



Universität Stuttgart

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

66. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

**Effizienz des Vielfachzugriffs auf
paketorientierte Kanäle in Satellitensystemen
für die globale Mobilkommunikation**

von

Andreas Weber

1998

D 93

© 1998 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart

Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart

ISBN 3-922403-76-X



University of Stuttgart

Institute of Communication Networks and Computer Engineering

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

66th Report on Studies in Congestion Theory

**Efficiency of Media Access
to Packet Oriented Channels in Satellite Systems
for Global Mobile Communications**

by

Andreas Weber

1998

Efficiency of Media Access to Packet Oriented Channels in Satellite Systems for Global Mobile Communications

Summary

Service Integration and Mobile Communications

In the recent years, telecommunication users have requested broadband and enhanced integrated services as well as the support of mobility. The Integrated Services Digital Network (ISDN), the ATM based Broadband ISDN, and the Intelligent Network (IN) standards offer flexible telecommunication services, easy service creation and modification, as well as broadband capabilities.

In the field of mobility support two different types of mobility in telecommunication networks can be distinguished: *Personal mobility* allows the user to register in different networks. A single user related number is used to determine the exact location of a user in case of incoming calls. The International Telecommunication Union (ITU) has defined the Universal Personal Telecommunications (UPT) system which supports the global user related number. A UPT user is able to plug-in the own terminal into any network access interface of any UPT network. Additionally, the user can personalize any UPT terminal using a Subscriber Identity Module (SIM). The SIM includes the personal UPT number as well as personal service related data. UPT evolves telecommunication from network interface related to user related service provision.

Terminal mobility is integrated in the UPT development and supports the wireless access to fixed networks via portable terminals. Different grades of mobility support can be distinguished: Wireless telephones according to CT2, CT3, and DECT standards support a small number of mobile terminals that are attached to one base station with a range of several hundred meters. Consequently, these systems are mainly used for in-house communication. A regional provision of mobile communication services is performed by trunked radio systems, e.g. TETRA (Trans European Trunked Radio System). Cellular mobile communication systems according to the standards GSM 900 and DCS 1800 allow roaming of their users in different countries that support these systems. Cellular systems increase the total covered area by dividing it into smaller cells each of which is served by one base station. A user can be reached if within the reach of one base station of these systems. Contrary to wireless telephones and trunked radio systems, cellular systems support handovers between base stations during a call.

Mobile Communications via Satellite Systems

Terrestrial cellular mobile communication systems are not economic for providing telecommunication services in areas with low offered traffic, e.g. at sea or in areas with low population density. Satellite systems with global or continental coverage can be used to fill this gap. They additionally have the advantage of supporting world-wide roaming of users and, hence the users have world-wide access using the same terminal. In the future, all mobile communication systems will be integrated into a unified system called UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) and IMT 2000 (International Mobile Telecommunications) currently being standardised by ETSI (European Telecommunications Standards Institute) and ITU respectively. These systems are a part of the UPT concept.

The first satellite communication systems were exclusively used for the interconnection of continental telephone networks (INTELSAT 1, 1965). The development of satellite systems for mobile communications started with GEO (Geostationary Satellite Orbit) satellites, e.g. INMARSAT II (launched in 1982). These systems covered a very large area using a single beam and, consequently, powerful terminals with large antennas were required. The main purpose of these first generation mobile communication satellite systems is maritime communication. As a next step, enhanced antenna technology helped to provide satellites with multiple beams which allows re-use of radio frequencies and, hence to better utilise the available frequency band. Focusing the transmitted radio power on a smaller area allows the use of smaller antennas for the mobile terminals. These types of satellite systems are currently in service (e.g., INMARSAT III, 1996). Further decreasing the size of the terminals can be achieved by increasing the number of spot beams per satellite, by decreasing the height of orbit, and by introducing Code Division Multiple Access (CDMA). These third generation satellite systems, e.g. INMARSAT P21, Iridium, and Odyssey will be installed around year 2000. Contrary to GEO systems, in which three satellites are sufficient for global coverage, Intermediate Circular Orbit (ICO) or Low Earth Orbit (LEO) satellite systems require a much greater number of satellites in order to provide global network access. Additionally, due to the movement of ICO and LEO satellites relative to the globe surface, a complicated location management is required and handovers of connections between neighbour satellites become necessary. Nevertheless, these drawbacks are more than compensated by the advantage of small and cheap mobile terminals, and consequently the third generation mobile satellite communication can evolve to a mass market.

Overview of the thesis

The goal of this thesis is the performance evaluation of the initial access of a mobile terminal to a LEO or ICO satellite system. An initial access is required as long as no connection exists between mobile terminal and satellite. This is the case before starting registrations, deregistrations, location updates, and call set-ups. The initial access is handled via a special dedicated

signalling channel. Collisions may occur due to the independent access of the common signalling channel by the mobile terminals and have to be resolved by a special multiple access protocol. Depending on the distribution of the users on the globe surface, the time dependent user behaviour, the size of the coverage area of a satellite, the number of satellites, and the movement of the satellites relative to the globe surface, every satellite has to handle a highly dynamic rate of initial access messages.

Chapter Two presents the basic aspects of communication switching. Some examples for typical satellite communication services are given in order to deduce the required performance of these systems. The architecture of satellite systems is shown and especially the properties that are different from terrestrial mobile communication systems, e.g. orbits, uplinks and downlinks, multiplex, and media access methods are presented. The advantages and drawbacks of the two basic media access protocols (*reservation* and *random* access) are shown. The expected properties of media access protocols that combine the advantages of random and reservation access are defined. Finally, Chapter Two shows an overview of a number of different media access protocols and classifies them according to convenient criteria, for example the type of access (random, reservation, combined).

Chapter Three presents the basic mathematical analysis and simulation methods used for the performance analysis of the initial access in satellite systems. For stationary memoryless systems with discrete states (Markovian Processes) the calculation of the state probabilities is shown. For non stable random access protocols, an analysis method is presented that allows evaluation of their performance despite their instability. A method for the evaluation of the stability of random access protocols is also presented. Finally, stationary and non-stationary simulation methods are explained. The non-stationary simulation method is very convenient for the performance evaluation of the access protocols in the highly dynamic ICO and LEO satellite system environment.

In Chapter Four a mathematical analysis for a class of slotted media access protocols, which combine the advantages of the two basic media access protocols (*reservation* and *random* multiple access), is presented. Depending on the overall system state, all these protocols allow a random access of the channel. At the same time, a reservation request is sent which is used only in the case of a collision of the data message. The mathematical analysis is based on a discrete-time Markov chain. An iterative solution has been developed. The sequence of iteration steps corresponds to the transient phase after system start when starting with an empty system. The iteration is stopped after reaching the stationary phase. For completeness, analysis methods for pure random and reservation access are deduced as special cases of the analysis of the combined protocols. The analysis results are validated by comparing them with simulation results. A comparison of the performance of the two basic access protocols with the new combined protocols is also given. All results show that the combined protocols really combine the

advantages of the two basic access protocols, namely the low transmission delay of the random access and the high maximum throughput and the stability of the reservation access.

The combined media access protocols may be used for the initial access to mobile communication satellite systems. Chapter Five presents a global two-step simulation of the combined protocols in a highly dynamic ICO environment. For the first step, a traffic generator has been developed which considers the movement of the satellites as well as the distribution of the users on the globe surface and their behaviour which depends on the local time of the day. The traffic generator model allows the calculation of the time dependent rate of initial access messages which is correlated to the rate of registrations, deregistrations, location updates and call set-ups. In a second step, the random traffic generated by the traffic generator is used for the simulation of the different combined media access protocols. As a result, e.g. the distribution function of the transmission delay is given. All results are shown from the point of view of the satellite as well as from the point of view of a user. The first type of results helps for dimensioning the system, while the second type of result corresponds to the quality of service offered to the user. All simulations have also been performed for the two basic protocols. According to the mathematical analysis the results generated for the realistic ICO system environment show the superiority of the combined media access protocols.

Chapter Six concludes the thesis, presenting the major results and insights. Additionally, an outlook on future topics in mobile satellite communications is given.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	5
Formelzeichen	7
1 Einleitung	11
1.1 Dienstintegration und Mobilkommunikation	11
1.2 Mobilkommunikation über Satellitensysteme	11
1.3 Übersicht über die Arbeit	12
2 Satellitensysteme	14
2.1 Grundlagen der Vermittlungstechnik	14
2.1.1 Vermittlungskonzepte	14
2.1.2 Verbindungskonzepte	16
2.1.3 Verbindungskonfigurationen	17
2.2 Dienste in Satellitensystemen	17
2.2.1 Verteildienste	18
2.2.2 Ausrufdienst	18
2.2.3 Positionsbestimmung	18
2.2.4 Datenübertragung zwischen lokalen Netzen	19
2.2.5 Verbindung von Weitverkehrsnetzen	20
2.2.6 Satellitenmobilkommunikation	20
2.2.7 VSAT-Dienste	21
2.3 Systemarchitekturen	22
2.3.1 Satellit als Repeater	24
2.3.2 Satellit mit Vermittlungsfunktionen	27
2.3.3 OBP-Satelliten	29
2.3.4 Bodenstationen	30

2.3.5 Systemmanagement	32
2.4 Umlaufbahnen	33
2.4.1 GEO-Satelliten.....	34
2.4.2 LEO- und ICO-Satelliten	34
2.5 Übertragungsstrecken in Satellitensystemen	36
2.6 Eigenschaften von Funkübertragungsstrecken in Satellitensystemen	37
2.6.1 Richtwirkung von Sende- und Empfangsantennen	38
2.6.2 Sende- und Empfangsleistung	39
2.6.3 Signallaufzeit	40
2.6.4 Störeffekte	40
2.6.5 Frequenzbänder	42
2.6.6 Bandbreite- und leistungsbegrenzte Kanäle	43
2.7 Multiplexverfahren	43
2.7.1 Raummultiplex	44
2.7.2 Frequenzmultiplex	45
2.7.3 Zeitmultiplex	45
2.7.4 Codemultiplex	46
2.8 Zugriffsverfahren	47
2.8.1 Wahlfreie Zugriffsverfahren.....	50
2.8.2 Zugriff durch Reservierung	55
2.8.3 Kombinierte Zugriffsverfahren.....	58
2.8.4 Klassifikation der Zugriffsverfahren	60
3 Methoden zur analytischen und simulativen Untersuchung von Satellitenzugriffsverfahren	63
3.1 Verkehrstheoretische Analysemethoden.....	63
3.1.1 Bestimmung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten.....	63
3.1.2 Einprägen des Gesamtangebotes	68
3.1.3 Stabilitätsuntersuchungen	70
3.2 Ereignisgesteuerte Simulation	72

3.2.1 Stationäre Simulation	75
3.2.2 Instationäre Simulation	76
4 Eine Analysemethode für eine Klasse getakteter Zugriffsverfahren	78
4.1 Gemeinsamkeiten der untersuchten Zugriffsverfahren	78
4.2 Das Grundprinzip der Analysemethode	80
4.2.1 Definition des Zustandsraumes	81
4.2.2 Zeitabhängige Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten	82
4.2.3 Iterative Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten	86
4.2.4 Berechnung der mittleren Auslastung	88
4.2.5 Berechnung der mittleren Verzögerungszeit	88
4.3 Analyse des Zugriffs durch Reservierung	90
4.3.1 Zugriff durch Reservierung bei endlicher Kapazität des Reservierungskanals	90
4.3.2 Zugriff durch Reservierung bei unendlicher Kapazität des Reservierungskanals	92
4.4 Analyse des CRRMA/UCA-Zugriffsverfahrens	93
4.5 Analyse des CRRMA/CCA1-Zugriffsverfahrens	96
4.6 Analyse des CRRMA/CCA2-Zugriffsverfahrens	99
4.7 Analyse des getakteten ALOHA-Zugriffsverfahrens	100
4.8 Validierung und Diskussion der Analysen	102
4.9 Leistungsvergleich der Zugriffsverfahren	118
5 Simulative Untersuchung der Zugriffsverfahren in einer LEO/ICO-Umgebung	122
5.1 Motivation	122
5.2 Modelldefinition	122
5.2.1 Geometrie des Systems	122
5.2.1.1 Umlaufbahn eines Satelliten	122

5.2.1.2 Die geographische Verteilung der Satellitenkommunikationsteilnehmer	127
5.2.2 Signalisierszenarien	130
5.2.3 Transientes Quellverhalten	132
5.3 Definition der Leistungskenngrößen.....	135
5.4 Simulation	136
5.4.1 Simulation der Bewegungsabläufe des Satellitensystems	136
5.4.2 Instationäre Simulation der Zugriffsverfahren	137
5.5 Leistungsuntersuchungen	141
5.5.1 Simuliertes System	141
5.5.2 Simulationsergebnisse	142
5.5.3 Vergleich und Bewertung der Zugriffsverfahren	152
6 Zusammenfassung und Ausblick	156
6.1 Zusammenfassung.....	156
6.2 Ausblick	158
Anhang	160
A1 Analyse der $D^{[x]}/D/1$ -Warteschlange	160
A2 Die hypergeometrische Verteilungsfunktion	161
A3 Tabellarische Klassifikation der Zugriffsprotokolle	163
Literatur	167

Abkürzungen

ACTS	Advanced Communications Technology Satellite
AMAP	Adaptive Mobile Access Protocol
ARRA	Announced Retransmission Random Access
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BOD	Bandwidth on Demand
CCIR	Comité Consultatif International des Radiocommunications, jetzt ITU
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique, jetzt ITU
CCw/oFB	Collision Channel without Feedback
CDMA	Code Division Multiple Access
CLC	Closed Loop Control
CL-LLC	Connectionless Logical Link Control
CMAP	Controlled Multiaccess Protocol
CO-LLC	Connection Oriented Logical Link Control
CPODA	Contention Priority Oriented Demand Assignment
CRRMA	Combined Random/Reservation Multiple Access
CRRMA/CCA	Combined Random/Reservation Multiple Access / Controlled Channel Access
CRRMA/UCA	Combined Random/Reservation Multiple Access / Uncontrolled Channel Access
CS	Circuit Switching
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CT2	Cordless Telephone 2
CT3	Cordless Telephone 3
DA	Demand Assignment
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DCS	Digital Cellular System
DECT	Digital European Cordless Telecommunications
DF-SRMA	Dynamic Frame SRMA
DRC	Distributed Reservation Control
DSI	Digital Speech Interpolation
DSSki	Dynamic Switching Strategy, k, i
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCS	Frame Check Sequence
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FF-SRMA	Fixed Frame SRMA
FH	Frequency Hopping
FH/SS	Frequency Hopped Spread Spectrum

FIFO	First In First Out
FODA	FIFO Ordered Demand Assignment
GEO	Geostationary Earth Orbit
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication, früher Groupe Spécial Mobile
GW	Gateway
HCB-TDMA	Hybrid Contention Based TDMA
HF	Hochfrequenz
HLR	Home Location Register
I-AMAP	Integrated-AMAP
ICO	Intermediate Circular Orbit
ICP	Input Control Procedure
IMT 2000	International Mobile Telecommunications 2000
IRCP	Input and Retransmission Control Procedure
ISA	Independent Stations Algorithm
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISL	Inter Satellite Link
ITU	International Telecommunication Union, früher CCITT bzw. CCIR
k.A.	keine Angaben
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LEO	Low Earth Orbit
MS	Mobilstation
MSAP	Minislotted Alternating Priorities
OBP	On Board Processing
PS	Packet Switching
PSTN	Public Switched Telephone Network
R-ALOHA	Reservation-ALOHA
RCP	Retransmission Control Procedure
RDSS	Radio Determination Satellite System
RTD	Round Trip Delay
S-ALOHA	Slotted-ALOHA
SDMA	Space Division Multiple Access
SIM	Subscriber Identity Module
SREJ-ALOHA	Selective Reject ALOHA
SRMA	Scheduled Retransmission Multiaccess
SRUC	Split Reservation upon Collision
SS/TDMA	Satellite Switched Time Division Multiple Access
TASI	Time Assignment Speech Interpolation
TCP	Transport Control Protocol

TCR	Tree Collision Resolution
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TH	Time Hopping
TPODA	Time Division Priority Oriented Demand Assignment
TSMA/PCD	Tone Sense Multiaccess Protocol with Partial Collision Detection
TTC	Telecontrol, Tracking and Command Station
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UPT	Universal Personal Telecommunications
VLR	Visiting Location Register
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WARC	World Administrative Radio Conference
WIMA	Wireless Integrated Multiple Access

Formelzeichen

a	Realisation für die Zufallsvariable A
A	Zufallsvariable für die Anzahl der in einem Zeitschlitz neu generierten Pakete
A	Fläche
α	Öffnungswinkel des Signalisierstrahls eines Satelliten
b	Anteil der mobilen Endgeräte, die auch nachts nicht ausgebucht werden
\mathbf{b}	Kanal ist reserviert (Realisation für die Zufallsvariable C)
$\bar{\mathbf{b}}$	Kanal ist nicht reserviert (Realisation für die Zufallsvariable C)
b_A	Verhältnis der Zeitschlitzraten von ALOHA und kombinierten Zugriffsverfahren bei vergleichbarer Leistungsfähigkeit
B	Breitengrad
$B(x, y, N)$	Wahrscheinlichkeit, daß bei einer zufälligen und unabhängigen Verteilung von y Gegenständen auf N Zellen genau x Zellen genau einen Gegenstand enthalten (Hypergeometrische Verteilungsfunktion)
β	statistische Aussagesicherheit (Konfidenzniveau)
c	Lichtgeschwindigkeit
c_a	Güte des Abmeldevorganges
c_e	Güte des Anmeldevorganges
C	Zufallsvariable für den Kanalzustand ($C=\mathbf{b}$: reserviert, $C=\bar{\mathbf{b}}$: nicht reserviert)
d_a	Hilfsvariable zur Einstellung der Dauer des Abmeldevorganges
d_e	Hilfsvariable zur Einstellung der Dauer des Anmeldevorganges
δ	Sichtwinkel: Winkel zwischen Horizont und Satellit aus Sicht eines Teilnehmers

δ_{\min}	minimal notwendiger Sichtwinkel
e	Basis des natürlichen Logarithmus
$E[X]$	Erwartungswert der Zufallsvariablen X
F_A	Massenanziehungskraft
F_Z	Zentrifugalkraft
ϕ_n	Abstand zwischen einer Stadt und einem Rasterelement n
$g(\phi_n)$	Einfluß einer Stadt auf ein Rasterelement, das ϕ_n (im Bogenmaß) von der Stadt entfernt ist
G	Gravitationskonstante
G	Gesamtangebot bestehend aus neu generierten und wiederholten Paketen
G_S	Größenfaktor einer Stadt
γ	Abstand zwischen Teilnehmer und Fußpunkt eines Satelliten (im Bogenmaß)
h	Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche
h_{GEO}	Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche bei geostationärem Satellit
$\eta(x, y, N)$	Anzahl von Fällen, bei denen bei einer zufälligen und unabhängigen Verteilung von y Gegenständen auf N Zellen genau x Zellen genau einen Gegenstand enthalten
I_w	Wiederholintervall bei ALOHA
j	Realisation für die Zufallsvariable J
J	Zufallsvariable für die <i>aktuelle</i> Anzahl der an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen (siehe auch K)
φ	Inklinationswinkel einer Umlaufbahn (Winkel zwischen Umlaufbahn- und Äquatorebene)
k	Realisation für die Zufallsvariable K
K	Zufallsvariable für die Anzahl der <i>nach einem RTD</i> an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen (siehe auch J)
K_{sys}	Zufallsvariable für die Anzahl aller kollidierten Anforderungen im Gesamtsystem
l_M	Länge eines Minizeitschlitzes
l_P	Länge einer Signalisierungsmeldung bzw. eines Paketes
L	Längengrad
ΔL	Winkel zwischen der Schnittgerade von Umlaufbahn- und Äquatorebene mit der x-Achse
$\lambda_a(t_l)$	Abmelderate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t_l
$\lambda_c(t_l)$	Rufankunftsrate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t_l
λ_{ce}	Rufankunftsrate eines in Bereitschaft stehenden Endgerätes
$\lambda_e(t_l)$	Anmelderate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t_l
$\lambda_o(t_l)$	Ortswechselrate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t_l

