 GSM-Zellen übernommen werden, die je mit 20 Kanälen und einer Blockierwahrscheinlichkeit  $p_b \leq 0,01$  ein mittleres Verkehrsangebot von 12 E bedienen können.

### 7.3.4 Integration von DECT/WLL und Satellitennetz

Zur Bewertung der Integration von drahtlosen Zugansnetzen (WLL) auf DECT Basis in ein Satellitennetz sollen analog zu Abschnitt 7.3.2 zwei Szenarien mit 10% bzw. 100% DECT Verkehrsangebot und verschiedenen Mechanismen zur Anpassung der unterschiedlichen Datenraten untersucht werden. Zur Analyse werden die vorgestellten Modelle für Verlustsysteme mit und ohne Reservierung verwendet.

#### 7.3.4.1 IRIDIUM-artige Satellitensysteme

Unter Verwendung des in Abschnitt 7.3.2 definierten Satellitenreferenzmodells wird für die Dienstgüteuntersuchung nach Abschnitt 7.3.1 von folgenden zusätzlichen Annahmen ausgegangen:

- Ein DECT Sprachverkehrschanal wird auf sieben Satellitensystemverkehrskanäle durch Kanalbündelung bzw. auf einen Satellitensystemverkehrskanal durch Transcodierung abgebildet.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Es sind im Mittel 1,6 Handover je Gespräch notwendig, vgl. Abschnitt 7.2.

Für die Dienstgüte eines kaskadiert betriebenen IRIDIUM-artigen und DECT (WLL) Kommunikationssystems ergeben sich lt. Abschnitt 7.3.1 die in Abbildung 7.28 dargestellten Ergebniskurven sowie die ausgewählten Ergebnisse in Tabelle 7.7. Durch einen Anteil von 10% DECT Verkehr ungebündelter Kanäle

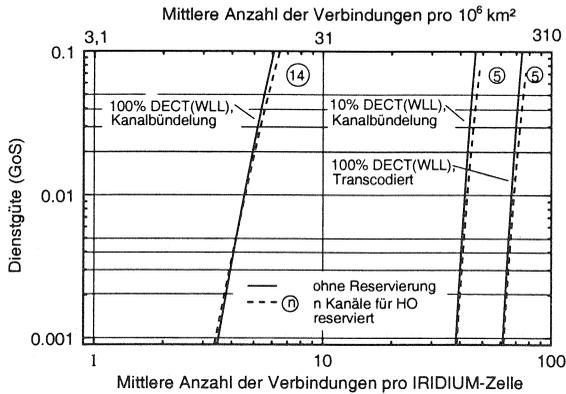


Abbildung 7.28: Dienstgüte bei Integration von DECT/WLL und IRIDIUM

Tabelle 7.7: Dienstgüte bei Integration von DECT/WLL und IRIDIUM

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle ohne/mit Reservierung	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% DECT/WLL (KB)	4,6/4,6	3,6/3,5
10% DECT/WLL (KB)	41,8/42,9	38,5/38,9
100% DECT/WLL (TC)	66,8/68,7	61,5/62,2

reduziert sich die mittlere Anzahl der gleichzeitig betreibbaren Verbindungen im Satellitensystem um 35% auf 42 pro Zelle. Bei 100% gebündelten DECT Verkehr können im Mittel bis zu 5 Verbindungen gleichzeitig betrieben werden. Für den transcodierten Betrieb stehen analog zu den GSM und ISDN Untersuchungen im Mittel 62 Verbindungen zur Verfügung. Zusammenfassend folgt daraus, daß der gemischte oder alleinige Betrieb von drahtlosen DECT-Zugangsnetzen in Kombination mit IRIDIUM-artigen Satellitensystemen nur in ländlichen Gegenden mit dünner Besiedlung zweckmäßig ist.

### 7.3.4.2 TELEDESIC-artige Satellitensysteme

Zusätzlich zur Annahme des in Abschnitt 7.3.2 definierten Satellitenreferenzsystems gelte für die Untersuchung im Rahmen dieses Abschnitts:

- Ein 32 kbit/s DECT Verkehrskanal wird auf zwei 16 kbit/s Satellitensystemverkehrskanäle durch Kanalbündelung bzw. auf einen Satellitensystemverkehrskanal durch Transcodierung abgebildet.
- Das mittlere Verkehrsangebot je Teilnehmer beträgt 10 mE.
- Aufgrund der erdfesten Zellen sind keine Handover erforderlich.

Das Ergebnis der verkehrstheoretischen Dienstgüteuntersuchung in Abschnitt 7.3.1 des kaskadierten Betriebs drahtloser DECT-Zugangsnetze mit dem TELEDESIC-

artigen Satellitenreferenzsystem ist in Abbildung 7.27 und Tabelle 7.8 dargestellt. Für den transcodierten Betrieb ergibt sich, wie zuvor beim Integrationsszenarium

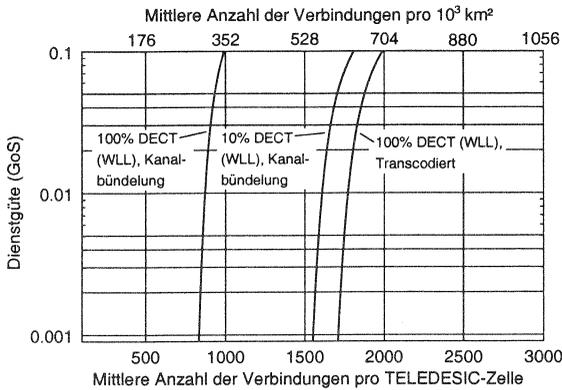


Abbildung 7.29: Dienstgüte bei Integration von DECT/WLL und TELEDESIC

Tabelle 7.8: Dienstgüte bei Integration von DECT/WLL und TELEDESIC

	Mittlere Verbindungszahl pro Zelle	
	GoS = 0,01	GoS = 0,001
100% DECT/WLL (KB)	875	834
10% DECT/WLL (KB)	1613	1552
100% DECT/WLL (TC)	1772	1711

von ISDN und GSM, eine mittlere Anzahl von 1772 gleichzeitig betreibbaren Verbindungen pro Zelle. Bei einem Anteil von 10% DECT Verkehr bei Originaldatenrate von 32 kbit/s reduziert sich diese Zahl um 9% auf 1613. Beim alleinigen Betrieb von DECT Verkehrskanälen mittels Kanalbündelung ist der um 51% reduzierte mittlere Betrieb von bis zu 875 Verbindungen gleichzeitig pro Zelle möglich. Ländliche und kleinstädtische Gebiete können somit mittels drahtloser Zugangnetze auf DECT Basis ausreichend versorgt werden, insbesondere wenn nur ein Teil der Teilnehmer drahtlos und die anderen ans Festnetz angeschlossen sind.



## Untersuchung von Aufenthaltsaktualisierungsverfahren und Handoverprotokollen

Neben den Ergebnissen der verkehrstheoretischen Dienstgüteeanalyse aus Kapitel 7 ist zur Bewertung der zusätzlichen Funktionalität eines integrierten GSM- und IRIDIUM-ähnlichen Zielsystems eine simulative Untersuchung des Netz-Handovers sowie der Aufenthaltsaktualisierungsverfahren im Satellitennetz erforderlich. Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt, erläutert und diskutiert, die mit dem Simulationswerkzeug NeSSIe erzielt worden sind.

### 8.1 Kalibrierung des Simulators

Basierend auf der Antragschrift für das IRIDIUM-Satellitensystem [27] bei der FCC<sup>1</sup> ist es möglich, ein IRIDIUM-ähnliches Satellitensystem zu modellieren und im Simulator NeSSIe zu implementieren. Folgende Parameter, die auch in der Antragschrift verwendet wurden, finden hierbei Berücksichtigung:

- Satellitenanzahl, -bahnart und -höhe,
- Abstrahlcharakteristik der Satellitenantenne,
- EIRP des Satelliten pro Träger (hier max. +53 dBm),
- Antennengewinn des Satelliten (hier +23 dBi),
- EIRP eines mobilen Satellitenfunkendgeräts (hier max. +32 dBm),
- Antennengewinn des mobilen Satellitenfunkendgeräts (hier +2 dBi) und
- Empfängerempfindlichkeit im Satellitennetz (hier -120 dBm).

Bei der Modellbildung des Satellitensystems wird darüberhinaus von einem GSM-ähnlichen Netzaufbau, vgl. [8, 27], sowie einer Empfängermodellierung analog Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 ausgegangen.

Für den Funkversorgungsbereich des GSM kann unter Zuhilfenahme des Ausbreitungsmodells nach GL (3.23-3.27) für jede BTS ein maximaler Funkversorgungsradius berechnet werden. Folgende standardkonforme Parameter werden dabei berücksichtigt:

- EIRP einer BTS (hier +47,5 dBm),
- Antennengewinn einer BTS (hier +7,5 dBi),
- EIRP eines GSM-Endgeräts (hier +34 dBm) und
- Antennengewinn eines GSM-Endgeräts (hier +2dBi).

Darüberhinaus gilt für den GSM-Empfänger:

- Empfängerempfindlichkeit im GSM-Netz (hier -100 dBm) und
- Empfängercharakteristik von Endgerät- und Feststation im GSM nach ETSI GSM-Fehlermusterdateien, vgl. Abschnitt 3.4.2 und [14].

---

<sup>1</sup>Staatlichen Kommission für Telekommunikation der Vereinigten Staaten von Amerika (FCC - Federal Communications Commission)

Die zur Simulation verwendeten Kanalmodelle entsprechen den in Kapitel 3 vorgestellten Mobilfunkkanälen für GSM bei 900 MHz (vgl. Abschnitt 3.4) und für mobilen Satellitenfunk bei 1600 MHz (vgl. Abschnitt 3.5).

## 8.2 Aufenthaltsverwaltung

In Mobilfunknetzen wird ein im Netz registriertes Endgerät mittels Funkruf über ankommende Gespräche informiert. Wäre der Aufenthaltsbereich des Endgeräts nicht bekannt, so müßte im gesamten Netz, d. h. über alle Funkfeststationen, gerufen werden. Offensichtlich würde dies zu einer unnötig hohen Signalisierungslast im Mobilfunknetz führen, so daß diese Betriebsart für moderne Mobilfunknetze nicht in Frage kommt. Um die durch Funkrufe verursachte Signalisierung möglichst gering zu halten, wird z. B. im GSM das Netz über den Aufenthaltsbereich eines jeden im Netz registrierten Endgeräts informiert. Die Aktualisierungshäufigkeit ist eine Funktion der Mobilität, eine mobilitätsunabhängige (z. B. periodische) Aktualisierung ist nach GSM Standard möglich. Wird der Aufenthaltsbereich zu klein gewählt, z. B. nur eine Funkzelle groß, müßte aufgrund der Teilnehmermobilität eine häufige, in der Summe aller Endgeräte signalisierungsintensive Aktualisierung der Aufenthaltsbereiche durchgeführt werden. In der Praxis umfaßt der Aufenthaltsbereich eines Endgeräts mehrere GSM-Funkzellen, die zu einem festen Verbund (LA – Location Area) zusammengefaßt sind. Die Anzahl der Funkzellen pro Verbund richten sich nach der mittleren Mobilität der Endgeräte im Verbund, so daß sich in der Summe für die Signalisierung durch Funkruf und Aktualisierung des Aufenthaltsbereichs ein Minimum ergibt.

Für mobile satellitengestützte Kommunikationsnetze ist analog zum GSM eine Optimierung der Signalisierungslast aus Funkruf und Aufenthaltsbereichsaktualisierungen erforderlich. Drei unterschiedliche Verfahren zur Aufenthaltsbereichsaktualisierung sollen hierzu untersucht, bewertet und miteinander verglichen werden. Im Hinblick auf die Integration mit GSM soll darüber hinaus geklärt werden, wie sich die unterschiedlichen Verfahren zur Aufenthaltsbereichsaktualisierung im Satellitennetz auf die Übertragbarkeit der Aufenthaltsbereichsinformation zwischen Satellitennetz und GSM auswirken.

Ein möglichst signalisierungsarmer Betrieb satellitengestützter Kommunikationsnetze führt zusätzlich zu einer Kapazitätserhöhung des tragbaren mittleren Nettoverkehrs, die aufgrund des kapazitätsbegrenzten Betriebs dieser Systeme wünschenswert ist.

### 8.2.1 Satellitenbasierter Ansatz

In Abbildung 8.1 ist ein GSM-ähnlicher Ansatz zur Aufenthaltsbereichsaktualisierung in satellitengestützten Mobilfunknetzen dargestellt. Ein Verbund von netzzeitigen Funkstationen, hier die Funkzellen eines LEO Satelliten, definieren zu jedem Zeitpunkt durch ihre Funkausleuchtung einen zugehörigen Teilnehmeraufenthaltsbereich:

$$Ab_i = \bigcup_{n=1}^{N_i} F_{i,n} \quad (8.1)$$

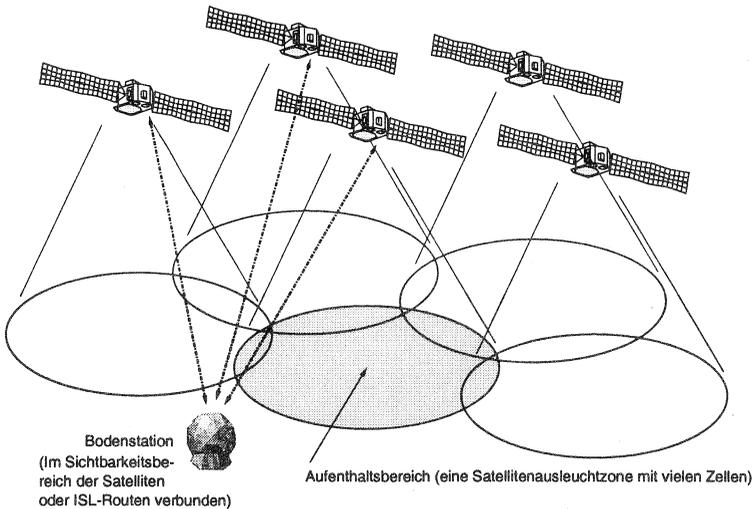


Abbildung 8.1: Satellitenbasierter Teilnehmeraufenthaltsbereich

$A_{b_i}$  Teilnehmeraufenthaltsbereich des Satelliten  $i$   
 mit  $N_i$  Anzahl der aktiven Funkzellen des Satelliten<sup>2</sup>  $i$   
 $F_{i,n}$  Funkzelle  $n$  des Satelliten  $i$ .

Die mittlere Anzahl  $\overline{F_r}$  zu rufender Zellen je Funkruf eines Satelliten  $i$  berechnet man bei serieller Ruffolge zu:

$$\overline{F_r} = \frac{1 + N_i}{2}. \quad (8.2)$$

Die Häufigkeit der Aufenthaltsbereichsaktualisierungen richtet sich nach Umlaufbahn und Anzahl der Satelliten sowie nach der Teilnehmerposition auf der Erde. In Abbildung 8.2 und 8.3 ist für zwei verschiedene Satellitenauswahlstrategien schematisch der zeitliche Verlauf der Satellitenauswahl dargestellt. Das erste, in Abbildung 8.2 dargestellte Verfahren TAS1 wählt unter den momentan sichtbaren Satelliten denjenigen aus, der die höchste Elevation zum Endgerät besitzt. Dies geschieht unter Auswertung des Empfangspegels sowie der Funkzellenkennzahl der einzelnen Funkzellen eines jeden sichtbaren Satelliten. Das zweite, verbesserte Verfahren TAS2 berücksichtigt darüber hinaus die Bahn des momentan ausgewählten Satelliten. So kann eine geringere Häufigkeit erforderlicher Aufenthaltsaktualisierungen erreicht werden. In Abbildung 8.4 und 8.5 sind die Untersuchungsergebnisse der Aufenthaltsbereichsaktualisierung jeweils für den gesamten Erdglobus dargestellt. Aufgrund der Rotation der Erde und der Mobilität des Satellitensystems ist die Aktualisierungshäufigkeit im Mittel unabhängig von der geographischen Länge der Teilnehmerposition. Für die Häufigkeit der Aufenthaltsaktualisierung des Verfahrens TAS1 ist ein stetiger Anstieg von 8,0 Aktualisierungen pro Stunde am Äquator bis hin zu 26,4 Aktualisierungen pro Stunde an den Polen zu verzeichnen. Die minimale, aus der Satellitenbewegung resultierende Aktualisierungshäufigkeit von 7,33 Aktualisierungen

<sup>2</sup>Zur Reduzierung von Interferenzen im System werden bei satellitengestützten Mobilfunknetzen auf polaren Bahnen redundante Satellitenfunkzellen abgeschaltet.

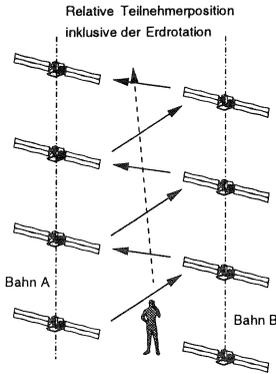


Abbildung 8.2: Auswahl nach Elevation

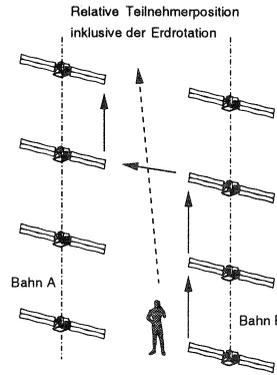


Abbildung 8.3: Verbesserte Auswahl

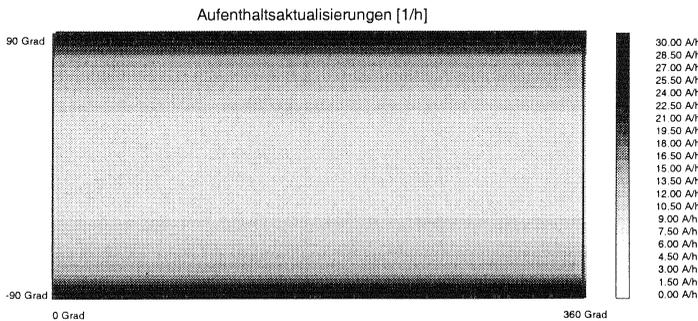


Abbildung 8.4: Ortsabhängige Zahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde für Verfahren TAS1

pro Stunde wird hierbei in einem Gebiet von  $-35^\circ \leq$  geographische Breite  $\leq 35^\circ$  nur gering überschritten. Für  $-49^\circ \leq$  geographische Breite  $\leq 49^\circ$  liegt die Aktualisierungshäufigkeit unterhalb von 10,0 Aktualisierungen pro Stunde.

Abbildung 8.5 zeigt die Simulationsergebnisse für das Verfahren TAS2. Um die

Tabelle 8.1: Exemplarische Ergebnisse für das Verfahren TAS1

Verfahren	TAS1
Anzahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde (Europa 51°)	10,57
Mittlere Anzahl gerufener Satellitenzellen pro Funkruf	24,5

Satellitenbahn B des momentan ausgewählten Satelliten zu bevorzugen, wählt der Teilnehmer erst dann einen Satellit einer fremden Bahn, wenn dieser eine Elevation von mindestens  $P_g\%$  (hier 10%) über der besten Elevation eines sichtbaren Satelliten der momentanen Bahn B aufweist. Eine signifikante Veränderung der Funkkanaleigenschaften des Verfahrens TAS2 gegenüber TAS1 konnte bei einer 10%igen Präferenz nicht festgestellt werden. Auch für das Satellitenauswahlverfahren TAS2

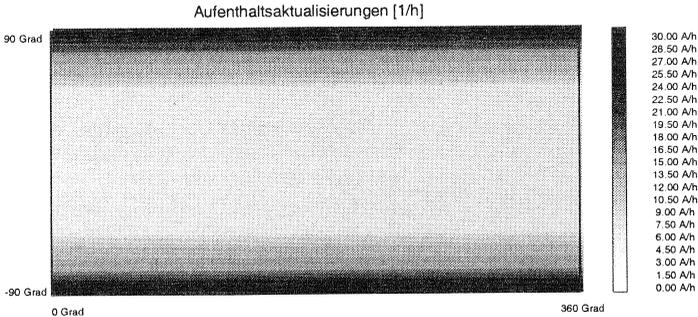


Abbildung 8.5: Ortsabhängige Zahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde für das Verfahren TAS2

Tabelle 8.2: Exemplarische Ergebnisse für das Verfahren TAS2

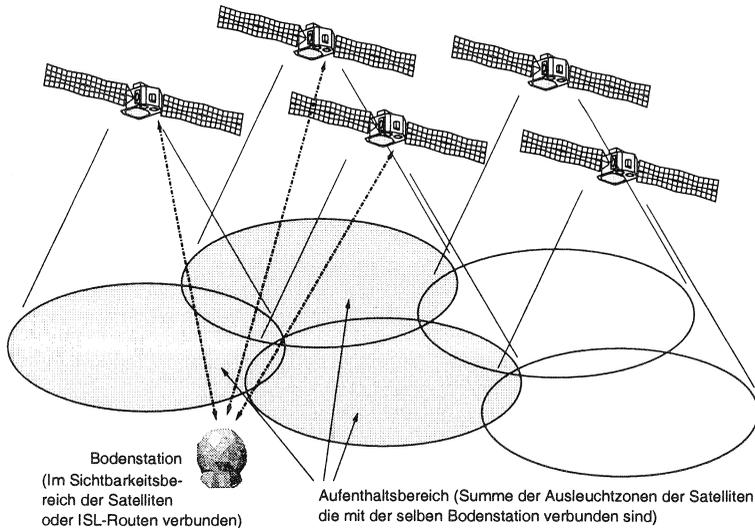
Verfahren	TAS2
Anzahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde (Europa 51°)	8,66
Mittlere Anzahl gerufener Satellitenzellen pro Funkruf	24,5

ist die Aktualisierungshäufigkeit unabhängig von der geographischen Länge der Teilnehmerposition. Sie variiert von 7,5 Aktualisierungen pro Stunde am Äquator bis hin zu 26,4 Aktualisierungen pro Stunde an den Polen. Die minimale Aktualisierungshäufigkeit liegt unter der des Verfahrens TAS1. Für eine Häufigkeit von 10,0 Aktualisierungen pro Stunde resultiert ein gegenüber dem Verfahren TAS1 vergrößertes Gebiet mit  $-53^\circ \leq \text{geographische Breite} \leq 53^\circ$ . Das Verfahren TAS2 ist somit dem Verfahren TAS1 vorzuziehen, vgl. [36].

Aus den Ergebnissen folgt, daß ein satellitenbasiertes Aufenthaltsbereichsaktualisierungsverfahren eine satellitenmobilitätsabhängige Häufigkeit von 7,33 Aktualisierungen pro Stunde nicht unterschreiten kann. Eine Abbildung von GSM-Aufenthaltsgebieten auf Satellitensystem-Aufenthaltsgebiete ist aufgrund der großen Satellitenfunkzellen nur einseitig in Richtung von GSM zu Satellitennetz möglich. Die Abbildung ist nicht umkehrbar eindeutig.

### 8.2.2 Bodenstationsbasierter Ansatz

Abbildung 8.6 zeigt ein zweites untersuchtes Verfahren zur Aufenthaltsbereichsaktualisierung. Es beruht darauf, daß zu jedem Zeitpunkt ein Teilnehmeraufenthalts-



**Abbildung 8.6:** Bodenstationbasierter Teilnehmeraufenthaltsbereich

gebiet durch die Summe aller Funkausleuchtgebiete der Satelliten gebildet wird, die von einer Bodenstation aus sichtbar oder über Routen mit weiteren Satelliten über spezielle Inter-Satellitenrichtfunkverbindungen (ISL) erreicht werden können<sup>3</sup>:

$$Ab_i = \bigcup_{m=1}^{M_i} \bigcup_{n=1}^{N_i} F_{i,n} \quad (8.3)$$

mit  $M_i$  Anzahl der einer Bodenstation zugeordneten Satelliten.