λ_{oe}	Ortswechselrate eines in Bereitschaft stehendes Endgerätes
$\lambda_u(t_l)$	Signalisierungsmeldungsrate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Zeit t_l
m_e	Masse der Erde
m_s	Masse des Satelliten
M	Anzahl der Stationen im Gesamtsystem
μ	Mittelwert
$\mu_{A,i}(t)$	zeitabhängiger Mittelwert der Anzahl der in einem Zeitschlitz neu generierten Signalisierungsmeldungen aus der Sicht des Satelliten i
$\mu_{A,tl}(t)$	zeitabhängiger Mittelwert der Anzahl der in einem Zeitschlitz neu generierten Signalisierungsmeldungen aus der Sicht eines Teilnehmers
N	Anzahl der Reservierungszeitschlitz (Minzeitschlitz) pro Nutzzeitschlitz
N'	Anzahl der Reservierungszeitschlitz (Minzeitschlitz) pro Nutzzeitschlitz während einer Kollisionsauflösung (nur bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2)
v	Wiederholwahrscheinlichkeit kollidierter Pakete bei ALOHA
$P\{A\}$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses A
$P\{A B\}$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses A unter der Bedingung, daß Ereignis B schon aufgetreten ist
$p_{jk}(t_1, t_2)$	Wahrscheinlichkeit, daß das System zum Zeitpunkt t_2 im Zustand k ist, falls es zum Zeitpunkt t_1 im Zustand j war
P_{jk}	Zustandsübergangswahrscheinlichkeit für das Verlassen des Zustands j in den Zustand k in einem zeitdiskreten System
$[P_{jk}]$	Matrix aller stationären Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten P_{jk}
$[P_{jk}(t)]$	Matrix aller Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten P_{jk} zum Zeitpunkt t
P_B	Bereitschaftswahrscheinlichkeit eines mobilen Endgerätes
$\vec{\pi}(t)$	Zustandsverteilung des Systems zum Zeitpunkt t
π_j	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Zustands j
Q	Zufallsvariable für die aktuelle Warteschlangenlänge
$Q(z)$	Erzeugende Funktion der Anzahl wartender Reservierungsanforderungen in der globalen Warteschlange
r	Radius der Umlaufbahn
r	Realisation für die Zufallsvariable R
r_{jk}	Zustandsübergangsrate für das Verlassen des Zustands j in den Zustand k
r_E	Erdradius
R	Zufallsvariable für die Anzahl der in einem Zeitschlitz erzeugten erfolgreichen Reservierungsanforderungen
$R(z)$	Erzeugende Funktion der Anzahl der pro Zeitschlitz eintreffenden Reservierungsanforderungen
R_{BK}	Bitrate des Signalisierkanals
R_Z	Zeitschlitzrate

s	Schätzwert der Standardabweichung
s^2	Schätzwert der Varianz
$s_a(t_l)$	Wahrscheinlichkeit, daß ein mobiles Endgerät zur lokalen Zeit t_l schon abgemeldet ist
$s_e(t_l)$	Wahrscheinlichkeit, daß ein mobiles Endgerät zur lokalen Zeit t_l schon angemeldet ist
Δs	Standort des Satelliten innerhalb der Umlaufbahn zur Systemzeit 0 Uhr (im Bogenmaß)
S	Auslastung (entspricht im verlustfreien System dem Angebot)
σ	Sendewahrscheinlichkeit
σ^2	Varianz
t	Zeit
t_d	Übermittlungsverzögerungszeit
t_l	lokale Zeit
t_{Prop}	Ausbreitungsverzögerung gemessen in Zeitschlitzen
t_{RTD}	Umlaufverzögerung gemessen in Zeitschlitzen
t_S	Dauer einer Schutzzeit
t_1	Zeit vom ersten bis zum erfolgreichen Sendeversuch der Reservierungsanforderung oder des Pakets
t_2	Zeit zwischen dem ersten erfolgreichen Sendeversuch und dem Aussenden des Pakets
t_3	Zeit vom Aussenden des Pakets bis zum Eintreffen im Empfänger
T_a	lokale Tageszeit, bei der der Abschaltvorgang zur Hälfte abgeschlossen ist
T_e	lokale Tageszeit, bei der der Einschaltvorgang zur Hälfte abgeschlossen ist
ΔT_a	Zeitdauer des Abmeldevorganges
ΔT_e	Zeitdauer des Anmeldevorganges
U	Entfernung, bei welcher der Einfluß $g(\phi_n)$ einer Stadt auf $1/e$ abgefallen ist (im Bogenmaß)
w_q	Wartezeit einer Reservierungsanforderung in der globalen Warteschlange
w	eine erfolgreiche wahlfreie Übertragung findet statt (Realisation für die Zufallsvariable W)
\bar{w}	eine erfolgreiche wahlfreie Übertragung findet nicht statt (Realisation für die Zufallsvariable W)
W	Zufallsvariable für das Ereignis einer erfolgreichen wahlfreien Übertragung
ω	Winkelgeschwindigkeit eines Satelliten innerhalb seiner Umlaufbahn
\bar{X}	Schätzwert des Mittelwertes $E[X]$
z	Zeitzone
z_i	Realisation für die Zufallsvariable $Z(t_i)$
$Z(t_i)$	Zufallsvariable für den Systemzustand zur Zeit t_i
Z_i	zeitdiskrete Zufallsvariable für den Systemzustand zum Zeitpunkt i

1 Einleitung

1.1 Dienstintegration und Mobilkommunikation

Die Entwicklung der Telekommunikation ist in den letzten Jahren geprägt vom Wunsch der Benutzer nach unterschiedlichen höherwertigen Diensten und nach Mobilität. Ersterem wurde durch die Entwicklung des dienstintegrierenden Digitalnetzes ISDN (*engl. Integrated Services Digital Network*) und des auf ATM (*engl. Asynchronous Transfer Mode*) basierenden Breitband-ISDN entsprochen. Bei der Benutzermobilität muß unterschieden werden zwischen dem Wunsch, weltweit in verschiedenen Netzen unter einer einzigen, globalen, netzunabhängigen und personenbezogenen Adresse erreichbar zu sein und dem Wunsch nach drahtloser Kommunikation. Die globale Adresse wird von UPT (*engl. Universal Personal Telecommunications*) unterstützt. UPT ist eine Definition der ITU (*engl. International Telecommunication Union*). Der UPT-Benutzer ist in der Lage, sein gewohntes transportables Endgerät mitzunehmen und an einen beliebigen Netzzugang eines beliebigen UPT-Netzes anzuschließen. Andererseits kann er ein fremdes UPT-Endgerät durch Verwendung einer SIM-Karte (*engl. Subscriber Identity Module*) mit seiner persönlichen Adresse und seinem gewünschten Dienste- und Leistungsspektrum personalisieren. Die Telekommunikation ändert sich also von einer netzanschlußbezogenen zu einer personenbezogenen Leistungserbringung.

In diese Entwicklung ist der weltweite Ausbau der Mobilkommunikation über tragbare Geräte bzw. Handgeräte integriert. Die Mobilkommunikation erlaubt eine drahtlose Anbindung von Endgeräten an Festnetze. Hierbei kann man vier verschiedene Grade der Mobilität unterscheiden. Bei den drahtlosen Telefonen nach CT2-, CT3- oder DECT-Standards sind einer Basisstation genau ein bzw. einige wenige drahtlose Telefone fest zugeordnet. Die Reichweite eines solchen Systems beträgt einige hundert Meter, so daß es sich zur Versorgung von Wohnungen oder Betrieben eignet. Eine regionale Versorgung mit einer Reichweite von einigen Kilometern bietet der Bündelfunk. Eine länderübergreifende Mobilkommunikation wird durch den zellularen Mobilfunk z.B. nach den Standards GSM 900 oder DCS 1800 ermöglicht. Die Reichweite dieser Systeme wird dadurch erhöht, daß das zu versorgende Gebiet in Funkzellen eingeteilt wird, die von jeweils einer Basisstation bedient werden. Die Erreichbarkeit eines Benutzers ist also abhängig davon, ob er sich innerhalb der Reichweite einer Basisstation des jeweiligen Systems befindet. Im Gegensatz zu drahtlosen Telefonen und Bündelfunk unterstützt der zellulare Mobilfunk einen Wechsel des mobilen Endgerätes zwischen zwei Nachbarbasisstationen auch während einer Verbindung.

1.2 Mobilkommunikation über Satellitensysteme

Durch zellulare Mobilfunksysteme lassen sich dünn besiedelte Gebiete bzw. Meere (Schiffahrtslinien) mit entsprechend niedrigem Verkehrsaufkommen nicht wirtschaftlich versorgen.

Diese Lücke kann durch Satellitensysteme mit einer teilweisen bzw. globalen Überdeckung der Erdoberfläche geschlossen werden. Globale Satellitensysteme haben weiterhin den Vorteil, eine weltweite Mobilität des Benutzers zu unterstützen, da Satellitendienste überall auf der Erdoberfläche mit einem einzigen mobilen Endgerät erreichbar sind. Zukünftig werden alle Mobilfunksysteme in einem universellen Mobilfunkkonzept vereinigt. Ein solches Konzept wird von der ITU unter dem Namen IMT 2000 (*engl. International Mobile Telecommunications*) und von ETSI unter dem Namen UMTS (*engl. Universal Mobile Telecommunication System*) als Teil des UPT-Konzeptes entwickelt.

Die ersten kommerziellen Satellitensysteme wurden ausschließlich zur Verbindung weit entfernter Telefonnetze eingesetzt (INTELSAT 1, 1965). Die Entwicklung von Satellitensystemen für die Mobilkommunikation begann mit GEO-Satelliten (*GEO = Geostationary Earth Orbit*) wie z.B. INMARSAT II (ab 1982), die jeweils ein großes Gebiet mit einem einzigen Richtstrahl versorgten. Dadurch sind sehr leistungsfähige, d.h. große mobile Endgeräte mit großen Antennen, notwendig. Das Haupteinsatzgebiet dieser Systeme der ersten Generation ist die maritime Kommunikation. Durch Verbesserung der Antennentechnik war es in einem weiteren Schritt möglich, mehrere Richtstrahlen in einem Satelliten zu integrieren. Dadurch kann das zur Verfügung stehende Frequenzband besser ausgenutzt werden. Durch die bessere Bündelung der Sendeleistung konnten die mobilen Endgeräte und deren Antennen verkleinert werden. Diese zweite Generation von Mobilfunksatellitensystemen wird zur Zeit installiert (z.B. INMARSAT III, 1996). Eine weitere Verkleinerung der mobilen Endgeräte kann durch eine größere Anzahl der Richtstrahlen eines Satelliten, durch niedrigere Umlaufbahnen (*engl. Orbit*) und durch Einführen der Multiplexart CDMA (*engl. Code Division Multiple Access*) erreicht werden. Systeme der dritten Generation wie z.B. INMARSAT P21, Iridium oder Odyssey werden voraussichtlich um die Jahrtausendwende installiert. Reichten bei den GEO-Systemen noch drei Satelliten aus, um die gesamte Erdoberfläche zu versorgen, muß die Anzahl der Satelliten bei niedrigeren Umlaufbahnen wie LEO (*engl. Low Earth Orbit*) oder ICO (*engl. Intermediate Circular Orbit*) stark erhöht werden. Nachteilig ist auch die Relativbewegung zwischen Erdoberfläche und Satelliten. Dadurch muß das System in der Lage sein, bestehende Verbindungen zwischen benachbarten Satelliten umzuschalten. Diese Nachteile werden aber durch die Vorteile der kleinen, billigen mobilen Endgeräte bei weitem aufgewogen, so daß die Mobilkommunikation über Satelliten alle Voraussetzungen erfüllt, sich zu einem Massenmarkt zu entwickeln.

1.3 Übersicht über die Arbeit

Die Zielrichtung dieser Arbeit ist die Untersuchung des Erstzugriffs eines mobilen Endgerätes auf ein LEO- bzw. ICO-Satellitensystem. Beim Erstzugriff ist noch keine Verbindung zwischen mobilem Endgerät und Satellitensystem aufgebaut. Erstzugriffe treten z.B. beim Ein- bzw. Ausbuchen eines mobilen Endgerätes, beim Wechsel der Aufenthaltszone oder beim

Signalisieren eines Verbindungswunsches auf und werden über Signalisierkanäle abgewickelt. Durch den unabhängigen Zugriff der signalisierenden mobilen Endgeräte kann es zu Kollisionen kommen, die durch ein spezielles Zugriffsverfahren aufgelöst werden müssen. Abhängig von der Benutzerverteilung auf der Erdoberfläche, dem tageszeitabhängigen Benutzerverhalten, der von einem Satelliten jeweils überdeckten Fläche, der Anzahl der Satelliten und deren Bewegung relativ zur Erdoberfläche, muß ein Satellit eine stark schwankende Rate von Erstzugriffen verarbeiten können.

Kapitel 2 behandelt zunächst die Grundlagen der Vermittlungstechnik. Danach werden zum besseren Verständnis der von einem Satellitensystem geforderten Leistungsfähigkeit einige typische Satellitenkommunikationsdienste vorgestellt. Die typische Systemarchitektur eines Satellitensystems wird erläutert. Danach wird besonders auf diejenigen Eigenschaften von Satellitenkommunikationssystemen eingegangen, die sich von terrestrischen Systemen unterscheiden. Dazu zählen Umlaufbahnen, Übertragungsstrecken, verwendete Multiplexverfahren und Zugriffsverfahren.

Kapitel 3 stellt die zur Untersuchung des Erstzugriffs verwendeten analytischen und simulativen Verfahren vor.

In Kapitel 4 wird eine Analyseverfahren für eine Klasse getakteter Zugriffsverfahren vorgestellt. Die analysierten Verfahren kombinieren die Vorteile zweier grundlegender Zugriffsverfahren: dem auf Reservierung beruhenden Zugriff und dem wahlfreien Zugriff. Die Richtigkeit der Analyseverfahren wird durch Vergleich von Analyse- und Simulationsergebnissen nachgeprüft. Die Leistungsfähigkeit der analysierten kombinierten Zugriffsverfahren wird der Leistungsfähigkeit der beiden grundlegenden Verfahren gegenübergestellt.

Die Zugriffsverfahren können für den Erstzugriff eines mobilen Endgerätes auf den Signalisierkanal eines Satelliten verwendet werden. In Kapitel 5 werden die zuvor analysierten Zugriffsverfahren in einer sehr instationären LEO- bzw. ICO-Umgebung simuliert. Dabei wird die Verteilung der Benutzer auf der Erdoberfläche und deren tageszeitabhängiges Verhalten beim Ein- und Ausbuchen, bei der Rufgenerierung und beim Wechsel der Aufenthaltszonen ebenso berücksichtigt wie die relative Bewegung zwischen Satelliten und Erdoberfläche. Als Ergebnis werden Verteilungsfunktionen der Übermittlungsverzögerung von Signalisiermeldungen vorgestellt.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit kurz zusammengefaßt und durch einen Ausblick auf zukünftige Themen innerhalb der Satellitenmobilkommunikation ergänzt.

2 Satellitensysteme

2.1 Grundlagen der Vermittlungstechnik

2.1.1 Vermittlungskonzepte

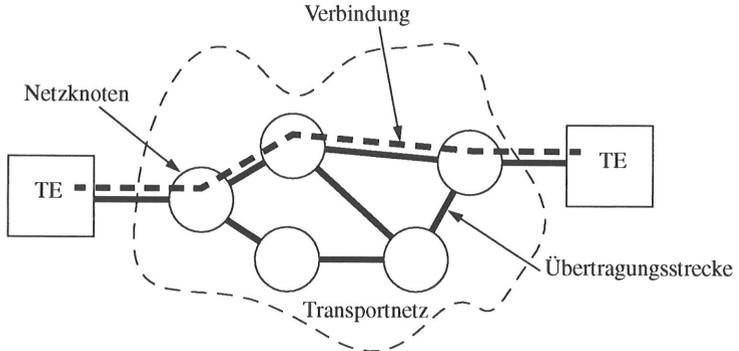


Bild 2-1: Begriffsdefinitionen: Teilnehmerendeinrichtung (TE), Transportnetz, Netzknotten, Übertragungsstrecke, Verbindung

In Bild 2-1 ist das prinzipielle Schema eines vermittelnden Nachrichtennetzes dargestellt. Zur Übermittlung von Nutzinformationen zwischen zwei Teilnehmerendeinrichtungen (*engl. Terminal Equipment, TE*) kann sowohl die Durchschalte- als auch die Speichervermittlung eingesetzt werden. Bei der Durchschaltvermittlung (*engl. Circuit Switching, CS*) wird zwischen den beiden beteiligten TE eine durchgehende Leitung (Leitungsvermittlung) bzw. ein durchgehender Kanal (Kanalvermittlung) durchgeschaltet. Ein Netz für Durchschaltvermittlung zeichnet sich dadurch aus, daß es den angeschlossenen Teilnehmern Verbindungen mit einer festen Übertragungskapazität zur Verfügung stellen kann. Dem Informationsaustausch geht eine Verbindungsaufbauphase voraus, in der der rufende Teilnehmer über seine TE dem vermittelnden Netz seinen Verbindungswunsch und die Adresse der gerufenen TE signalisiert. Das Netz baut über verschiedene Netzknotten eine Verbindung auf und erhält sie während der gesamten Verbindungsdauer aufrecht. Während der Dauer der Verbindung steht unabhängig vom aktuell übertragenen Datenvolumen immer die volle Übertragungskapazität zur Verfügung. Wird die Verbindung nicht mehr benötigt, dann signalisiert einer der beiden beteiligten Teilnehmer dem Netz den Verbindungsabbauwunsch. Nach der Verbindungsabbauphase stehen alle während der Verbindung belegten Netzressourcen wieder zur Verfügung. Durchschaltvermittlung eignet sich besonders für die Übertragung von Nutzinformationen mit konstanter Datenrate während mittlerer bis längerer Zeitdauern, wie z.B. für Sprachverbindungen. Weniger gut geeignet ist die Durchschaltvermittlung zur Übermittlung von kurzen Nachrichten

(Datenpaketen) bei Übertragungsstrecken mit langer Signallaufzeit und bei, relativ zur reinen Übermittlungsphase, langen Verbindungsauf- und -abbauzeiten. Diese Situation ist besonders häufig bei der Datenübertragung in Satellitensystemen gegeben.

Bei der Speichervermittlung muß das Transportnetz keine Verbindung zwischen den beteiligten TE durchschalten. Die Nachrichten bzw. die Datenpakete werden vielmehr von Netzknoten zu Netzknoten sukzessive weitergereicht. Da keine durchgeschaltete Verbindung existiert, die implizit die Wegelenkungsinformation enthält, muß jedes Datenpaket in seinem Steuerteil, dem sogenannten Paketkopf, die Adressierungsinformation der adressierten Ziel-TE mitführen. Jeder Vermittlungsknoten muß in der Lage sein, aus der Adressierungsinformation die weiterführende Teilstrecke zu ermitteln. Um Zugriffskonflikte auf den abgehenden Teilstrecken zu vermeiden und um die Adressierungsinformation auszuwerten, müssen eintreffende Datenpakete zunächst vollständig zwischengespeichert werden, was besonders bei sehr langen Nachrichten Probleme in den Netzknoten verursachen kann. Die Übertragung der Datenpakete zwischen den Netzknoten ist im allgemeinen gesichert. Derjenige Netzknoten, der einen Übertragungsfehler entdeckt, muß ihn beheben. Dies kann durch eine Fehlerkorrektur oder durch eine Wiederholung der Übertragung des fehlerhaft empfangenen Paketes geschehen. Dazu sind (neben den zwischen den Netzknoten ablaufenden Protokollen zur Paketwiederholung) in jedem Datenpaket Kontrollinformationen notwendig, die ein Aufspüren bzw. Korrigieren von Übertragungsfehlern erlauben.

Bei der Speichervermittlung unterscheidet man zwischen der Sendungsvermittlung (*engl. Message Switching*) und der Paketvermittlung (*engl. Paket Switching, PS*). Bei der Sendungsvermittlung wird die ursprüngliche Information lediglich mit der Adressierungsinformation versehen und als ganzes vermittelt. Problematisch ist bei dieser Vermittlungsart, neben den möglichen Speicherproblemen in den Netzknoten, die Fehleranfälligkeit der langen Nachrichtenblöcke. In langen Nachrichtenblöcken ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Übertragungsfehlern höher. Weiterhin muß bei einer Wiederholungsanforderung immer der gesamte Nachrichtenblock nochmals übertragen werden. Diese Probleme können durch die Paketvermittlung verringert werden. Dazu wird die ursprüngliche Information in mehrere kleinere Nachrichtenblöcke mit begrenzter Länge unterteilt. Jeder Nachrichtenblock wird mit Adressierungs- und Kontrollinformation versehen und getrennt übermittelt. Die Einheit aus Nachrichtenblock, Adressierungs- und Kontrollinformation wird als Datenpaket bezeichnet. Bei aufgetretenen Fehlern muß nur das jeweils fehlerhafte Datenpaket wiederholt werden. Da in den einzelnen Netzknoten nicht immer die gesamte Nachricht zwischengespeichert werden muß, ist die gesamte Übermittlungszeit trotz des notwendigen Mehraufwandes für jedes Datenpaket im allgemeinen kürzer als bei der Speichervermittlung. Start- und Zielknoten müssen die Unterteilung und den Zusammenbau der ursprünglichen Nachricht durchführen. Je nach gewähltem Verbindungskonzept (siehe Abschnitt 2.1.2) muß der Zielknoten auch eine Reihenfolgesicherung durchführen.

Durch die Markierung von Paketanfang und -ende mit sogenannten Begrenzern sind die Netzknoten in der Lage, den empfangenen Datenstrom in einzelne Pakete aufzutrennen. Bei Paketen konstanter Länge (Zellen) können diese Begrenzer auch entfallen. Gleichzeitig ermöglicht man dadurch in den Netzknoten eine einfachere Speicherorganisation. Die ATM-Technik basiert auf der Vermittlung von Zellen.