Die mittlere Anzahl  $\overline{Fr}$  zu rufender Zellen je Funkruf einer Bodenstation  $i$  berechnet sich somit bei serieller Ruffolge zu:

$$\overline{Fr} = \frac{1 + \overline{M}_i N_i}{2} \quad (8.4)$$

Wird eine Anzahl von Bodenstationen (z. B. 17) symmetrisch über den gesamten Globus verteilt (vgl. Abb. 8.7), so lassen sich alle Satelliten eines IRIDIUM-ähnlichen Satellitensystems mit maximal einer zusätzlichen ISL-Verbindung von den jeweiligen Bodenstationen aus erreichen. Eine Aufenthaltsaktualisierung wird für dieses bodenstationbasierte Verfahren, TAS3, aus folgenden zwei Gründen erforderlich:

1. Der momentan ausgewählte Satellit wechselt aufgrund seiner Mobilität die Bodenstationszuordnung.

<sup>3</sup>Ein Satellit wird hierbei stets der physikalisch nächsten Bodenstation zugeordnet.

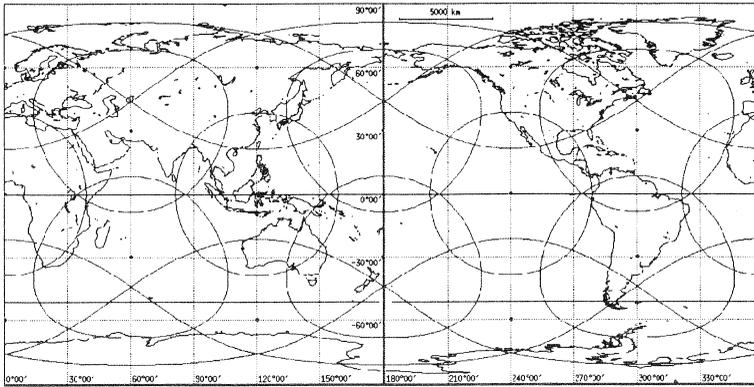


Abbildung 8.7: Symmetrische Anordnung von 17 Bodenstationen

2. Aufgrund besserer Funkversorgung wählt der Endteilnehmer einen neuen Satelliten mit anderer Bodenstationszuordnung aus.

In Abbildung 8.8 sind die Simulationsergebnisse der erforderlichen Aufenthaltsbereichsaktualisierungen, hier die Häufigkeit, dargestellt. Aus der resultierenden

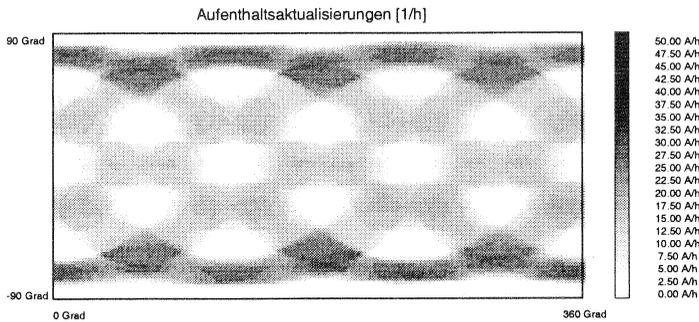


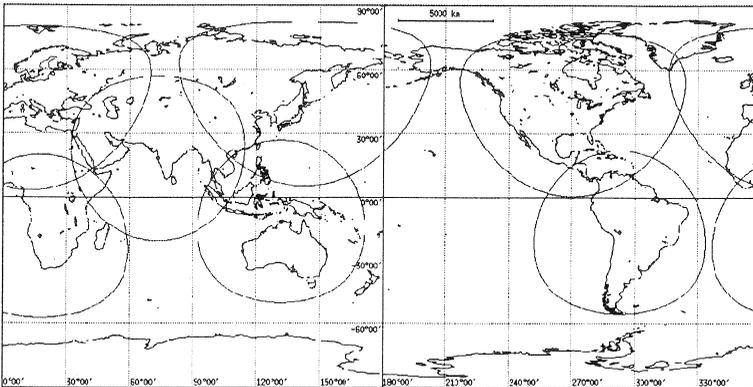
Abbildung 8.8: Ortsabhängige Zahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde für das Verfahren TAS3

Tabelle 8.3: Exemplarische Ergebnisse für das Verfahren TAS3

Verfahren	TAS3
Anzahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde (Europa 51°)	0
Mittl. Anzahl gerufener Satellitenzellen pro Funkruf	93,62

Verteilung der erforderlichen Aufenthaltsbereichsaktualisierungen pro Stunde läßt sich deutlich die Anordnung der Bodenstationen wiedererkennen. Innerhalb eines bestimmten Radius um jede Bodenstation ist dabei sichtlich keine Aktualisierung des Aufenthaltsbereichs erforderlich. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ein Teilnehmer in unmittelbarer Nähe zur Bodenstation stets auch über einen Satelliten, der dieser Bodenstation zugeordnet ist, erreicht werden kann. Für die Überschneidungsgebiete der Bodenstationszuordnungsradien müssen abhängig von der geographischen Breite bis zu 25 Aufenthaltsbereichsaktualisierungen pro Stunde durchgeführt werden. Unter Inkaufnahme einer deutlich höheren mittleren Anzahl zu rufender Satellitenfunktellen je Funkruf kann mit Verfahren TAS3 die Anzahl durchzuführender Aufenthaltsbereichsaktualisierungen für kleine Gebiete um die Bodenstationen herum bis auf Null reduziert werden.

In Abbildung 8.9 ist eine aus den vorangegangenen Überlegungen entwickelte optimale Bodenstationsverteilung dargestellt, die sich an den Kontinenten unter Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung orientiert.



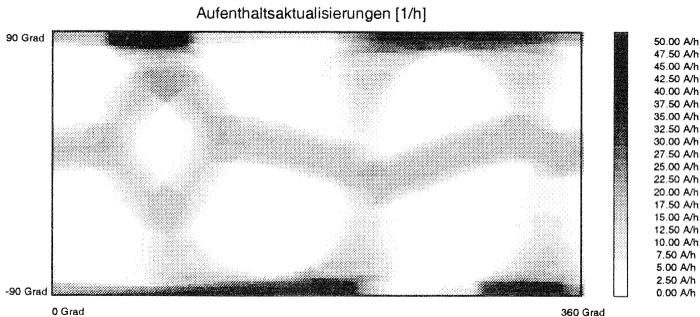
**Abbildung 8.9:** An der Bevölkerungsverteilung orientierte Bodenstationsverteilung

Da sich mit nur sieben Bodenstationen nicht mehr alle Satelliten mit maximal einer ISL Verbindung zuordnen lassen, sind mit diesem Verfahren TAS4 bis zu drei ISL Verbindungen (Multi-Hop) erforderlich, um die jeweils geographisch nächste Bodenstation zu erreichen. Analog zu Abbildung 8.8 ist in Abbildung 8.10 die durch Simulation ermittelte Häufigkeit der erforderlichen Aufenthaltsbereichsaktualisierungen dargestellt.

**Tabelle 8.4:** Exemplarische Ergebnisse für das Verfahren TAS4

Verfahren	TAS4
Anzahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde (Europa 51°)	0
Mittl. Anzahl gerufener Satellitenzellen pro Funkruf	226,82

Aus der resultierenden Verteilung der Zahl erforderlicher Aufenthaltsaktualisierungen läßt sich deutlich ein vergrößerter Bereich um die jeweiligen Bodenstationen



**Abbildung 8.10:** Ortsabhängige Zahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde für das Verfahren TAS4

nen herum erkennen, für den keine Aktualisierungen durchgeführt werden müssen. Großteile von Europa z. B. liegen innerhalb einer solchen Zone. Da für das Verfahren TAS4 aber auch die mittlere Anzahl zu rufender Satellitenfunkzellen je Funkruf mehr als doppelt so groß ist wie für das Verfahren mit 17 Bodenstationen, kann eine vergleichende Aussage über die Leistungsfähigkeit beider Verfahren nur gemacht werden, wenn die Signalisierungskosten für Funkrufe und Aufenthaltsbereichsaktualisierungen, sowie die unterschiedliche Anzahl der erforderlichen Bodenstationen berücksichtigt werden.

Eine Abbildung von GSM-Aufenthaltsgebieten auf Satellitensystem-Aufenthaltsgebiete ist für die Verfahren TAS3 und TAS4 nur nach Festlegung der Satellitensystem-Aufenthaltsgebiete möglich. Die Abbildung ist nicht umkehrbar eindeutig.

### 8.2.3 Teilnehmerbasierter Ansatz

Ein weiteres neu entwickeltes Verfahren (TAS5) wird in Abbildung 8.11 dargestellt. Bei diesem teilnehmerspezifischen Verfahren wird der Aufenthaltsbereich nicht anhand der Satellitenfunkzellen definiert, sondern richtet sich nach der Position und Geschwindigkeit des mobilen Teilnehmers. Hierzu ist eine regelmäßige Ermittlung der geographischen Position des Mobilteilnehmers notwendig. Der Ablauf ist wie folgt:

1. Der Teilnehmer aktiviert sein mobiles Endgerät.
2. Durch Laufzeit- und Dopplerschätzungen wird in Verbindung mit den empfangenen Satellitenfunkzellenkennzahlen, den entsprechenden Signalpegeln dieser Zellen und der momentanen Zeit die eigene Position vom Endgerät aus geschätzt. Eine Ermittlung dieser Position über das GPS<sup>4</sup> oder durch einen Positionierungsdienst des mobilen Satellitensystem ist alternativ möglich.

<sup>4</sup>Global Positioning System [76, 99]

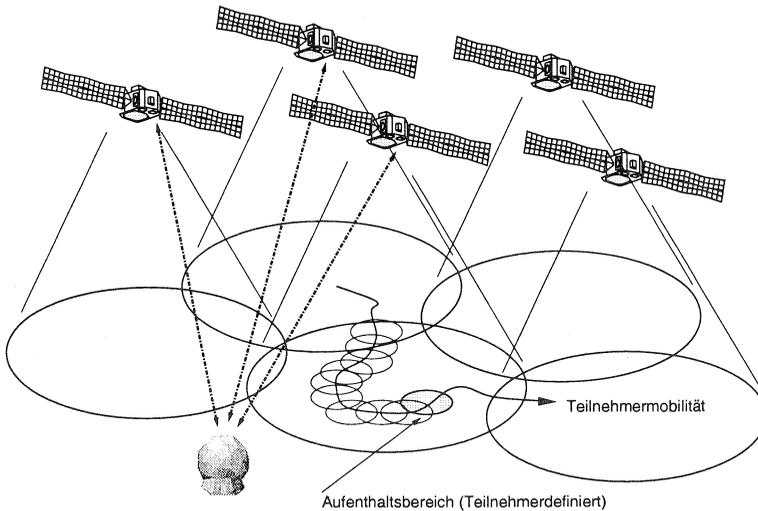


Abbildung 8.11: TAS5: Teilnehmerdefinierter Aufenthaltsbereich

3. Aufgrund der mittleren Mobilität des Endgeräts in der Vergangenheit oder einer festen Standardeinstellung wird der Radius eines Kreises um die momentane Position definiert, der den individuellen Teilnehmeraufenthaltsbereich beschreibt.
4. Position und Radius werden dem Satellitensystem im Rahmen einer Aufenthaltsaktualisierung mitgeteilt.
5. Durch eine periodische Positionsbestimmung überwacht das mobile Endgerät, ob es sich noch innerhalb seines Teilnehmeraufenthaltsbereichs befindet.
6. Droht das Verlassen des definierten Aufenthaltsbereiches, so wird eine erneute Aufenthaltsbereichsaktualisierung durchgeführt. Hierbei wird wie zuvor die Teilnehmerposition und der neue Radius des Teilnehmeraufenthalts, der sich aus der mittleren eigenen Mobilität ableitet, übermittelt.

Da die genaue Position des Teilnehmers innerhalb seines Teilnehmeraufenthaltsbereichs nicht notwendigerweise bekannt ist, muß bei einem ankommenden Gespräch in allen Satellitenfunkzellen, die den Teilnehmeraufenthaltsbereich versorgen, gerufen werden, vgl. Abb. 8.12. Wird in den einzelnen Funkzellen dabei der Reihe nach gerufen, so läßt sich die mittlere Anzahl der Funkrufe  $\overline{Fr}$  bei schneller Antwort des mobilen Endgeräts auf

$$\overline{Fr} = \frac{1 + N_{\text{Maximale Funkzellenzahl}}}{2} \quad (8.5)$$

reduzieren. In Abbildung 8.13 ist die mittlere Anzahl sichtbarer Satellitenfunkzellen  $\overline{SFz}$  vom Teilnehmeraufenthaltsbereich aus als Funktion des Satellitenfunkzellenradius  $R_{SZ}$  über den Radius des Teilnehmeraufenthaltsbereichs aufgetragen. Die mittlere Anzahl der Funkrufe  $\overline{Fr}$  berechnet sich aus

$$\overline{Fr} = 1 + \frac{R_{SZ} - 1}{2}. \quad (8.6)$$

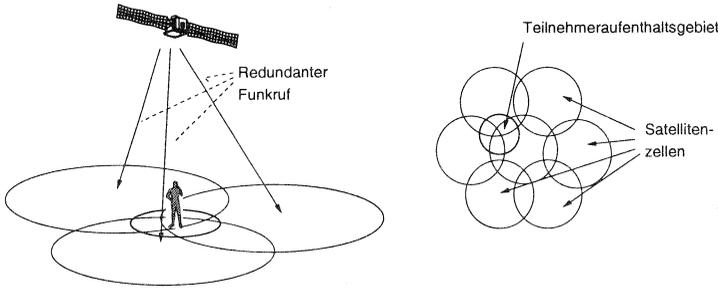


Abbildung 8.12: Redundanter Funkruf bei einem ankommenen Gespräch

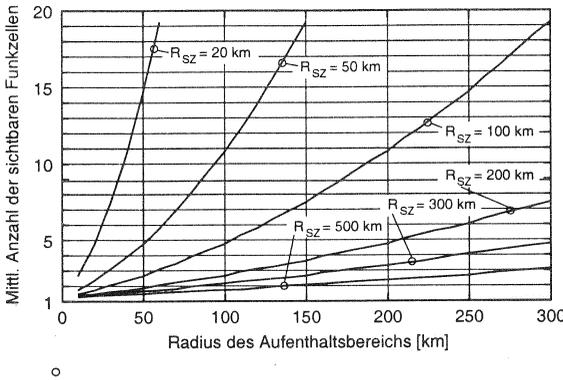


Abbildung 8.13: Mittlere Anzahl sichtbarer Satellitenfunkzellen

Die erforderliche Häufigkeit der Aufenthaltsbereichsaktualisierung für dieses Verfahren ist in Abbildung 8.14 als Funktion der mittleren Teilnehmergewindigkeit  $v$  über den Radius des Teilnehmeraufenthaltsbereichs aufgetragen. Zur Berechnung des optimalen Radius des Teilnehmeraufenthaltsbereichs als Funktion der mittleren Teilnehmergewindigkeit müssen die Signalisierungskosten von Funkruf und Aufenthaltsbereichsaktualisierung berücksichtigt werden.

Für die Summe der Signalisierungskosten  $K_{Gesamt}$  aus Funkruf und Aufenthaltsbereichsaktualisierung gilt:

$$K_{Gesamt} = K_{Funkruf} + K_{Aufenthaltsaktualisierung}, \tag{8.7}$$

wobei

$$K_{Funkruf} = k_{F1} \cdot k_{F2} \cdot k_{F3} \cdot k_{F4} \tag{8.8}$$

mit

- $k_{F1}$  mittl. Anzahl gerufener Zellen pro Funkruf,
- $k_{F2}$  mittl. Anzahl der Funkrufe pro Gespräch,
- $k_{F3}$  mittl. Anzahl ankommender Gespräche pro Stunde und
- $k_{F4}$  Signalisierungskosten pro Funkruf,

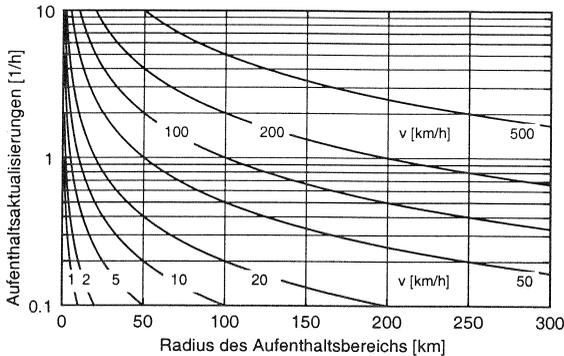


Abbildung 8.14: Aufenthaltsbereichsaktualisierungshäufigkeit für das Verfahren TAS5

und

$$K_{\text{Aufenthaltsaktualisierung}} = k_{A1} \cdot k_{A2} \tag{8.9}$$

mit

- $k_{A1}$  mittl. Anzahl der Aufenthaltsaktualisierungen pro Stunde und
- $k_{A2}$  Signalisierungskosten pro Aufenthaltsaktualisierung.

Für die Untersuchungen des Verfahrens teilnehmerdefinierten Aufenthaltsbereichen gelte der in Tabelle 8.5 angegebene Parametersatz mit der freien Variablen  $K_0$  der Kostenfunktion. In Abbildung 8.15 sind die resultierende Gesamtsignalisierungs-

Tabelle 8.5: Untersuchter Parametersatz für das Verfahren TAS5

mittl. Anzahl der Funkrufe pro ankommendes Gespräch	2
mittl. Anzahl ankommender Gespräche pro Stunde	1
Signalisierungskosten pro Funkruf	$K_0$
Signalisierungskosten pro Aufenthaltsaktualisierung	$1,5, 10, 20 \times K_0$

kosten als Funktion des Radius des Aufenthaltsbereiches mit der mittleren Teilnehmergewindigkeit  $v$  und als Parameter für ein beispielhaft angenommenes Aufenthaltsbereichsaktualisierungs- zu Funkrufkostenverhältnis von  $\frac{k_{A2}}{k_{F4}} = 10$  dargestellt. Aus den Minima der jeweiligen Kostenkurven läßt sich der optimale Radius des Teilnehmeraufenthaltsbereiches als Funktion der mittleren Teilnehmergewindigkeit bestimmen.

In Abbildung 8.16 sind für vier verschiedene Kostenverhältnisse  $\frac{k_{A2}}{k_{F4}}$  die optimalen Radien als Funktion der Geschwindigkeit dargestellt.

Eine umkehrbar eindeutige Abbildung von GSM- auf Satellitensystem-Aufenthaltsbereiche ist für das Verfahren TAS5 für kleine Radien der Teilnehmeraufenthaltsbereiche im Satellitennetz und unter Kenntnis der Teilnehmerposition (z. B. auf 10 km genau) möglich. Hierdurch ist eine einfache Abwicklung des Mobilitätsmanagements im Rahmen des Inter-Netz Handovers auf GSM- und Satellitennetzseite möglich.

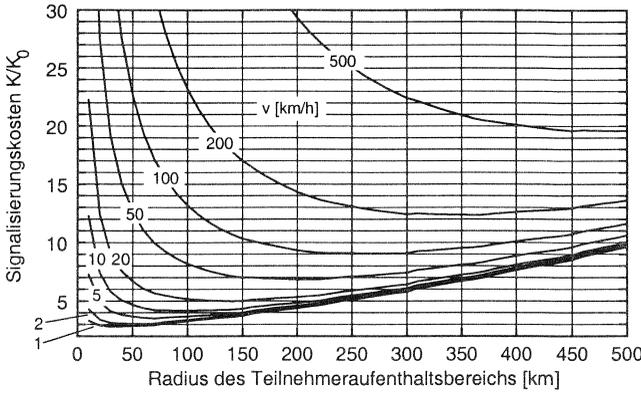


Abbildung 8.15: Signalisierungskosten für das Verfahren TAS5 ( $\frac{k_{A2}}{k_{F4}} = 10$ )

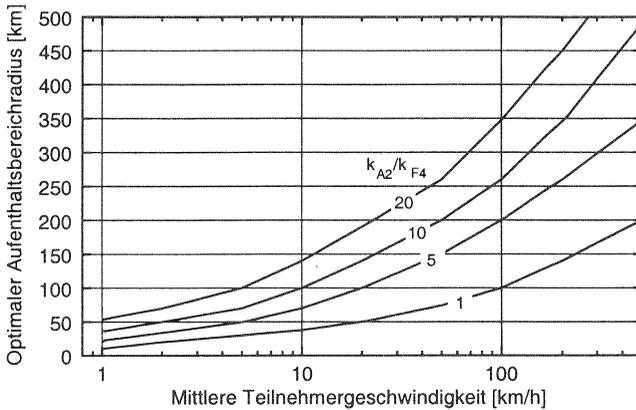


Abbildung 8.16: Optimaler Teilnehmeraufenthaltsbereichsradius

### 8.2.4 Kostenvergleich

Mit Hilfe des in Tabelle 8.5 spezifizierten Parametersatzes ist, basierend auf den exemplarischen Ergebnissen (vgl. Tabelle 8.1–8.4) der Aufenthaltsbereichsaktualisierungsverfahren TAS1–TAS5, ein Vergleich der einzelnen Verfahren bzgl. des auftretenden Signalisierungsverkehrs möglich. In Abbildung 8.17 sind die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Für eine mittlere Teilnehmersgeschwindigkeit von 1 km/h (Fußgänger) bis hin zu 500 km/h (Flugzeug) erzielt das teilnehmerpositionsbasierte Verfahren TAS5 unabhängig vom Kostenverhältnis  $\frac{k_{A2}}{k_{F4}}$  die niedrigsten mittleren Gesamtsignalisierungskosten pro Stunde. Des weiteren wird deutlich, daß aufgrund der hohen mittleren Anzahl am Funkruf beteiligter Zellen für die Verfahren TAS3 und TAS4 die Gesamtsignalisierungskosten bis auf ein Kostenverhältnis  $\frac{k_{A2}}{k_{F4}} = 20$  stets über denen der Verfahren TAS1 und TAS2 liegen. Das hier vorgeschlagene Verfahren TAS5 stellt somit bezüglich der Signalisierungskosten für Funkrufe und Aufenthalts-

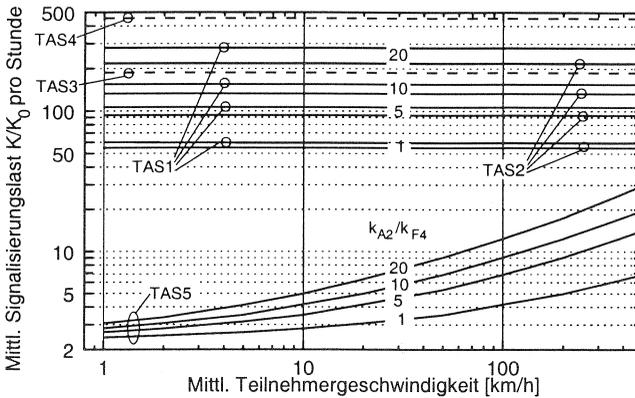


Abbildung 8.17: Vergleich der Aktualisierungsverfahren

verwaltung eine erhebliche Verbesserung dar, und ist nicht nur in satellitengestützten sondern auch in terrestrischen Mobilfunknetzen vorteilhaft einzusetzen.

### 8.3 Inter-Netz Handover

In diesem Abschnitt wird die Eignung der GSM-Signalisierungsprotokolle für Inter-Netz Handover zwischen GSM und einem auf GSM-Technik beruhenden IRIDIUM-ähnlichen Mobilfunksystem untersucht und bewertet.

#### 8.3.1 Untersuchte Szenarien

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Szenarien basieren auf der in Abbildung 8.18 dargestellten Kombination von GSM und mobilem Satellitensystem. Die GSM-Funkausleuchtung basiert auf dem in Abschnitt 3.4 vorgestellten Funkausbreitungsmodell, so daß auf der Hälfte der Wegstrecke zwischen zwei Funkfeststationen des GSM stets der gleiche minimale Empfangspegel von -90 dBm herrscht:

$$L_{open}\left(\frac{\overline{M_i M_j}}{2}\right) = L_{rural,suburban,urban}\left(\frac{\overline{M_i M_j}}{2}\right) = -90 \text{ dBm} \quad (8.10)$$

für  $M_i, M_j \in \{M_1, M_2, M_3\}$ ,  $i \neq j$ , (vgl. auch Abbildung 8.18). Insgesamt werden vier verschiedene Szenarien, die sich durch jeweils unterschiedliche Geländetypen auszeichnen, untersucht (vgl. Abbildung 8.18):

- Szenarium 1: offenes Gelände,
- Szenarium 2: ländliches Gelände,
- Szenarium 3: vorstädtisches Gelände und
- Szenarium 4: städtisches Gelände.

Der mittlere Pegel der GSM-Funkausleuchtung für ein vorstädtisches Gelände ist in Abbildung 8.19 dargestellt. Das mobile Satellitensystem schafft eine Funkausleuchtung der untersuchten Szenarien, wie in Abbildung 8.20 exemplarisch für einen einzelnen Satelliten gezeigt. Für die Untersuchungen mit Hilfe des NeSSiE

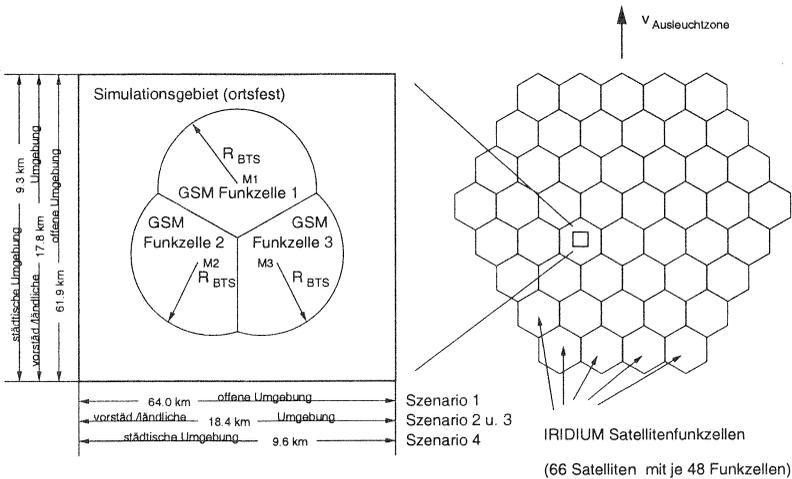


Abbildung 8.18: LEO Satelliten und GSM-Simulationsszenarien

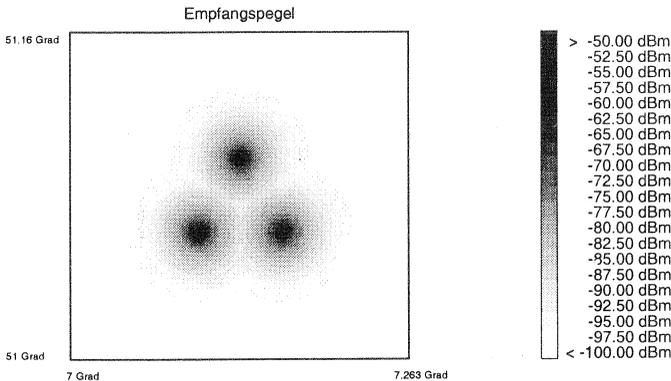


Abbildung 8.19: GSM-Funkausleuchtung für das vorstädtische Szenarium

Simulators wird auf die gesamte IRIDIUM-Konstellation zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Somit ist eine möglichst realitätsnahe kontinuierliche Untersuchung des Handoverablaufs möglich.

In Abbildung 8.21-8.24 ist für die im Szenarium verfügbare Satellitenfunkausleuchtung für die einzelnen untersuchten Geländetypen jeweils exemplarisch der Verlauf der Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER – Bit Error Ratio) für uncodierte Übertragung dargestellt. Hierbei ist deutlich der Einfluß des Geländetyps sowie der zeitlich variierenden Elevation auf diese Fehlerwahrscheinlichkeit zu erkennen.

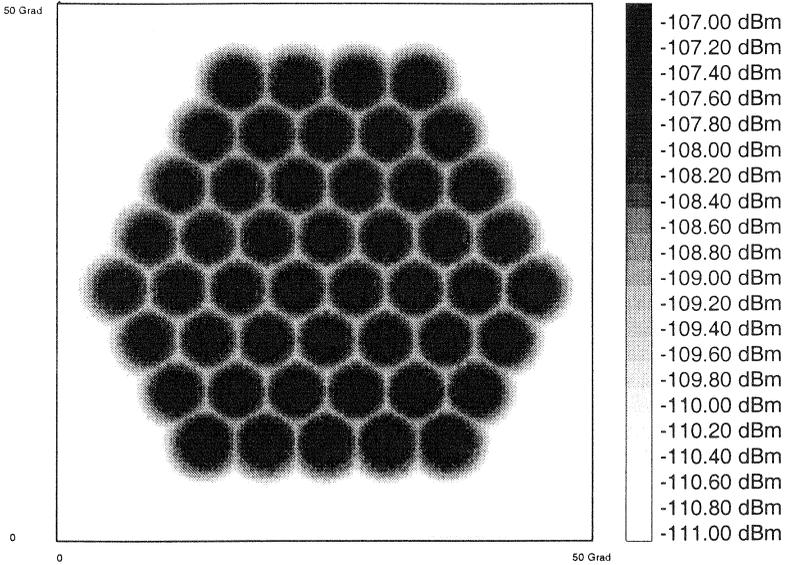


Abbildung 8.20: IRIDIUM-ähnliche Satellitenfunkausleuchtung

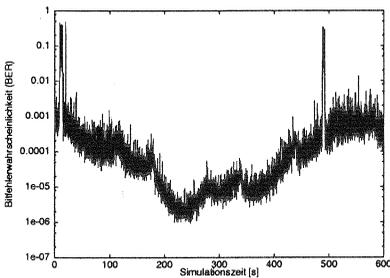


Abbildung 8.21: Zeitabhängiges BER der Satellitenverbindung in offenem Gelände

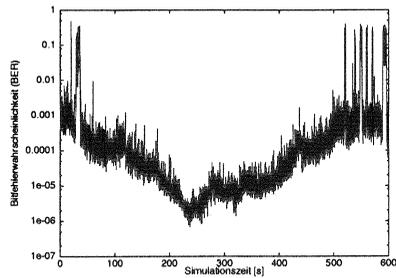
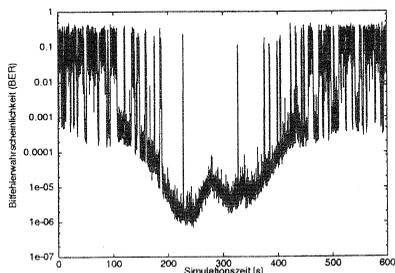
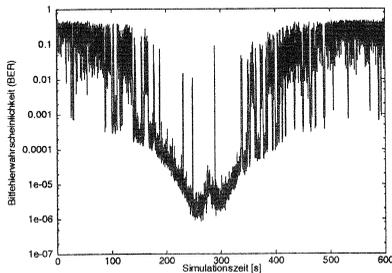


Abbildung 8.22: Zeitabhängiges BER der Satellitenverbindung in ländlichem Gelände

Zur Simulation des Handoververhaltens wird im gesamten Simulationsszenarium eine bestimmte Anzahl Mobilfunkteilnehmer zufällig verteilt angenommen. Jeder Teilnehmer bewegt sich mit einer um 20 km/h normalverteilten ( $\sigma = 10$  km/h) Geschwindigkeit  $v$ . Die Gesamtteilnehmerzahl  $N$  im Szenarium liegt unterhalb der Kapazität des IRIDIUM-Systems.



**Abbildung 8.23:** Zeitabhängiges BER der Satellitenverbindung in vorstädtischem Gelände



**Abbildung 8.24:** Zeitabhängiges BER der Satellitenverbindung in städtischem Gelände

Die Kapazität beim Handover wird durch die maximal im Satellitensystem verfügbare Anzahl von Verkehrskanälen pro Zelle und mögliche Begrenzungen durch das Vielfachzugriffsverfahren eingeschränkt.

Aus der mittleren zulässigen Anzahl von 62 Verbindungen bei 92 Verkehrskanälen bei einer Dienstgüte von 1% (vgl. Abbildung 7.1.1) kann die mittlere zulässige Anzahl von Handoverversuchen bestimmt werden. Unter der Annahme eines Verkehrsangebots von 10 mE pro Teilnehmer sowie maximal eines Inter-Netz Handovers pro Gespräch errechnet sich eine maximale Anzahl von  $N_{Max} = \frac{62}{0.01} = 6200$  Teilnehmern im Szenarium.

Da das Zugriffsverfahren des Erstzugriffs auf das IRIDIUM-Satellitensystem nicht bekannt ist, wird ein reines ALOHA/Verfahren (vgl. [29]) beim Erstzugriff benutzt. Ist eine bis zu fünffache Wiederholung des Zugriffs bei Kollision erlaubt, so ergibt sich für die Erfolgswahrscheinlichkeit  $p_{bZ}$  des Zugriffs:

$$p_{bZ} = 1 - p_b^{n_{max}}, \quad (8.11)$$

wobei  $p_b$  die Kollisionswahrscheinlichkeit und  $n_{max}$  die maximal zulässige Anzahl von Wiederholungen bei Kollision darstellt. Aufgrund der Kollisionen erhöht sich das ursprüngliche Verkehrsangebot  $A_0$  auf

$$A \approx A_0 \left( 1 + 0.5 \sum_{n=1}^{n_{max}} p_b^n \right). \quad (8.12)$$

Für ein reines ALOHA-Verfahren folgt für die Kollisionswahrscheinlichkeit:

$$p_b = 1 - e^{-2A} \quad (8.13)$$

$$= 1 - e^{-2A_0(1+0.5 \sum_{n=1}^{n_{max}} p_b^n)}. \quad (8.14)$$

Für eine angestrebte Erfolgswahrscheinlichkeit von  $p_{bZ} = 10^{-4}$  und eine maximale Anzahl von  $n_{max} = 5$  Wiederholungen läßt sich die Gl. 8.14 nach  $p_p$  näherungsweise auflösen:

$$p_b \approx \frac{2A_0}{1 - A_0}. \quad (8.15)$$

Für die mittlere ursprüngliche Belegung  $A_0$  des Erstzugriffskanals ohne Kollision resultiert:

$$A_0 = \frac{p_{bZ}^{\frac{1}{5}}}{2 + p_{bZ}^{\frac{1}{5}}} \quad (8.16)$$

bzw. eine Belegung des Erstzugriffskanals von 0,073426 Erlang. Dies entspricht 31924 Handover/h, eine Zahl, die bei der beschränkten Zahl von Verkehrskanälen nicht auftreten kann.

Mit einer fest eingestellten Teilnehmerzahl von  $N = 5000$  im Simulationsszenarium besteht in der Konsequenz keine Gefahr der Kapazitätsbegrenzung durch das Satellitensystem. Das GSM ist im Gegensatz zum IRIDIUM-Satellitensystem durch Wahl des Zellradius bzgl. der Kapazität einfach erweiterbar, so daß bei entsprechender Dimensionierung ebenfalls keine Beschränkung der Kapazität droht.

### 8.3.2 Handoverauslösung

Inter-Netz Handover können in einem integriert GSM- und satellitengestützten Mobilfunknetz aus einer Reihe von Gründen ausgelöst werden. Folgende Handoverinitiationen sind möglich:

1. Der Empfangspegel RXLEV oder die Qualität RXQUAL des momentan verwendeten Mobilfunknetzes sinkt unterhalb eines vorher eingestellten Grenzwertes.
2. Aufgrund von Voreinstellungen wählt das mobile Endgerät bei Bedarf das jeweils optimale Netz aus und leitet notfalls einen Handover ein. Die Netzauswahl kann sich z. B. nach der Preisstruktur oder Dienstpalette der verfügbaren Mobilfunknetze richten.
3. Ein Handover wird vom Teilnehmer manuell ausgelöst.

Für die Handoveruntersuchungen wird im Simulator davon ausgegangen, daß stets das GSM gegenüber dem satellitengestützten Mobilfunknetz präferiert wird. Da beim Verlassen des GSM-Funkversorgungsbereichs der Empfangspegel RXLEV kontinuierlich sinkt, aber die Empfangsqualität RXQUAL nicht notwendigerweise auch proportional geringer wird, ist im Simulator eine rein pegelbasierte Handoverauslösung mit Auslöseschwelle RXLEV\_MIN implementiert.

RXLEV\_MIN wird nach der im Simulator gemessenen Blockierwahrscheinlichkeit des asynchronen GSM Inter-MSC Handovers nach Standard GSM 03.09 [5] bestimmt. Um den Einfluß der Funkausbreitung im GSM an der Handoverblockierwahrscheinlichkeit gering zu halten, wird für RXLEV\_MIN ein Funkpegel von  $-93$  dBm gewählt, was eine Handoverblockierwahrscheinlichkeit im Simulator von  $10^{-3}$  zur Folge hat. Die gemessene mittlere Handoverunterbrechungsdauer  $t_u$  beträgt 177,0 ms mit einer Standardabweichung von 56,5 ms. Zur protokolltechnischen Simulation ist für diese Untersuchung am Ort der momentan selektierten GSM Funkfeststation im Simulator eine weitere Funkfeststation plaziert, zu der der asynchrone Inter-MSC Handover durchgeführt wird.

Für den in Abschnitt 3.4 vorgestellten GSM 900 MHz Mobilfunkkanal und der Empfangspegelgrenze RXLEV\_MIN =  $-93$  dBm ergibt sich in vorstädtischem Gelände eine wie in Abbildung 8.25 dargestellte geographische Verteilung der Orte, an denen ein Inter-Netz Handover zwischen GSM und satellitengestütztem Mobilfunknetz ausgelöst wird. Zum Vergleich des tatsächlichen Empfangspegels im mo-

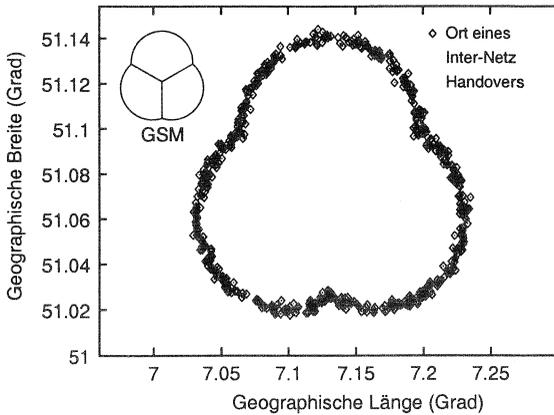


Abbildung 8.25: Orte eines Inter-Netz Handovers im vorstädtischen Szenarium

bilen Endgerät mit RXLEV\_MIN wird eine Mittelung über  $N_M = 100$  RXLEV-Empfangswerte durchgeführt.

### 8.3.3 Satellitenkanalcodierung

Die Art der Kanalcodierung im IRIDIUM-Satellitensystem ist für die Übertragung von Signalisierungsdaten nicht bekannt. Für das verwendete IRIDIUM-ähnliche Satellitenreferenzsystem wird deshalb der Einfluß verschiedener Verfahren zur Kanalcodierung (vgl. Tabelle 8.6) auf die Blockierwahrscheinlichkeit eines Inter-Netz Handovers untersucht, vgl. [33]. Die Codieraten der untersuchten Block-(BCH – Bose-Chaudhuri-Hocquenghem), Reed-Solomon (RS) und Faltungscodierung sind hierbei zu etwa  $r = \frac{1}{2}$  gewählt, wie in der Literatur üblicherweise vorgeschlagen vgl. [26, 84, 83]. Die Fehlerkorrektureigenschaften der untersuchten Faltungscodierung

Tabelle 8.6: Untersuchte Satellitenkanalcodierungen

Art der Kanalcodierung	keine	BCH (255,115)	RS (112,56;GF(4))	Faltungscodierung ( $r = \frac{1}{2}, \nu = 7$ )
Informationsstellen	112	115	112	112
Code-Länge	112	255	224	224
Korrigierbare Fehler	0	21	$28^5$	Abb. 8.26

codierung ( $r = \frac{1}{2}$ , Einfluftiefe  $\nu = 7$ ) werden dabei durch das Diagramm in Abbildung 8.26 bestimmt, vgl. [17]. Die maximale Anzahl der zu übertragenden Nutzbits richtet sich nach der minimalen Länge der Protokoll-dateneinheit des HAND-OVER\_COMMAND Signals auf der Satellitenfunkschnittstelle. Unter Annahme eines LAPDm-ähnlichen Sicherungsschichtprotokolls sowie einer zusätzlichen, zwei Oktette umfassenden Codierung zur Fehlererkennung (CRC) ergibt sich dabei der in Tabelle 8.7 definierte Aufbau der Protokoll-dateneinheit. Die Füllzeichen sorgen für eine konstante Blocklänge.

<sup>5</sup>Symbole mit je 2 Bit

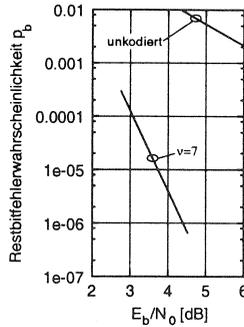


Abbildung 8.26: Restbitfehlerwahrscheinlichkeit  $p_b$  bei Faltungscodierung ( $r = \frac{1}{2}, \nu = 7$ ) mit Viterbi-decodierung bei PSK-Modulation nach [17]

Tabelle 8.7: Protokoll dateneinheit auf der Satellitenfunkschnittstelle

Inhalt	Address-feld	Steuer-feld	Informationsfeld Längenindikator	Informations-feld	Füllzeichen	CRC
Oktette	1	1	1	0-9	9-0	2

### 8.3.4 Modifikation der LAPDm Parameter

Im GSM wird zur fehlerfreien Übertragung von Signalisierungsdaten über die Luft-schnittstelle  $U_m$  das Sicherungsschicht-Protokoll LAPDm nach GSM 04.06, vgl. [6], verwendet. Es basiert auf dem ISDN LAPD Protokoll, vgl. [52], und ist auf die GSM-Funkübertragungsstrecke und Rahmenstruktur angepaßt. Zum Einsatz auf der Satellitenübertragungsstrecke und für eine IRIDIUM-ähnliche Rahmenstruktur ist eine Modifikation der LAPDm-Parameter erforderlich. Die Struktur des für die Satellitenfunkschnittstelle angenommenen Zeitmultiplexverfahren ist in Abbildung 8.27 dargestellt. Ein SEND-AND-WAIT-ARQ Betrieb ist ohne Kapazitätsverlust mög-

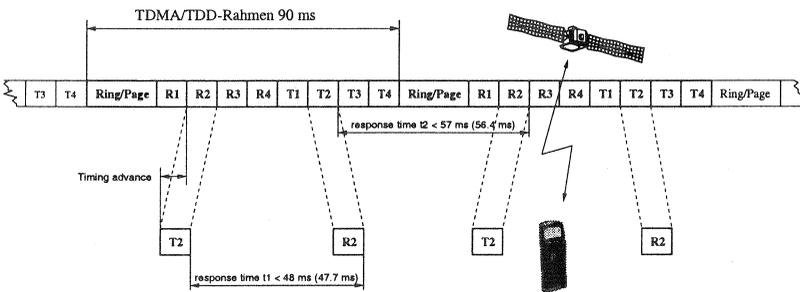


Abbildung 8.27: Zeitmultiplex-Rahmen im Satellitensystem

lich, vgl. Abbildung 8.27.

Im Vergleich zum GSM ergeben sich hierdurch folgende Parameterveränderungen des LAPDm: Alle Parameter sind auf einen möglichst leistungsfähigen Betrieb

Tabelle 8.8: LAPDm Parameter im GSM und Satellitennetz

LAPDm Parameter	GSM	Satellitennetz
FACCH Blockwiederkehrzeit	40 ms	90 ms
FACCH T200	160 ms	70 ms
Maximale Anzahl der FACCH Blockwiederholungen	34	16
T3124	320 ms	720 ms

der Signalisierungsverbindung im Satellitennetz ausgerichtet, da es durch die rahmenstrukturbedingt hohe Blockwiederkehrzeit sonst zu unzulässigen Verzögerungen im Signalisierungsbetrieb kommt.

### 8.3.5 Simulationsergebnisse für den asynchronen Handover

Die Simulationsergebnisse für Blockierwahrscheinlichkeit und mittlere Unterbrechungsdauer<sup>6</sup> des asynchronen Inter-Netz Handovers vom GSM zum Satellitennetz sind für eine in der satellitengestützten Kommunikation typische effektive Empfängerrauschtemperatur, hier  $T = 1000K$  (vgl. [93]), in Abbildung 8.28 und 8.29 sowie Tabelle 8.9 und 8.10 dargestellt. Nach Gl. 3.3 ist der Einfluß der Emp-

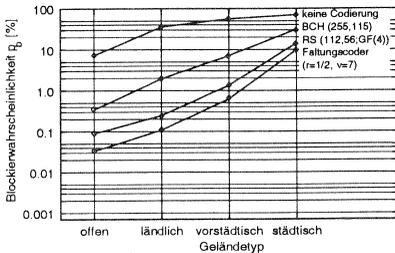


Abbildung 8.28: Handoverblockierwahrscheinlichkeit  $p_b$  bei  $T = 1000K$

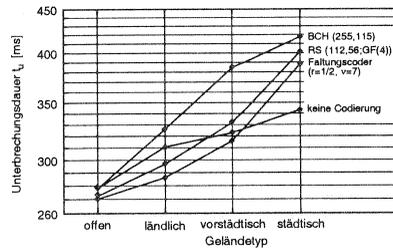


Abbildung 8.29: Mittlere Unterbrechungsdauer  $t_u$  bei  $T = 1000K$

fängerrauschtemperatur auf das Träger zu Rauschleistungsverhältnis  $C/N$  und damit auf die Bitfehlerwahrscheinlichkeit BER ähnlich signifikant wie z. B. die Sendeleistung  $P_S$ .

Anhand der Handoverblockierwahrscheinlichkeit läßt sich für alle Geländetypen der Einfluß der Kanalcodierung auf die erfolgreiche Durchführung und mittlere Unterbrechungsdauer eines Inter-Netz Handovers erkennen.

Unter der Annahme einer mittleren Inter-Netz Handoverwahrscheinlichkeit von 0,1 Handover pro Gespräch ergibt sich entsprechend Gl. 7.55 eine maximal zulässige Handoverblockierwahrscheinlichkeit  $p_h = p_b = 1\%$ , um eine Dienstgüte  $GoS \leq 0,02$  zu erreichen.