2.1.2 Verbindungskonzepte

Ein paketvermittelter Informationsaustausch kann entweder verbindungsorientiert oder verbindungslos erfolgen. Ein durchschaltvermittelter Informationsaustausch erfolgt grundsätzlich verbindungsorientiert.

Kennzeichen für einen verbindungsorientierten Datenaustausch ist die notwendige Verbindungsauf- und -abbauphase. Bei verbindungsorientierter Paketvermittlung werden die Datenpakete immer auf demselben Weg, d.h. über dieselben Teilstrecken aber nicht unbedingt über dieselben Kanäle zwischen den beteiligten TE vermittelt. Man spricht von einer virtuellen Verbindung. Während der Verbindungsaufbauphase wird der Weg durch das Transportnetz bestimmt. Die Wegelenkungsinformation liegt während der gesamten Verbindungsdauer verteilt in den einzelnen Netzknoten in Form einer Verkettung von logischen oder virtuellen Kanälen vor. Während der Verbindungsabbauphase wird die Wegelenkungsinformation in den einzelnen Netzknoten wieder gelöscht. Zur Übertragung der Datenpakete zwischen zwei Netzknoten wird die Übertragungskapazität auf einem freien Kanal dynamisch zugeteilt.

Die Datenpakete benötigen bei verbindungsorientierter Paketvermittlung nicht notwendigerweise die vollständige Zieladresse. Es genügt eine logische Kennung, d.h. eine logische Kanalnummer, die einer Verbindung während der Verbindungsaufbauphase zugeteilt wird. Dadurch ist es nicht notwendig, im Paketkopf Platz für die gesamte Zieladresse zur Verfügung zu stellen. Der im Paketkopf notwendige Adressierungsbereich kann noch weiter verkleinert werden, falls die Netzknoten in der Lage sind, die logischen Kanalnummern für empfangene Pakete vor dem Weitersenden umzusetzen. Die ATM-Vermittlung basiert auf diesem Prinzip. Die Vorteile der Paketvermittlung, wie z.B. eine wirtschaftliche Ausnutzung der Übertragungskapazität der Teilstrecken, gehen durch den Aufbau einer virtuellen Verbindung nicht verloren.

Bei der verbindungslosen Kommunikation wird keine Verbindung zwischen den beteiligten TE aufgebaut. Dadurch entfällt der Aufwand für Verbindungsauf- und -abbau. Die Datenpakete müssen die vollständige Zieladresse enthalten. Jeder Netzknoten muß in der Lage sein, aus der Zieladresse eine weiterführende Übertragungsstrecke zu bestimmen. Durch einen hierarchischen Aufbau der Adressierung genügt dabei evtl. die Auswertung eines Teils der Zieladresse. Die Netzknoten müssen verschiedene Pakete, die für dieselbe Zieladresse bestimmt sind, nicht immer auf dieselbe abgehende Teilstrecke vermitteln. Dadurch kann es beim Zielknoten zu einer Vertauschung der Reihenfolge von Paketen kommen, die zu derselben ursprünglichen

Nachricht gehören. Der Zielknoten oder die Zielstation muß in diesem Fall die richtige Paketreihenfolge sicherstellen.

Wichtig ist, daß auch bei der verbindungsorientierten Kommunikation und sogar bei der Durchschaltvermittlung für Verbindungsauf- und -abbau grundsätzlich eine verbindungslose Kommunikation für die Übertragung der notwendigen Steuerinformation notwendig ist.

2.1.3 Verbindungskonfigurationen

Bei verbindungsorientierter Kommunikation unterscheidet man zwischen Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Mehrpunkt- und Mehrpunkt-Verbindungen. Bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wird zwischen genau zwei TE eine Verbindung aufgebaut. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Sprachkommunikation zwischen zwei Teilnehmern. Bei Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen wird von einer TE zu mehreren anderen TE jeweils eine Verbindung aufgebaut. Diese Konfiguration wird eingesetzt, falls eine Nachricht gleichzeitig zu mehreren TE vermittelt werden soll. Dadurch ist es bei der sendenden TE nicht notwendig, die Nachricht mehrfach zu senden. Vielmehr wird sie im Vermittlungsknoten, an den die sendende TE angeschlossen ist, kopiert und auf alle abgehenden Verbindungen verteilt. An Mehrpunkt-Verbindungen sind mehr als zwei TE beteiligt. Es werden von jeder beteiligten TE zu allen anderen beteiligten TE unmittelbar oder mittelbar über Brückenknoten Verbindungen aufgebaut. Ein Beispiel hierfür sind Konferenzschaltungen in durchschaltvermittelnden Netzen.

2.2 Dienste in Satellitensystemen

Satelliten sind in der Lage, Nutzinformation über ein großes, in den Umrissen genau definiertes Gebiet zu verteilen. Abhängig von der Höhe ihrer Umlaufbahn über der Erdoberfläche und von der Richtcharakteristik der Satellitenantennen ist das versorgte Gebiet unterschiedlich groß. Bewegt sich der Satellit auf einer geostationären Bahn, dann sind die Grenzen des versorgten Gebietes konstant. Durch Verwendung mehrerer Satelliten kann das insgesamt versorgte Gebiet vergrößert werden. Bei geostationären Satelliten werden für eine Überdeckung der gesamten Erdoberfläche (außer der Polgebiete) mindestens drei Satelliten benötigt.

Vom Satellitensystem angebotene Dienste können innerhalb des Versorgungsgebietes uneingeschränkt in Anspruch genommen werden. Benutzer von Satellitensystemen sind daher nicht an eine terrestrische Infrastruktur gebunden. Folgende Dienste eignen sich besonders gut für die Abwicklung über Satellitensysteme:

- Verteildienste
- Ausrufen (*engl. Paging*)
- Flottenmanagement

- Positionsbestimmung
- Datenübertragung zwischen LANs
- Verbindung von Weitverkehrsnetzen
- Mobilkommunikation
- Mobile Datenkommunikation
- VSAT-Dienste

2.2.1 Verteildienste

Verteildienste, wie z.B. die Ausstrahlung von Radio- und Fernsehprogrammen, nutzen die Eigenschaft des Satelliten, ein eintreffendes Signal bzw. eintreffende Nachrichten über eine große Fläche auszusenden. Kennzeichen eines Verteildienstes ist die netzweite, d.h. im Falle eines Satellitensystems die im gesamten Versorgungsgebiet sichergestellte Zugänglichkeit der ausgesendeten Nutzinformation. Ein Empfänger sucht sich die für ihn relevanten Informationen heraus und ignoriert bzw. verwirft den Rest. Verteildienste werden auch von verschiedenen Nachrichtenagenturen benutzt, die damit ihre Nachrichten (Fest- und Bewegtbild, Ton und Text) an die interessierten Redaktionen verteilen. Verteildienste bieten in der Regel keinen Rückkanal, so daß eine Quittierung und damit eine Wiederholung fehlerhaft empfangener Nachrichten nicht möglich ist. Die sendenden Stationen mieten entweder Übertragungskapazität in Form von Kanälen, oder sie greifen wahlfrei auf den Satelliten zu. Das übertragene Datenvolumen ist bei Verteildiensten im allgemeinen sehr groß.

2.2.2 Ausrufdienst

Der Ausrufdienst (*engl. Paging* von *engl. to page*: ausrufen) ermöglicht das Ausrufen eines Teilnehmers, der sich innerhalb des Versorgungsgebietes des Satelliten bewegt. Weiterhin können auch kurze Nachrichten zusammen mit der Paging-Meldung versendet werden. Der Benutzer des Paging-Endgerätes wird nach dem Eintreffen einer Paging-Meldung veranlaßt, sich bei einer vorher bekannten Person oder Zentrale zu melden. Durch den fehlenden Rückkanal kann er dazu nicht das Satellitensystem benutzen. Der Absender muß die Paging-Meldung entweder an einer zentralen Station an das Satellitensystem übergeben, oder er muß ein spezielles Zugriffsverfahren für den Paging-Kanal benutzen. Der Paging-Dienst ist ein Verteildienst mit einer sehr kurzen Nachrichtenlänge.

2.2.3 Positionsbestimmung

Ein inzwischen weit verbreiteter Satellitendienst ermöglicht weltweit die Positionsbestimmung eines Teilnehmers mittels eines handlichen Empfangsgerätes. Dieser Dienst wird z.B. vom

amerikanischen GPS (*engl. Global Positioning System*) angeboten. Bei diesem System sendet jeder Satellit eines aus mehreren niedrigfliegenden Satelliten bestehenden Satellitensystems ständig die aktuelle Uhrzeit aus. Durch Vergleichen der empfangenen Signale mehrerer Satelliten können Differenzen der Signallaufzeiten berechnet werden, mit denen die Position des Empfangsgerätes relativ zum Satellitensystem bestimmt werden kann. Da die Position der empfangbaren Satelliten bekannt ist, kann diese Positionsangabe in eine Position bezüglich des gewohnten erdgebundenen Koordinatensystems umgerechnet werden. Zur zweidimensionalen Positionsbestimmung müssen die Signale von drei verschiedenen Satelliten berücksichtigt werden. Soll ebenfalls die Höhe über dem Meeresspiegel bestimmt werden, muß noch das Signal eines vierten Satelliten empfangbar sein. Ein Rückkanal ist nicht vorgesehen. Es können jedoch kurze Nachrichten über das Satellitensystem an die Empfangsgeräte verteilt werden. Auch der Positionsbestimmungsdienst gehört zur Sparte der Verteildienste ohne Rückkanal.

2.2.4 Datenübertragung zwischen lokalen Netzen

Durch die Datenübertragung über einen Satelliten (siehe [129]) lassen sich z.B. lokale Netze (*engl. Local Area Network, LAN*) weit entfernter Firmenstandorte miteinander verbinden. Die beiden LANs müssen jeweils mit einer Bodenstation, der sogenannten GW-Bodenstation (*GW = engl. Gateway*), verbunden sein. Problematisch ist bei diesem Dienst das Zusammenwirken der terrestrischen Protokolle mit den Satellitenprotokollen. Bei Ende-zu-Ende-Verbindungen über Satellit müssen Protokollparameter, wie z.B. die maximal erlaubte Zeit zwischen dem Aussenden des Paketes und dem Eintreffen der dazugehörigen Bestätigung, berücksichtigt werden. Ein typisches Schicht-4-Protokoll, das von an LANs angeschlossenen Endgeräten benutzt wird, ist das *Transport Control Protocol (TCP)*. TCP basiert auf einer fenstergesteuerten Flußkontrolle, die es erlaubt, eine begrenzte Menge an Paketen unquittiert zu versenden, bevor die sendende Station auf eine Quittierung für das älteste noch nicht quittierte Paket warten muß. Abhängig von der Fenstergröße und der Umlaufverzögerung (*engl. RTD, Round Trip Delay*) zwischen dem Aussenden des Paketes und dem Empfang der Quittierung kann es zu einer schlechten Ausnutzung der maximal möglichen Übertragungskapazität kommen.

Die Verfahren für den Zugriff auf die Übertragungsstrecken des Satellitensystems beeinflussen ebenfalls die Leistungsfähigkeit dieses Dienstes. Wird die Übertragungskapazität nur bedarfsweise angefordert, dann entstehen zusätzliche Verzögerungszeiten durch die notwendige Reservierungsprozedur. Werden wahlfreie Zugriffsverfahren benutzt, kann es durch Kollisionen zu großen Varianzen in der Übermittlungszeit verschiedener Pakete kommen. Fest durchgeschaltete Satellitenkanäle lohnen sich nur, wenn der vom LAN angebotene Verkehr sehr gleichmäßig ist. Ändert sich der angebotene Verkehr nur langsam, dann kann man die angeforderte Übertragungskapazität durch ein DAMA-Zugriffverfahren langsam an den Bedarf anpassen. DAMA (*engl. Demand Assignment Multiple Access*) wurde ursprünglich für

durchschaltvermittelten Verkehr vorgesehen. Es eignet sich wegen seiner fest durchgeschalteten Kanäle und des darauf abgestimmten Zugriffsverfahrens besonders gut zur Verbindung weit entfernter GW-Bodenstationen, an die mehrere LANs angeschlossen sind, die gemeinsam ein größeres und konstanteres Angebot erzeugen (siehe [17]).

Eine weitere Möglichkeit zur Verbindung von LANs bzw. von LANs mit mobilen Endgeräten bieten LEO-Satelliten [22]. Sie eignen sich für die Speichervermittlung, indem sie kurze Meldungen beim Überfliegen des Absenders einsammeln und diese beim Überfliegen der adressierten Bodenstation wieder aussenden. LEO-Satellitensysteme mit einer zu jedem Zeitpunkt vollständigen Abdeckung der gesamten Erdoberfläche bieten bei der Vermittlung von PS-Verkehr eine sehr kurze Übermittlungszeit [40].

2.2.5 Verbindung von Weitverkehrsnetzen

Die Verbindung von kontinentalen Telefonweitverkehrsnetzen ist eine traditionelle Aufgabe von Satellitensystemen. Hierbei kommen geostationäre Satelliten mit Umlaufbahnen in 35786 km Höhe über dem Äquator zum Einsatz. Das Satellitensystem arbeitet wie eine Leitung entsprechender Übertragungskapazität. Der Satellit selbst wirkt innerhalb des Systems wie ein Aufholverstärker, der das ankommende Signal empfängt und verstärkt zur Erde zurücksendet. Der Satellit muß keinerlei Vermittlungsfunktionen enthalten, da die Kapazität fest zugewiesen ist und im allgemeinen nicht verändert wird. Diese Systeme arbeiten gleichberechtigt neben den zum gleichen Zweck vorhandenen Überseekabeln. Nachteilig für Sprechverbindungen wirkt sich die relativ hohe Laufzeit von ca. 250 ms für den Weg GW-Bodenstation Nr. 1 - Satellit - GW-Bodenstation Nr. 2 aus.

2.2.6 Satellitenmobilkommunikation

Die Satellitenmobilkommunikation erfolgt über kleine, mobile und tragbare Endgeräte, die den heutigen Mobilfunkendgeräten ähneln. Dieser Dienst bietet, im Gegensatz zum Mobilfunk über terrestrische Netze, den Vorteil weltweiter Verfügbarkeit und weltweit einheitlicher Standards. Durch die hohen Anfangsinvestitionen sind nur wenige konkurrierende Systeme in Planung. Am aussichtsreichsten sind die Systeme ‚Iridium‘ (Motorola), ‚P21‘ (Inmarsat), ‚Globalstar‘ (Loral/Qualcomm) und ‚Odyssey‘ (TRW/Teleglobe) (siehe [54]). Einige wichtige Daten dieser Systeme sind in Tabelle 2-1 zusammengefaßt.

Die Systeme bieten nicht nur einen Kommunikationsdienst innerhalb des Systems, d.h. von MS (Mobilstation) zu MS, sondern sie ermöglichen über sogenannte GW-Bodenstationen auch Zugriffe auf das terrestrische Telefonnetz (*engl. Public Switched Telephone Network, PSTN*). Das PSTN bietet wiederum Zugang zu terrestrischen Mobilfunk- und Datennetzen, so daß eine weltweite und systemübergreifende mobile Sprach- und Datenkommunikation möglich ist

	Iridium	Globalstar	Odyssey	P21
Initiator	Motorola	Loral/ Qualcomm	TRW/ Teleglobe	Inmarsat
Start	1998	1998	2000	2000
Anzahl der Satelliten	66	48	12	10
Höhe der Umlaufbahn / km	780	1400	10354	k.A.
Anzahl verschiedener Umlaufbahnen	6	8	3	k.A.
Inklinationswinkel der Umlaufbahnen	86°	52°	55°	k.A.

Tabelle 2-1: Daten einiger aussichtsreicher Systeme für Satellitenmobilkommunikation
(siehe [54, 115], k.A. = keine Angaben)

(siehe Bild 2-2). Verbindungen innerhalb des Systems, bei denen die beiden beteiligten MS von zwei verschiedenen Satelliten bedient werden müssen, können entweder über das PSTN oder, falls vorhanden, über Verbindungen zwischen den Satelliten (*engl. Inter Satellite Link, ISL*) durchgeschaltet werden. Alle Systeme arbeiten auf durchschalteter Basis mit einer fest vorgegebenen Übertragungskapazität pro durchgeschaltetem Kanal.

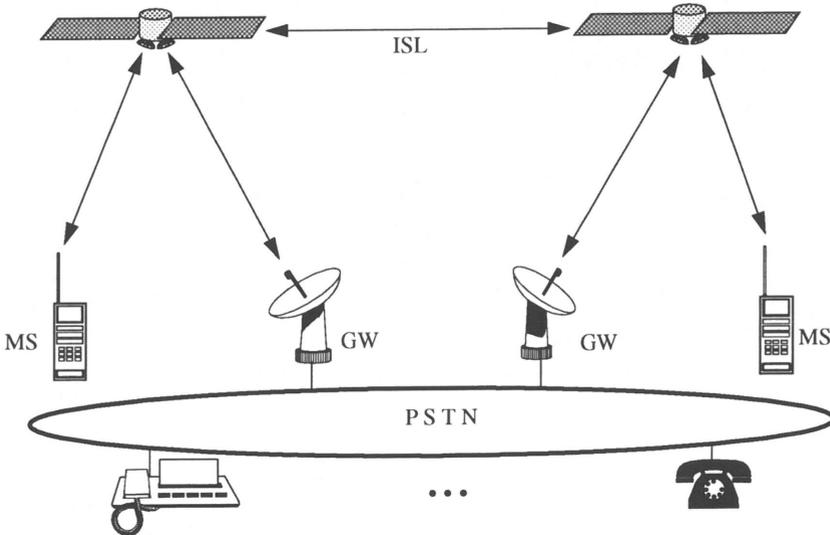


Bild 2-2: Mobilkommunikation über Satelliten

2.2.7 VSAT-Dienste

VSATs (siehe [4, 30, 130]) eignen sich besonders für Konfigurationen, in denen mehrere weit entfernte, kleinere Stationen (*engl. Very Small Aperture Terminal, VSAT*) und daran ange-

geschlossene lokale Netze mit einer leistungsfähigen zentralen Station kommunizieren. Eine Kommunikation zwischen den kleinen Stationen ist, falls sie überhaupt notwendig ist, nur über die zentrale Station möglich. Die Kommunikation erfolgt über einen geostationären Satelliten. Die Senderate eines VSATs liegt zwischen 12 und 19,2 kbit/s, während die Empfangsrate zwischen 256 und 512 kbit/s liegt. Die Empfangsrate der VSATs entspricht der Senderate der zentralen Station. VSAT-Systeme eignen sich besonders für Datenbankabfragen wie sie z.B. bei der Verbindung von Kreditkartenautomaten mit der Bankzentrale auftreten oder zur Verbindung entfernter Filialen mit der zentralen Verwaltung einer Firma (siehe [30]).

2.3 Systemarchitekturen

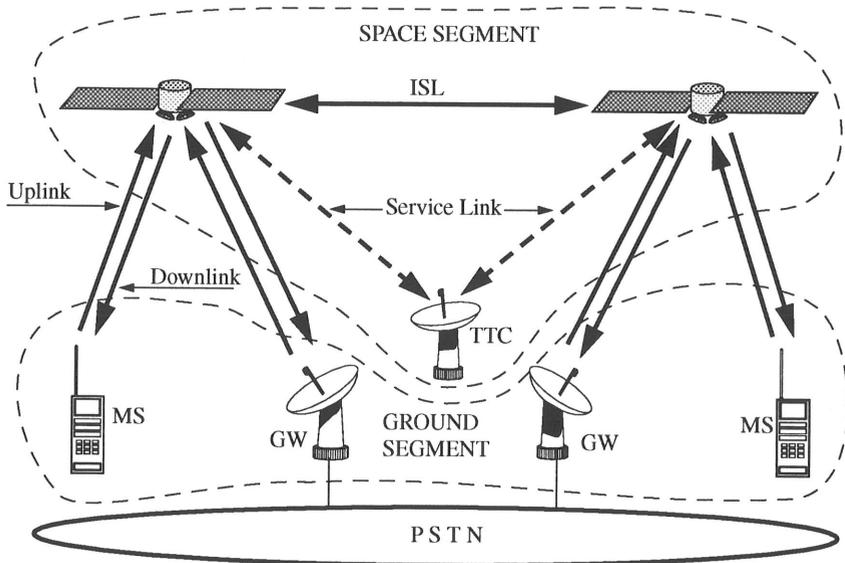


Bild 2-3: Begriffsdefinitionen: Space Segment, Ground Segment, Uplink, Downlink, TTC, Service Link

Satellitensysteme bestehen aus den terrestrischen Kommunikationseinrichtungen (*engl. Ground Segment*), d.h. mobilen bzw. ortsfesten Bodenstationen und GW-Bodenstationen, sowie den Satelliten und allen für die Überwachung und Steuerung der Satelliten notwendigen Kontrollstationen (*engl. Space Segment*, siehe Bild 2-3). Die Kontrollstationen (*engl. Telecontrol, Tracking and Command Station, TTC*) dienen zur Überwachung und Steuerung jedes Satelliten hinsichtlich der Einhaltung der Umlaufbahn und hinsichtlich seines Zustandes (z.B. Batterieladenzustand). Weiterhin überwacht die TTC die Ausführung von Kommandos durch den Satelliten. Die Verbindung zwischen TTC und Satellit (*engl. Service Link*) kann eine sehr niedrige Bitrate besitzen. Die Verbindung zwischen MS und Satellit nennt man *Uplink*, in

umgekehrter Richtung *Downlink*. Ausführliche Beschreibungen zu TTC und weiteren Funktionen und Komponenten finden sich in [68].

Im Hinblick auf die Kommunikation über Satelliten, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, wird die fehlerfreie Funktion des gesamten Systems als gegeben angenommen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Datenübertragung in Satellitensystemen meist durch fehlerkorrigierende Verfahren geschützt ist. In den folgenden Abschnitten werden nur noch Funktionen, die direkt mit der Kommunikation in Zusammenhang stehen, betrachtet.

Das gesamte Versorgungsgebiet, von dem ein Satellit von der Erdoberfläche aus erreichbar ist (*engl. Service Area*), wird entweder durch einen Richtstrahl mit großem Öffnungswinkel (*engl. Global Beam*) oder durch mehrere kleinere Richtstrahlen mit entsprechend kleinerem Öffnungswinkel (*engl. Spot Beams*) abgedeckt. In Bild 2-4 ist eine Multibeam-Konfiguration dargestellt. Eine Kombination beider Möglichkeiten ist ebenfalls möglich. EUTELSAT 1 verwendet für den Uplink einen globalen Richtstrahl, während für den Downlink eine Multibeam-Konfiguration verwendet wird. In letzterem Fall spricht man trotzdem von einem Multibeam-System.

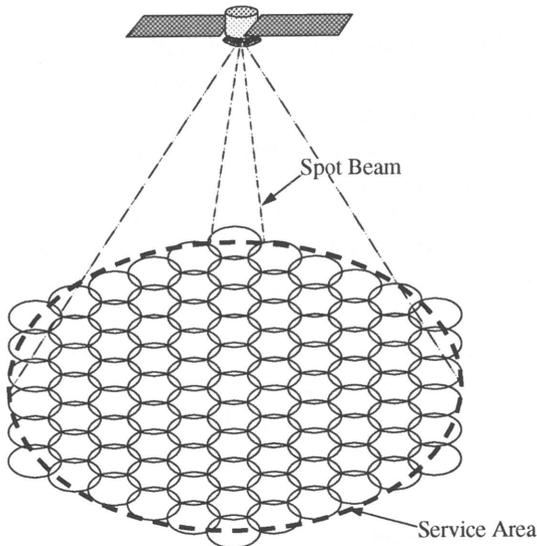


Bild 2-4: Aufteilung des Versorgungsgebietes (*Service Area*) durch einzelne Richtstrahlen (*Spot Beams*)

Will man die gesamte Erdoberfläche versorgen, benötigt man mehrere Satelliten. Befinden sich die Satelliten in geostationären Umlaufbahnen, dann benötigt man mindestens drei Satelliten, deren Versorgungsgebiete bei einem Abstand von 120° kleinstmögliche Schnittflächen aufwei-

sen. Da Teilnehmer, die sich innerhalb der Schnittflächen aufhalten, Zugang zu mehreren Satelliten haben, kann es günstiger sein, andere Abstände zwischen den Satelliten zu wählen, um Gebiete mit hohem Verkehrsaufkommen besser zu bedienen. Gebiete um die beiden Pole der Erde können von GEO-Satelliten grundsätzlich nicht bedient werden. Bei niedrigfliegenden Satelliten in LEO- oder ICO-Umlaufbahnen werden zur Abdeckung der gesamten Erdoberfläche mindestens

$$n = 4\pi r_E^2 / A = \frac{\pi}{3 \arctan \left[\frac{\sqrt{3}}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{r_E}{r_E + h} \right)} \right] - \pi} \quad (1)$$

Satelliten benötigt, falls der minimale Sichtwinkel des Satelliten vom Benutzer aus gesehen 0° beträgt, d.h., falls der Satellit schon empfangbar ist, wenn er gerade über dem Horizont steht. A ist dabei die sechseckige Fläche, die bei einer bienenwabenartigen Aneinanderreihung der Versorgungsgebiete der Satelliten entsteht. Eine genaue Herleitung hierfür findet sich in [115].

Die Geschichte kommerzieller Kommunikationssatelliten begann 1965 mit INTELSAT I, einem geostationären Satelliten mit nur einem Richtstrahl für Uplink und Downlink (siehe auch [68]). Danach folgten Multibeam-Satelliten, bei denen einzelne Uplink-Downlink-Paare fest verbunden und meist auch für unterschiedliche Dienste (Fernsehen, Telefon, ...) zuständig sind. Diese Systeme vereinigen im Prinzip die Kommunikationstechnik mehrerer Satelliten auf einer Satellitenplattform. In der weiteren Entwicklung entstanden Multibeam-Systeme mit der Möglichkeit, von jedem Uplink wahlfrei unterschiedliche Downlinks zu erreichen, wobei die Kapazität aller Uplink-Downlink-Paare fest vorgegeben ist (engl. *Transponder Hopping*). Heutige Systeme sind mittels TDMA (siehe Abschnitt 2.7.3) in der Lage, Uplinks und Downlinks dynamisch zu verbinden (engl. *Satellite Switched Time Division Multiple Access, SS/TDMA*). Die Steuerung der Uplink-Downlink-Kopplung befindet sich in Kontrollstationen auf der Erde. Zukünftig werden die Kontrolleinrichtungen für die Kommunikationstechnik im Satelliten selbst installiert werden (engl. *On Board Processing, OBP*).

2.3.1 Satellit als Repeater

Ein Satellit ohne Koppelnetzfunktionalität wirkt prinzipiell wie eine bzw. mehrere Leitungen mit Signalverstärker. Als Mehrfachzugriffsverfahren wird in diesem Fall fast immer FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*) verwendet. Der Satellit stellt Übertragungskapazitäten zwischen den einzelnen Stationen bereit. Aus der Sicht der Informationsübertragung kann man ein solches Satellitensystem als vollvermaschtes Netz mit Leitungen unterschiedlicher Kapazität, aber mit einer begrenzten Gesamtkapazität aller Leitungen, betrachten.

Bei einem Satelliten mit globalem Richtstrahl für Uplink und Downlink wird das empfangene Frequenzband vom Satelliten verstärkt, umgesetzt und wieder gesendet. Das Basisband selbst ist für den Satelliten belanglos. Das beim Satelliten empfangene und verstärkte Frequenzgemisch setzt sich aus den Einzelsignalen aller sendenden Stationen zusammen (siehe Bild 2-5). Jede Bodenstation besitzt eine Trägerfrequenz pro Empfangsstation, mit der sie kommunizieren will. Benötigt jede der M Station eine Verbindung zu jeder anderen Station, dann werden im gesamten System $M \cdot (M - 1)$ Trägerfrequenzen benötigt. Alle Stationen empfangen das gesamte vom Satelliten verstärkte Frequenzband und demodulieren nur diejenigen Frequenzbänder, die an sie selbst adressierte Nutzinformationen enthalten. Die Kapazität der einzelnen Kanäle ist durch ihre Bandbreite festgelegt. Eine dynamische Änderung der Übertragungskapazität ist nicht möglich. Allerdings kann das System an ein geändertes Verkehrsaufkommen angepaßt werden, indem die Bandbreite der einzelnen Kanäle geändert wird, ohne daß Überschneidungen mit Nachbarkanälen auftreten oder die Grenzen des vom Satelliten verstärkten Frequenzbandes überschritten werden.

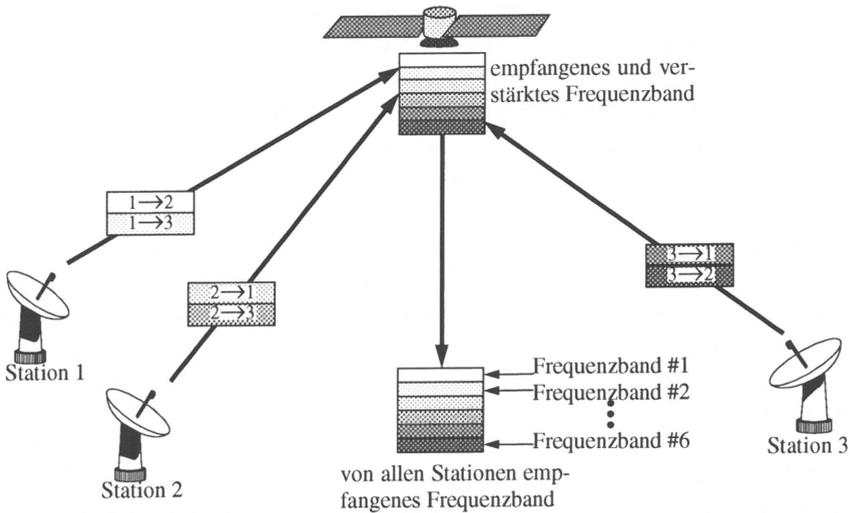


Bild 2-5: Satellitensystem mit globalem Richtstrahl und FDMA

Satelliten mit globalem Richtstrahl eignen sich besonders für GEO-Satelliten, die Verteildienste wie z.B. Fernsehprogramme anbieten. Für Kommunikationsanwendungen, bei denen bestimmte Frequenzbänder nur in bestimmten Regionen empfangen werden sollen, eignen sie sich weniger gut. Die verwendeten Frequenzbänder werden nur sehr schlecht ausgenutzt, da sie innerhalb des Versorgungsgebietes maximal zweifach genutzt werden können (je einmal mit horizontaler und vertikaler Polarisation).

Multibeam-Systeme können Trägerfrequenzen mit gleicher Polarisationsrichtung sowohl für den Uplink als auch für den Downlink mehrfach verwenden, da die Satelliten ihre Downlink-Richtstrahlen stark gebündelt senden bzw. das gesamte Versorgungsgebiet mit mehreren richtungsselektiven Uplink-Antennen abdecken. Durch die Bündelung wird die auf dem Downlink abgestrahlte Energie auf ein kleineres Gebiet verteilt als bei Satelliten mit globalem Richtstrahl. Durch den höheren Gewinn der stärker richtungsselektiven Satellitenempfangsantennen kann die beim Satelliten gemessene Energieflußdichte verringert werden. Aus diesen beiden Gründen können für die Bodenstation kleinere bündelnde oder omnidirektionale Empfangs/Sende-Antennen verwendet werden. Zusätzlich kann die von der Bodenstationen abgestrahlte Leistung reduziert werden. Mit Hilfe einer bündelnden Sendeantenne kann die Bodenstation zwar Sendeleistung einsparen, allerdings muß die Sendeantenne dann, abhängig von der Güte der Bündelung, auf den Satelliten ausgerichtet sein.

Um den Vorteil der mehrfachen Verwendung von Frequenzbändern auch auf dem Downlink ausnutzen zu können, darf der Satellit ein empfangenes Signal, das für genau einen Downlink bestimmt ist, auch nur über die Sendeantenne dieses Downlinks ausstrahlen. Systeme mit Transponder Hopping spalten die empfangenen Signale aller Uplink-Antennen durch Bandpässe in diejenigen Subbänder auf, die zu verschiedenen Downlinks vermittelt werden sollen. Danach werden die einzelnen Subbänder über Transponder verstärkt und über die jeweiligen Downlinks wieder abgestrahlt. Die Trägerfrequenz wird im Satelliten grundsätzlich umgesetzt, um Störungen des Empfangssystems des Satelliten durch sein Sendesystem zu verhindern. Bild 2-6 zeigt ein Multibeam-System mit zwei verschiedenen Richtstrahlgebieten. In diesem Fall kann z.B. das Frequenzband für ,1→1', das im Richtstrahlgebiet Nr. 1 verwendet wird, als Frequenzband ,2→2' im Richtstrahlgebiet Nr. 2 wiederverwendet werden. Grundsätzlich gilt, daß sich durch Erhöhung der Anzahl der Richtstrahlgebiete die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite verbessern läßt. Allerdings wächst der Aufwand im Satelliten, da für eine Vollvermaschung von M Richtstrahlgebieten mindestens M^2 Bandpässe und Transponder benötigt werden.

Die Bodenstationen müssen für die Senderichtung in der Lage sein, die verschiedenen Trägerfrequenzen zu erzeugen. In Empfangsrichtung müssen sie auf die verschiedenen Trägerfrequenzen abstimbar sein. Die einzelnen Frequenzbänder bzw. Trägerfrequenzen adressieren bei einem Multibeam-System im Gegensatz zu einem System mit globalem Richtstrahl nicht einzelne Bodenstationen, sondern ein Richtstrahlgebiet. Zur Adressierung einzelner Stationen kann ein Frequenzband in mehrere Subbänder unterteilt werden, die jeweils nur von einer Station des Zielrichtstrahlgebietes empfangen werden.

Die Übermittlungskapazität zwischen jedem Uplink-Downlink-Paar kann durch Zuweisung einer unterschiedlichen Anzahl von Subbändern an ein Richtstrahlgebiet an den aktuellen Bedarf angepaßt werden. In diesem Fall werden mehr als M^2 Bandpässe und Transponder im

Satelliten benötigt. Dies geschieht allerdings nur aufgrund von längerfristigen Messungen durch eine Kontrollbodenstation. Multibeam-Systeme mit Transponder Hopping eignen sich deshalb gut für die überregionale (kontinentale) Telekommunikation. In diesem Anwendungsfall sammeln die Bodenstationen den auftretenden Verkehr eines größeren Gebietes, wodurch statistische Schwankungen der Verkehrsbelastung der einzelnen Bodenstationen bzw. der einzelnen Richtstrahlgebiete minimiert werden. Für Mobilkommunikation über Satelliten sind solche Systeme ungeeignet.

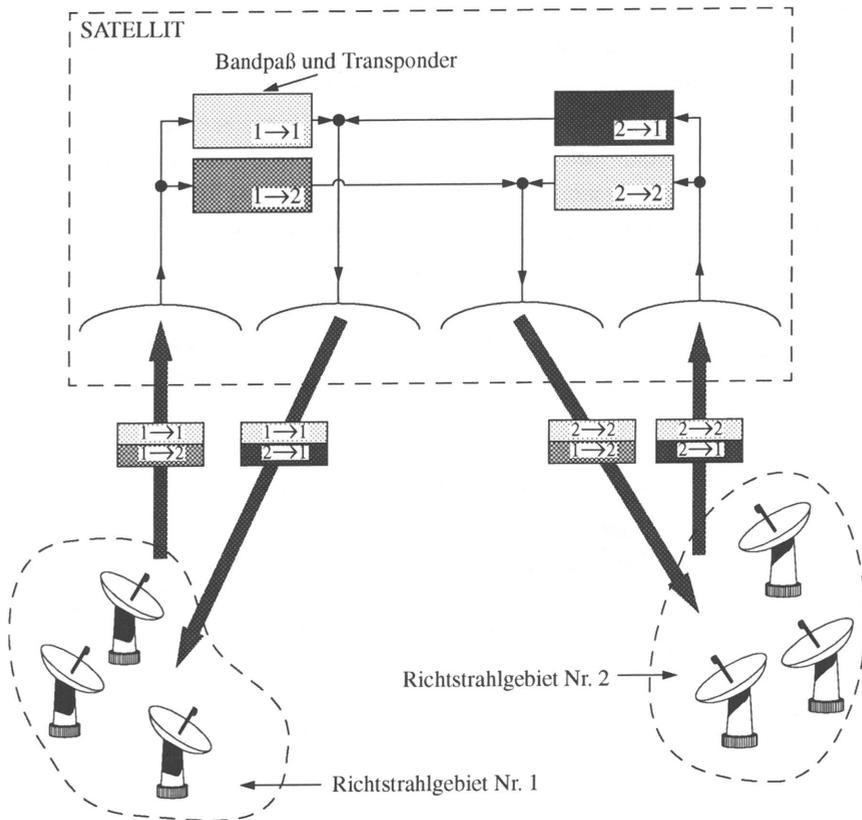


Bild 2-6: Multibeam-Satellitensystem (siehe auch [68])

2.3.2 Satellit mit Vermittlungsfunktionen

Beim Transponder Hopping ist der Aufwand im Satelliten proportional zum Quadrat der Anzahl verwendeter Trägerfrequenzen, d.h. zum Quadrat der Anzahl möglicher Verbindungen

zwischen zwei Bodenstationen. Dieser Aufwand kann verringert werden, wenn die Vermittlungsfunktion von den Bodenstationen in den Satelliten verlegt wird.

Beim für Multibeam-Systeme verwendeten SS/TDMA (*engl. Satellite Switched Time Division Multiple Access*, siehe [72, 94, 125]) wird der Uplink jedes Richtstrahlgebietes in periodische Rahmen gleicher Dauer strukturiert. Innerhalb eines Rahmens vermittelt der Satellit Zeitschlitze an alle Richtstrahlgebiete (siehe Bild 2-7). Die Vermittlung geschieht im Frequenzband in der TDMA-Koppelmatrix. Bei M Richtstrahlgebieten und voller Erreichbarkeit aller Richtstrahlgebiete ist der Rahmen eines Uplinks in M Zeitschlitze unterteilt. Die Kapazität eines Uplink-Downlink-Paares hängt von der Dauer des zugehörigen Zeitschlitzes innerhalb eines Rahmens ab. Innerhalb eines Zeitschlitzes müssen alle Bodenstationen des zugehörigen Uplink-Gebietes, die Daten zum entsprechenden Downlink-Gebiet senden wollen, diese in Form von Bursts nacheinander senden. Die Sendereihenfolge und die Dauer der Zeitschlitze wird anhand eines langfristig gemessenen Verkehrsaufkommens bestimmt. Die Steuerung hierfür befindet sich im allgemeinen in einer speziellen Bodenstation.

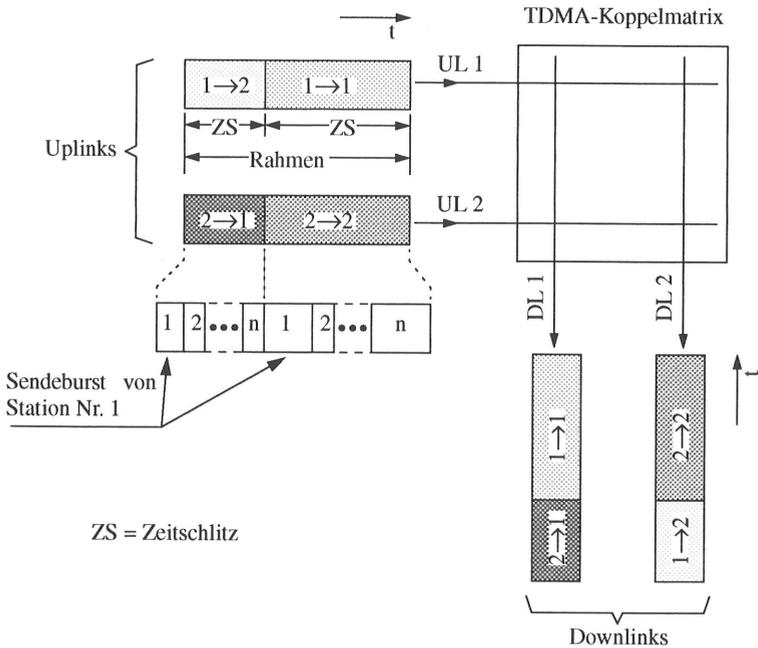


Bild 2-7: Vermittlung der Zeitlagen verschiedener Richtstrahlgebiete mittels eines TDMA-Koppelnetzes im Satelliten

2.3.3 OBP-Satelliten

In regenerativen Satellitensystemen werden digitale Daten im Satelliten im Basisband vermittelt. Dazu werden die über die Uplinks ankommenden Signale demoduliert. Nach der Vermittlung werden sie wieder moduliert und ausgestrahlt. Regenerative Satellitensysteme sind unempfindlicher gegen Übertragungsfehler.