<sup>6</sup>der erfolgreichen Handover

**Tabelle 8.9:** Simulationsergebnisse ohne Kanalcodierung für den GSM zu Satellitennetz-Handover bei einer Empfängerrauschtemperatur von 1000K

Geländetyp	ohne Kanalcodierung		
	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]
offen	7,2	278,1	50,9
ländlich	36,7	310,8	94,8
vorstädtisch	56,5	322,9	95,4
städtisch	70,5	343,5	128,5

**Tabelle 8.10:** Simulationsergebnisse mit Kanalcodierung für den GSM zu Satellitennetz-Handover bei einer Empfängerrauschtemperatur von 1000K

Geländetyp	Codierung								
	RS (112,56;GF(4))			BCH (255,115)			Faltungscodierung ( $r = \frac{1}{2}, \nu = 7$ )		
	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]
offen	0,089	272,3	39,3	0,341	277,9	58,0	0,033	270,2	33,3
ländlich	0,245	296,8	79,7	1,944	326,1	118,0	0,108	286,2	65,3
vorstädtisch	1,34	331,9	115,1	7,123	384,6	161,8	0,622	316,0	98,7
städtisch	14,41	401,3	186,8	31,16	417,7	207,9	9,77	388,4	173,9

Ohne Kanalcodierung sind die Blockierwahrscheinlichkeiten für alle Geländetypen zu groß, vgl. Abbildung 8.28, da während der Phase des Zugriffs auf das Satellitensystem sowie dem anschließenden Ablauf des Handoverprotokolls die Fehlersicherung mangelhaft ist. Ein erfolgreicher Handover kommt nur bei niedrigen Paketfehlerwahrscheinlichkeiten auf dem Satellitenfunkkanal zustande. Im Vergleich zu den BCH, RS und faltungskanalcodierten Übertragungen führt dies zu einer geringen Differenz der mittleren Unterbrechungsdauer zwischen offenem Gelände mit 278,1 ms und vorstädtischem Gelände mit 322,9 ms, vgl. Abbildung 8.29.

Während für die BCH-Codierung nur ein Betrieb in offenem Gelände sinnvoll erscheint,  $p_h = 0,341\%$ , ist ein Betrieb mit RS-Codierung in offenem,  $p_h = 0,089\%$ , und ländlichem,  $p_h = 0,245\%$ , für die faltungscodierte Übertragung sogar auch in vorstädtischem Gelände,  $p_h = 0,622\%$ , möglich. Ein Inter-Netz Handover in städtischem Gelände ist für keine der Codierungen sinnvoll und wahrscheinlich auch nicht nötig, weil man hier eine GSM-Versorgung erwarten kann.

Die mittlere Unterbrechungsdauer ist bei Faltungscodierung mit nahe bei 300 ms am geringsten, (270,2 ms für offenes, 286,2 ms für ländliches und 316 ms für vorstädtisches Gelände) ein Wert, wie er z. B. für das TETRA Bündelfunksystem gefordert wird, vgl. [103]. Die für einen synchronen Handover im GSM geforderte maximale Unterbrechungsdauer von 150 ms kann systembedingt nicht erreicht werden.

Für den Inter-Netz Handover vom Satellitensystem zum GSM ergeben sich für Handoverblockierwahrscheinlichkeit und mittlere Unterbrechungsdauer die bereits bei der Festlegung der RXLEV\_MIN Grenze geforderten Werte von 0,1% und 177,0 ms als realisierbar. Dies liegt daran, daß mit Ausnahme der Handoverinitiation durch das Satellitennetz der Handoverablauf mit dem GSM Inter-MSC

Handover identisch ist.

### 8.3.6 Verbesserung der Dienstgüte beim Handover

Nachfolgend werden zwei Möglichkeiten zur Verbesserung des Inter-Netz Handovers betrachtet, nämlich die Verringerung der Empfängerrauschtemperatur und die Durchführung eines synchronen Inter-Netz Handovers.

#### 8.3.6.1 Verbesserung der Funkübertragungsstrecke

Zur Verbesserung der Qualität der Funkübertragungsstrecke wird die Rauschtemperatur der Satellitenempfänger auf  $T = 500K$  verringert. Die resultierenden Simulationsergebnisse sind in Abbildung 8.30 und 8.31 sowie Tabelle 8.11 dargestellt. Für alle Kanalcodierverfahren zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Hand-

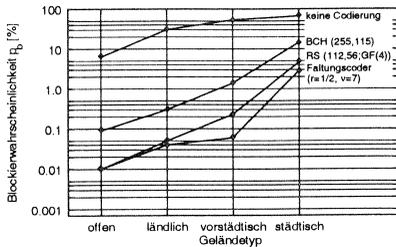


Abbildung 8.30: Handoverblockierwahrscheinlichkeit  $p_h$  bei  $T = 500K$

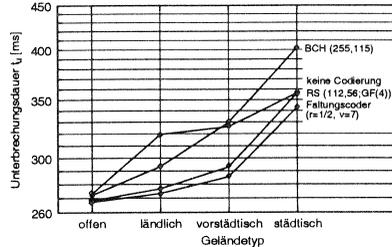


Abbildung 8.31: Mittlere Unterbrechungsdauer  $t_u$  bei  $T = 500K$

Tabelle 8.11: Simulationsergebnisse für den GSM zu Satellitennetz-Handover bei einer Empfängerrauschtemperatur von  $T=500K$

Geländetyp	Codierung								
	RS (112,56;GF(4))			BCH (255,115)			Faltungscodier ( $r = \frac{1}{2}, \nu = 7$ )		
	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$ [ms]
offen	0,01	268,3	27,1	0,09	272,1	39,7	0,01	267,2	22,6
ländlich	0,05	276,8	46,5	0,3	293,5	77,8	0,04	273,3	39,7
vorstädtisch	0,23	293,2	71,5	1,4	329,9	114,1	0,06	285,7	63,2
städtisch	4,68	356,4	145,7	14,6	402,3	186,2	2,86	343,3	133,6

overblockierwahrscheinlichkeit und der mittleren Unterbrechungsdauer<sup>7</sup>, vgl. Tabelle 8.11.

Der Betrieb von RS und Faltungskanalcodierung ist mit einer Blockierwahrscheinlichkeit  $p_h < 1\%$  für offene, ländliche und vorstädtische Gebiete möglich. Die durch den Handover verursachte mittlere Unterbrechungsdauer liegt für diese drei Geländetypen zwischen 267,2 ms und 293,2 ms und ist somit geringer als

<sup>7</sup>der erfolgreichen Handover

im asynchronen Fall. Ein akzeptabler Betrieb in einer städtischen Umgebung ist jedoch auch mit einer auf  $T = 500K$  reduzierten Empfängerrauschtemperatur nicht möglich, denn selbst mit Faltungscodierung liegt hier die Handoverblockierwahrscheinlichkeit mit 2,86% deutlich zu hoch.

Die Halbierung der Empfängerrauschtemperatur auf  $T = 500K$  ist zu einer Erhöhung der EIRP um 3 dB äquivalent (vgl. Gl. 3.4).

### 8.3.6.2 Durchführung eines synchronen Handovers

Eine zweite Verbesserung kann durch einen synchronen Handover erzielt werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Dabei wird bereits bei der Initiierung durch den HANDOVER\_COMMAND die Synchronisationsinformation des Zielsystems an das mobile Endgerät geliefert und es kann direkt mit dem Aufbau der Sicherungsschicht (Schicht 2)-Verbindung begonnen werden. Die Untersuchungsergebnisse für den synchronen Handover sind in Abbildung 8.32 und 8.33 sowie Tabelle 8.12 dargestellt.

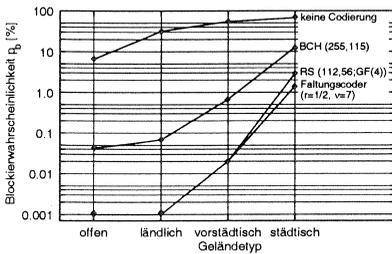


Abbildung 8.32: Blockierwahrscheinlichkeit  $p_h$  bei synchronem Handover und  $T = 1000K$

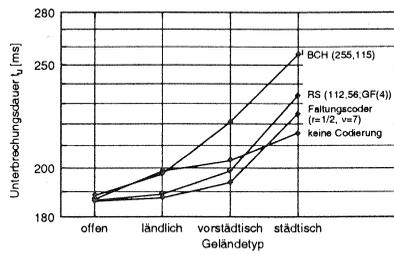


Abbildung 8.33: Mittlere Unterbrechungsdauer  $t_u$  bei synchronem Handover und  $T = 1000K$

Tabelle 8.12: Simulationsergebnisse für den synchronen GSM zu Satellitennetz-Handover bei einer Empfängerrauschtemperatur von 1000K

Geländetyp	Codierung								
	RS (112,56;GF(4))			BCH (255,115)			Faltungscoder ( $r = \frac{1}{2}, \nu = 7$ )		
	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$	$p_h$ [%]	$t_u$ [ms]	$\sigma$
offen	0,001	186,5	12,0	0,042	188,4	21,3	0,001	186,1	9,7
ländlich	0,001	188,9	18,2	0,068	197,3	37,7	0,001	187,4	13,6
vorstädtisch	0,02	198,7	36,2	0,673	221,0	67,8	0,02	193,8	27,6
städtisch	2,94	234,3	85,9	12,9	255,9	109,1	1,43	225,3	75,5

Mit einem synchronem Handover kann die Blockierwahrscheinlichkeit sowie die mittlere Unterbrechungsdauer<sup>8</sup> noch weiter reduziert werden, vgl. Tabelle 8.11 und 8.12 weil die Anzahl der zu übertragenden Nachrichten (vgl. Abschnitt 2.2.1.3) reduziert und der Zugriffsmechanismus auf die Funkressourcen des Zielsystems durch Synchronisation verbessert worden ist.

Mit BCH, RS und Faltungskanalcodierten Kanälen ist – städtisches Gelände ausgenommen – ein Inter-Netz Handover mit einer Blockierwahrscheinlichkeit  $p_h \leq 1\%$  möglich, vgl. Abbildung 8.32. Durch die reduzierte Anzahl der Protokolldateneinheiten eines synchronen Handovers kann die mittlere Unterbrechungsdauer in offenem, ländlichen und vorstädtischen Gelände auf unter 200 ms reduziert werden.

Mit Faltungskanalcodierung ist auch bei synchronem Handover eine Blockierwahrscheinlichkeit  $p_h < 1\%$  nicht zu erreichen, aber die erzielten 1,43% liegen in der Nähe des geforderten Wertes.

Da die Ermittlung genauer, sich zeitlich ständig verändernder Synchronisationsinformation des mobilen Satellitennetzes vom GSM aus mit erheblichem technischen Aufwand verbunden ist, kann ein synchroner Handover nach heutigem Stand der Technik nicht durchgeführt werden. Zukünftig ist ein solcher Betrieb jedoch vorstellbar.

### 8.3.7 Validierung der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse können bzgl. der verwendeten Kanalmodelle sowie des Handoverprotokolls validiert werden. Die GSM- und Satelliten-L/S-Kanalmodelle sind durch Messungen validiert worden, vgl. Abschnitt 3.4 und 3.5. Das simulativ untersuchte Handoverprotokoll ist nach GSM-Standard 03.09 im Simulator auf Basis erweiterter endlicher Automaten spezifiziert und implementiert worden. Der korrekte Ablauf des Protokolls wurde durch Vergleich der Signalflußdiagramme laut Standard und der vom Simulator erzeugten Signalflußdiagramme überprüft.

---

<sup>8</sup>der erfolgreichen Handover

The text in this section is extremely faint and illegible. It appears to be a list or a series of paragraphs, but the content cannot be discerned.

The text in this section is also extremely faint and illegible. It appears to be a list or a series of paragraphs, but the content cannot be discerned.

## Analytische und simulative Untersuchung der Funkversorgung satellitengestützter Transportnetze mit terrestrischem Zugangsnetz

Gegenstand dieses Kapitel ist es, die Ergebnisse der analytischen und simulativen Untersuchung satellitengestützter Transportnetze mit terrestrischem Zugangsnetz darzustellen und miteinander zu vergleichen. Im Unterschied zu Kapitel 7 wird der Untersuchungsschwerpunkt auf die analytische und simulative Ermittlung der Dienstgüte unter Berücksichtigung von Regen gesetzt. Für verschiedene Szenarien wird darüber hinaus der Einfluß von Leistungsregelung und der gewählten Orbitalhöhe untersucht.

### 9.1 Definition der Referenzdienste und -funkübertragung

Um vergleichbare Aussagen für unterschiedliche satellitengestützte Transportnetze zu erhalten, ist die Definition von Referenzdiensten (vgl. Abschnitt 9.1.1) und -funkübertragung (vgl. Abschnitt 9.1.2–9.1.6) im Satellitennetz erforderlich.

#### 9.1.1 Dienste

Als Basisdienst wird in diesem Kapitel von einem Sprachdienst mit 16 kbit/s Datenrate ausgegangen. Funkgesteuerte, hier GSM oder DECT/WLL, sowie drahtgebundenen Zugangsnetze, hier ISDN, können ihre Dienste durch eine Reihe unterschiedlicher Verfahren auf den Basisdienst abbilden:

- nicht transparente Abbildung mittels Ratenreduktion durch Transcodierung,
- nicht transparente Abbildung mittels Ratenreduktion durch Unterdrückung von Sprachpausen (Voice Activity Detection) und
- transparente Abbildung mittels Kanalbündelung.

Die Untersuchungsergebnisse in Abschnitt 9.4 sind für eine nicht transparente Abbildung mit Ratenreduktion durch Transcodierung gewonnen worden.

#### 9.1.2 Antennentechnik

In satellitengestützten Mobilfunknetzen kommen bezogen auf den jeweiligen Satelliten sowohl starre als auch strahlschwenkende Antennen zum Einsatz (vgl. Abschnitt 2.3.1.1 und 2.3.2.1).

Mit strahlschwenkenden Antennen können erdfeste Funkzellen ausgeleuchtet werden, daher entfällt die hohe Rate an satellitenmobilitätsbedingten Handovern im System. In Abbildung 9.1 ist das analytische Ergebnis der vergleichenden Dienstgüteuntersuchung, vgl. Gl. 7.55, von starren und strahlschwenkenden Antennen in einem TELEDESIC-artigen Satellitensystem dargestellt. Wie aufgrund der sehr geringen

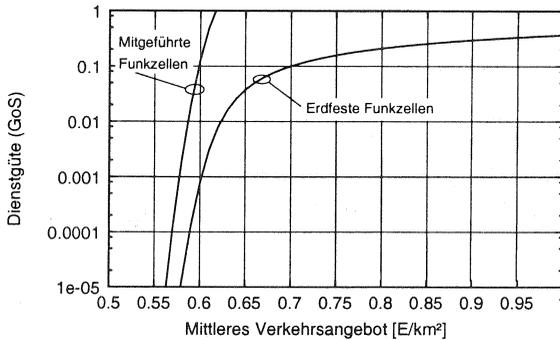


Abbildung 9.1: Dienstgüte (Gl. 7.55) erdfester und mitgeführter Funkzellen

Handoverzahl für erdfeste Zellen zu erwarten ist, bietet der Einsatz strahlenschwenkender Antennen in satellitengestützten Mobilfunksystemen eine deutlich bessere Dienstgüte als der Einsatz starrer Satellitenantennen. Daher wird für alle weiteren Untersuchungen vom Einsatz strahlenschwenkender Antennen ausgegangen. Darüberhinaus erfolgt die Strahlenschwenkung elektronisch, was zu einem niedrigen relativen Nebenkeulenpegel führt. Für eine phasengesteuerte Gruppenantenne mit konstanter Phasen- und Amplitudenbelegung liegt der Richtfaktor der ersten Nebenkeule  $13,5$  dB unter dem der Hauptkeule [11].

### 9.1.3 Übertragungsverfahren

In Anlehnung an das TELEDESIC-System (vgl. Abschnitt 2.3.2) werden ATM-Zellen an der Funkschnittstelle übertragen. Für die ATM Dienstklassen mit Echtzeitanforderungen, **Constant Bit Rate (CBR)** und **Variable Bit Rate (VBR)**, sind alle relevanten Dienstgüteparameter wie Zellverlustwahrscheinlichkeit und Zellübertragungszeit spezifiziert. Eine Realisierung von Diensten, die auf diesen Dienstklassen basieren, ist aufgrund der Dienstgüteparametereinstellungen nur für Systeme mit entsprechender Schwundreserve gegen Witterungseinflüsse denkbar. Für Dienstklassen ohne Echtzeitanforderungen, **Available Bit Rate (ABR)**, oder komplett ohne spezifizierte Dienstgüteparameter, **Unspecified Bit Rate (UBR)**, ist eine Übertragung auch für Systeme mit niedriger Schwundreserve möglich.

### 9.1.4 Leistungssteuerung

Jetzt sollen satellitengestützte Mobilfunksysteme sowohl mit und ohne aktive Leistungssteuerung untersucht werden. Da eine Bodenstation im Gegensatz zum Satelliten über sehr hohe Sendeleistungsreserven verfügt, wird die Diskussion der Leistungsregelung auf die maßgebliche Funkübertragungsstrecke zwischen Satellit und Bodenstation als begrenzendem Faktor beschränkt.

Für Satellitensysteme mit Leistungssteuerung wird beim momentanen Stand der Technik von einer Begrenzung der Leistung pro Träger  $i$  auf  $P_{i,max} \approx 57,5$  dBm ( $560$  W) ausgegangen [11, 16]. Die maximale Sendeleistung des Satelliten bei Vollaustlastung  $P_{max}$  darf jedoch nicht überschritten werden. Für ein TELEDESIC-ähnliches Satellitensystem mit  $36$  Makrofunkzellen pro Satellit,  $9$  Mikrofunkzellen pro Makro-

funkzelle und im Mittel  $T_e$  aktiven Gesprächen pro Mikrofunkzelle resultiert:

$$P_{max} = 67 \text{ dBm} \geq \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{36} \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^{T_z(i,j)} P_k(i,j) \quad (9.1)$$

mit

$$P_{i,max} = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^{T_z(i,j)} P_k(i,j) \leq 57.5 \text{ dBm}, \quad (9.2)$$

wobei  $P_k$  die momentane Sendeleistung einer aktiven Verbindung darstellt.

Wird jeweils die gesamte Sendeleistung des Satelliten den bedienten Funkverbindungen zur Verfügung gestellt, resultiert als Funktion des Funkversorgungsradius bei Vollausslastung der in Abbildung 9.2 dargestellte Verlauf der Leistungsbilanz  $P_{s,max} = P_{i,max}(r/r_0) - P_{max}/36$ . Das Radienverhältnis  $r/r_0$  beschreibt das Verhältnis vom aktuellen zum Mindestfunkversorgungsradius der Vollversorgung der Ausleuchtzone des Satelliten (vgl. auch Abb. 9.8).

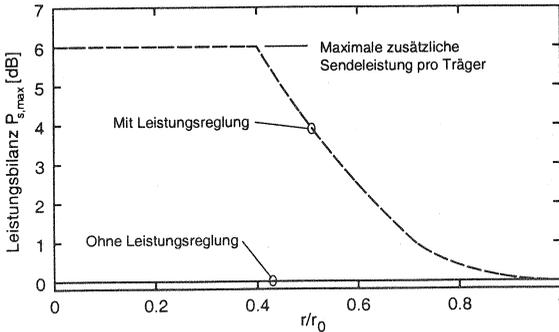


Abbildung 9.2: Leistungsbilanz  $P_{s,max}$  bei reduziertem Funkversorgungsradius

Bestehen im Funkversorgungsgebiet eines Satelliten weniger aktive Verbindungen als bei Vollausslastung des Systems möglich, kann für diese die Sendeleistung innerhalb bestimmter Grenzen, hier 6 dB, angehoben werden.

### 9.1.5 Kanalvielfachzugriff

Für Auf- und Abwärtsstrecke werden TELEDESIC-artige Kanalvielfachzugriffsverfahren angenommen (vgl. Abschnitt 2.3.2).

### 9.1.6 Kanalvergabe

Bei den untersuchten, satellitengestützten Mobilfunksystemen handelt es sich um kapazitätsbegrenzte Funkssysteme. Eine Interferenzbegrenzung wird im wesentlichen durch die folgenden Vorkehrungen vermieden:

- Es werden phasengesteuerten Gruppenantennen mit hohem Richtfaktor verwendet, so daß Interferenzen für Gleichkanalzellen nur durch Abstrahlung über bereits stark gedämpfte Nebenkeulen, hier  $< -13,5 \text{ dB}$ , entstehen und

- es wird eine schachbrettartige Anordnung von rechts- und links-zirkular polarisierter Funkversorgung benutzt.

Im zur Übertragung genutzten 20/30 GHz Frequenzband steht mit 500 MHz genügend Bandbreite zur Verfügung, so daß für die Funkschnittstelle von Fester Kanalvergabe (FKV) ausgegangen wird. Analog zum TELEDESIC-System stehen auf der Funkübertragungsstrecke pro Mikrozone 1800 Verkehrskanäle, je mit einer Übertragungsrate von 16 kbit/s zur Verfügung.

## 9.2 Optimaler Konstellationsentwurf

Die untersuchten Mobilfunksysteme werden als Satellitensysteme mit „optimaler“ Bahnkonstellationen und Systemkonfiguration angenommen. Dies bedeutet, daß für die angestrebte Teilnehmerdichte eine gleichmäßige Funkversorgung mit vorherbestimmten Leistungsgrößen vorhanden ist.

### 9.2.1 Randbedingungen

Um eine möglichst gleichmäßige Funkversorgung zu erzielen, wird bei den untersuchten Satellitenkonstellationen von rein polaren Bahnen ausgegangen. In der Praxis ist stets eine Bahninklination  $i \neq 90^\circ$  Grad vorhanden, um den Zusammenstoß von Satelliten auf unterschiedlichen polaren Bahnen zu vermeiden. Ein weiterer Grund für eine von  $90^\circ$  Grad verschiedene Inklination ist die daraus resultierende Begrenzung des maximalen Funkversorgungsbereichs. In dieser Arbeit werden satellitengestützte Mobilfunknetze mit globaler Funkversorgung untersucht.

Weitere Randbedingungen sind eine optimale Position- und Lageregelung sowie ein ausfallfreier Betrieb des satellitengestützten Mobilfunknetzes.

### 9.2.2 Größe und Art der Funkzellen

Erd feste Funkzellen bieten stets eine höhere Dienstgüte als mitgeführte, wie bereits in Abschnitt 9.1.2 ausgeführt. Ihr Einsatz in satellitengestützten Mobilfunknetzen ist eine Technologie- und Kostenfrage. In terrestrischen Mobilfunknetzen kommen äquivalente, intelligente Antennen bereits in naher Zukunft zum Einsatz.

Die Dimensionierung einer erd festen Satellitenfunkzelle richtet sich nach

- der Anzahl verfügbarer Verkehrskanäle pro Satellitenfunkzelle,
- dem mittleren zu bedienenden Verkehrs  $E/\text{km}^2$  und
- der relativen Zellgeometrie.

In Abbildung 9.3 ist der mit Hilfe von Gl. 7.4 und Gl. 7.55 berechnete, mittlere tragbare Verkehr  $E/\text{km}^2$  für drei unterschiedliche Dienstdatenraten als Funktion der Kantenlänge einer quadratischen Satellitenmakrofunkzelle dargestellt. Eine Makrofunkzelle besteht aus neun Mikrofunkzellen, die ihrerseits über je 1800 Verkehrskanäle à 16 kbit/s verfügen. Die Untersuchung gelte für eine Dienstgüte  $GoS = 0,001$ . Die unterschiedlichen Dienstdatenraten werden durch Kanalbündelung an die Basisdienstdatenrate von 16 kbit/s angepaßt.