Satelliten mit OBP (*engl. On Board Processing*) sind zusätzlich in der Lage, die empfangenen Daten auszuwerten und zu bearbeiten. Damit kann der Satellit eine oder mehrere der folgenden Aufgaben erfüllen [8, 9, 36]:

- Fehlerkorrektur für empfangene Daten
- Prüfsummenberechnung für zu sendende Daten
- Zwischenspeichern von Daten
- Kopieren und Versenden auf verschiedenen Downlinks (*engl. Multicast*)
- Vermitteln von Datenpaketen anhand von Adressen im Paketkopf
- Bitratenkonvertierung
- Empfang und Auswertung von Reservierungsanforderungen bei durchschaltevermitteltem Verkehr
- Unterstützung bei Zugriffsverfahren (z.B. Kollisionsauflösung)
- Überlastabwehr

OBP-Satelliten werden von einer Kontrollbodenstation aus überwacht. Die Kontrollbodenstation kann ebenfalls einige der Aufgaben, wie z.B. die Auswertung von Reservierungsanforderungen, übernehmen. OBP-Satellitensysteme sind sehr flexibel bezüglich Änderungen der Verkehrsbeziehungen zwischen den unterschiedlichen vom Satelliten bedienten Regionen. Sie eignen sich sehr gut zur Integration verschiedener Vermittlungsarten. Ermöglicht der Satellit die Auswertung von Reservierungsanforderungen, verkürzt sich die Verbindungsaufbauzeit für durchschaltevermittelte Verbindungen, da die Reservierungsanforderung und die zugehörige Rufbestätigung nur je einmal den Weg zwischen Erdoberfläche und Satellit zurücklegen müssen. Durch die Bitratenkonvertierung können auch unterschiedlich leistungsfähige Bodenstationen miteinander kommunizieren. Die Überlastabwehr muß bei Satellitensystemen mit fest durchgeschalteten Verbindungen zwischen den Bodenstationen von den einzelnen Bodenstationen selbst durchgeführt werden. Bei Systemen mit OBP-Satelliten und wählbaren Verbindungen und vor allem bei Paketvermittlung muß das Space Segment (d.h. der Satellit oder die Kontrollbodenstation) dazu in der Lage sein. Wird die Überlastabwehr in diesem Fall von der Kontrollbodenstation übernommen, geht wertvolle Zeit bis zur Information der lasterzeugenden Bodenstationen verloren, da der Zustand des Satelliten zunächst der Kontrollbodenstation

mitgeteilt werden muß. Nach der Auswertung können die Bodenstationen bei gegebener Überlastsituation erst nach einer weiteren Umlaufverzögerung informiert werden. Geschieht die Analyse der Lastsituation und das Aussenden der Überlastmeldung im Satelliten, dann verkürzt sich die Zeit vom Auftreten der Überlast bis zur Information der Bodenstationen auf eine halbe Umlaufverzögerung.

Wahlfreie Zugriffsverfahren sind bei Multibeam-Systemen besonders effizient einsetzbar, falls der Satellit in der Lage ist, Kollisionen zu erkennen und die daran beteiligten Bodenstationen zu informieren. Andernfalls müßten über den Uplink empfangene Meldungen grundsätzlich auf dem zugehörigen Downlink zurückgesendet werden, damit die Bodenstation eine Kollision ihrer zuvor gesendeten Meldung selbst erkennen kann. Gleichzeitig müßte die Meldung auch auf dem Ziel-Downlink ausgesendet werden. Findet die Kollisionserkennung in der Kontrollbodenstation statt, wird das zugehörige Uplink-Downlink-Paar stark belastet.

2.3.4 Bodenstationen

Bodenstationen erfüllen in Satellitensystemen sehr unterschiedliche Aufgaben. Grundsätzlich bestehen sie jedoch aus dem Antennensystem, dem HF-Teil und der Schnittstelle zu den terrestrischen Kommunikationseinrichtungen (siehe [68]).

Das Antennensystem ist zuständig für Ausstrahlung und Empfang der HF-Signale auf dem Uplink bzw. Downlink sowie für die Auftrennung der Signalpfade für Sende- und Empfangsrichtung. Bündelt die Antenne die HF-Signale, dann muß sie auf den Satelliten ausgerichtet werden. Bei LEO- oder ICO-Satelliten erfolgt das entweder durch periodisches Ausführen einer programmierten Bewegung oder durch einen Regelkreis, mit dessen Hilfe die empfangene Signalstärke maximiert wird. Als Antennenbauformen für Antennen mit Richtwirkung haben sich Parabolantennen und *Phased Array*-Antennen [68, 96, 109] allgemein durchgesetzt. Parabolantennen erzielen ihre Richtwirkung durch Bündelung der eintreffenden Empfangsenergie auf die im Brennpunkt sitzende eigentliche Antenne. *Phased Array*-Antennen bestehen aus einem Feld von vielen omnidirektionalen Einzelantennen, deren Empfangssignale geeignet gewichtet und phasenverschoben addiert werden. In Senderichtung werden die Einzelantennen getrennt durch geeignet phasenverschobene Signale angesteuert. Im Gegensatz zur Parabolantenne kann die Antennenausrichtung elektronisch verändert werden. Weiterhin kann gleichzeitig in mehrere Richtungen gesendet bzw. aus mehreren Richtungen empfangen werden.

Der HF-Teil gliedert sich in Sende- und Empfangsrichtung. In Senderichtung wird das Basisbandsignal moduliert und durch einen HF-Konverter auf die höhere Sendefrequenz umgesetzt. Werden gleichzeitig Signale in mehreren Frequenzbändern gesendet, dann werden diese addiert, verstärkt und zum Antennensystem geleitet. In Empfangsrichtung werden die HF-Signale zunächst verstärkt. Danach werden sie, falls mehrere Frequenzbänder gleichzeitig

empfangen werden, durch Bandpässe getrennt. Die einzelnen Signale werden durch einen HF-Konverter in ein Signal mit einer niedrigeren Zwischenfrequenz umgesetzt und demoduliert.

In Senderichtung faßt die terrestrische Schnittstelle die zu übertragenden Signale (Datenpakete, kontinuierliche Datenströme oder analoge Signale) im sog. Multiplexer zusammen und übergibt sie im Basisband dem HF-Teil. In Empfangsrichtung übernimmt die terrestrische Schnittstelle die Daten vom HF-Teil im Basisband. Nach dem Aufspalten in die einzelnen Datenströme im Demultiplexer werden sie an die terrestrischen Kommunikationseinrichtungen weitergeleitet. Die terrestrische Schnittstelle muß eine Protokollumsetzung der in den terrestrischen Netzen verwendeten Protokolle auf die im Satellitensystem verwendeten Protokolle durchführen.

In digitalen mobilen Endgeräten für die mobile Sprachkommunikation über Satelliten besteht die ‚terrestrische Schnittstelle‘ lediglich aus der Signalaufbereitung und A/D-Wandlung des Sprachsignals (Senderichtung) bzw. der D/A-Wandlung, Verstärkung und Wiedergabe (Empfangsrichtung).

Bodenstationen müssen, je nach unterstütztem Dienst, weitere, sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllen. So müssen mobile Stationen sehr klein und leicht gebaut sein (Koffergröße). Endgeräte für Satellitenmobilkommunikation (‚Satellitenmobiltelefon‘, *engl. Handheld Terminals*) müssen extrem klein und leicht sein. Die Sendeleistung darf festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten. Die Abstrahlung des Sendesignals sollte einerseits zum Satellit gebündelt erfolgen, andererseits aber nicht auf den Körper (z.B. den Kopf bei Satellitenmobilfunkgeräten) des Benutzers gerichtet sein. Bodenstationen, die gleichzeitig mehrere Satelliten empfangen können, müssen in der Lage sein, den für sie am besten empfangbaren Satelliten zu bestimmen. Ist bei einer Verschlechterung der Empfangssituation ein Umstieg von einem gerade benutzten Satelliten zu einem besser empfangbaren Satelliten erlaubt (*engl. Handover*), dann muß die Bodenstation in der Lage sein, während der Kommunikation über einen Satelliten die Empfangsfeldstärke aller anderen Satelliten zu messen.

Mobile Bodenstationen müssen in der Lage sein, ihre Position zu bestimmen und dem Satellitensystem mitzuteilen. Die Positionsbestimmung kann entweder über GPS oder über ein in das Kommunikationssatellitensystem integriertes Positionsbestimmungssystem erfolgen.

Bei Satellitensystemen mit TDMA-Mehrfachzugriff muß die Bodenstation nach dem Einschalten und vor dem ersten Aussenden einer Meldung auf den Systemtakt synchronisiert werden. Dafür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung [8, 68, 94, 114]. Bei geostationären Satelliten kann die Bodenstation durch geometrische Berechnungen aus ihrer eigenen Position und aus der bekannten Position des Satelliten die Umlaufverzögerungszeit berechnen. Dadurch können Sendezeitpunkte relativ zu einem periodisch vom Satelliten abgestrahlten Signal bestimmt werden. Eine andere Methode benutzt einen durch Bodenstation und Satellit gebilde-

ten Regelkreis. Dabei kann der Satellit entweder eine aktive oder eine passive Rolle übernehmen. OBP-Satelliten sind in der Lage, den Synchronisationsfehler zu bestimmen und den Bodenstationen ein Korrektursignal zu senden. Passive Satelliten stellen ein zum Systemtakt synchrones Empfangsfenster zur Verfügung und senden darin empfangene Signale zur Bodenstation zurück. Aus der empfangenen Signalenergie kann die Bodenstation ihren Synchronisationsfehler berechnen.

2.3.5 Systemmanagement

Das Management eines Kommunikationssatellitensystems läßt sich in zwei Bereiche gliedern:

- Telecontrol, Tracking and Command (TTC)
- Management der Kommunikationseinrichtungen

Das TTC-System ist für die Überwachung des Satellitensystems und für korrigierende Maßnahmen hinsichtlich der Einhaltung der Umlaufbahnen und der Funktionsfähigkeit der Satellitenkomponenten zuständig (siehe Unterkapitel 2.3 und [68]). Es besteht aus dem On-Board-Management und der TTC-Kontrollstation. Das On-Board-Management ist innerhalb des bzw. der Satelliten installiert und enthält alle TTC-Managementdaten und -prozeduren. Meßwerte wie z.B. die Position des Satelliten oder die Batteriespannung werden erfaßt und auf TTC-Managementdaten abgebildet, die von der TTC-Kontrollstation abgefragt werden können oder, falls sie kritische Werte über- bzw. unterschreiten, automatisch zur TTC-Kontrollstation gesendet werden. Andere TTC-Managementdaten wirken direkt auf den Zustand zugeordneter Komponenten des Satelliten ein. Dadurch kann die TTC-Kontrollstation z.B. die Leistungsaufnahme des Satelliten durch Abschalten von Sendeantennen verringern. Die Kommunikation zwischen der TTC-Kontrollstation und dem On-Board-Management über den sogenannten *Service Link* ist für die Erhaltung der Funktionsfähigkeit des Satellitensystems lebenswichtig und wird deshalb durch fehlerkorrigierende Codes und durch mehrmaliges Wiederholen der Meldungen gesichert. Es werden omnidirektionale Antennen verwendet, die die zugeführte Leistung in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlen bzw. empfangen, damit eine Kommunikation auch mit einem ins Trudeln geratenen Satelliten möglich ist. Die zum TTC-Management gehörenden Komponenten sind oft mehrfach vorhanden. Die Datenraten auf dem *Service Link* können sehr klein sein.

Das Management der Kommunikationseinrichtungen steuert bzw. überwacht die für die Nutzkommunikation des Satellitensystems zuständigen Komponenten. Es ist deshalb unter anderem zuständig für die Synchronisation der Komponenten, die Verteilung der Frequenzbänder und Zeitschlitze an die Bodenstationen (bei SS/TDMA), die Aktualisierung der verschiedenen Datenbanken für die Mobilitätsverwaltung bei Satellitenmobilfunksystemen, die Einrichtung von gemieteten durchschaltvermittelten Verbindungen, die Messung der Auslastung aller

Systemkomponenten und die Veranlassung von Überlastabwehrmaßnahmen sowie das Ein- bzw. Ausbuchen von Bodenstationen.

Das Management der Kommunikationseinrichtungen von Mobilfunksatellitensystemen basierend auf LEO- oder ICO-Satelliten ähnelt wegen der Benutzermobilität dem Management von terrestrischen Mobilfunknetzen. Gleichzeitig muß allerdings die Bewegung der Satelliten relativ zur Erdoberfläche berücksichtigt und verwaltet werden.

2.4 Umlaufbahnen

In den folgenden beiden Abschnitten werden ausschließlich kreisförmige Umlaufbahnen beschrieben. Elliptische Umlaufbahnen werden für Spezialanwendungen, bei denen ein einzelner Satellit für Bodenstationen in Regionen hoher nördlicher bzw. südlicher Breite für einen großen Anteil seiner Umlaufzeit sichtbar sein soll, gewählt (siehe [68]). Dazu muß die Umlaufbahnebene gegenüber der Äquatorebene stark gedreht sein, d.h. der Inklinationswinkel φ (siehe Bild 5-1) muß groß sein.

Die Anziehungskraft, mit der sich Erde und Satellit gegenseitig anziehen, ist:

$$F_A = Gm_e \frac{m_s}{r^2} \quad (2)$$

Dabei ist G die Gravitationskonstante, m_e die Masse der Erde ($Gm_e = 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, siehe Unterabschnitt 5.2.1.1, Gl. (116)), m_s die Masse des Satelliten und r der Abstand des Satelliten vom Erdmittelpunkt. Die Anziehungskraft F_A ist bei einem Satelliten in einer stabilen kreisförmigen Umlaufbahn gleich der Zentrifugalkraft F_Z :

$$F_Z = m_s \omega^2 r \quad (3)$$

Dabei ist ω die Winkelgeschwindigkeit des Satelliten bezüglich des Erdmittelpunktes. Setzt man $F_A = F_Z$, dann kann aus den Gleichungen (2) und (3) die Winkelgeschwindigkeit des Satelliten berechnen:

$$\omega = \sqrt{\frac{Gm_e}{r^3}} = \sqrt{\frac{Gm_e}{(r_E + h)^3}} \quad (4)$$

Dabei ist $r_E = 6378,1 \text{ km}$ der Radius der Erde und h der Abstand zwischen Erdoberfläche und Satellit.

2.4.1 GEO-Satelliten

Geostationäre Satelliten (*engl. Geostationary Earth Orbit, GEO*) umkreisen die Erde in östliche Richtung mit einer Umlaufzeit von einem Sternentag. Die Dauer eines Sternentages beträgt 23h 56min 4,1s. Während eines Sternentages dreht sich die Erde um exakt 360° . Der Sternentag unterscheidet sich vom 24-stündigen Sonnentag, da sich die Erde innerhalb eines Jahres einmal um die Sonne bewegt. Dadurch dreht sich die Erde während eines Sonnentages um $360,9856^\circ$. Die Umlaufbahnebene eines GEO-Satelliten liegt genau in der Äquatorebene. Da die Erde sich ebenfalls innerhalb eines Sternentages einmal um ihre Achse dreht, steht ein GEO-Satellit von der Erdoberfläche aus gesehen scheinbar immer über demselben Punkt senkrecht über dem Äquator. Die Winkelgeschwindigkeit eines GEO-Satelliten beträgt $\omega = 2\pi/\text{Sternentag}$. Aus Gl. (4) folgt dann für den Abstand zwischen Erdoberfläche und Satellit:

$$h_{\text{GEO}} = 35786 \text{ km} \quad (5)$$

Für eine Bodenstation, die sich genau im Fußpunkt des Satelliten befindet, steht der Satellit genau senkrecht am Himmel. Der Fußpunkt des Satelliten ist der Schnittpunkt der Verbindungslinie von Satellit und Erdmittelpunkt mit der Erdoberfläche. Für alle anderen Bodenstationen ist der Sichtwinkel immer kleiner als 90° . Für Bodenstationen mit einer nördlichen bzw. südlichen Breite größer als $81,3^\circ$ ist ein GEO-Satellit niemals zu empfangen. Wünschenswert ist ein Mindestsichtwinkel von 40° . Dadurch können mit GEO-Satelliten nur Benutzer bis zu einer nördlichen bzw. südlichen Breite von 45° komfortabel erreicht werden [124] (zur Berechnung des Sichtwinkels siehe Unterabschnitt 5.2.1.1, Gleichungen (122) und (124)). Vorteilhaft ist, daß sich die Position des Satelliten relativ zu einer Bodenstation nicht ändert. Deshalb müssen Antennen mit Richtwirkung nicht nachgeführt werden. Zur Abdeckung der Erdoberfläche (mit den oben erläuterten Einschränkungen) benötigt man mindestens drei GEO-Satelliten.

2.4.2 LEO- und ICO-Satelliten

Die Grenze zwischen LEO- und ICO-Satellitensystemen ist fließend. Die Umlaufbahn von LEO-Satelliten befindet sich in ca. 1000 km Höhe, die Umlaufbahn von ICO-Satelliten in ca. 10000 km Höhe über der Erdoberfläche. Zur Abdeckung der gesamten Erdoberfläche werden mindestens $4\pi r_E^2/A$ Satelliten benötigt (siehe Unterkapitel 2.3). Berechnet man aus Gl. (1) die untere Schranke für die Anzahl der benötigten Satelliten, so ergibt sich die Kurve nach Bild 2-8.

Vorteilhaft gegenüber GEO-Satelliten ist, daß durch Drehung der Umlaufbahnebene relativ zur Äquatorebene, d.h. durch einen Inklinationwinkel $\varphi > 0$ (siehe Bild 5-1), auch Gebiete nahe den beiden Polen der Erde versorgt werden können. Die Satelliten bewegen sich mit dem glei-

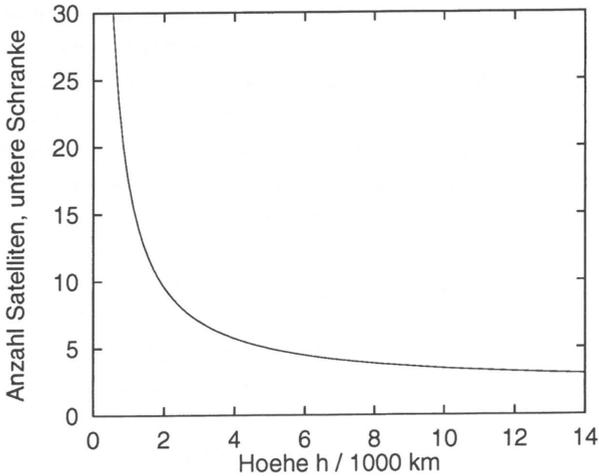


Bild 2-8: Mindestanzahl von LEO- bzw. ICO-Satelliten zur Versorgung der gesamten Erdoberfläche in Abhängigkeit von der Höhe h der Satelliten über der Erdoberfläche

chen Drehsinn wie die Erde (d.h. sie bewegen sich von West nach Ost), um die Relativgeschwindigkeit von Erdoberfläche und Satelliten klein zu halten. Da die LEO- bzw. ICO-Satelliten in kleineren Höhen als GEO-Satelliten operieren, ist ihre Umlaufzeit grundsätzlich kürzer als ein Sternentag.

Da sich die Satelliten auf ihrer Umlaufbahn bewegen, sind sie nicht zu jedem Zeitpunkt optimal verteilt. Zur Optimierung der globalen Überdeckung werden alle Satelliten zunächst verschiedenen Umlaufbahnen so zugeordnet, daß sich in jeder Umlaufbahn genau gleich viele Satelliten befinden. Innerhalb einer Umlaufbahn werden die Satelliten äquidistant verteilt. Die Umlaufbahnen werden so gegeneinander verdreht, daß der Winkel zwischen den Schnittgeraden der Umlaufbahn- mit der Äquatorebene zweier Nachbarumlaufbahnen für alle Umlaufbahnen genau gleich ist. Die Zeitpunkte, zu denen irgendein Satellit des Systems seinen nördlichsten Punkt erreicht, sind ebenfalls äquidistant. Nach der Beobachtung eines solchen Ereignisses, findet das nächste Ereignis immer bei der (östlichen bzw. westlichen) Nachbarumlaufbahn der gerade betrachteten Umlaufbahn statt. In Abschnitt 5.5.1 werden die Forderungen für eine optimale Verteilung der Satelliten nochmals genauer beschrieben. Die Satellitendichte über der Erdoberfläche ist nicht konstant. Daher werden zur globalen Erfassung der Erdoberfläche mehr Satelliten als die in Gl. (1) berechnete Mindestanzahl benötigt. Eine Simulation der Dynamik des Systems gibt Aufschluß über Flächen, die zeitweise bzw. immer unversorgt sind.

Nachteilig gegenüber GEO-Satelliten ist, daß sich die Satelliten relativ zur Erdoberfläche bewegen. Die Umlaufgeschwindigkeit ist nach Gleichung (4) proportional zu $(r_E + h)^{-3/2}$.

Sinnvoll ist es, wenn die Umlaufgeschwindigkeit so gewählt wird, daß ein Sternentag ein ganzzahliges Vielfaches der Umlaufzeit ist. In diesem Fall wiederholt sich die Konstellation von Satelliten und Erde nach jedem Sternentag und läßt sich einfacher vorausberechnen. Durch die Bewegung der Satelliten müssen Bodenstationen Antennen mit Richtwirkung nachführen. Allerdings ist die am Boden ankommende Signalenergie durch den geringeren Abstand zwischen Bodenstation und Satelliten größer als bei GEO-Systemen, so daß kleinere oder omnidirektionale Antennen bzw. kleinere Sendeleistungen ausreichen.