Die resultierende äquivalente spektrale Effizienz

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{mittlerer getragener Verkehr [E]}}{\text{Bandbreite [MHz]} \cdot \text{Fläche [km}^2\text{]}} \quad (9.3)$$

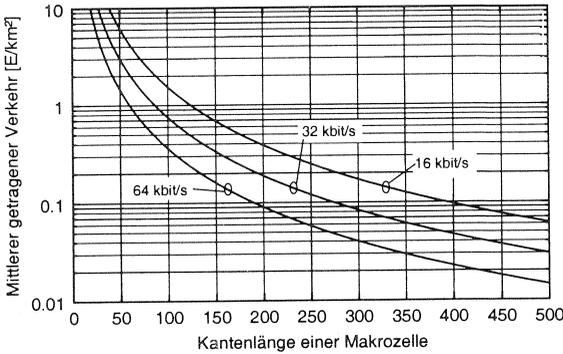


Abbildung 9.3: Mittlere getragene Verkehrsdichte (GoS = 0,001) als Funktion der Zellgröße

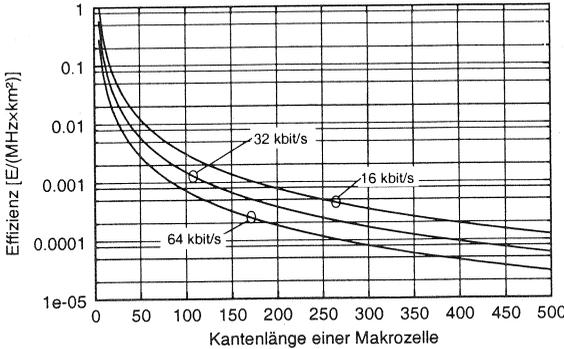


Abbildung 9.4: Effizienz als Funktion der Zellgröße bei 500 MHz

ist in Abbildung 9.4 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß für satellitengestützte Mobilfunknetze durch den hohen Frequenzwiederholabstand nur eine geringe spektrale Effizienz zu erzielen ist. Um das vorhandene Spektrum so effizient wie möglich zu nutzen, müssen unnötig hohe Dienstdatenraten vermieden und möglichst kleine Satellitenfunkzellen realisiert werden.

### 9.2.3 Anzahl der erforderlichen Satelliten und Umlaufbahnen

Nach der Dimensionierung einer Makrozelle, hier der Kantenlänge  $l_k$ , entsprechend dem mittleren zu tragenden Verkehr muß die Anzahl der erforderlichen Satellitenumlaufbahnen sowie der Satelliten pro Bahn definiert werden. Bei polaren Satellitenbahnen ist am Äquator die größte Distanz zwischen zwei benachbarten Bahnen vorhanden. Daher ist eine Dimensionierung auf Basis des Äquatorumfangs erforderlich, um eine wirklich globale Funkversorgung zu erreichen. Für die Anzahl der Satellitenbahnen  $O$  resultiert

$$O = \frac{\pi \cdot R_e}{\sqrt{\text{Makrozellen pro Satellit}} \cdot l_k} \tag{9.4}$$

mit dem Erdradius  $R_e$ . Entsprechend ergibt sich für die Anzahl der Satelliten pro Satellitenumlaufbahn:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_e}{\sqrt{\text{Makrozellen pro Satellit} \cdot l_k}} \quad (9.5)$$

Da nur ganzzahlige Werte für die Anzahl der Satellitenumlaufbahnen sowie der Satelliten pro Umlaufbahn in Frage kommen, ergibt sich die in Tabelle 9.1 dargestellte Quantelung der möglichen polaren Satellitenkonstellationen. Die angegebenen Kennwerte für den mittleren bedienbaren Verkehr E/km<sup>2</sup> für die Dienstgüten GoS = 0,01 und GoS = 0,001 beziehen sich auf eine Auswertung ohne die Berücksichtigung von Witterungseinflüssen, hier Regen. Sie gelten damit für 99% der Betriebszeit, da Regen nur in ca. 1% der Fälle eine Übertragung im 20/30 GHz Frequenzbereich stört, vgl. [46, 48]. Reale Systeme weichen in der Praxis teilweise leicht von diesen opti-

**Tabelle 9.1:** Optimale polare Satellitenkonstellationen

Gesamtzahl Satelliten	Bahnen	Satelliten pro Bahn	Mittlerer bedienbarer Verkehr [E/km <sup>2</sup> ]	
			GoS = 0,01	GoS = 0,001
18	3	6	0,013	0,012
32	4	8	0,023	0,022
50	5	10	0,036	0,035
72 <sup>1</sup>	6	12	0,051	0,050
98	7	14	0,070	0,068
128	8	16	0,091	0,088
162	9	18	0,12	0,11
200	10	20	0,14	0,14
242	11	22	0,17	0,17
288 <sup>2</sup>	12	24	0,21	0,20
338	13	26	0,24	0,23
392	14	28	0,28	0,27
450	15	30	0,32	0,31
512	16	32	0,37	0,35
578	17	34	0,41	0,40
648	18	36	0,46	0,45
722	19	38	0,52	0,50
800	20	40	0,57	0,55
882 <sup>3</sup>	21	42	0,63	0,61
968	22	44	0,69	0,67

malen Satellitenkonstellationen ab, da aus Kostenersparnisgründen ein Kompromiß zwischen verfügbarer Dienstgüte und Anschaffungs- und Betriebskosten eingegangen wird.

#### 9.2.4 Orbitalhöhe

Die Bestimmung der optimalen Orbitalhöhe ist unabhängig von der bisherigen Betrachtung optimaler Satellitenkonstellationen. Sie resultiert aus einem Kompromiß zwischen maximal zulässiger Signallaufzeit (vgl. Abbildung 9.5), zulässiger Dynamik des Witterungseinflusses (vgl. Abschnitt 8.3) und den mit einer bestimmten Orbitalhöhe verbundenen Satellitenstartkosten. Um Witterungseinflüssen entge-

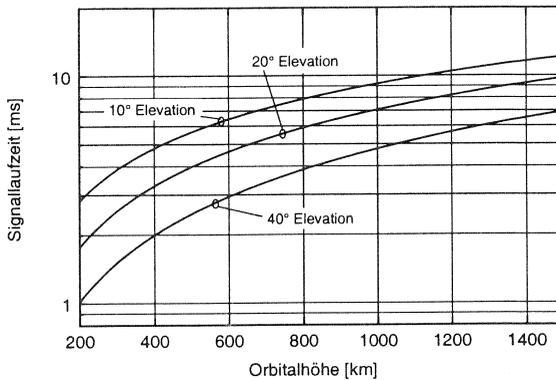


Abbildung 9.5: Signallaufzeit Erde-Satellit als Funktion der Orbitalhöhe

genzuwirken, ist eine hohe Orbitalhöhe beispielsweise direkt unterhalb des ersten Van Allen Strahlungsgürtels bei 1400 km optimal. Die maximale Signallaufzeit einer Erde-Satellit-Erde Verbindung ist bei einer Elevation von 20° bei dieser Orbitalhöhe jedoch mit fast 20 ms bereits erheblich. Die genaue Wahl der Orbitalhöhe ergibt sich in der Praxis aus einem systemspezifischen Kompromiß, der jedoch für mehrere vorgeschlagene Systeme (vgl. [103]) eine Orbitalhöhe um 1400 km über NN favorisiert.

### 9.3 Einfluß der Witterung auf die Dienstgüte der Übertragung

In realen Mobilfunksystemen, die im Freien betrieben werden, wird die Funkübertragung durch Witterungseinflüsse beeinträchtigt. Abhängig vom verwendeten Frequenzband der Übertragung (vgl. Abbildung 3.1), sind die Auswirkungen von Regen, Nebel und Schnee zu vernachlässigen oder müssen bei Entwurf und Dimensionierung der Funkübertragungsstrecke berücksichtigt werden.

Im 20/30 GHz Frequenzband sind für den Betrieb satellitengestützter Weitverkehrsnetze die Regenhäufigkeit und -intensität von maßgeblicher Bedeutung. Weitverkehrsnetze besitzen in der Regel ähnlich wie Richtfunkstrecken eine sehr hohe Verfügbarkeit von 99,9–99,999% der Zeit, vgl. [39, 82]. Nachfolgend wird der Einfluß von Regen auf die Funkversorgung im 20/30 GHz Frequenzband und damit auf die Verfügbarkeit satellitengestützter Mobilfunknetze untersucht.

#### 9.3.1 Parametrisierung des Klimamodells

Das Klimamodell nach ITU-R (vgl. [46, 48]) erlaubt Aussagen über den mittleren witterungsbedingten Signalschwund. Eine Untersuchung des dynamischen Witterungsverhaltens ist jedoch nicht möglich. Das hier entwickelte dynamischen Klima-

<sup>1</sup>IRIDIUM-ähnliches System

<sup>2</sup>TELEDESIC (Neuentwurf)-ähnliches System

<sup>3</sup>TELEDESIC (Originalentwurf)-ähnliches System

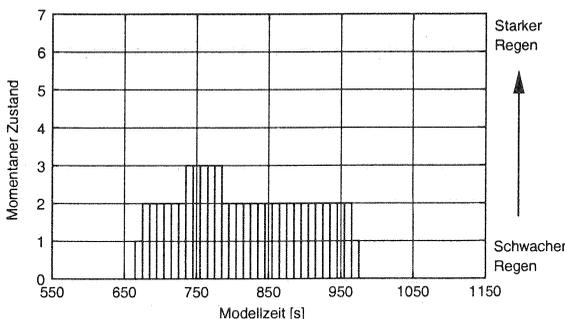
modell (vgl. Abschnitt 3.6.1.2 und 3.6.1.3) erlaubt statische und dynamische Untersuchungen von Regenereignissen.

Eine entsprechende Parametrisierung des Modells für die in Deutschland vorherrschende Klimazone „E“ ist in Tabelle 9.2 dargestellt. Zur Bestimmung der Zu-

**Tabelle 9.2:** Parametrisierung der Klimazone „E“ nach ITU-R

	0	1	2	3	4	5	6	7
Regenratenbereiche								
R[mm/h]	0	0 – 1	1 – 3	3 – 6	6 – 12	12 – 22	22 – 41	> 41
Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten								
$P_i$	0,99	0,007	0,002	0,0007	0,0002	0,00007	0,00002	0,00001
Zustandübergangswahrscheinlichkeiten								
$p_{i-1i}$	0,0	0,5583	0,1254	0,0634	0,0396	0,0244	0,0174	0,0095
$p_{ii}$	0,9961	0,4059	0,8524	0,9253	0,9518	0,9706	0,9778	0,9905
$p_{i+1i}$	0,0039	0,0358	0,0222	0,0113	0,0086	0,0050	0,0048	0,0
Zustandsübergänge $N_{i,i+1}$								
$Z_i \rightarrow Z_{i+1}$	12324	791	140	25	6	2	1	0

standsübergangswahrscheinlichkeiten sind hierbei veröffentlichte Regenfallmessungen des Institute of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark, vgl. [10], verwendet worden. Ein charakteristischer Verlauf eines Regenereignisses im Modell der Regenzone „E“ ist in Abbildung 9.6 dargestellt. Im Vergleich



**Abbildung 9.6:** Typischer Verlauf eines Regenereignisses im Modell der Klimazone E

zum Verlauf von Regenereignissen in der Texas-Meßkampagne (vgl. Kapitel 3) wird der wesentlich flachere Verlauf eines typisch Mitteleuropäischen Regenereignisses deutlich. Platzregenereignisse sowie hohe Regenraten sind selten. Niedrige Regenraten hingegen kommen sehr häufig vor.

### 9.3.2 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, daß im Mittel für jeden Satelliten für bestimmte Zeitintervalle nach ITU-R von einer vorherrschenden Regenintensität

ausgegangen werden kann. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Transienten zwischen unterschiedlichen Regenintensitäten (Zeitintervallen) kann jedes Zeitintervall für sich unabhängig untersucht und ausgewertet werden. Das Ergebnis der Gesamtuntersuchung  $R_{ges}$  wird nachfolgend aus der Summe der Einzelergebnisse  $R_i$  und dem Ergebnis der Transientenuntersuchung  $R_{trans}$  gebildet, vgl. [30]:

$$R_{ges} = \sum_i R_i + R_{trans}. \quad (9.6)$$

Wird während der einzelnen Zeitintervalle stets ein zeitunabhängiger Wert, wie z. B. die Blockierwahrscheinlichkeit  $p_{b,ges}$  eines ausgewählten Satelliten bestimmt, so muß jedes Einzelergebnis  $p_{b,i}$  gewichtet mit der jeweiligen Intervalldauer  $T_i$  berücksichtigt werden:

$$p_{b,ges} = \frac{1}{T_{ges}} \cdot \sum_i T_i \cdot p_{b,i} + p_{b,trans} \quad (9.7)$$

mit

$$T_{ges} = \sum_i T_i. \quad (9.8)$$

Die jeweilige Länge der Zeitintervalle folgt nach ITU-R (vgl. [46, 48]), nach der jedes Zeitintervall mit einer bestimmten Regenrate in Abhängigkeit von der Klimazone verbunden ist. Das transiente Verhalten wird mit Hilfe des dynamischen Klimamodells aus Kapitel 3 bestimmt.

### 9.3.3 Dienstgütedefinition und -berechnung

Die Dienstgüte GoS kann in Anlehnung an Gl. 7.55 wie folgt verallgemeinert werden:

$$GoS(\Lambda) = p_{block}(\Lambda) + 10 \cdot p_{drop}. \quad (9.9)$$

Der Term  $p_{block}$  beschreibt die Blockierwahrscheinlichkeit im Satellitennetz für ein neues Gespräch. Der Term  $p_{drop}$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer vorzeitigen, forcierten Gesprächsunterbrechung.

Gesprächsblockierungen treten in satellitengestützten Weitverkehrsnetzen aus zwei Gründen auf:

1. Die verfügbare Anzahl der Verkehrskanäle ist zu gering für das vorhandene Verkehrsangebot.
2. Aufgrund hoher Regenrate reichen die Schwundgegenmaßnahmen des Systems nicht aus und der nominelle Funkversorgungsradius eines Satelliten wird eingeschränkt.

Die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für eine Gesprächsblockierung aufgrund mangelnder Verkehrskanalananzahl,  $p_b^{Kanaltvergabe}$ , oder aufgrund von starkem Regen,  $(1 - p_{Verfügbarkeit})$ , werden zur Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit  $p_{block}$  zusammengefaßt:

$$p_{block}(\Lambda) = p_{Verfügbarkeit} \cdot p_b^{Kanaltvergabe} + (1 - p_{Verfügbarkeit}) \quad (9.10)$$

Unerwartete Gesprächsunterbrechungen sind ohne Berücksichtigung von Handover in satellitengestützten Mobilfunknetzen mit ortsfesten Funkzellen ausschließlich auf Regen zurückzuführen. Zwei unterschiedliche Gründe für Gesprächsunterbrechungen aufgrund von Regen sind im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt worden:

1. Gesprächsunterbrechungen aufgrund einer plötzlichen Regenintensitätserhöhung ohne entsprechende Schwundgegenmaßnahmen und

2. Gesprächsunterbrechungen aufgrund der Satellitenbewegung bei reduziertem Funkversorgungsradius.

Analog zur Gesprächsblockierung werden diese beiden Effekte zu einem Ausdruck zusammengefaßt:

$$p_{drop} = p_{drop}^{Regen} \quad (9.11)$$

$$= p_{drop}^{Regenzunahme} + p_{drop}^{Satellitenbewegung}. \quad (9.12)$$

Im folgenden werden die einzelnen Blockierungs- und Unterbrechungsmechanismen untersucht, um simulative und entsprechende analytische Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

### 9.3.3.1 Kanalvergabe

Für eine feste Kanalvergabestrategie kann die Blockierwahrscheinlichkeit eines Mobilfunknetzes mit  $n$  Verkehrskanälen und einem mittleren Verkehrsangebot  $\Lambda$  mit Hilfe der ErlangB-Formel berechnet werden:

$$p_b^{Kanalvergabe} = E_1(\Lambda, n) = \frac{(\Lambda^n / n!)}{\sum_{i=0}^n \Lambda^i / i!}. \quad (9.13)$$

Die Untersuchungsergebnisse der Blockierwahrscheinlichkeit sind für ein satellitengestütztes Mobilfunknetz mit 1800 Verkehrskanälen pro Funkzelle in Abbildung 9.7 als Funktion des mittleren Verkehrsangebots dargestellt. Die Ergebnisse aus Simu-

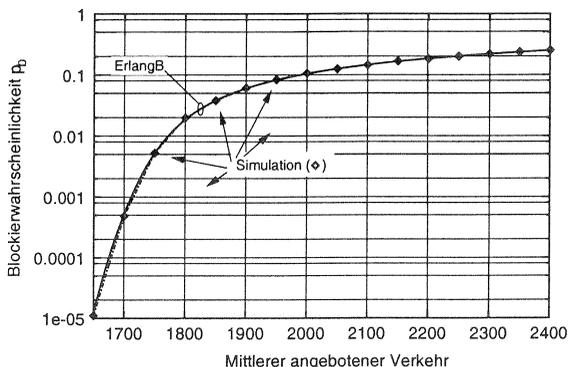


Abbildung 9.7: Blockierwahrscheinlichkeit in einer Mikrozelle

lation und mathematischer Berechnung stimmen, wie deutlich zu erkennen ist, gut überein. Der Satellitensimulator NeSSiE ist also diesbezüglich validiert.

### 9.3.3.2 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit eines satellitengestützten Weitverkehrsnetzes wird wesentlich durch das Verhältnis aus witterungsbedingtem Schwund und entsprechenden Schwundgegenmaßnahmen bestimmt. Abbildung 9.8 zeigt den Einfluß der Regenintensität auf den effektiven Funkversorgungsradius und damit auf die Satellitensystemverfügbarkeit. Das Grundfunkversorgungsgebiet  $F_0$  im ungestörten Betrieb

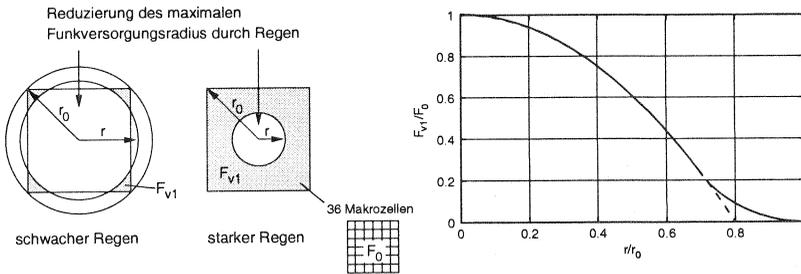


Abbildung 9.8: Einfluß der Regenintensität auf die Satellitensystemverfügbarkeit

eines Satelliten wird als quadratisch angenommen. Das Verhältnis der Verlustfläche zur Funkversorgungsfläche im Normalbetrieb  $F_{v1}/F_0$  läßt sich dabei in Abhängigkeit des normierten Funkversorgungsradius  $r/r_0$  wie folgt bestimmen (s. a. Anhang A):

$$\frac{F_{v1}}{F_0} = \begin{cases} 0 & \frac{r}{r_0} > 1 \\ 1 + \left( 2 \arccos\left(\frac{r_0}{\sqrt{2}r}\right) - \frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - \sqrt{2\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1} & \text{für } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \frac{r}{r_0} \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 & 0 \leq \frac{r}{r_0} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (9.14)$$

Für die Verfügbarkeit  $p_{Verfügbarkeit}$  folgt entsprechend:

$$p_{Verfügbarkeit} = 1 - \sum_{i=1}^m \frac{T_i}{T_{ges}} \cdot \frac{F_{v1}(R_i)}{F_0}, \quad (9.15)$$

wobei  $F_{v1}(R_i)$  die Verlustfläche  $F_{v1}$  bei einer bestimmten Regenrate  $R_i$  angibt. Im folgenden wird der normierte Funkversorgungsradius  $r/r_0$  als Funktion der Regenrate bestimmt. Dabei wird die Funkschnittstelle so dimensioniert angenommen, daß ohne Regen am Rande des Funkversorgungsbereichs ein Funkpegel mit  $E_b/N_0$  von 6,77 dB herrscht. Dies entspricht einer gerade noch akzeptabel Bitfehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  für uncodierte Übertragung auf einem AWGN-Kanal.

In Abbildung 9.9 sind exemplarisch für verschiedene Regenraten die Dämpfung durch Regen nach ITU-R (vgl. Kapitel 3) sowie unterschiedliche Schwundreservepegel mit und ohne Leistungssteuerung als Funktion des normierten Funkversorgungsradius dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse gelten dabei stets für die Distanz zum Rande des Funkversorgungsradius. Aufgrund der aus Einzelantennen bestehenden Satellitengesamtantenne kommt es mit abnehmendem Funkversorgungsradius zu einer effektiven Überhöhung der eingestellten Schwundreserve. Dies ist vor allem auf den um 2 dB höher liegenden Funkversorgungspegel im Mittelpunkt jeder Einzelzelle zurückzuführen. Aus den Schnittpunkten der effektiven Schwundreserve, ohne und mit Leistungsreserve, mit den Regendämpfungskurven für bestimmte Regenraten läßt sich der Funkversorgungsradius als Funktion der Regenrate bestimmen. In Abbildung 9.10 ist der Funkversorgungsradius als Funktion der Schwundreserve ohne und mit Leistungssteuerung dargestellt.

Die entsprechende Darstellung des Verhältnisses  $F_{v1}/F_0$  folgt in Abbildung 9.11. Der Einfluß der Schwundreserve sowie der Leistungsregelung ist deutlich zu erkennen. Mathematische Analyse und Simulation liefern in Abbildung 9.11 über weite

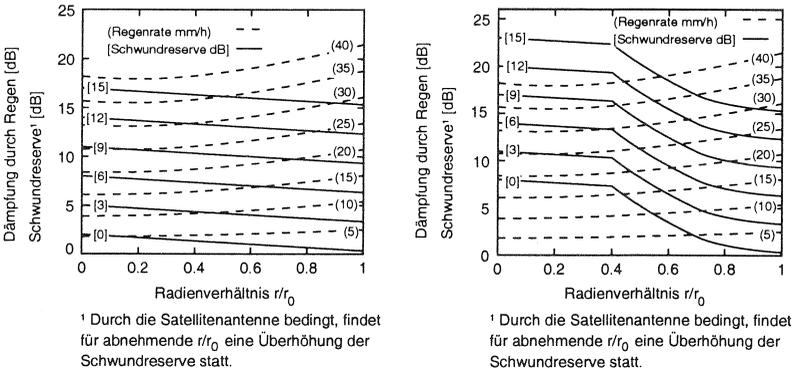


Abbildung 9.9: Schwund durch Regen und Schwundreserve ohne/mit Leistungsregelung

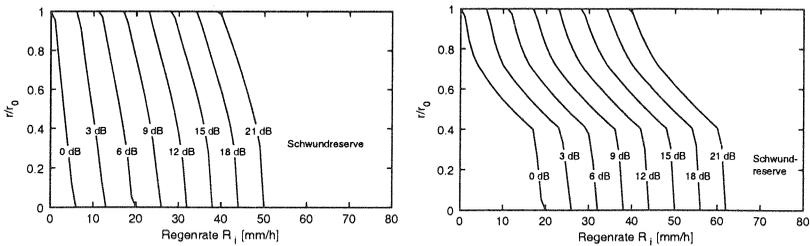


Abbildung 9.10: Einfluß der Regenintensität auf den Funkversorgungsradius mit Schwundreserve ohne/mit Leistungsregelung

Bereiche fast identische Ergebnisse. Die Ergebnisse der simulativen Untersuchung gelten für ein realistisches Antennenmodell, Leistungsregelung und Regenverhalten nach ITU-R. Abweichungen sind für den Sendeleistungsbegrenzungsfall mit Leistungsregelung vorhanden,  $r/r_0 > 0,8$ . Ihre Auswirkungen auf die Genauigkeit der Endergebnisse ist allerdings begrenzt (vgl. Abschnitt 8.4). Das Ergebnis einer simulativen Untersuchung der Satellitenfunkversorgung mit  $6 \times 6$  Makrozellen bzw.  $18 \times 18$  Mikrozellen ist für eine Schwundreserve von 0 dB sowie einer Regenrate von 1 und 5 mm/h in Abbildung 9.12 dargestellt. Sowohl die Verringerung des effektiven Funkversorgungsradius als auch der Einfluß von Regen auf jede einzelne Zelle sind hier deutlich zu erkennen. Das dargestellte quadratische auf den Satellitenfußpunkt (SFP) bezogene Funkversorgungsgebiet von  $-2$  bis  $+2$  Grad Länge und Breite entspricht dem Funkversorgungsgebiet eines TELEDESIC-Satelliten ohne Regen.