2.5 Übertragungsstrecken in Satellitensystemen

In diesem Unterkapitel werden die Eigenschaften der Übertragungsstrecken in Satellitensystemen beschrieben. Dabei muß zwischen Uplinks, Downlinks und Übertragungsstrecken zwischen Satelliten (*engl. Intersatellite Link, ISL*) unterschieden werden (siehe auch Bild 2-3). Uplinks und Downlinks werden in Satellitensystemen ausschließlich durch Funkübertragungsstrecken realisiert. Für ISLs können auch optische Übertragungsstrecken verwendet werden. Hier ist bei LEO- und ICO-Systemen insbesondere die schnelle Relativbewegung zwischen den Satelliten unterschiedlicher Umlaufbahnen problematisch, da die Sendeleistung mittels LASER stark gebündelt abgestrahlt wird. Der LASER-Strahl muß also ständig präzise nachgeführt werden.

Bei Uplinks und Downlinks muß ebenfalls ein Kompromiß zwischen der Bündelung der Richtstrahlen und der Notwendigkeit einer genauen Ausrichtung der Antennen gefunden werden. Hierbei unterscheiden sich Uplink und Downlink. Beim Downlink ist es meist erforderlich, ein größeres, in den Umrissen genau definiertes Gebiet zu versorgen. Die Bündelung des Downlinks darf also nicht zu stark sein. Umgekehrt ist für den Uplink oft eine starke Bündelung wünschenswert, um möglichst viel Sendeleistung zum Satelliten zu transportieren. Für ortsfeste Bodenstationen kann man dabei die Nachteile einer präzisen Nachführmechanik und einer großen Antenne in Kauf nehmen. Bei mobilen Bodenstationen versucht man allerdings, mit möglichst kleinen Antennen und mit einer geringen Sendeleistung auszukommen. Dasselbe gilt grundsätzlich auch für den Downlink, da der Satellit möglichst leicht sein sollte und mit der Energie sparsam umgegangen werden muß.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Auslastung von Uplinks, Downlinks und ISLs und damit zusammenhängende Fragen wie die Wegeauswahl (Verkehrslenkung, *engl. Routing*) eintreffender Rufe bzw. Pakete. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Mobilfunksystem über LEO-Satelliten betrachtet (siehe Bild 2-9). Besitzt das System keine ISLs und sind die zwei zu verbindenden mobilen Endgeräte nicht über denselben Satelliten erreichbar, dann muß die Verbindung zwischen zwei Mobilteilnehmern immer über die zwei jeweils am besten empfangbaren Satelliten und über ortsfeste Bodenstationen gelenkt werden. Sind die zwei beteiligten Satelliten nur über zwei verschiedene ortsfeste Bodenstationen erreichbar, dann muß die Verbindung

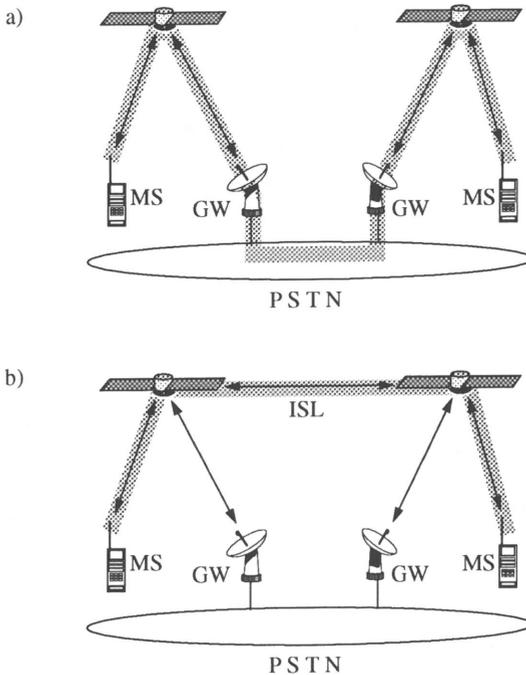


Bild 2-9: Verbindung von zwei mobilen Endgeräten über PSTN (a) bzw. ISL (b)

über ein terrestrisches Netz, z.B. das Telefonnetz, gelenkt werden (Bild 2-9, Fall a). Besitzt das System ISLs, dann kann man den Zielsatelliten direkt erreichen (Bild 2-9, Fall b). Dadurch werden Uplinks und Downlinks von bzw. zu GW-Bodenstationen entlastet. Untersuchungen von Verkehrslenkungsalgorithmen finden sich in [13], [28] und [100]. Ein weiterer Vorteil von ISLs ist, daß man die Anzahl von GW-Bodenstationen reduzieren kann, da ein Satellit, der momentan keine Verbindung zu einer GW-Station hat, jederzeit über ISLs erreicht werden kann. Dies ist besonders bei LEO-Systemen von Vorteil, da der Raumwinkel des Gebietes, den eine Bodenstation beobachten kann, von der Flughöhe abhängig ist (siehe Bild 2-10).

2.6 Eigenschaften von Funkübertragungsstrecken in Satellitensystemen

Das mit der zu übertragenden Information modulierte HF-Signal durchläuft in einem Satellitensystem folgende Komponenten:

- Sendeverstärker

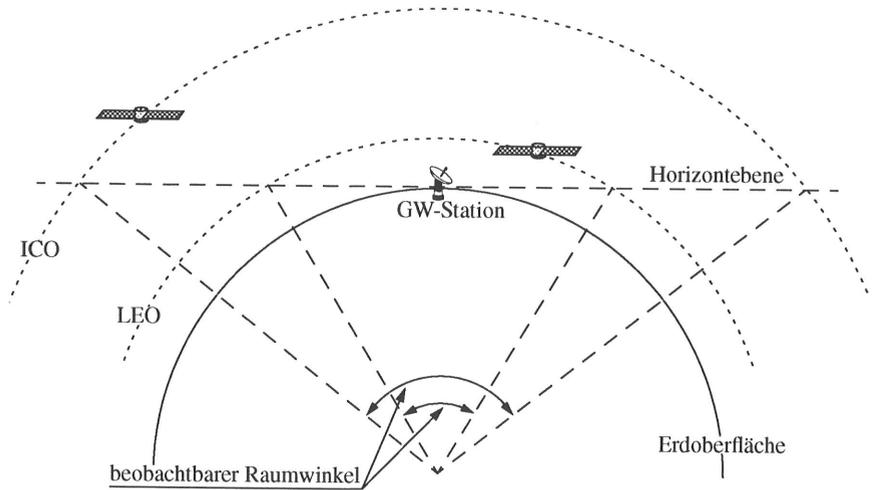


Bild 2-10: Von einer Bodenstation aus beobachtbarer Raumwinkel einer LEO- bzw. ICO-Umlaufbahn

- Sendeantenne
- Übertragungsstrecke (verläuft teilweise innerhalb der Atmosphäre)
- Empfangsantenne
- Empfangsverstärker.

Jede dieser Komponenten kann dem HF-Signal Störungen in Form von Rauschen oder Interferenz überlagern. In den folgenden Abschnitten werden einige Eigenschaften dieser Komponenten sowie die auf sie wirkenden Störgrößen beschrieben.

2.6.1 Richtwirkung von Sende- und Empfangsantennen

Eine der wichtigsten Eigenschaften einer Funkübertragungsstrecke innerhalb eines Satellitensystems ist die gebündelte Signalabstrahlung bzw. der richtungsselektive Empfang. Dadurch ist es möglich, die Empfangbarkeit eines von einem Satelliten ausgestrahlten Richtstrahls auf ein bestimmtes geographisches Gebiet zu beschränken. Durch diese Maßnahme können Frequenzbänder mehrfach genutzt werden. Gleichzeitig steigt auch die beim Empfänger eintreffende Leistung. Den Bündelungseffekt nutzen auch die Multibeam-Systeme.

Die Bündelung wird durch Verwendung von Parabol- oder *Phased Array*-Antennen [68, 96, 109] erreicht. Bei beiden Antennenarten erhält man in der Hauptrichtung das sogenannte Hauptmaximum der Sendeleistung bzw. der Empfindlichkeit. Gleichzeitig erhält man mehrere

Nebenmaxima, die auf Randeffekte aufgrund der endlichen Größe der Antennen zurückzuführen sind.

2.6.2 Sende- und Empfangsleistung

Die von der Empfangsantenne empfangene Leistung hängt von folgenden Faktoren ab (siehe auch [68]):

- Ausgangsleistung des HF-Leistungsverstärkers
- Verluste zwischen HF-Leistungsverstärker und Sendeantenne
- maximaler Gewinn der Sendeantenne
- Verluste durch nichtoptimale Ausrichtung der Antennen aufeinander
- Verluste beim Durchlaufen der Atmosphäre
- Verluste beim Durchlaufen von Regengebieten
- Ausbreitungsverlust
- maximaler Gewinn der Empfangsantenne

Der Gewinn einer Antenne ist definiert als das Verhältnis der abgestrahlten Leistung pro Raumwinkel in einer gegebenen Richtung zur Leistung pro Raumwinkel einer isotrop abstrahlenden, d.h. omnidirektionalen Antenne. Der maximale Gewinn einer Antenne wird in Richtung des Hauptmaximums der abgestrahlten Sendeleistung gemessen. Der Gewinn einer Parabolantenne ist proportional zu ihrem Wirkungsgrad und den Quadraten ihres Durchmessers und der Sende- bzw. Empfangsfrequenz. Typische Werte sind 30 ... 50 dB für geostationäre Satelliten. Bei Mobilfunksatellitensystemen kann auf der Seite der mobilen Endgeräte aus naheliegenden Gründen keine große Parabolantenne mit starker Richtungswirkung verwendet werden. Omnidirektional abstrahlende Antennen besitzen einen Antennengewinn von 0 dB.

Der Ausbreitungsverlust ist definiert als das Verhältnis von gesendeter zu empfangener Leistung bei isotrop abstrahlenden Antennen. Er ist proportional zu den Quadraten des Abstandes der Antennen und der Sende- bzw. Empfangsfrequenz. Der bei weitem bedeutendste Anteil der Gesamtleistungsbilanz eines Satellitensystems ist der Ausbreitungsverlust. Für einen geostationären Satelliten liegt er bei ca. 200 dB.

Verluste durch die nichtoptimale Ausrichtung der Antenne treten immer dann auf, wenn eine Bodenstation nicht im Zentrum des durch einen Satellitenrichtstrahl abgedeckten Gebietes sitzt oder wenn die beteiligten Antennen nicht genau aufeinander ausgerichtet sind. Hierfür sind Verluste von 3 dB typisch. Je größer der Antennengewinn ist, desto größer ist auch die Richtwirkung der Antenne und desto genauer müssen die Antennen aufeinander ausgerichtet sein. Bei relativen Bewegungen von Satellit und Bodenstation müssen die Antennen mit Hilfe

eines Regelkreises oder durch geometrische Berechnungen aufgrund der Kenntnis der Positionen von Bodenstation und Satellit nachgeführt werden.

Die Sendeleistung der HF-Leistungsverstärker hängt vorrangig von der Stromversorgung ab. Ein Leistungsverstärker eines Satelliten bezieht seine Energie üblicherweise aus einer Batterie, die von Sonnenkollektoren aufgeladen wird. Bewegt sich der Satellit durch den Erdschatten, dann entfällt die Nachladung der Batterien. Aufgrund der begrenzten Leistung der Satellitenstromversorgung sind Sendeleistungen in der Größenordnung von wenigen Watt üblich. Stationäre Bodenstationen können an das terrestrische Stromnetz angeschlossen werden. Deshalb sind hier Sendeleistungen um 100 Watt möglich und üblich. Tragbare Satellitenmobilfunkgeräte sind auf die Stromversorgung durch eine Batterie angewiesen, wodurch die mögliche Sendeleistung eingeschränkt ist. Gleichzeitig dürfen aus physiologischen Gründen bestimmte Grenzwerte der Sendeleistung nicht überschritten werden. Hier sind Leistungen von ca. einem Watt üblich.

2.6.3 Signallaufzeit

Die Signallaufzeit zwischen Bodenstation und Satellit ist proportional zu deren Abstand und zur Lichtgeschwindigkeit $c \approx 300000 \text{ km/s}$. Bei einem GEO-Satelliten mit einer Höhe von $h_{\text{GEO}} = 35786 \text{ km}$ beträgt sie mindestens 119,3 ms, falls sich der Satellit genau über der Bodenstation befindet. Als Ausbreitungsverzögerung (*engl. Round Trip Propagation Time*) wird die Zeit definiert, die ein Signal zwischen dem Aussenden und dem Empfang durch eine Bodenstation benötigt. Bei einem GEO-Satelliten beträgt die Ausbreitungsverzögerung mindestens 238,6 ms. Bei einer Kommunikation zwischen zwei Bodenstationen ist die Antwortzeit zwischen dem Absenden einer Meldung und dem Eintreffen der Antwort immer größer als die zweifache Ausbreitungsverzögerung, d.h. rund 500 ms. Diese Zeitverzögerung kann eine Sprachkommunikation empfindlich stören. Bei einer paketierten Datenübertragung mit Queue-Mechanismus kann diese Zeitverzögerung zwischen dem Absenden eines Paketes und dem Eintreffen der Empfangsbestätigung den mittleren Durchsatz begrenzen (siehe [129]).

2.6.4 Störeffekte

Die im folgenden beschriebenen Störeffekte haben Abweichungen des im Empfänger rekonstruierten Basisbandsignals vom Originalsignal zur Folge. Dadurch verringert sich bei Übertragung von analogen Signalen die Signalqualität. Bei digitalen Signalen entstehen Bitfehler, die durch zusätzliche Maßnahmen wie z.B. fehlerkorrigierende Codes oder Erkennung und Wiederholung fehlerhafter Datenpakete behoben werden müssen. Durch die genaue Kenntnis dieser Störeffekte lassen sich Kanalmodelle herleiten, mit deren Hilfe Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet werden können (siehe z.B. [66]):

- Rauschen entsteht in allen signalbearbeitenden und -transportierenden Baugruppen des Satellitensystems. Rauschsignale werden aber auch durch die Antennen empfangen, falls Rauschquellen im Sichtbereich der Antenne liegen. Eine Satellitenantenne empfängt vorrangig Rauschquellen von der Erdoberfläche und über die Nebenmaxima der Antennencharakteristik auch Hintergrundrauschen aus dem Weltall. Eine Antenne einer Bodenstation empfängt vorrangig Rauschen über das Hauptmaximum, d.h. Hintergrundrauschen aus dem Weltall und Rauschen aus der Atmosphäre und aus meteorologischen Formationen wie Nebel und Wolken. Über ihre Nebenmaxima empfängt eine Antenne einer Bodenstation auch Rauschen von terrestrischen Quellen. Grundsätzlich sind alle absorbierenden Medien (Luft, Wolken) auch Rauschquellen.
- Regengebiete, die vom HF-Signal durchlaufen werden, verursachen eine Signalabschwächung und eine teilweise Drehung der Polarisationsrichtung. Durch letztere können sich zwei HF-Signale, die orthogonal polarisiert sind, aber dieselbe Trägerfrequenz benutzen, gegenseitig stören.
- Die Atmosphäre besitzt einen u. a. von der Höhe abhängigen Brechungsindex. Der Brechungsindex kann sich lokal sehr schnell ändern, wodurch die Signallaufzeit und die Richtung der Signalausbreitung gestört werden kann. Die Ionosphäre verdreht zusätzlich die Polarisationsrichtung des Signals.
- Interferenz entsteht durch Überlagerung des HF-Nutzsignals mit HF-Signalen fremder Sender mit gleicher oder ähnlicher Trägerfrequenz. Sie werden z.B. verursacht durch Einstreuungen aus terrestrischen Richtfunkstrecken, falls das Nebenmaximum des Gewinns der Richtfunktendeanenne auf den Satelliten ausgerichtet ist.
- Intermodulationen entstehen durch nichtlineare HF-Verstärkerkennlinien. Sie treten immer dann auf, wenn eine Summe mehrerer HF-Signale verstärkt wird. Diese Situation ist in jedem Nachrichtensatelliten und in jeder Bodenstation gegeben, falls mehrere Sendekanäle bereitgestellt und mittels FDMA übertragen werden. Intermodulationen können verringert werden, falls man nur den weitgehend linearen Teil der HF-Verstärkerkennlinie nutzt. In diesem Fall wird allerdings die Sendeleistung des HF-Verstärkers stark verringert. Intermodulationen entstehen bei Frequenzen, die Summen von ganzzahligen Vielfachen der verstärkten Trägerfrequenzen entsprechen. Intermodulationen verursachen vor allem gegenseitige Störungen der Kanäle einer Satellitenübertragungsstrecke.
- Durch die mit steigender Frequenz zunehmende Neigung des ausgesendeten HF-Signals, sich wie Licht zu verhalten, entstehen Abschattungen, falls sich z.B. Gebäude in der Sichtlinie zwischen Bodenstation und Satellit befinden. Dieser Störeffekt muß besonders bei mobilen, bewegten Bodenstationen beachtet werden. Um eine Verbindung trotz solcher Störungen aufrechtzuerhalten, muß eine Verbindung bei Abschattungen auf einen anderen, besser empfangbaren Satelliten umgeschaltet werden (*engl. Handover*).

- Multipath-Effekte entstehen durch mehrfachen Empfang desselben HF-Signals durch eine Bodenstation. Der Mehrfachempfang wird durch die Spiegelung des HF-Signals an Gebäuden oder Bergen verursacht. Durch die Differenz des Weges, den die unterschiedlichen Signale zurückgelegt haben, können Signalabschwächungen entstehen, die sehr stark vom Standort der Bodenstation abhängig sind. Abhilfe kann z.B. durch die Verwendung mehrerer Antennen oder durch die Erhöhung der Richtwirkung der Empfangsantenne der Bodenstation geschaffen werden.
- Der Doppler-Effekt entsteht durch die Bewegung des Satelliten und bewirkt für den Satelliten eine scheinbare Veränderung der Sendefrequenz einer Bodenstation und für die Bodenstation eine scheinbare Veränderung der Sendefrequenz des Satelliten. Der Doppler-Effekt ist besonders bei niedrigfliegenden Satelliten durch die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Satelliten und Bodenstationen von Bedeutung.
- Durch Bahnstörungen der Satellitenumlaufbahn ist es möglich, daß ein Satellit nicht genau an der berechneten Stelle angetroffen wird. Eine auf Bahnberechnungen beruhende Ausrichtung der Antenne einer Bodenstation kann daher ungenau sein.

2.6.5 Frequenzbänder

Frequenzbänder für die Satellitenkommunikation, besonders für die Mobilkommunikation über LEO- und ICO-Satellitensysteme, müssen global vereinbart werden. Dies geschieht in Konferenzen mit weltweiter Beteiligung (*World Administrative Radio Conferences, WARC*) unter der Leitung der ITU (*International Telecommunications Union, früher Comité Consultatif International des Radiocommunications, CCIR*). Tabelle 2-2 zeigt die zur Zeit in der Kommunikation über Nachrichtensatelliten genutzten Frequenzbänder.

Name	Frequenzbereich		Vorwiegende Nutzung
	Uplink	Downlink	
C-Band	6 GHz	4 GHz	ältere Nachrichtensatelliten
X-Band	8 GHz	7 GHz	Verwaltungen, Regierungen
Ku-Band	14 GHz	12 GHz	heutige Nachrichtensatelliten
Ka-Band	30 GHz	20 GHz	Experimentelle Systeme
L-Band	1,6 GHz	1,5 GHz	Heutige Systeme für Mobilkommunikation über Satelliten

Tabelle 2-2: Zur Zeit in der Satellitenkommunikation genutzte Frequenzbänder [68]

Bei der WARC-93 wurde beschlossen, sofort die beiden jeweils 16,5 MHz breiten und zur Zeit für RDSS (*Radio Determination Satellite System, Positionsbestimmung über Satelliten*) genutzten Frequenzbänder zwischen 1,6100 GHz ... 1,6265 GHz (L-Band) und zwischen

2,4835 GHz ... 2,5000 GHz (S-Band) für mobile Satellitendienste über LEO- bzw. ICO-Systeme freizugeben. Ab 2005 kommen zwei weitere Frequenzbänder mit einer Breite von jeweils 30 MHz (1,980 GHz ... 2,010 GHz und 2,170 GHz ... 2,200 GHz) dazu. Die für Satellitenkommunikation schon früher freigegebenen Frequenzbänder können ebenfalls genutzt werden, sind aber zum Teil schon stark ausgelastet (siehe auch [7]). Beispiele für die in geplanten LEO- und ICO-Systemen genutzten Frequenzbänder finden sich in [7] und [124].