### 9.3.3.3 Gesprächsabbruch

Wird der Funkversorgungsradius aufgrund von Regen und mangelnder Schwundreserve eingeschränkt, so kommt es durch den Anstieg der Dämpfung sowie die Satellitenbewegung zu vorzeitigen Unterbrechungen von Gesprächen.

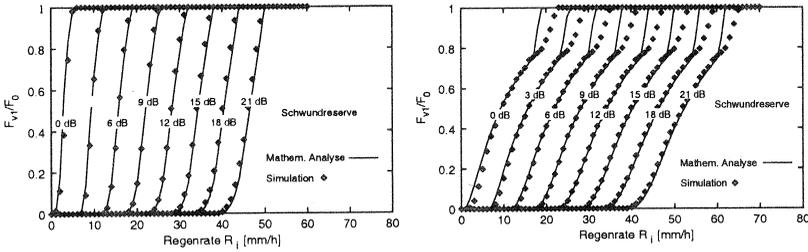


Abbildung 9.11:  $\frac{F_{v1}}{F_0}$  als Funktion der Regenintensität  $R_i$  mit Schwundreserve ohne/mit Leistungsregelung (6 dB)

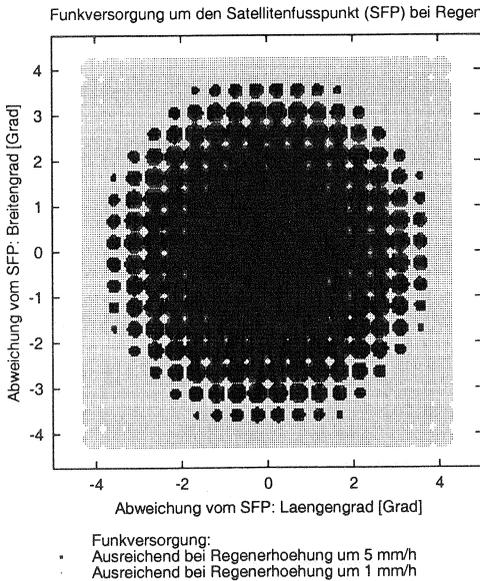


Abbildung 9.12: Simulation der Funkversorgung bei Regen

Wenn in einer Zeitspanne  $T_{ges}$  insgesamt  $N_{i,i+1}$  Ereignisse einer plötzlichen Regen­zunahme von einer Regenrate  $R_i$  zu  $R_{i+1}$  stattfinden, berechnet sich die Gesprächsabbruchwahrscheinlichkeit  $p_{drop}^{Regenzunahme}$  über alle Regenraten zu

$$p_{drop}^{Regenzunahme} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{N_{i,i+1}}{\mu T_{ges}} \cdot \frac{F_{v1}(R_{i+1}) - F_{v1}(R_i)}{F_0} \quad (9.16)$$

mit  $\mu^{-1}$  der mittleren Gesprächsdauer. Die Berechnung von  $F_{v1}(R_i)$  ist bereits in der Diskussion der Verfügbarkeit dargestellt worden, vgl. Gl. 9.14 und Abbildung 9.11. Die Anzahl der Transienten  $N_{i,i+1}$  können für Regenraten einer bestimmten Klima­zone nach ITU-R mit Hilfe des dynamischen Regenmodells aus Kapitel 3 bestimmt werden (vgl. Tabelle 9.2).

In Abbildung 9.13 ist der Einfluß der Satellitenbewegung auf die Wahrscheinlichkeit eines Gesprächsverlusts dargestellt. Bezogen auf die Grundfunkversorgungsflä-

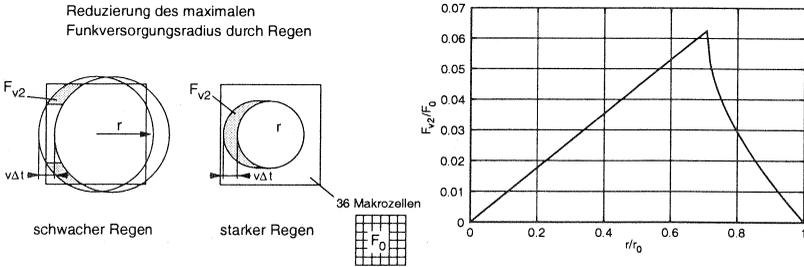


Abbildung 9.13: Einfluß der Satellitenbewegung bei Regen auf die Satellitensystemverfügbarkeit

che  $F_0$  kann die durch eine Satellitenbewegung mit Geschwindigkeit  $v$  über Grund verursachte Verlustfläche  $F_{v2}$  wie folgt berechnet werden (s. a. Anhang A):

$$\frac{F_{v2}}{F_0} = \begin{cases} 0 & \frac{r}{r_0} > 1 \\ \frac{v \Delta t}{r_0} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} - \sqrt{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - \frac{1}{2}} \right) & \text{für } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \frac{r}{r_0} \leq 1 \\ \frac{v \Delta t}{r_0} \frac{r}{r_0} & 0 \leq \frac{r}{r_0} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (9.17)$$

Das Beobachtungsintervall beträgt  $\Delta t$ . Die Wahrscheinlichkeit eines Gesprächsabbruchs  $p_{drop}^{Satellitenbewegung}$  folgt hieraus zu:

$$p_{drop}^{Satellitenbewegung} = \sum_{i=1}^m \frac{T_i}{T_{ges}} \cdot \frac{F_{v2}(R_i)/F_0}{\mu \Delta t} \quad (9.18)$$

Die Ergebnisse einer exemplarischen Auswertung für ein TELEDESIC-artiges Satellitensystem sind in Abbildung 9.14 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen

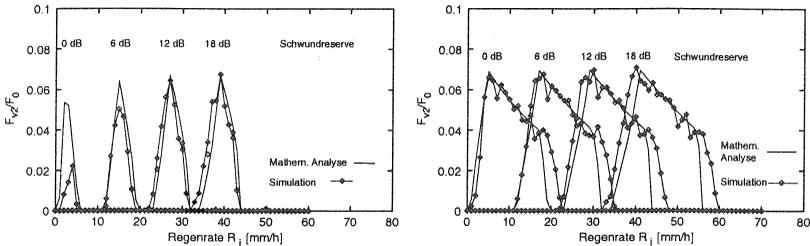


Abbildung 9.14:  $\frac{F_{v2}}{F_0}$  als Funktion der Regenintensität und Satellitenbewegung mit Schwundreserve ohne/mit Leistungsregelung

mathematischer Analyse nach Gl. 9.17 und Simulation ist bei den Untersuchungen ohne Leistungsregelung gut und mit Leistungsregelung ausreichend, um in guter Näherung das Auftreten von Gesprächsabbrüchen zu modellieren.

## 9.4 Definition und Leistungsbewertung verschiedener Szenarien

In diesem Abschnitt wird die Leistung verschiedener Szenarien zum Einsatz satellitengestützter Mobilfunknetze als Weitverkehrsnetze bewertet. Es handelt sich um optimale Satellitensysteme. Sie werden jeweils entsprechend der TELEDESIC-ähnlichen Funkschnittstellendefinition aus Abschnitt 9.1 betrieben.

Die zu erwartende Dienstgüte im Szenarium wird als Funktion der Schwundreserve sowie des angebotenen Verkehrs im Szenarium in äquatorialer Nähe untersucht. Die Sendeleistung eines Satelliten ist im Vergleich zur Sendeleistung einer Bodenstation stark begrenzt. Deshalb wird nur die Abwärtsstrecke zwischen Satellit und Bodenstation eines Zugangsnetzknosens untersucht. Sie ist für die maßgebliche Begrenzung der Dienstgüte in jedem Szenarium verantwortlich. Die Dienstgüteuntersuchung am Äquator führt zu einer weiteren unteren Abschätzung der Dienstgüte, da die Überlappung (Redundanz) der Satellitenausleuchtzonen hier am geringsten ist.

### 9.4.1 Kalibrierung des Simulators

Basierend auf der TELEDESIC-ähnlichen Funkschnittstellendefinition aus Abschnitt 9.1 sowie der Antragschrift für das TELEDESIC Satellitensystem [28] bei der FCC ist der NeSSiE-Simulator zur Leistungsbewertung verschiedener Satellitensystemenszenarien parametrisiert worden. Folgende Parameter sind u. A. fest eingestellt worden:

- EIRP des Satelliten pro Träger<sup>4</sup> (700 km): 76,9 dBm,
- EIRP des Satelliten pro Träger<sup>4</sup> (1400 km): 82,9 dBm,
- Antennengewinn des Satelliten (700 km): 27,0 dBi,
- Antennengewinn des Satelliten (1400 km): 33,0 dBi,
- Antennengewinn der Bodenstation eines Zugangsknoten: 25,7 dBi,
- Rauschtemperatur des Empfängers der Bodenstation: 710K,
- AWGN Kanal ohne Mehrwegeempfang (Richtantennen),
- minimal gefordertes  $E_b/N_0$  am Empfänger: 6,77 dB (BER=  $10^{-3}$ ) und eine
- Teilnehmerdienstdatenrate pro Verbindung von 16 kbit/s.

Weitere Parameter können der Funkschnittstellendefinition in Abschnitt 9.1 und der jeweiligen Konstellationsdefinition der einzelnen Szenarien entnommen werden. Natürlich sind im Simulator auch völlig andere Parameter einstellbar und untersuchbar, um z. B. TELEDESIC-fremde Satellitensysteme zu analysieren.

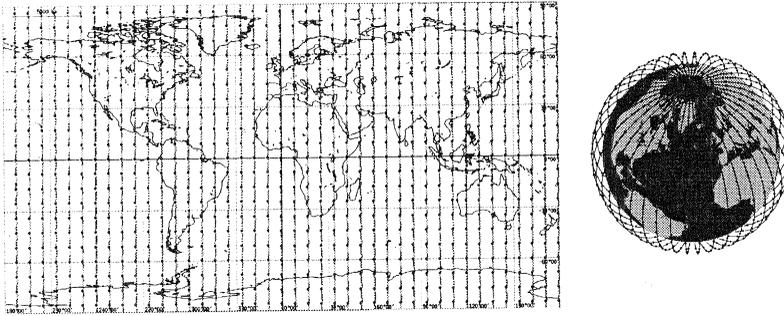
In Abbildung 9.15 ist die Satellitenfunkausleuchtung eines TELEDESIC-ähnlichen Satellitensystems für die obigen Parametervorgaben dargestellt. Um die geforderte Funkzellegeometrie am Boden auszuleuchten, muß die Satellitenantenne in Abhängigkeit von der Orbitalhöhe dynamisch gesteuert werden. Als Resultat ergibt sich auf der Erde ein Empfangspegel, der von der gewählten Orbitalhöhe unabhängig ist.

---

<sup>4</sup>ohne Schwundreserve



Die entsprechende Bahn- und Satellitenanordnung ist in Abbildung 9.16 dargestellt.

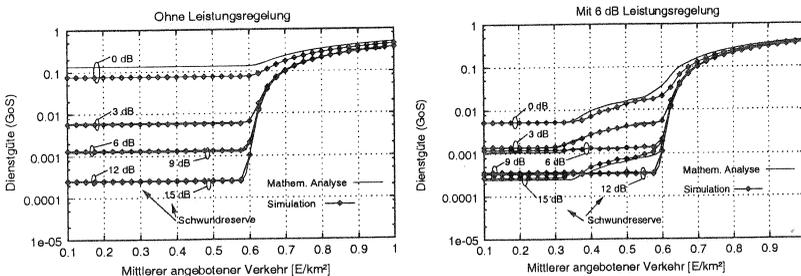


**Abbildung 9.16:** Konstellation des Satellitensystems mit breitbandiger Funkversorgung

Als Dimensionierungsgrundlage wurde ein mittleres Verkehrsangebot von  $0,6 \text{ E/km}^2$  bei einer Dienstgüte  $\text{GoS} = 0,01$  gewählt, welches einem typischen GSM Verkehrsangebot in gemischt städtischer und vorstädtischer Umgebung einer Stadt wie Gelsenkirchen entspricht, vgl. [34, 32].

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird das mittlere Verkehrsangebot auf die Fläche einer Mikrozelle bezogen. Die Auswirkungen der Satellitenkonstellation und der damit verbundenen mittleren Kapazitätsbegrenzung pro  $\text{km}^2$  werden hierbei transparent.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und mathematischer Analyse, vgl. Gl. 9.9–9.18, wird in Abbildung 9.17 für unterschiedliche Schwundreservepegel ohne und mit Leistungsregelung gezeigt. Bis auf eine Schwundreserve von  $0 \text{ dB}$



**Abbildung 9.17:** Dienstgüte des breitbandigen Satellitensystems TD882 mit Schwundreserve ohne/mit Leistungsregelung

liefern Simulation und mathematische Analyse eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Für beide Diagramme ist deutlich zu erkennen, daß in Abhängigkeit von der verfügbaren Schwundreserve mit und ohne Leistungssteuerung eine „Witterungsbegrenzung“ der Dienstgüte selbst für ein reduziertes Verkehrsangebot

stattfindet, vgl. die 100% transcodierte DECT (WLL) Ergebniskurve in Abb. 7.29. Für eine auf das Jahr bezogene gewünschte Mindestdienstgüte ist die erforderliche Schwundreserve ohne und mit Leistungssteuerung direkt zu erkennen. Wird z. B. eine Dienstgüte von 0,001 angestrebt, so ist dies ohne Leistungssteuerung nur mit einer Schwundreserve von mindestens 12 dB zu erreichen. Eine leicht schlechtere Dienstgüte von 0,002 ist jedoch bereits mit 6 dB zu erzielen. Gleiches gilt für den Fall mit Leistungssteuerung, wobei hier für geringere Schwundreserven eine teilweise deutlich bessere Dienstgüte gegenüber dem Fall ohne Leistungssteuerung erreicht wird. Ist die Schwundreserve ausreichend groß dimensioniert, findet für den Fall mit und ohne Leistungsregelung eine Begrenzung der Dienstgüte durch die feste Kanalvergabe-strategie statt.

### 9.4.3 Schmalbandige Funkversorgung

Im Szenarium TD288 soll ein satellitengestütztes Weitverkehrsnetz untersucht werden, welches eine schmalbandige Versorgung ortsfester Bodenstationen, z. B. Basisstationen von Zugangsnetzen gestattet. Die gewählte Satellitenkonstellation mit einer Orbitalhöhe von 1400 km entspricht der des momentanen Entwurfs des TELEDESIC-Systems. Im Vergleich soll dieselbe Konstellation auch für eine Orbitalhöhe von 700 km untersucht werden. Die gewählten Konstellationsparameter sind in Tabelle 9.4 aufgeführt. Die entsprechende Bahn- und Satellitenanordnung ist in

**Tabelle 9.4:** Parameter der Satellitenkonstellation im Szenarium TD288

System TD288		
Konstellation	Gesamtzahl Satelliten	288
	Anzahl der Bahnen	12
	Satelliten pro Bahn	24
	Orbitalhöhe (Bahnhöhe)	700 km /1400 km
	Inklination	90°
Zellen	Makrozellen je Satellit	36
	Kantenlänge Makrozelle	278,3 km
	Mikrozellen je Makrozelle	9
	Fläche einer Mikrozelle	8607,51 km <sup>2</sup>
	Verkehrskanäle je Mikrozelle	1800

Abbildung 9.18 dargestellt. Als Dimensionierungsgrundlage wurde ein mittleres Verkehrsangebot von 0,2 E/km<sup>2</sup> bei einer Dienstgüte GoS = 0,01 herangezogen, welches einem typischen GSM Verkehrsangebot in gemischt ländlicher und vorstädtischer Umgebung einer Stadt wie Gelsenkirchen entspricht, vgl. [34, 32].

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und mathematischer Analyse, vgl. Gl. 9.9–9.18, ist in Abbildung 9.19 für unterschiedliche Schwundreservepegel mit Leistungssteuerung und für die beiden verschiedenen Orbitalhöhen dargestellt. Äquivalent zur Untersuchung des ersten Szenariums ergibt sich auch hier eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus Simulation und mathematischer Analyse. Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit 700 km und 1400 km Orbitalhöhe ist deutlich die höhere gemessene Dienstgüte des Systems auf 1400 km ausgedrückt durch einen niedrigeren GoS-Wert, zu erkennen.

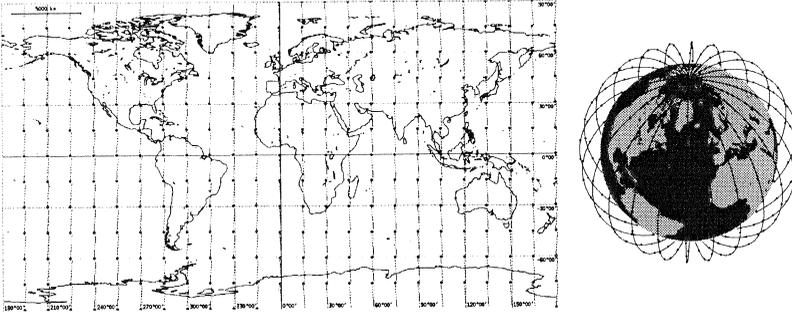


Abbildung 9.18: Konstellation des Satellitensystems mit schmalbandiger Funkversorgung

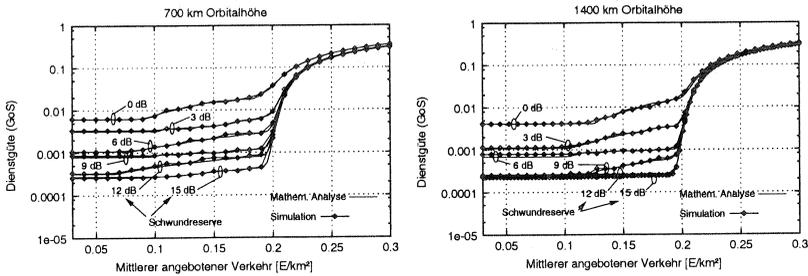


Abbildung 9.19: Dienstgüte des schmalbandigen Satellitensystems TD288 mit Schwundreserve und Leistungsregelung für unterschiedliche Orbitalhöhen (700 km/1400 km)

Während für die niedrige Orbitalhöhe mit einer Schwundreserve von 6 dB bei einem angebotenen Verkehr von 0,19 E/km<sup>2</sup> nur ein Dienstgütewert von 0,003 erreicht werden kann, ist mit der höheren Orbitalhöhe ein Dienstgütewert von 0,001 möglich. Die Satellitenkonstellation mit höherer Orbitalhöhe ist dementsprechend der mit niedriger Orbitalhöhe vorzuziehen.

Der maximal erreichbare Dienstgütewert von 0,0003 ist für beide Orbitalhöhen gleich. Diese Begrenzung wird durch sehr starke Regenereignisse herbeigeführt, die weder mit Schwundreserve und Leistungsregelung noch durch die Wahl der Orbitalhöhe ausgeglichen werden können.

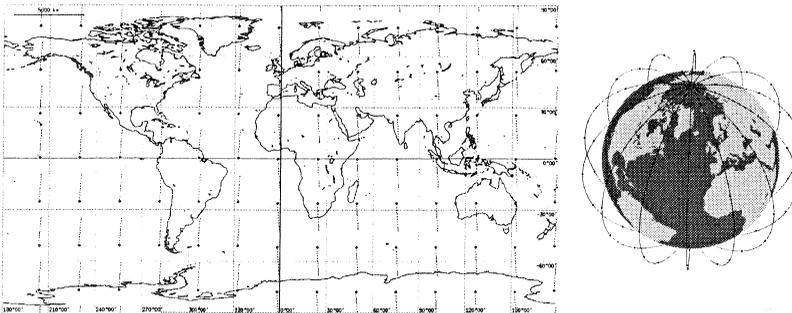
### 9.4.4 Nomadische Funkversorgung

Im Szenarium CEL98 wird ein satellitengestütztes Weitverkehrsnetz mit einer sehr schmalbandiger Funkversorgung für sogenannte nomadische Anwender untersucht. Zugangsnetzknotten können mit dieser Funkversorgung nur in sehr begrenztem Umfang bedient werden. Die gewählte Satellitenkonstellation entspricht der eines auf globale Funkversorgung erweiterten CELESTRI Satellitensystems, vgl. [103]. Die gewählten Konstellationsparameter sind in Tabelle 9.3 aufgeführt. Die entsprechende

**Tabelle 9.5:** Parameter der Satellitenkonstellation im Szenarium CEL98

System CEL98		
Konstellation	Gesamtzahl Satelliten	98
	Anzahl der Bahnen	7
	Satelliten pro Bahn	14
	Orbitalhöhe (Bahnhöhe)	1400 km
	Inklination	90°
Zellen	Makrozellen je Satellit	36
	Kantenlänge Makrozelle	477,1 km
	Mikrozellen je Makrozelle	9
	Fläche einer Mikrozelle	25290 km <sup>2</sup>
	Verkehrskanäle je Mikrozelle	1800

Bahn- und Satellitenanordnung ist in Abbildung 9.18 dargestellt. Als Dimensio-

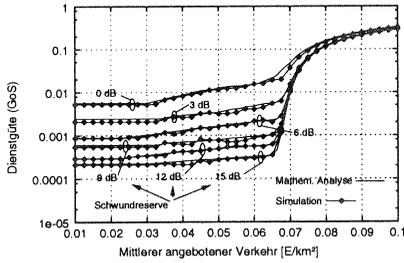


**Abbildung 9.20:** Konstellation des Satellitensystems mit nomadischer Funkversorgung

nierungsgrundlage wurde ein mittleres Verkehrsangebot von  $0,07 \text{ E/km}^2$  bei einer Dienstgüte  $\text{GoS} = 0,01$  zu Grunde gelegt, welches einem typischen GSM Verkehrsangebot in gemischt offener und ländlicher Umgebung in Deutschland entspricht.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und mathematischer Analyse, vgl. Gl. 9.9–9.18, ist in Abbildung 9.21 für unterschiedliche Schwundreservepegel mit Leistungssteuerung dargestellt. Auch in dieser Untersuchung ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus Simulation und mathematischer Analyse. Mit zunehmender Schwundreserve ist in diesem Szenarium eine kontinuierliche Verbesserung der Dienstgüte bis auf einen Dienstgütewert von  $0,0003$  zu erreichen. Dies ist auf die minimale Elevation von  $34,7^\circ$  im Szenarium CEL98 im Vergleich zu einer minimalen Elevation von  $49,9^\circ$  z. B. im Szenarium TD288 zurückzuführen. Bei einer niedrigen minimalen Elevation ist der maximale Weg durch eine Regenzone länger und der witterungsbedingte Schwund entsprechend größer. Im Szenarium CEL98 ist deshalb eine Schwundreserve von  $9 \text{ dB}$  mit Leistungsregelung erforderlich, um eine Dienstgüte von  $0,001$  bei einem angebotenen Verkehr von  $0,065 \text{ E/km}^2$  zu erreichen.

Diese szenariospezifischen Ergebnisse zeigen die tendenziellen Möglichkeiten der verschiedenen beispielhaft betrachteten Systemkonzepte. Die in dieser Arbeit ent-



**Abbildung 9.21:** Dienstgüte des schmalbandigen Satellitensystems CEL98 mit statischer Schwundreserve und aktiver Leistungsregelung

wickelten Berechnungsverfahren für die vom Verkehrsaufkommen abhängige Dienstgüte erweisen sich in allen Fällen als ausreichend genau und konnten durch Simulationen validiert werden.



# Zusammenfassung und Ergebnisse

Motivation dieser Arbeit ist der wachsende Einsatz von Mobilfunknetzen unterschiedlicher Standards, der zukünftig zu einer breiten Palette an parallel verfügbaren Systemen führen wird. Um aus Teilnehmer- und Betreibersicht eine vielfältige und global verfügbare Dienstpalette mit hoher Qualität zu erreichen, ist eine Integration komplementärer Kommunikationsnetze erforderlich.

In dieser Arbeit werden geeignete Verfahren für eine Integration satellitengestützter und terrestrischer Mobilfunknetze entwickelt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet.

Für Mobilfunksysteme mit gleichartiger Protokoll- und Netzstruktur wurden unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration untersucht:

- Integration auf Endgeräteebene
- Integration auf Netzebene
- Integration auf Datenbankebene

Darüber hinaus wurden zur Integration verschiedener zellulärer Mobilfunknetze die Möglichkeit zum kaskadierten Betrieb, z. B. von Zugangsnetz und Satellitensystem, oder zum Einsatz eines UPT-Servers diskutiert.

Die Integration gleichartiger Mobilfunknetze auf Datenbankebene wird in den Kapiteln 7 und 8 der Arbeit am Beispiel eines satellitengestützten IRIDIUM-ähnlichen und GSM-Zielsystems untersucht. Die hierzu erforderlichen Verfahren zur Aufenthaltsaktualisierung im Satellitennetz und Protokolle zum Inter-Netz Handover zwischen den Einzelsystemen werden mathematisch und mit einem eigens hierfür entwickelten Simulator NeSSiE analysiert und bewertet.

Als Ergebnis kann hierbei gezeigt werden, daß sich zur gemeinsamen Mobilitätsverwaltung nur ein teilnehmerpositionsbasiertes Aufenthaltsaktualisierungsverfahren im Satellitennetz eignet, da andere Verfahren aufgrund der Positionsungenauigkeit keine umkehrbar eindeutige Abbildung der Teilnehmeraufenthaltsbereiche zwischen beiden Systemen ermöglichen. Aufgrund der Flexibilität eines solchen Verfahrens ist ein weiteres Ergebnis die sehr geringe Signalisierungslast im Vergleich zu den anderen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren.

In Kapitel 8 wird der Inter-Netz Handover auf Basis des synchronen und asynchronen GSM Inter-MSK Handovers untersucht. Es wird hierbei gezeigt, daß ein Inter-Netz Handover zwischen GSM und Satellitensystem möglich ist. Die Dienstgüte variiert dabei jedoch erheblich nach Geländetyp.

Für offenes, ländliches und vorstädtisches Gelände ist mit entsprechender Kanalcodierung, z. B. einer Halbbraten-Faltungscodierung mit Einflußlänge 7, eine Handoverblockierwahrscheinlichkeit stets kleiner 1% zu erreichen. Für eine typische städtische Umgebung liegt bei gleicher Kanalcodierung die Handoverblockierwahrscheinlichkeit für einen asynchronen Handover mit einer Empfängerrauschtemperatur von 1000K bei 9,77%. Wird die Empfängerrauschtemperatur auf 500K verbessert, so reduziert sich die Handoverblockierwahrscheinlichkeit auf 2,86%.

Ein alternativ untersuchter synchroner Handover mit einer Empfängerrauschtemperatur von 1000K liefert mit einer Handoverblockierwahrscheinlichkeit von 1,43% das beste Ergebnis. Zur Durchführung eines solchen Handovers ist allerdings die Synchronisation zwischen GSM und Satellitennetz erforderlich, was mit einem nicht zu vernachlässigenden technischen Aufwand verbunden ist.

In den Kapiteln 7 und 9 wird der kaskadierte Betrieb von zwei verschiedenen Mobilfunknetzen am Beispiel unterschiedlicher funkgesteuerter sowie drahtgebundener Zugangsnetze und einem satellitengestützten Weitverkehrsnetz untersucht und bewertet. Es liegen umfangreiche Untersuchungsergebnisse der zu erwartenden Dienstgüte vor.

Falls die Schwundreserve beim Betrieb eines kaskadierten und satellitengestützten Weitverkehrsnetzes nicht ausreicht, um jeglichen Witterungseinfluß, besonders bei höheren Übertragungsfrequenzen, zu überwinden, so ist eine Analyse der Witterungsbegrenzung des Systems erforderlich. Die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung liegen als Resultat dieser Arbeit vor. Zusammenfassend läßt sich aus den Ergebnissen schlußfolgern, daß aufgrund der begrenzten Energieressourcen eines satellitengestützten Weitverkehrsnetzes eine Dienstgüte  $GoS = 10^{-4}$ , wie sie für terrestrische Richtfunkstrecken üblich ist, hier nur mit unverhältnismäßig hoher Schwundreserve erreichbar ist. Mit einer typischen Schwundreserve von 9 dB sowie einer adaptiven Leistungsregelung von bis zu 6 dB ist eine Dienstgüte  $GoS = 10^{-3}$  zu erwarten.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Formeln und Berechnungsmethoden sind der mittlere bedienbare Verkehr ( $E/km^2$ ) sowie die zu erwartende Dienstgüte satellitengestützter Weitverkehrsnetze in guter Näherung vorherzubestimmen.

Abschließend ist festzuhalten, daß mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze und Verfahren eine effektive Integration von Mobilfunknetzen möglich ist, wobei die zu erwartende Dienstgüte in guter Näherung vorbestimmt werden kann. Darüberhinaus sind diese Ansätze und Verfahren bereits zum Teil in die Standardisierung eines zukünftigen Mobilfunknetzes der dritten Generation, UMTS, eingeflossen.

## QUELLENVERZEICHNIS

---

- [1] *Common Interface (CI), Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT), ETS 300 175 (Part 1-9)*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, 1996.
- [2] *Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT), Wireless Relais Station (WRS), ETS 300 700*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, 1997.
- [3] *Generic Access Profile (GAP), Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT), Draft ETS 300 474 (Part 1-2)*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, 1996.
- [4] *GSM Recommendation 01.02, General Description Of A GSM PLMN*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, October 1992.
- [5] *GSM Recommendation 03.09, Handover Procedures*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, October 1990.
- [6] *GSM Recommendation 04.06, Mobile Station-Base Station System (MS-BSS) Interface Data Link (DL) Layer Specification*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, September 1994.
- [7] *GSM Recommendation 09.02, Mobile Application Part (MAP) Specification*, Sophia Antipolis, France, European Telecommunication Standards Institute, August 1996.
- [8] ACTS Project INSURED (AC229). *Deliverable 2 (D02), S-UMTS Demonstrator Architecture*. Brussels, Belgium, 1997.
- [9] Ameling, W. *Digitalrechner – Grundlagen und Anwendungen, Technische Informatik 1*. Braunschweig: VIEWEG, 1990.
- [10] K. Arnbjerg-Nielsen, Spliid H., P. Harremoes. *Modelling of Tipping Bucket Gauges: Single Rain Events and Rain Series*. In *Proceedings of 7th International Conference on Urban Storm Drainage (ICUSD)*, pp. 115–120, Hannover, Germany, 1996.
- [11] E. Bauer. *Einführung in die Radartechnik*. Teubner Studienskripten, Stuttgart, 1985.
- [12] A. Beccera, A. Guntsch, B. Bjelajac. *Service Definition in the Integrated UMTS Environment*. In *Proceedings Tenth International Conference On Digital Satellite Communications*, Brighton, United Kingdom, IEE, May 1995.
- [13] H. Bischl, M. Werner, E. Lutz. *Elevation-dependant Channel Model and Satellite Diversity for NGSO S-PCNs*. In *Proceedings of the VTC 96, Atlanta*, pp. 1038–1042, April 1996.
- [14] G. Brasche. *Prototypische Bewertung und Implementierung von neuen Paket-Datendiensten für das GSM-Mobilfunksystem*. PhD thesis, RWTH-Aachen, Aachen, 1998.

- [15] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt(Main), 1986.
- [16] CELESTRI. *Technical description of the CELESTRI Satellitesystem*, 1998. Published via Internet <http://www.celestri.com/>.
- [17] G. C. Clark, J. B. Cain. *Error-Correction Coding for Digital Communications*. Plenum Press, 1988.
- [18] R. B. Cooper. *Introduction to Queueing Theory*. The Macmillan Company, 1972.
- [19] D. Cygan. *Analytical Evaluation of Average Bit Error Rate for the Land Mobile Satellite Channel*. International Journal of Satellite Communications, Vol. 7, pp. 99-102, 1989.
- [20] D. Cygan, M. Dippold, J. Finkenzeller. *Kanalmodelle für die satellitengestützte Kommunikation landmobiler Teilnehmer*. In *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*. Gustav Fischer Verlag, 1988.
- [21] P. H. Dana. *Global Positioning System (GPS) Overview*, 1997. Published via Internet <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>.
- [22] ETSI. *Network Aspects (NA); A standardisations programme for Universal Personal Telecommunications (UPT)*. Technical Report ETR 032, European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, 1991.
- [23] ETSI. *Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); A Guide to DECT features that influence the traffic capacity and the maintenance of high radio link transmission quality*. Technical Report ETR 042, European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, 1992.
- [24] ETSI. *Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Traffic capacity and spectrum requirements for multi-system and multi-service DECT applications co-existing in a common frequency band*. Technical Report ETR 310, European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, 1996.
- [25] ETSI. *Universal Personal Telecommunication (UPT); Phase 1 (restricted UPT service scenario)*. Technical Report ETR 213-223, European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, 1995.
- [26] B.G. Evans. *Satellite Communication Systems*. Peter Peregrinus LTd., 1993.
- [27] FCC. *A Low Orbit Mobile Satellite System – Application of Motorola Satellite Communications, Inc.*, Washington, D. C., December 1990.
- [28] FCC. *A Low Orbit Mobile Satellite System – Application of TELEDESIC Corporation, Inc.*, Washington, D. C., March 1997.
- [29] R. Gallager, D. Bertsekas. *Data Networks*. Prentice-Hall In., Englewood Cliffs, 1992.
- [30] C. Görg. *Verkehrstheoretische Modelle und Stochastische Simulationstechniken zur Leistungsanalyse von Kommunikationsnetzen*. Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 13. Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1997.

- [31] A. Guntsch. *Analysis of the ATDMA/PRMA++ Protocol in a Mobile Satellite Environment*. In *Proceedings 46th Vehicular Technology Conference*, pp. 1225–1229, Atlanta, U.S.A., April 1996.
- [32] A. Guntsch. *A Comparison Between Terrestrial and Mobile Satellite Based Broadband Networks for Use in Feeding Wireless Local Loop Systems*. In *Proceedings 2nd European Personal Mobile Communication Conference*, Bonn, Germany, October 1997.
- [33] A. Guntsch. *Integrating GSM and Mobile Satellite Communication Systems - An Analysis*. In *Proceedings 2nd European Personal Mobile Communication Conference*, Bonn, Germany, October 1997.
- [34] A. Guntsch. *Integration Towards a Future Terrestrial and Mobile Satellite Based Communication System - An Analysis*. In *Proceedings 5th International Mobile Satellite Conference*, pp. 13–18, Pasadena, U.S.A., June 1997.
- [35] A. Guntsch. *Inter-Segment Handover Analysis in an Integrated GSM and Mobile Satellite PCN*. In *Proceedings 47th Vehicular Technology Conference*, pp. 525–529, Phoenix, U.S.A., May 1997.
- [36] A. Guntsch. *Mobility Management in an Integrated GSM and Satellite PCN*. In *Proceedings 46th Vehicular Technology Conference*, pp. 1830–1834, Atlanta, U.S.A., April 1996.
- [37] A. Guntsch. *Satellite Based Mobile Transport Networks for Use in Feeding Wireless Local Loop Systems - An Analysis*. In *Proceedings 5th International Mobile Satellite Conference*, pp. 45–50, Pasadena, U.S.A., June 1997.
- [38] A. Guntsch. *Signalling Analysis for an Integrated GSM and Satellite PCN*. In *Proceedings 1995 IEEE Wireless Communication System Symposium*, pp. 97–102, New York, U.S.A., IEEE, November 1995.
- [39] A. Guntsch. *Terrestrial versus Mobile Satellite Based Broadband Networks for Use in Feeding Wireless Local Loop Systems*. In *Proceedings 8th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, Finland, September 1997.
- [40] A. Guntsch, B.G. Evans, A. Sammut, R. Tafazolli. *SAINT's Migration path to UMTS*. In *Proceedings RACE Mobile Telecommunications Summit*, pp. 535–541, Cascais, Portugal, November 1995.
- [41] A. Guntsch, M. Ibnkahla, G. Losquadro, M. Mazella, D. Roviras, A. Tim. *EU's R&D Activities on Third Generation Mobile Satellite Systems (S-UMTS)*. In *IEEE Communications Magazine*, February 1998.
- [42] A. Guntsch, R. Tafazolli, D. Giancristofaro. *Architectures and Functionalities for an Integrated GSM and Satellite System Environment*. In *Proceedings RACE Mobile Telecommunications Summit*, pp. 393–397, Cascais, Portugal, November 1995.
- [43] A. Guntsch, R. Tafazolli, D. Giancristofaro. *Integrating GSM with New Satellite Systems*. *Mobile Communications International*, No. 31, pp. 62–65, May 1996.

- [44] M Hata. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 29, No. 3, pp. 317–325, 1980.
- [45] IRIDIUM. *Technical description of the IRIDIUM Satellitesystem*, 1997. Published via Internet <http://www.iridium.com/>.
- [46] ITU-R. *Attenuation By Hydrometeors, In Particular Precipitation, And Other Atmospheric Particles*. Recommendation P.721–1, International Telecommunication Union, 1982.
- [47] ITU-R. *Basic System Requirements and Performance Objectives for Cellular Type Mobile Systems Used as Fixed Systems*. Recommendation S.757, International Telecommunication Union, 1992.
- [48] ITU-R. *Radiometeorological data*. Recommendation P.563–1, International Telecommunication Union, 1982.
- [49] ITU-R. *Satellite Antenna Radiation Pattern for Use as a Design Objective*. Recommendation S.672–3, International Telecommunication Union, 1995.
- [50] ITU-T. *B-ISDN ATM Layer Specification*. Recommendation I.361, International Telecommunication Union, 1995.
- [51] ITU-T. *Characteristics of Primary PCM Multiplex Equipment Operating at 2048 kbit/s*. Recommendation G.732, International Telecommunication Union, 1988.
- [52] ITU-T. *ISDN user-network interface – Data link layer specification*. Recommendation Q.921, International Telecommunication Union, 1993.
- [53] ITU-T. *Numbering Plan for the ISDN era*. Recommendation E.164, International Telecommunication Union, 1991.
- [54] ITU-T. *One Way Transmission Time*. Recommendation G.114, International Telecommunication Union, 1996.
- [55] ITU-T. *Stage 3 Description for Call Completion Supplementary Services Using SS No. 7*. Recommendation Q.733, International Telecommunication Union, 1993.
- [56] ITU-T. *Stage 3 Description for Multiparty Supplementary Services Using SS No. 7*. Recommendation Q.734, International Telecommunication Union, 1993.
- [57] A. Jahn, E. Lutz. *DLR Channel Measurement Programme for Low Earth Orbit Satellite Systems*. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC '94), San Diego*, pp. 423–429, Sep./Oct. 94.
- [58] M. Junius. *Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme*. PhD thesis, RWTH–Aachen, Aachen, 1995.
- [59] M. Junius, C. Görg. *Ein Programmpaket zur ereignisgesteuerten Simulation in C++*. In *Messung, Modellierung und Bewertung von Rechen- und Kommunikationssystemen*, March 1993.
- [60] Pooi Yuen Kam. *On Orthogonal Signaling over the slow nonselective Rician Fading Channel with unknown specular component*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 41, No. 6, pp. 817–819, June 1993.

- [61] S. Kleier. *Neue Konzepte zur Unterstützung von Mobilität in Telekommunikationsnetzen*. PhD thesis, RWTH-Aachen, Aachen, 1997.
- [62] L. Kleinrock. *Queueing Systems: Theory*, Vol. 1. John Wiley and Sons, 1975.
- [63] L. Kosten. *Stochastic Theory of Service Systems*. Pergamon Press, 1973.
- [64] L. Kosten. *Über Sperrungswahrscheinlichkeiten bei Staffelschaltungen*. Elektro Nachrichten.-Technik, Vol. 14, pp. 5-12, 1937.
- [65] A. Kuczura. *The Interrupted Poisson Process as an Overflow Process*. Bell Systems Technical Journal, Vol. 52, pp. 437-448, 1973.
- [66] A. Kuczura, D. Bajaj. *A Method of Moments for the Analysis of a Switched Communication Network Performance*. IEEE Transactions on communications, Vol. 25, No. 2, pp. 185-193, 1977.
- [67] X. Lagrange, P. Godlewski. *Teletraffic Analysis of a hierarchical cellular network*. In *Proceedings of the VTC 95, Chicago, USA*, pp. 882-886, July 1995.
- [68] H.-D. Lüke. *Signalübertragung*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [69] E. Lutz. *A Markov Model for Correlated Land Mobile Satellite Channels*. International Journal of Satellite Communications, Vol. 14, pp. 333-339, 1996.
- [70] E. Lutz. *Mobilkommunikation über geostationäre (GEO) und umlaufende Satelliten*. Informationstechnik und Technische Informatik, No. 35, pp. 26-34, May 1993.
- [71] E. Lutz. *Slotted ALOHA Multiple Access and Error Control Coding for Land Mobile Satellite Networks*. International Journal of Satellite Communications, Vol. 10, pp. 275-281, 1992.
- [72] E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, W. Papke. *The Land Mobile Satellite Communications Channel — Recordings, Statistics and Channel Model*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, No. 2, pp. 375-386, May 1991.
- [73] G. Maral, M. Bousquet. *Satellite Communication Systems*. B.G. Teubner, 1990.
- [74] G. Maral, J.-J. de Ridder, B. G. Evans, M. Richharia. *Low Earth Orbit Satellite Systems for Communications*. International Journal for Satellite Communications, Vol. 9, pp. 209-225, 1991.
- [75] Wolf Mende. *Bewertung ausgewählter Leistungsmerkmale von zellularen Mobilfunksystemen*. PhD thesis, FernUniversität-Gesamthochschule-in Hagen, 1991.
- [76] MicroLegend. *What is Signalling System No. 7 (SS 7)?*, 1997. Published via Internet <http://www.microlegend.com/>.
- [77] M. Mouly, M.-B. Pautet. *The GSM System for Mobile Communications*. 49, rue Louise Bruneau, F-91120 Palaiseau, Tel. ++33 1 69 31 03 18, 1992.
- [78] N. Niebert, A. Spinner. *Vermittlungssysteme*. Vorlesungsskript. Ericsson Eurolab Deutschland GmbH, Aachen, 1995.
- [79] R. L. Olsen, D. V. Rogers, D. B. Hodge. *The  $aR^b$  Relation in the Calculation of Rain Attenuation*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-26, No. 2, pp. 318-329, March 1978.

- [80] L. Ortigoza-Guerrero, A. Aghvami. *A Self-Adaptive Prioritised Hand-off DCA Strategy for a Micocellular Environment*. In *Proceedings 8th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 401–405, Helsinki, Finland, September 1997.
- [81] Parsons, J.D. *The Mobile Radio Channel*. London: BPCC Wheatons Ltd., 1992.
- [82] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [83] U. Quernheim. *Satellitenkommunikation – Kanalmodellierung und Protokollbewertung*. PhD thesis, RWTH-Aachen, 1993.
- [84] RACE II Project SAINT (R2117). *Deliverable 9 (D09), Air Interface, Nr. AAU/CN DR P209-B1*. Brussels, Belgium, 1995.
- [85] Y. Rapp. *Planning of Junction Network in Multiexchange Area*. Ericsson Technics, Vol. 20, pp. 77–130, 1964.
- [86] S. Rappaport, Lon-Rong Hu. *Personal Communication Systems Using Multi-ple Hierarchical Cellular Overlays*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13, pp. 406–415, 1995.
- [87] D. Roddy. *Satellitenkommunikation*. Carl Hanser/Prentice-Hall International, 1991.
- [88] C.-H. Rokitansky, A. Guntsch, B. Bjelajac. *Exchange of Telemetry Data via the Satellite Segment of the Universal Mobile Telecommunication System (SUMTS)*. In *Proceedings European Telemetry Conference*, pp. 72–77, Garmisch-Partenkirchen, Germany, May 1996.
- [89] C.-H. Rokitansky, A. Guntsch, B. Bjelajac, C. Wietfeld. *SIMCO 3++: Simulation of Mobile COmmunications for Performance Evaluation of Cellular Networks, Short-Range and Satellite Communications*. In *Proceedings RACE Mobile Workshop*, pp. 578–584, Amsterdam, Netherlands, May 1994.
- [90] S.M. Samuels. *A Characterization of the Poisson Process*. J. App. Prob., Vol. 11, pp. 72–85, 1974.
- [91] M. Scheibenbogen, Clausen S., A. Guntsch. *Dynamic Channel Allocation in Hierarchical Cellular Systems*. In *Proceedings 46th Vehicular Technology Conference*, pp. 721–725, Atlanta, U.S.A., April 1996.
- [92] F. Schreiber. *Effective Control of Simulation Runs by a New Evaluation Algorithm for Correlated Random Sequences*. In *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, Vol. 42, pp. 347–354. Gustav Fischer Verlag, 1988.
- [93] B. Sklar. *Digital Communications*. Prentice Hall, 1988.
- [94] M. A. Sturza. *Architecture of the TELEDESIC Satellite System*. In *Proceedings of the IMSC '95*, pp. 212–218, May 1995.
- [95] W. L. Stutzman. *Prediction of Rain Effects on Earth-Space Communication Links operating in the 10 to 35 GHz Frequency Range*. International Journal for Satellite Communications, Vol. 7, pp. 37–45, 1989.
- [96] W. L. Stutzman. *Prolog to The Special Section on Propagation Effects on Satellite Communication Links*. Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 6, pp. 850–855, June 1993.

- [97] H.-D. Südhofen. *Modelle für Benutzergruppen zur Beschreibung von Datenverkehrsflüssen in Kommunikationssystemen*. PhD thesis, RWTH-Aachen, 1986.
- [98] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1981.
- [99] P. W. Tarr. *Introduction to GPS (Global Positioning System) Navigation*, 1997. Published via Internet [http://www.inmet.com/~pwt/gps\\_nav.html](http://www.inmet.com/~pwt/gps_nav.html).
- [100] TELEDESIC. *Technical description of the TELEDESIC Satellitesystem*, 1997. Published via Internet <http://www.teledesic.com/>.
- [101] H.-G. Unger. *Hochfrequenztechnik in Funk und Radar*. Teubner Studienskripten, 1988.
- [102] W. Vogel, G. Torrence, J. Alnutt. *Rain Fades on Low Elevation Angle Earth-Satellite Paths: Comparative assessment of the Austin, Texas, 11.2-GHz Experiment*. Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 6, pp. 885–896, June 1993.
- [103] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*, Vol. 1 u. 2. Teubner Verlag, January 1998.
- [104] M. Wittig. *The European Space Agency's On Board Processing System Design and Key-Technologies*. In *Proceedings of the SCGII '97*, pp. 56–62, Pasadena, USA, June 1997.
- [105] W. W. Wu, E. F. Miller, W. L. Pritchard, R. L. Pickholtz. *Mobile Satellite Communications*. Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, pp. 1431–1448, September 1994.
- [106] O. Zinke, Vlcek A. *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer-Verlag, 1990.