2.6.6 Bandbreite- und leistungsbegrenzte Kanäle

In Satellitensystemen ist die begrenzende Ressource oftmals nicht die zur Verfügung stehende Bandbreite, sondern die Sendeleistung. Dieser Sachverhalt leuchtet für Satelliten mit begrenztem Energiehaushalt unmittelbar ein. Doch auch bei mobilen Endgeräten, die aus einer Batterie gespeist werden, ist die Sendeleistung begrenzt. Bei den üblichen Mehrfachzugriffsverfahren wie FDMA und TDMA wird relativ viel Sendeleistung benötigt, damit der Pegelabstand zwischen dem übertragenen Signal und dem allgegenwärtigen Rauschen groß genug ist. Dabei hat TDMA noch den zusätzlichen Nachteil des unterbrochenen Betriebes. Dadurch ist die während eines TDMA-Bursts benötigte Spitzsendeleistung oft wesentlich höher als die mittlere Sendeleistung. Bei CDMA wird im Gegensatz zu FDMA und TDMA die ursprünglich benötigte Bandbreite um ein Vielfaches erweitert (*engl. Spread Spectrum*). Durch diese Maßnahme kann die Sendeleistung stark reduziert werden. Weiterhin ist ein gleichzeitiger Betrieb mehrerer Systeme auf demselben Frequenzband möglich, falls sie andere Codes benutzen. Durch die Erweiterung der zur Signalübertragung benötigten Bandbreite kann das HF-Nutzsignal auch schwächer sein als das gleichzeitig empfangene bzw. erzeugte Rauschen. Dadurch ist das CDMA-Verfahren äußerst störunempfindlich (siehe auch [3], [4], [5], [14], [42], [80] und [109]).

2.7 Multiplexverfahren

Im folgenden werden Multiplexverfahren beschrieben, die eine Mehrfachnutzung einer Übertragungsstrecke (Funkstrecke, Kupfer- oder Glasfaserkabel) ermöglichen (siehe auch [5], [68], [97], [109] und [112]). Die Übertragungsstrecke faßt eine Anzahl von Kanälen zusammen, die beim Empfänger wieder getrennt werden können. Ein Kanal ist einer Verbindung zwischen zwei Kommunikationseinrichtungen, z.B. zwei Endgeräten oder zwei Vermittlungsknoten zugeordnet. Er ist durch eine physikalische Größe (Richtung, Frequenzband, Zeitlage, Code) eindeutig gekennzeichnet. Verbindet die Übertragungsstrecke zwei Vermittlungsknoten, kann der Kanal in Subkanäle unterteilt sein, die den Vermittlungsknoten verborgen bleiben (d.h. gemeinsam vermittelt werden). Subkanäle können durch andere Multiplexverfahren erzeugt werden. Kombinationen von Multiplexverfahren, bei denen ein Kanal durch mehrere physikalische Größen beschrieben wird, sind ebenfalls üblich. In den folgenden Abschnitten wird besonders auf die Gegebenheiten von Uplink und Downlink eingegangen. Bild 2-11 zeigt alle

in der Satellitentechnik üblichen und in den folgenden Abschnitten erklärten Multiplexverfahren am Beispiel des Uplink.

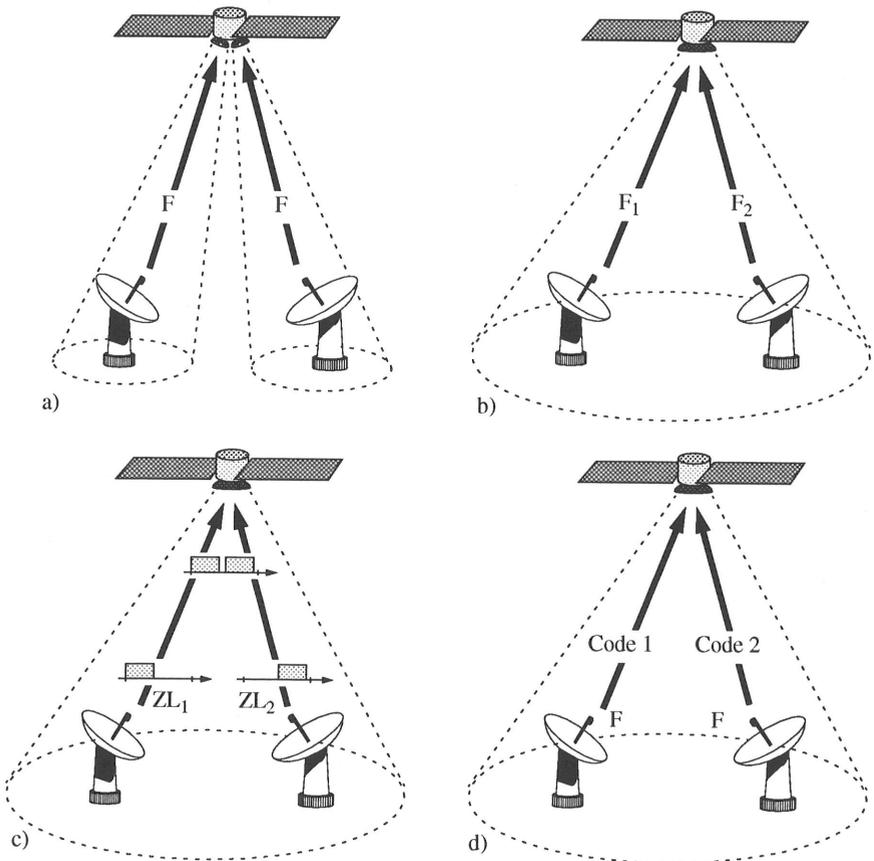


Bild 2-11: In der Kommunikationstechnik über Nachrichtensatelliten übliche Multiplex-
techniken am Beispiel des Uplink: a) Raummultiplex (SDMA), b) Frequenzmultiplex
(FDMA), c) Zeitmultiplex (TDMA), d) Codemultiplex (CDMA),
 F = Trägerfrequenz, ZL = Zeitlage

2.7.1 Raummultiplex

Raummultiplex (*engl. Space Division Multiple Access, SDMA*, siehe [50, 92]) wird in der Satellitenkommunikation zur Erhöhung der nutzbaren Kapazität bei vorgegebener Bandbreite auf Uplink und Downlink verwendet. Der sogenannte Multibeam-Satellit ist hierbei in der Lage, HF-Signale gleicher Frequenz und Polarisation, die aus verschiedenen Richtungen ein-

treffen, zu trennen (Uplink) bzw. HF-Signale mit gleicher Frequenz und Polarisation stark gebündelt auszustrahlen, so daß bei den adressierten Bodenstationen jeweils nur ein Signal empfangen werden kann (Downlink). Zur Auftrennung der einzelnen Kanäle muß die Empfangsantenne des Satelliten richtungsselektiv empfangen (siehe Bild 2-11a). Dies kann durch mehrere richtungsselektive Einzelantennen oder durch eine *Phased Array*-Antenne (siehe [68], [96] und [109] sowie Abschnitt 2.3.4) realisiert werden. Eine Erhöhung der Anzahl der SDMA-Kanäle kann durch eine Verkleinerung der Empfangs- bzw. Sendegebiete eines SDMA-Kanals erreicht werden. Allerdings wird dadurch eine bessere Fokussierung der Richtstrahlen und eine präzisere Ausrichtung und Nachführung von Sende- und Empfangsantennen notwendig.

Durch sogenannte *Scanning Beams* kann Raum- und Zeitmultiplex miteinander kombiniert werden. Dabei besucht jeder Uplink- bzw. Downlink-Richtstrahl nach einem bestimmten periodischen Muster einzelne Gebiete auf der Erdoberfläche. Ein Beispiel für die Anwendung von Scanning Beams ist der *Advanced Communications Technology Satellite (ACTS)* [32, 77].

2.7.2 Frequenzmultiplex

Eine Übertragungsstrecke wird beim Frequenzmultiplex (*engl. Frequency Division Multiple Access, FDMA*) in Kanäle unterteilt, denen verschiedene Frequenzbereiche zugeordnet sind (siehe Bild 2-11b). Die Kanäle müssen durch Schutzfrequenzbänder getrennt sein, um Interferenz zwischen Nachbarkanälen durch Ungenauigkeiten der verwendeten Oszillatoren und Filter zu verhindern. Deshalb sinkt der maximal mögliche Durchsatz eines gegebenen Frequenzbandes bei Erhöhung der Anzahl der Kanäle bei gleichzeitiger Verkleinerung der Kanalbandbreite. Wird ein FDMA-Signal durch einen HF-Verstärker verstärkt, treten durch Nichtlinearitäten der Verstärkerkennlinie Intermodulationsprodukte auf, die Störsignale in alle Nutzfrequenzbänder des FDMA-Signals einstreuen können. Die Trennung der einzelnen Kanäle beim Empfänger geschieht durch Bandpaßfilterung des HF-Signals. Die Stationen müssen nicht synchronisiert sein. Die Übertragungsrate kann durch Änderung der Bandbreite der einzelnen Frequenzbänder an das Angebot angepaßt werden.

2.7.3 Zeitmultiplex

Beim Zeitmultiplex (*engl. Time Division Multiple Access, TDMA*) müssen alle sendenden Stationen synchronisiert sein. Jedem Kanal wird innerhalb eines sich periodisch wiederholenden Zeitbereiches (Rahmen) eine Sendezeit (Zeitschlitz) zugewiesen, deren Dauer und Lage relativ zum Rahmenbeginn während einer Verbindung konstant bleibt (siehe Bild 2-11c). Die einzelnen Zeitschlitze müssen durch Schutzzeiten voneinander getrennt sein, um Ungenauigkeiten in der Position der Zeitschlitze auszugleichen. Dadurch sinkt der maximal mögliche Durchsatz bei Erhöhung der Anzahl der Kanäle. TDMA eignet sich nur für Basisbandsignale, die in der

sendenden Station für die Dauer eines Rahmens speicherbar sind. Diese Forderung wird von digitalen Signalen erfüllt. Analoge Basisbandsignale (z.B. Sprache) müssen zuerst digitalisiert und zu Datenpaketen von der Dauer eines Zeitschlitzes zusammengefaßt werden. Durch die Paketierung entstehen zusätzliche Verzögerungen. Bei TDMA müssen die Stationen in der Lage sein, in den ihnen zugeordneten Zeitschlitz mit der vollen Übertragungsrate zu senden (*engl. Burst*). In der restlichen Zeit des Rahmens muß die Station ihre Sendung unterbrechen. Die Trennung der Kanäle beim Empfänger geschieht durch Empfang der relevanten Zeitschlitz und durch Ignorieren des restlichen Rahmens. Ist die Wiederherstellung eines kontinuierlichen Datenstromes erforderlich, müssen die empfangenen Zeitschlitz zwischengespeichert und mit einer konstanten Bitrate ausgelesen werden. Vorteilhaft für Satellitenübertragungsstrecken ist, daß nur eine Trägerfrequenz verwendet wird und die entstehenden Intermodulationsprodukte nicht in das Nutzfrequenzband fallen. Der HF-Sendeverstärker kann deshalb nahe der Sättigung betrieben werden.

2.7.4 Codemultiplex

Die bisher beschriebenen Verfahren sind anfällig für Interferenz durch Einstreuungen anderer Sender in das benutzte Frequenzband. Aus Effizienzgründen wird versucht, das HF-Signal so schmalbandig wie möglich zu machen. Dadurch kann die Leistung eines störenden schmalbandigen Senders leicht eine Toleranzschwelle überschreiten, falls sich die beiden Frequenzbereiche überlappen. Beim Codemultiplex (*engl. Code Division Multiple Access, CDMA*, siehe [52]) wird das digitale Basisbandsignal zunächst durch Multiplikation mit einem sich periodisch wiederholenden Codesignal mit möglichst geringer Autokorrelation breitbandiger gemacht (siehe Bild 2-11d). Die Bitrate des Code, die sogenannte Chiprate, beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Bitrate des Nutzsignals und ist mit dem Nutzsignal synchronisiert. Das ursprüngliche Spektrum wird im Verhältnis von Chiprate zu Nutzbitrate gedehnt. Dadurch wird auch das HF-Signal um denselben Faktor breitbandiger. Die Leistung des Senders wird also auf ein breiteres Frequenzband verteilt. Alle sendenden Stationen der betrachteten CDMA-Übertragungsstrecke benutzen dasselbe Frequenzband aber andere Codes mit einer möglichst geringen Kreuzkorrelation. Die Trennung der Kanäle geschieht durch erneute chip-synchrone Multiplikation des empfangenen Signals mit den verschiedenen Codesignalen. Dadurch werden die Spektren der Störsignale bzw. die Signale der anderen Benutzer der Übertragungsstrecke gedehnt, d.h. die Störleistung verteilt sich auf einen sehr großen Frequenzbereich. Das Nutzsignal wird durch die erneute Multiplikation rekonstruiert (siehe Bild 2-12). Die Störleistung, die in den schmalen Frequenzbereich des Nutzsignals fällt, ist sehr klein. Falls die Autokorrelation der verwendeten Codes klein ist, dann werden auch Störungen durch Mehrwegeempfang wirksam unterdrückt. CDMA eignet sich wegen der kleinen benötigten Sendeleistung und der Unterdrückung des Mehrwegeempfangs besonders für Mobilkommunikation über Satelliten.

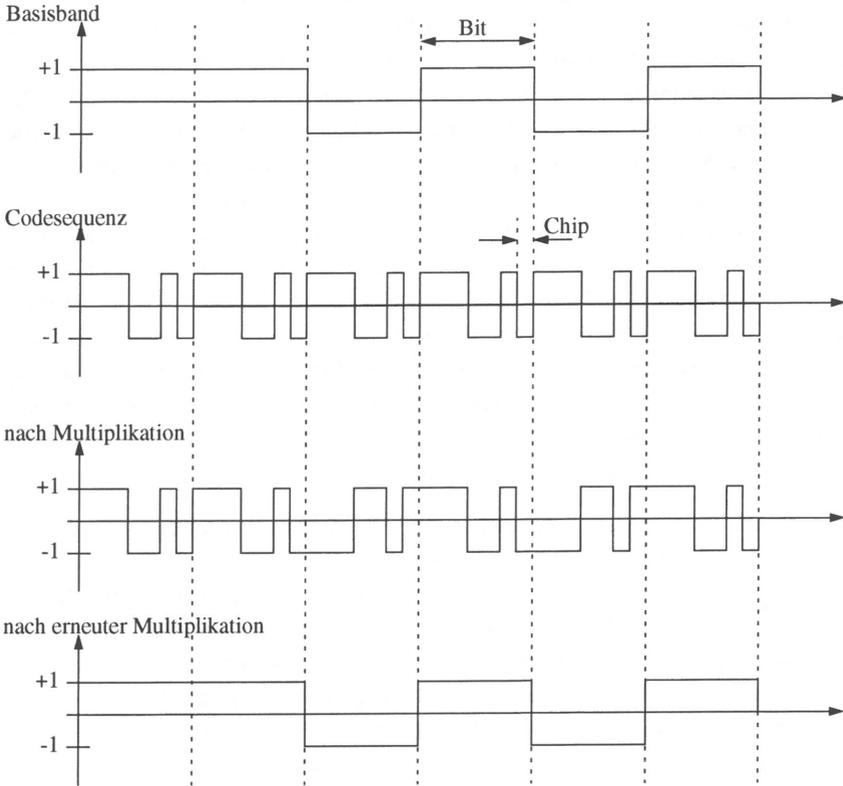


Bild 2-12: Prinzip des Codemultiplex: Basisbandsignal, Codesequenz, Basisbandsignal nach der Multiplikation mit der Codesequenz und Rekonstruktion des Basisbandsignals durch erneute Multiplikation des empfangenen Signals mit der Codesequenz

2.8 Zugriffsverfahren

Die Entwicklung der Zugriffsverfahren für Satelliten-Links begann mit dem Wunsch, die mit fest vorgegebener Kapazität durchgeschalteten Verbindungen zwischen den einzelnen Bodenstationen schneller an das aktuelle Verkehrsaufkommen anpassen zu können. Die Satellitenkanäle waren fest zugeordnet (*engl. Fixed Assignment*). Die Zuordnung konnte nur mit Hilfe der Kontrollstation (TTC, siehe Bild 2-3 und Unterkapitel 2.3) durch einen Operator in größeren Zeitabständen geändert werden [5].

In einem ersten Schritt wurde die feste Kanaluordnung durch flexiblere DAMA-Zugriffsverfahren ersetzt (*DAMA = Demand Assignment Multiple Access*, [5]). Bei diesen Verfahren werden zunächst allen Stationen gleich viele Kanäle zugeordnet. Bei Laständerungen teilen die

Bodenstationen ihr aktuelles Angebot einer Kontrollstation durch Inband-Signalisierung mit. Die Kontrollstation vergibt alle vorhandenen Kanäle entsprechend einem vorgegebenen Algorithmus, z.B. proportional zum Angebot der einzelnen Stationen. Jede Station bekommt aber mindestens einen freien Kanal zugeteilt. Ist das Gesamtangebot aller Stationen kleiner als die Systemkapazität, dann verfügt jede Station über freie Kanäle, die sofort durch neu eintreffende Rufe belegt werden können, ohne daß zusätzliche Verzögerungen durch Verbindungsaufbauzeiten im Satellitensystem auftreten. DAMA eignet sich für ortsfeste Bodenstationen, die den Verkehr mehrerer Quellen konzentrieren. DAMA kann sowohl für Paket- als auch für Durchschaltvermittlung verwendet werden. Dabei kann eine durchschaltvermittelte Verbindung mehrere Kanäle umfassen [121]. Da den einzelnen Stationen meist mehr Kanäle als beantragt zugewiesen werden, können für Sprachverbindungen auch redundanzreduzierende Verfahren wie *Time Assignment Speech Interpolation (TASI)* oder *Digital Speech Interpolation (DSI)* verwendet werden, die selbst bei einer konstanten Anzahl von Verbindungen einen schwankenden Bedarf an Kanälen erzeugen (siehe [33, 93]). Die maximale Anzahl aller Stationen darf die Anzahl der vorhandenen Kanäle nicht überschreiten.

Durch die Einschränkung der maximalen Anzahl aller Bodenstationen eignet sich DAMA nicht für Satellitensysteme mit einer großen Anzahl von Bodenstationen, die jeweils nur sehr wenig Verkehr generieren, wie z.B. Mobilfunksatellitensysteme. Hier muß, im Falle von Durchschaltvermittlung, für jeden eintreffenden Ruf Übertragungskapazität reserviert werden, die sofort nach dem Ende der Verbindung wieder an das System zurückgegeben wird. Die Signalisierung kann nicht über einen Nutzkanal erfolgen, da zum Zeitpunkt des Auftretens eines Verbindungswunsches keine Verbindung zum Satellitensystem besteht. Dieser Vorgang wird Erstzugriff (*engl. Initial Access*) genannt. Die zum Aufbau einer Verbindung notwendigen Signalisiermeldungen müssen über einen Signalisierkanal an die Kontrollstation bzw. an den Satelliten übermittelt werden. Bei den dafür notwendigen Zugriffsverfahren muß berücksichtigt werden, daß die Bodenstationen nur über den bzw. die Satelliten über den aktuellen Zustand des Gesamtsystems unterrichtet werden können. Dadurch können Zugriffs Konflikte entstehen, die durch das Zugriffsverfahren aufgelöst werden müssen. Die Zugriffsverfahren können auch für die Übermittlung kurzer Datenpakete verwendet werden. Im folgenden sind immer beide Anwendungsmöglichkeiten gemeint, wenn von Datenpaketen und vom Datenkanal die Rede ist.

Es können zwei grundsätzliche Arten von Zugriffsverfahren unterschieden werden. Beim Zugriff durch Reservierung wird zunächst auf einem speziellen Reservierungskanal Übertragungskapazität für ein Datenpaket beantragt. Die Reservierungsanforderung ist verglichen mit der Länge eines Datenpaketes sehr kurz. Der Reservierungskanal kann deshalb eine sehr kleine Übertragungskapazität besitzen. Wurde die Reservierungsanforderung erfolgreich übertragen, dann bekommt die sendewillige Station einen Zeitpunkt mitgeteilt, zu dem sie ihr Datenpaket übertragen darf. Während der Datenübertragung darf die betrachtete Station den Datenkanal

exklusiv belegen. Die Auflösung von Zugriffskonflikten wird beim Zugriff durch Reservierung auf den langsamen Reservierungskanal verlegt, um den schnellen Datenkanal nicht mit den Kollisionsauflösungen zu belasten. Die kleinstmögliche Verzögerungszeit beträgt beim Zugriff durch Reservierung zwei Umlaufverzögerungen, falls die Kanalzuteilung durch den Satelliten erfolgt. Im ersten RTD wird Übertragungskapazität beantragt. Das Datenpaket selbst wird im zweiten RTD übertragen. Der Datenkanal kann, abgesehen von notwendigen Schutzzeiten zwischen den Paketen, zu 100% ausgenutzt werden.

Beim wahlfreien Zugriff senden Stationen eintreffende Pakete sofort aus. Dadurch kann es zu Kollisionen mit Paketen anderer, gleichzeitig sendender Stationen kommen. Kollidierte Pakete müssen wiederholt werden. Die Gefahr von Kollisionen steigt stark mit dem Gesamtangebot aller Stationen an. Die maximal mögliche Auslastung bei einem rein wahlfreien Kanalzugriff wird durch S-ALOHA (siehe Abschnitt 2.8.1) erreicht und beträgt $1/e = 36,8\%$. Die sich bei niedrigem Gesamtangebot einstellende minimale Übermittlungszeit für ein Datenpaket beträgt durch die Einsparung des Reservierungsvorganges allerdings nur ein RTD.