## Herleitungen

### Herleitung zu Gl. 7.54

Der zeitliche Verlauf der Funkausleuchtung eines festen Teilnehmeraufenthaltsgebiets durch einen Satelliten eines mobilen Satellitensystems ist in Abbildung A.1 dargestellt. Der mittlere Abstand  $\bar{l}_T$  den ein Teilnehmer bis zum überschreiten des

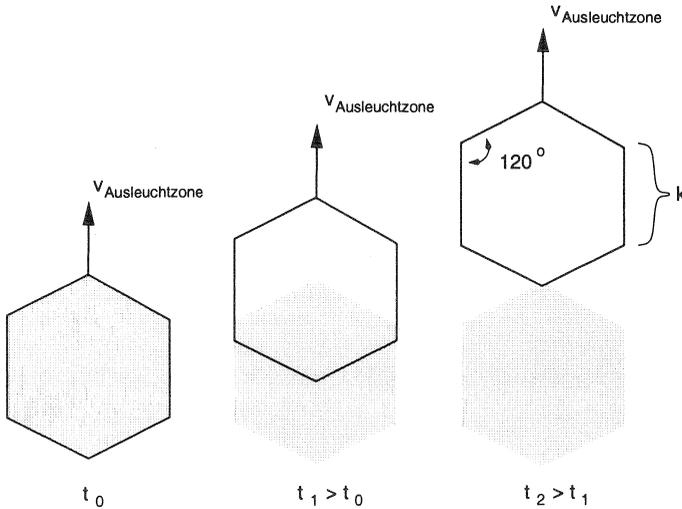


Abbildung A.1: Zeitlicher Verlauf der Funkausleuchtung eines festen Teilnehmeraufenthaltsgebiets durch einen mobilen Satelliten

Satellitenfunkzellenrandes zurücklegt lässt sich wie folgt herleiten:

$$\bar{l}_T = \frac{1}{\sqrt{3}k} \int_0^{\sqrt{3}k} \int_{-\frac{k}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}}x}^{\frac{k}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}}x} dy dx \quad (\text{A.1})$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}k} \int_0^{\sqrt{3}k} \frac{k}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}}x dx \quad (\text{A.2})$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}k} \left( \frac{\sqrt{3}}{2}k^2 + \frac{\sqrt{3}}{4}k^2 \right) \quad (\text{A.3})$$

$$= k + \frac{k}{2} = \frac{3}{2}k \quad (\text{A.4})$$

$$(\text{A.5})$$

Hieraus folgt für die mittlere Aufenthaltsdauer  $\eta_h^{-1}$  eines Teilnehmers in der Satellitenfunktelle:

$$\eta_h^{-1} = \frac{\bar{l}_T}{v_{\text{Ausleuchtzone}}} = \frac{3k}{2v_{\text{Ausleuchtzone}}}. \quad (\text{A.6})$$

Mit Hilfe der mittleren Gesprächsdauer  $\mu$  folgt Gl. 7.54:

$$n_h = \frac{\eta_h}{\mu} = \frac{2v_{\text{Ausleuchtzone}}}{3k\mu}.$$

### Herleitung zu Gl. 9.14

Nach Abbildung 9.8 wird  $\frac{F_{v1}}{F_0}(\frac{r}{r_0})$  in drei angrenzenden Wertebereichen betrachtet:

$\frac{r}{r_0} > 1$  Es gilt:

$$\frac{F_{v1}}{F_0}\left(\frac{r}{r_0}\right) = 0 \quad (\text{A.7})$$

da der effektive Funkversorgungsbereich (siehe Abbildung 9.8) nicht eingeschränkt wird.

$\frac{1}{\sqrt{2}} \leq \frac{r}{r_0} \leq 1$  Die Fläche  $F_{v1}$  die aufgrund einer plötzlichen Regenerhöhung nicht mehr funkversorgt werden kann (siehe Abbildung 9.8) berechnet sich zu:

$$F_{v1} = 2r_0^2 - \pi r^2 + 4 \left( \underbrace{\frac{2r^2 \arccos \frac{r_0}{\sqrt{2}r} - r_0 \sqrt{2r^2 - r_0^2}}{2}}_{s_1 \text{ aus [15], S. 194}} \right). \quad (\text{A.8})$$

Bezogen auf die quadratische Grundfläche  $F_0 = 2r_0^2$  resultiert:

$$\frac{F_{v1}}{F_0} = 1 + \left( 2 \arccos\left(\frac{r_0}{\sqrt{2}r}\right) - \frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - \sqrt{2\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1}. \quad (\text{A.9})$$

$0 \leq \frac{r}{r_0} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$  Die Fläche  $F_{v1}$  die aufgrund einer plötzlichen Regenerhöhung nicht mehr funkversorgt werden kann (siehe Abbildung 9.8) berechnet sich zu:

$$F_{v1} = F_0 - \pi r^2. \quad (\text{A.10})$$

Bezogen auf die quadratische Grundfläche  $F_0 = 2r_0^2$  resultiert:

$$\frac{F_{v1}}{F_0} = 1 - \frac{\pi}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^2. \quad (\text{A.11})$$

### Herleitung zu Gl. 9.17

Nach Abbildung 9.13 wird  $\frac{F_{v2}}{F_0}(\frac{r}{r_0})$  in drei angrenzenden Wertebereichen betrachtet:

$\frac{r}{r_0} > 1$  Es gilt:

$$\frac{F_{v2}}{F_0}\left(\frac{r}{r_0}\right) = 0 \quad (\text{A.12})$$

da der effektive Funkversorgungsbereich (siehe Abbildung 9.13) nicht eingeschränkt wird.

$\frac{1}{\sqrt{2}} \leq \frac{r}{r_0} \leq 1$  Die Fläche  $F_{v2}$  die vom Satelliten in der Zeit  $\Delta t$  mit seiner durch Regen reduzierten Ausleuchtzone (siehe Abbildung 9.13) überstrichen wird berechnet sich zu:

$$F_{v2} = 2v\Delta t \left( \frac{r_0}{\sqrt{2}} - \sqrt{r^2 - \frac{r_0^2}{2}} \right). \quad (\text{A.13})$$

Bezogen auf die quadratische Grundfläche  $F_0 = 2r_0^2$  resultiert:

$$\frac{F_{v2}}{F_0} = \frac{v\Delta t}{r_0} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} - \sqrt{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - \frac{1}{2}} \right). \quad (\text{A.14})$$

$0 \leq \frac{r}{r_0} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$  Die Fläche  $F_{v2}$  die vom Satelliten in der Zeit  $\Delta t$  mit seiner durch Regen reduzierten Ausleuchtzone (siehe Abbildung 9.13) überstrichen wird berechnet sich zu:

$$F_{v2} = 2r \cdot v\Delta t. \quad (\text{A.15})$$

Bezogen auf die quadratische Grundfläche  $F_0 = 2r_0^2$  resultiert:

$$\frac{F_{v2}}{F_0} = \frac{v\Delta t}{r_0} \frac{r}{r_0} \quad (\text{A.16})$$



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

ABR	<b>A</b> vailable <b>B</b> it <b>R</b> ate	DMT	<b>D</b> ual <b>M</b> ode <b>T</b> erminal
ACM	<b>A</b> ddress <b>C</b> omplete <b>M</b> essage	DECT	<b>D</b> igital <b>E</b> nhanced <b>C</b> ordless <b>T</b> elecommunication
ADPCM	<b>A</b> daptive <b>D</b> ifferential <b>P</b> ulse <b>C</b> ode <b>M</b> odulation	DFS	<b>D</b> ECT <b>F</b> ixed <b>S</b> ystem
ANM	<b>A</b> Nswer <b>M</b> essage	DS	<b>D</b> elay <b>S</b> pread
ASCI	<b>A</b> dvanced <b>S</b> peech <b>C</b> all <b>I</b> tems	EI	<b>E</b> quipment <b>I</b> dentify
ATM	<b>A</b> synchronous <b>T</b> ransfer <b>M</b> ode	EIR	<b>E</b> quipment <b>I</b> dentify <b>R</b> egister
AuC	<b>A</b> uthentication <b>C</b> entre	EIRP	<b>E</b> quivalent <b>I</b> sotropic <b>R</b> adiated <b>P</b> ower
AWGN	<b>A</b> dditive <b>W</b> hite <b>G</b> aussian <b>N</b> oise	ETC	<b>E</b> arth <b>T</b> erminal <b>C</b> ontroller
BCH-Code	<b>B</b> ose- <b>C</b> haudhuri- <b>H</b> ocquenghem- <b>C</b> ode - <b>B</b> lockcode	ETSI	<b>E</b> uropean <b>T</b> elecommunications <b>S</b> tandards <b>I</b> nstitute
BER	<b>B</b> it <b>E</b> rror <b>R</b> atio	FACCH	<b>F</b> ast <b>A</b> ssociated <b>C</b> CH
BSC	<b>B</b> ase <b>S</b> tation <b>C</b> ontroller	FCC	<b>F</b> ederal <b>C</b> ommunications <b>C</b> ommission der Vereinigten Staaten von Amerika
BSS	<b>B</b> ase <b>S</b> tation <b>S</b> ubsystem	FDMA	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
BTS	<b>B</b> ase <b>T</b> ransceiver <b>S</b> tation	FMBS	<b>F</b> rame <b>M</b> ode <b>B</b> earer <b>S</b> ervice
CCH	<b>C</b> ontrol <b>C</b> Hannel	FKV	<b>F</b> este <b>K</b> anal <b>V</b> ergabe
CDMA	<b>C</b> ode <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess	FP	<b>F</b> ixed <b>P</b> art
CBR	<b>C</b> onstant <b>B</b> it <b>R</b> ate	GAP	<b>G</b> eneric <b>A</b> ccess <b>P</b> rofile
CC	<b>C</b> all <b>C</b> ontrol	GEO	<b>G</b> eostationary <b>E</b> arth <b>O</b> rbital
CEPT	<b>C</b> onférences <b>E</b> uropéenne des <b>P</b> ostes et <b>T</b> élécommunications	GoS	<b>G</b> rade of <b>S</b> ervice
CPG	<b>C</b> all <b>P</b> ro <b>G</b> ress <b>M</b> essage	GPS	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
CTA	<b>C</b> ordless <b>T</b> erminal <b>A</b> dapter	GPRS	<b>G</b> eneral <b>P</b> acket <b>R</b> adio <b>S</b> ervice
DB	<b>D</b> ata <b>B</b> ase		
DCS	<b>D</b> ynamic <b>C</b> hannel <b>S</b> election		

GLT	<b>G</b> iga <b>L</b> ink <b>T</b> erminal	MSC	<b>M</b> obile <b>S</b> witching <b>C</b> enter
GS	<b>G</b> ateway <b>S</b> witch	MSI	<b>M</b> edium <b>S</b> cale <b>I</b> ntegration
GSM	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile communication	MT	<b>M</b> obile <b>T</b> erminal
GSM-MoU	<b>M</b> emorandum of <b>U</b> nderstanding on the <b>I</b> ntroduction of the <b>P</b> an-European <b>D</b> igital <b>M</b> obile <b>C</b> ommunication <b>S</b> ervice	NOC	<b>N</b> etwork <b>O</b> peration and <b>C</b> ontrol
GSM	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile communication	NSS	<b>N</b> etwork and <b>S</b> witching <b>S</b> ubsystem
HLR	<b>H</b> ome <b>L</b> ocation <b>R</b> egister	OMC	<b>O</b> peration and <b>M</b> aintenance <b>C</b> entre
HSCSD	<b>H</b> igh <b>S</b> peed <b>C</b> ircuit <b>S</b> witched <b>D</b> ata <b>S</b> ervice	OSS	<b>O</b> peration <b>S</b> ub <b>S</b> ystem
IAM	<b>I</b> nitial <b>A</b> ddress <b>M</b> essage	PBX	<b>P</b> rivate <b>B</b> ranch <b>e</b> Xchange
IMEI	<b>I</b> nternational <b>M</b> obile <b>E</b> quipment <b>I</b> dentify	PLMN	<b>P</b> ublic <b>L</b> and <b>M</b> obile <b>N</b> etwork
IN	<b>I</b> ntelligenter <b>N</b> etze	PP	<b>P</b> ortable <b>P</b> art
IWU	<b>I</b> nter <b>W</b> orking <b>U</b> nit	PAP	<b>P</b> ublic <b>A</b> ccess <b>P</b> rofile
ISDN	<b>I</b> ntegrated <b>S</b> ervices <b>D</b> igital <b>N</b> etwork	REL	<b>R</b> E <b>L</b> ease <b>M</b> essage
ISL	<b>I</b> nter <b>S</b> atellite <b>L</b> ink	RLC	<b>R</b> e <b>L</b> ease <b>C</b> omplete <b>M</b> essage
ISU	<b>I</b> ndividual <b>S</b> ubscriber <b>U</b> nit	RLL	<b>R</b> adio in the <b>L</b> ocal <b>L</b> oop
ISUP	<b>I</b> SDN <b>U</b> ser <b>P</b> art	RR	<b>R</b> adio <b>R</b> esource <b>M</b> anagement
LA	<b>L</b> ocation <b>A</b> rea	RS-Code	<b>R</b> eed- <b>S</b> olomon- <b>C</b> ode
LAP	<b>L</b> ink <b>A</b> ccess <b>P</b> rotocol	RSSI	<b>R</b> adio <b>S</b> ignal <b>S</b> trength <b>I</b> ndicator
LAPD	<b>L</b> ink <b>A</b> ccess <b>P</b> rotocol for the <b>D</b> -channel	SCP	<b>S</b> ervice <b>C</b> ontrol <b>P</b> oint
LAPDm	<b>LAP</b> for the <b>Dm</b> -channel	SCCP	<b>S</b> ignalling <b>C</b> onnection <b>C</b> ontrol <b>P</b> art
LAPDs	<b>LAP</b> for the <b>Ds</b> -channel	SDMA	<b>S</b> pace <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
LEO	<b>L</b> ow <b>E</b> arth <b>O</b> rbital	SFP	<b>S</b> atelliten <b>F</b> uß <b>P</b> unkt
LSI	<b>L</b> arge <b>S</b> cale <b>I</b> ntegration	SIM	<b>S</b> ubscriber <b>I</b> dentify <b>M</b> odule
MAHO	<b>M</b> obile <b>A</b> ssisted <b>H</b> and <b>O</b> ver	SP	<b>S</b> ignalling <b>P</b> oint
MEO	<b>M</b> edium <b>E</b> arth <b>O</b> rbital	SS 7	<b>S</b> ignalling <b>S</b> ystem <b>N</b> o. 7 - <b>Z</b> eichengabesystem <b>N</b> r. 7
MM	<b>M</b> obility <b>M</b> anagement	ST	<b>S</b> tandard <b>T</b> erminal
MS	<b>M</b> obile <b>S</b> tation	STP	<b>S</b> ignal <b>T</b> ransfer <b>P</b> oint

SV	Space Vehicle	UBR	Unspecified Bit Rate
TCAP	Transaction Capabilities Application	UNI	User to Network Interface
TCH	Traffic Channel	UUS	User-to-User Signalling
TDD	Time Division Duplexing	VBR	Variable Bit Rate
TDMA	Time Division Multiple Access	VLR	Visitor Location Register
TRAU	Transcoder/Rate Adaptor Unit	VLSI	Very Large Scale Integration
		WLL	Wireless Local Loop



## STICHWORTVERZEICHNIS

---

### Symbole

Überlaufsystem ..... 90

### A

Abschattung ..... 31  
 Absorption ..... 28  
 Aktualisierungshäufigkeit ..... 119  
 Antenne ..... 139  
 ASTRA ..... 15  
 ATM ..... 140  
     Dienstklassen ..... 140  
 Aufenthaltsverwaltung- Verfahren und  
     Ergebnisse ..... 116  
 AWGN-Kanal ..... 33

### B

Bahngeschwindigkeit ..... 98  
 Beugung ..... 30  
     Fresnel-Kirchhof ..... 30  
 Bodenstation ..... 120

### C

CALL HOLD ..... 57  
 CALL WAITING ..... 57  
 CEPT ..... 6  
 CNCL ..... 78

### D

DECT ..... 6, 12-14, 102  
     Dynamische Kanalwahl, DCS ..... 13  
     Funkschnittstelle ..... 13  
     Netz-Architektur ..... 12  
     WLL, RLL ..... 14  
 Delay Spread ..... 30  
 Dienste ..... 139  
 Dienstgüte ..... 102  
     bei Überlaufverkehr ..... 108  
     bei Handoververkehr ..... 109  
 DLR-Kanalmodell ..... 37  
 Dual Mode ..... 54

### E

EFSM ..... 81  
 EIRP ..... 27, 115  
 Elevationswinkel ..... 99  
 Empfängerrauschtemperatur ..... 134

Erlang-B ..... 86  
 Erstzugriff ..... 131  
 ETSI ..... 6  
 EUTELSAT ..... 15

### F

FCC ..... 115  
 Freiraumdämpfung ..... 27  
 Funkruf ..... 116  
 Funkzellen ..... 142

### G

Geländetyp ..... 128  
 Gesprächsabbruch ..... 150  
 Gesprächsaufbau ..... 108  
 Gleichkanalstörungen ..... 32  
 GoS ..... 147  
 Grade of Service, GoS ..... 102  
 Gruppenantenne ..... 99  
 GSM ..... 6-11, 128  
     A-Schnittstelle ..... 59  
     A<sub>bis</sub>-Schnittstelle ..... 58  
     E-Schnittstelle ..... 60  
     Authentifizierungszentrum, AuC .... 8  
     Besucherdatei ..... 8  
     Betriebs-/Wartungszentrum, OMC . 8  
     Burst ..... 9  
     FACCH ..... 10  
     Feststationssteuerung, BSC ..... 8  
     Frequenzband ..... 9  
     Funkausleuchtung ..... 128  
     Funkfeststation, BTS ..... 8  
     Funkteilsystem ..... 7  
     Geräteidentifikationsregister, EIR .... 8  
     Handover ..... 10  
     Heimatdatei, HLR ..... 8  
     Kanalmusterdateien ..... 36  
     LAPDm ..... 10  
     Mobiles Endgerät, MS ..... 7  
     Mobilvermittlungsstelle, MSC ..... 8  
     Rahmenstruktur ..... 9

### H

Handover ..... 87  
     -frequenz ..... 101  
     Angebotener Verkehr ..... 96

- asynchron ..... 134  
 Auslösung ..... 131  
 Blockierwahrscheinlichkeit ..... 135  
 Inter-Netz ..... 127  
 synchron ..... 137
- I**
- Inklination ..... 97  
 Integration ..... 53  
   Anforderungen ..... 54  
   Benutzerdaten ..... 56, 60, 65, 68, 70  
   Datenbankebene ..... 62  
   DECT(WLL) ..... 111  
   Endgeräteebene ..... 55  
   GSM ..... 106  
   Handover ..... 56, 62, 66, 69, 72  
   ISDN ..... 103  
   Kaskadierte Systeme ..... 70  
   Netzebene ..... 58  
   Sicherheit ..... 56, 61, 66, 69, 71  
   UPT-Server ..... 66  
 IRIDIUM ..... 17-21, 120  
   Dienste ..... 17  
   Funkausleuchtung ..... 128  
   Funkschnittstellen ..... 20  
   Funkversorgung ..... 17  
   Netz-Architektur ..... 18  
   Satellitenkonstellation ..... 17  
 ISL ..... 120
- K**
- Kanalbündelung ... 103, 105, 106, 111, 112  
 Kanalcodierung ..... 132  
   BCH ..... 133  
   Faltungscodierung ..... 133  
   Reed-Solomon ..... 133  
 Kanalvergabe ..... 141  
 Kapazitätsbegrenzung ..... 130  
 Konstellation ..... 143
- L**
- LAPDm ..... 134  
 Leistungssteuerung ..... 140  
 Location Area, LA ..... 116  
 Log-Normalverteilung ..... 32  
 LRE ..... 83
- M**
- M/M/n-Verlustsystem ..... 85  
 Markov-Kette ..... 86  
 Mehrwegeausbreitung ..... 30  
 Mobilitätsmodelle ..... 95
- MoU ..... 6
- N**
- NeSSiE ..... 77  
   Software Architektur ..... 80  
   Technische Anforderungen ..... 78
- O**
- Okumura-Hata ..... 35  
 Orbitalhöhe ..... 144
- P**
- Paketfehlerwahrscheinlichkeit ..... 40
- R**
- Rayleigh-Kanal ..... 33  
 Rayleigh-Verteilung ..... 31  
 Reflexion ..... 28  
 Regen ..... 41  
 Regendynamik ..... 43  
 Regenereignis ..... 146  
 Regenzone ..... 43  
 Reservierung ..... 89  
 Rice-Kanal ..... 32  
 Rice-Verteilung ..... 31  
 RXLEV ..... 131  
 RXQUAL ..... 131
- S**
- Satellitenfußpunkt ..... 100  
 Satellitenmobilität ..... 97  
 Short Term Fading ..... 31  
 Signalisierung  
   Kosten ..... 124, 126  
   Kostenvergleich ..... 126  
 Signallaufzeit ..... 15  
 SNIFF+ ..... 79  
 Streuung ..... 28  
 Suzuki-Prozeß ..... 38
- T**
- Teilnehmermobilität ..... 95  
 TELEDESIC ..... 21-25  
   Dienste ..... 21  
   Funkschnittstelle ..... 24  
   Funkversorgung ..... 22  
   Netz-Architektur ..... 23  
   Satellitenkonstellation ..... 21  
 Transcodierung . 8, 103, 105, 106, 111, 112
- U**
- Unterbrechungsdauer ..... 135

**V**

Van-Allen-Gürtel .....	15
Verbindungsbilanz .....	28
Verfügbarkeit .....	148
Verlustsystem	
kaskadiert .....	94

**W**

Wartemodell .....	85
Witterungseinfluß .....	145

**Z**

Zentriwinkel .....	99
Zielsystem .....	85
Zielsysteme .....	72
DECT/WLL und Satellit .....	75
GSM und Satellit .....	73
ISDN und Satellit .....	72
Zustandswahrscheinlichkeit .....	88



## NACHWORT

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt insbesondere Herrn 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.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. J. Schmitt danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und die Hinweise zur Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Diplomanden, Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften, die durch ihre Arbeit wesentlich zum Gelingen beigetragen haben, ebenso bei meinen Kollegen, die die Mühe des Korrekturlesens dieser Arbeit auf sich genommen haben, vor allem jedoch bei meiner Frau, Dipl.-Ing. Kristina Guntsch.

Weiterer Dank geht an die Free Software Foundation, Cambridge, U.S.A. Auf deren GNU C++ Compiler, C++ Library, Debugger, sowie vielen weiteren Programmen, die im Quellcode frei verfügbar sind, konnten große Teile des Simulators NeSSiE und der Bibliothek CNCL aufbauen.

Aachen, im März 1998

Alexander Guntsch

*Imagination is more important than knowledge.*

Albert Einstein



# 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 Anwen-  
dung,  
1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-383-4

## **ABMT Band 5**

**Böhmer, S.**  
Entwurf eines ATM-basierten  
Funknetzes und Software-  
Entwurfsmethodik zur Imple-  
mentierung,  
1. Auflage 1996, 172 Seiten;  
ISBN 3-86073-384-2

## **ABMT Band 6**

**Guntermann, M.**  
Universelle Benutzermobilität  
auf der Basis des Intelligen-  
ten Netzes - Entwurf, Bewertung  
und Implementierung -,  
1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-385-0

## **ABMT Band 7**

**Kleier, S.**  
Neue Konzepte zur Unter-  
stützung von Mobilität in  
Telekommunikationsnetzen,  
1. Auflage 1996, 204 Seiten;  
ISBN 3-86073-386-9

## **ABMT Band 8**

**Decker, P.**  
Entwurf und Leistungsbewer-  
tung hybrider Fehlersicher-  
ungsprotokolle 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 Kapazitäts-  
optimierung schnurloser Mo-  
bilfunksysteme nach DECT-  
Standard,  
1. Auflage 1997, 180 Seiten;  
ISBN 3-86073-388-5

## **ABMT Band 10**

**Plenge, C.**  
Leistungsbewertung öffent-  
licher DECT-Systeme,  
1. Auflage 1997, 258 Seiten;  
ISBN 3-86073-389-3

## **ABMT Band 11**

**Kennemann, O.**  
Lokalisierung von Mobilsta-  
tionen anhand ihrer Funk-  
meßdaten,  
1. Auflage 1997, 162 Seiten;  
ISBN 3-86073-620-5

## **ABMT Band 12**

**Wietfeld, C. M.**  
Mobilfunksysteme für die  
europäische Verkehrsleittech-  
nik - 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**

**Fröhlich, 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