Durch Kombination dieser beiden grundlegenden Verfahren kann man versuchen, ihre Vorteile zu vereinen (siehe Bild 2-13 und [59]).

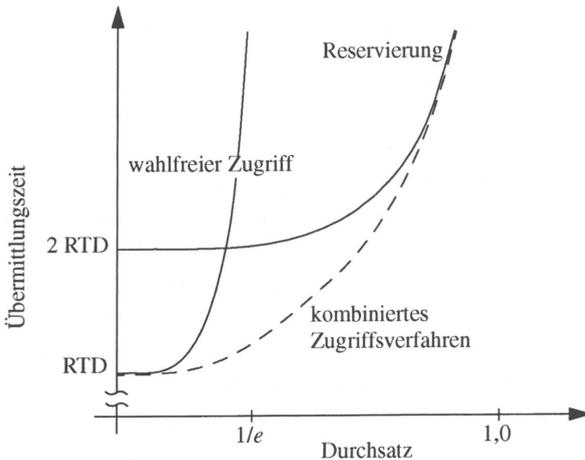


Bild 2-13: Prinzipieller Verlauf der Übertragungszeit als Funktion des Durchsatzes für wahlfreien Zugriff und Zugriff durch Reservierung sowie erwünschter Verlauf für ein kombiniertes Zugriffsverfahren

Oftmals werden in einem Satellitensystem mehrere Zugriffsverfahren integriert, ohne sie zu kombinieren, um sie an die Anforderungen unterschiedlicher Dienste (z.B. durchschaltvermittelte Sprachverbindungen, Übertragung kurzer Meldungen oder langer Pakete) anzupassen.

Die sendende Station kann das passende Zugriffsverfahren auswählen. Beispiele hierfür finden sich in [10], [12], [25], [61], [82].

In den folgenden Abschnitten 2.8.1 bis 2.8.3 werden einige in der Literatur veröffentlichte Zugriffsverfahren für Satellitensysteme kurz vorgestellt und klassifiziert. In Abschnitt 2.8.4 werden Kriterien zur Klassifikation der Zugriffsverfahren vorgestellt. Eine Tabelle mit der Klassifikation aller Zugriffsverfahren befindet sich im Anhang A3.

2.8.1 Wahlfreie Zugriffsverfahren

In [2] beschreibt Abramson das ursprünglichste wahlfreie Zugriffsverfahren *ALOHA* und seinen ersten Einsatz auf Hawaii. In [3] stellt derselbe Autor eine vereinheitlichte Darstellung des auf *ALOHA* basierenden Paketverteilendienstes vor. In [46] beschreibt Kleinrock die Anwendung und Analyse von *ALOHA* für Satellitensysteme. Mehravari [69] stellt wahlfreie Zugriffsverfahren dem reinen TDMA gegenüber. Lim stellt in [62] und [63] Leistungsuntersuchungen von wahlfreien Zugriffsverfahren bei Stationen mit Pufferspeicher vor. In [15], [37] und [87] untersuchen verschiedene Autoren wahlfreie Zugriffsverfahren für VSAT-Systeme. Das dynamische Verhalten nach Überlastsituationen wurde von Raychaudhuri durch Simulation untersucht [88]. Der sogenannte *Capture-Effekt*, bei dem die zentrale Station in manchen Fällen trotz Kollision eines der beteiligten Pakete empfangen kann, wird von Wieselthier [117] untersucht.

ALOHA eignet sich für den Datenaustausch weitläufig verteilter Stationen mit einer zentralen Station. Die verteilten Stationen senden ihre Datenpakete, sobald sie eintreffen. Dadurch ist es möglich, daß Kollisionen auftreten, falls sich die Datenpakete von zwei oder mehr Stationen überlappen. Die Datenpakete sind durch fehlererkennende Codes geschützt. Dadurch können kollidierte Datenpakete von der zentralen Station erkannt werden. Über einen Rückkanal wird den verteilten Stationen mitgeteilt, daß eine Kollision stattgefunden hat. Die beteiligten Stationen wiederholen ihre Pakete nach einer zufällig bestimmten Zeit, um Folgekollisionen zu verhindern (siehe Bild 2-14). Bei einer Paketwiederholung kann es wegen der unabhängigen Bestimmung der zufälligen Wartezeit durch die beteiligten Stationen natürlich zu erneuten Kollisionen mit wiederholten oder neu gesendeten Paketen kommen. Der maximale Durchsatz bei reinem *ALOHA* beträgt $1/2e = 18,4\%$.

Bei einer nur teilweisen Überlappung müssen bei *ALOHA* jeweils die gesamten Pakete wiederholt werden. Eine Wiederholung der überlappenden Teile eines Datenpaketes erlaubt *SREJ-ALOHA* (*SREJ* = *Selective Reject*, siehe [83, 86]). Hierzu wird das Datenpaket in kleine Teilpakete zerlegt. Jedes Teilpaket muß getrennt mit einem fehlererkennenden Code gesichert sein. Bei teilweiser Überlappung der Pakete müssen nur die betroffenen Teilpakete wiederholt werden. Dadurch läßt sich der Durchsatz des Zugriffsverfahrens je nach Größe der Teilpakete und je nach dem Mehraufwand für die fehlererkennenden Codes maximal verdoppeln. Verdoppeln

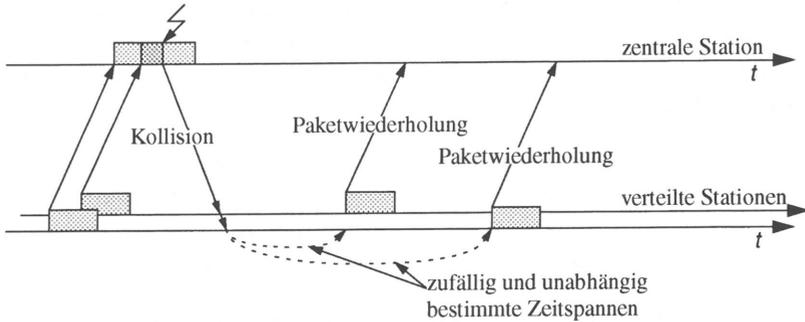


Bild 2-14: Zeitlicher Verlauf einer Kollisionsauflösung bei ALOHA

läßt sich der maximal mögliche Durchsatz auch, wenn dieses Zugriffsverfahren getaktet und mit Datenpaketen gleicher Länge betrieben wird. Bei *S-ALOHA (Slotted-ALOHA)* wird der Kanal in Zeitschlitze strukturiert, die jeweils ein Datenpaket aufnehmen können [2]. Bei einer Kollision überlappen sich die kollidierten Pakete vollständig. Eine teilweise Überlappung mit dem Verlust aller beteiligten Datenpakete tritt bei *S-ALOHA* nicht auf.

Die oben beschriebenen ALOHA-Verfahren verhalten sich grundsätzlich instabil: Sind sehr viele Pakete an Kollisionsauflösungen beteiligt, dann dauert es sehr lange, bis eines dieser Pakete erfolgreich übertragen wird. Im gleichen Zeitraum kann aber ein neu generiertes Paket eintreffen, das mit den an der Kollisionsauflösung beteiligten Paketen kollidiert. Dadurch vergrößert sich die Anzahl kollidierter Pakete. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Gesamtangebot. Das Gesamtangebot setzt sich zusammen aus dem Angebot an neu eintreffenden Paketen und dem Angebot an zu wiederholenden Paketen. Es wurden daher schon bald Verfahren vorgeschlagen, um die ALOHA-Zugriffsverfahren zu stabilisieren.

Bei den von Lam [56] vorgeschlagenen auf *S-ALOHA* basierenden Verfahren *Input Control Procedure (ICP)*, *Retransmission Control Procedure (RCP)* und *Input and Retransmission Control Procedure (IRCP)* wird das Gesamtangebot der verteilten Stationen durch Messung der Rate freier Zeitschlitze geschätzt. Bei Über- bzw. Unterschreitung von zwei verschiedenen Schwellwerten (Hysterese) werden je nach verwendetem Verfahren unterschiedliche Aktionen ausgelöst. Bei *ICP* werden neu eintreffende Pakete angenommen bzw. abgelehnt. Bei *RCP* wird zwischen zwei verschiedenen Werten für die mittlere Wartezeit zur Wiederholung kollidierter Pakete umgeschaltet. Bei *IRCP* werden beide Aktionen kombiniert. Kamal [38] erweitert die Verfahren um die *Closed Loop Control (CLC)*. Hier wird die Wiederhol- und die Rückweisewahrscheinlichkeit stufenlos so eingestellt, daß das geschätzte Gesamtangebot 100% beträgt. Mittal [71] stellt eine in der Theorie optimale Eingangskontrollprozedur vor, die auf der Anzahl der kollidierten Pakete im Gesamtsystem basiert. In der Praxis kann die Anzahl kollidierter Pakete allerdings nur geschätzt werden.

Controlled ALOHA nach van der Vleuten [110] schätzt ebenfalls das Gesamtangebot und versucht, den Kanal durch Verändern der Dauer des Wiederholintervalls optimal auszulasten. Das Wiederholintervall gibt die Zeitspanne an, innerhalb der ein vorher kollidiertes Paket gleichverteilt wiederholt wird.

Im *Near-Optimum Controlled Collision Channel* nach Paris [78] berechnen die verteilten Stationen nach jeder Kanalarückmeldung die Verteilungsfunktion sowie die Mindestanzahl der noch nicht aufgelösten Kollisionen. Daraus wird die optimale Wiederholwahrscheinlichkeit für kollidierte Pakete im nächsten Zeitschlitz berechnet.

Zur Herabsetzung der Wahrscheinlichkeit von Folgekollisionen kann die zentrale Station Senderechte an einzelne Stationen oder Gruppen von Stationen vergeben. Kleinrock [49] geht für sein getaktetes *URN-Zugriffsverfahren* davon aus, daß der Anteil der sendewilligen Stationen bekannt ist. Die zentrale Station berechnet daraus die optimale Anzahl von Stationen, denen die zentrale Station zyklisch Sendeerlaubnis erteilt.

Der *Independent Stations Algorithm (ISA)* nach Aicardi [6] versucht, die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung im nächsten Zeitschlitz zu optimieren. Dazu wird vorausgesetzt, daß die Wahrscheinlichkeit, daß eine Station ein neues Paket generiert, für alle Stationen gleich groß ist. Der Algorithmus wählt eine Gruppe von Stationen aus, die mit der größten Wahrscheinlichkeit genau ein Paket senden wollen. Dazu wird die der zentralen Station bekannte Vorgeschichte des Kanals berücksichtigt. Für hohe Auslastungen geht das Verfahren in ein reines *Round Robin* über, da immer nur genau einer Station Sendeerlaubnis gegeben wird.

Die Auflösung von Kollisionen läßt sich auch beschleunigen, wenn der Übermittlungskanal für neu ankommende Pakete gesperrt wird und die Stationen, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind, durch verschiedene Kriterien in immer feinere Gruppen aufgeteilt werden. Diese Verfahren nennt man *TCR-Verfahren (TCR = Tree Collision Resolution)*. Aufteilungskriterium kann die Ankunftszeit der kollidierten Pakete oder ein von den beteiligten Stationen bestimmter zufälliger Wert sein.

Zur Gruppe der TCR-Verfahren gehört das *S-ALOHA mit Intervall-Test* nach Mosley [73]. Die verteilten Stationen besitzen synchron laufende Uhren und versehen ihre eintreffenden Pakete mit einem Zeitstempel, der die Ankunftszeit des Paketes festhält. Die zentrale Station verbreitet über den Rückkanal ein Zeitintervall. Liegt die Ankunftszeit eines Paketes innerhalb dieses Zeitintervalls, dann darf es gesendet werden. Wird in einem Zeitintervall kein Paket oder genau ein Paket gesendet, dann wird das Intervall verschoben. Treten Folgekollisionen auf, wird das Intervall immer weiter halbiert.

Huang [31] beschreibt den *0.487 Contention Resolution Algorithm*. Er beruht auf dem Intervalltestverfahren. Bei einer Kollisionsauflösung werden durch die zentrale Station zwei Inter-

vallgrenzen veröffentlicht. Falls die Ankunftszeit eines Paketes innerhalb des veröffentlichten Intervalls liegt, darf die betreffende Station es wiederholen. Tritt eine erneute Kollision auf, wird das Intervall in zwei Teile zerlegt. Anstelle der Veröffentlichung der Intervallgrenzen können sie auch durch einen verteilten Algorithmus in allen Stationen synchron berechnet werden.

Jaquet [35] stellt das *MACHNET*-Zugriffsverfahren vor, das ebenfalls auf dem TCR-Prinzip basiert. Durch einen komplexen verteilt ablaufenden Algorithmus kann jede Station berechnen, wann sie ihr Paket senden darf. Geht das Angebot gegen 100%, dann geht das Verfahren in ein Polling-System über, bei dem alle aktiven Stationen nacheinander jeweils ein Paket senden.

Beim *Free Access Tree Algorithm* nach Oie [75, 76] ist der Kanal in Zeitschlitz strukturiert, die aus einem Datenteil und einem in Minizeitschlitz unterteilten Kopf bestehen. Ein neu eintreffendes Paket belegt immer den Datenteil und gleichzeitig einen der Minizeitschlitz. Tritt eine Kollision auf, dann werden pro belegtem Minizeitschlitz eine konstante Anzahl von Zeitschlitz vorgesehen, innerhalb denen diejenigen Stationen, die den betrachteten Minizeitschlitz benutzt hatten, ihre Paketübertragung wahlfrei wiederholen müssen. Erlaubt das Verfahren eine ternäre Rückmeldung für die Minizeitschlitz (frei, einfach belegt, mehrfach belegt), genügt es, wenn genau ein Zeitschlitz für eine Wiederholung zur Verfügung gestellt wird, falls genau eine Belegung im betrachteten Minizeitschlitz enthalten ist.

Zur Stabilisierung von wahlfreien Zugriffsverfahren kann man auch die maximale Anzahl von Wiederholungen kollidierter Pakete beschränken oder auf Paketwiederholungen ganz verzichten. Um trotzdem eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung zu erhalten, kann man die zu übertragenden Datenpakete durch fehlerkorrigierende Codes (*engl. Forward Error Correction, FEC*) sichern. Lam [55] schlägt mit seinem *Time Hopping / Frequency Hopping Multiple-Access Protocol* vor, einen (n, k) -Reed-Solomon-Code zu verwenden, bei dem k der n Subpakete, aus denen ein Datenpaket besteht, ausreichen, um die Originalinformation zu rekonstruieren. Durch Frequency Hopping und Time Hopping wird verhindert, daß sich automatisch alle überlappenden Subpakete von zwei gleichzeitig ausgesendeten Paketen gegenseitig zerstören.

Lauer [58] stellt mit dem *Collision Channel without Feedback (CCw/oFB)* ein Modell eines getakteten, wahlfrei zugänglichen Kanals ohne Paketwiederholung vor. Die Datenpakete werden mit FEC geschützt. Da die Störung durch andere Benutzer immer einen Zeitschlitz lang andauert, wird *Interleaving* angewandt. Interleaving entspricht dem in [55] vorgestellten Time Hopping. Dabei wird ein Paket in kleine Fragmente zerschnitten, die in charakteristischen aus orthogonalen Codes bestimmten Abständen gesendet werden.

Kim [44] schlägt ein Verfahren vor (*Frequency Hopped Spread Spectrum, FH/SS*), bei dem durch Frequency Hopping mehrere CDMA-Kanäle erzeugt werden. Die zu übertragenden Pakete sind durch einen (n, k) -Reed-Solomon-Code geschützt. Nachdem ein Paket k -mal wiederholt wurde, wird es als verloren gezählt und darf nicht mehr übertragen werden. In [45] werden von demselben Autor zwei Verbesserungen des Verfahrens vorgeschlagen. Ein Entscheider berechnet bei fehlerhaftem Empfang eines Symbols immer die wahrscheinlichste und die zweitwahrscheinlichste Möglichkeit. Bei den aus mehreren Symbolen bestehenden und durch fehlererkennende Codes (*engl. Frame Check Sequence, FCS*) geschützten Datenpaketen werden alle Alternativen der mehrdeutigen Symbole durchprobiert, bis Datenpaket und FCS zusammenpassen. Mit Hilfe der zweiten Verbesserung ist es möglich, Datenpakete, die sowohl bei der ersten Übertragung als auch bei der Wiederholung fehlerhaft empfangen wurden, durch Kombination der beiden empfangenen Frequenzmuster zu rekonstruieren.

Das *zweistufige ALOHA* nach Economopoulos [24] eignet sich für CDMA-Kanäle. Die Kanäle sind in Präambel- und Datenkanäle unterteilt. Nach dem Eintreffen eines neuen Paketes wird zunächst ein kurzes Signal auf einem der Präambelkanäle gesendet. Wurde die Präambel erfolgreich (d.h. unkollidiert) übertragen, dann darf das zugehörige Datenpaket auf einem der Datenkanäle gesendet werden.

Ein *mehrstufiges ALOHA* wird auch von Pountourakis [81] vorgeschlagen. Der getaktete Übertragungsweg besteht aus mehreren Kanälen. Hat eine Station einen Sendewunsch, dann sendet sie das Paket immer auf dem ersten Kanal. Tritt eine Kollision auf, dann wird das Paket wahlfrei auf einem der anderen Kanäle wiederholt. Zur Stabilisierung des Verfahrens ist die Wiederholwahrscheinlichkeit umgekehrt proportional zur Anzahl der kollidierten Pakete.

Durch *Spread-Aloha* nach Abramson [4] kann die Spitzenleistung, die zum Aussenden eines Paketes benötigt wird, durch Verwendung von CDMA stark reduziert werden, ohne daß die Kollisionswahrscheinlichkeit ansteigt. Das gleiche gilt für das von Makrakis [67] vorgestellte *Spread Slotted ALOHA*. Hier wird ein getakteter Kanal verwendet. Die zentrale Station kann nur eine begrenzte Anzahl von CDMA-Signalen dekodieren. Deshalb kommt es zu Kollisionen, falls zwei gleichzeitig sendende Stationen den gleichen Code verwenden oder falls zu viele Stationen gleichzeitig senden und nicht alle von der zentralen Station dekodiert werden können.

Eaves [23] schlägt für sein *ALOHA/TDM-Satellitensystem* vor, die gesamte zur Verfügung stehende Bandbreite optimal auf Uplink und Downlink zu verteilen. Der Uplink besteht aus mehreren FDMA-Kanälen und wird auf mehrere FDMA/TDM-Downlink-Kanäle vermittelt. Eine Verbesserung durch einen im Satelliten enthaltenen Pufferspeicher stellt Suda [99] vor. Chang [19, 20] erweitert das Verfahren, indem er die einzelnen Kanäle von Uplink und Downlink für räumlich getrennte Gebiete verwendet und im Satelliten Transponder Hopping zur Vermittlung einsetzt. Ähnlich ist auch das von Benelli [11] vorgestellte System *DSSki (Dynamic Switching*

Strategy, k, i). In [21], [34], [122] und [123] finden sich Leistungsuntersuchungen verschiedener Autoren für diese besonders für VSAT-Systeme geeignete Familie von Zugriffsverfahren.

Das von Lo [65] vorgeschlagene *Tone Sense Multiaccess Protocol with Partial Collision Detection (TSMA/PCD)* eignet sich nur für Systeme mit nahe beieinander stehenden Bodenstationen und für Datenpakete unterschiedlicher Länge. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird versucht, die Zeit vom Sendebeginn bis zur Entdeckung einer Kollision zu verringern. Gleichzeitig mit dem Sendebeginn eines Datenpaketes sendet die betreffende Station einen Belegton. Empfängt eine sendewillige Station einen Belegton, dann verschiebt sie das Ausenden des betreffenden Paketes. Bei gleichzeitigem Sendebeginn können Kollisionen unentdeckt bleiben. Dies kann durch *Multitone-TSMA/PCD* verhindert werden, da eine sendende Station einen von mehreren verschiedenen Belegttönen wählen kann und die Frequenz des Belegtones nach jedem Zeitschlitz ändert. Zur Analyse dieser Zugriffsverfahren kann man auf die bekannten Methoden zur Leistungsbewertung von *CSMA* (engl. *Carrier Sense Multiple Access*) zurückgreifen (siehe [91, 95]).

2.8.2 Zugriff durch Reservierung

Bei Zugriffsverfahren mit expliziter Reservierung signalisieren sendewillige Stationen ihren Bedarf an Übertragungskapazität über einen Reservierungskanal. Das einfachste Zugriffsverfahren dieser Familie besteht aus einem Reservierungskanal mit niedriger Übertragungskapazität und wahlfreiem Zugriff und dem Datenkanal mit hoher Übertragungskapazität. Es wurden allerdings schon sehr bald Verbesserungen vorgeschlagen, um den Zugriff auf den Reservierungskanal zu stabilisieren.

Am ähnlichsten ist diesem grundlegenden Zugriffsverfahren das *Distributed Reservation Control (DRC)* nach Greene [29]. Der Datenkanal ist getaktet und zum Reservierungskanal synchronisiert. M Zeitslitze des Datenkanals werden zu einem Rahmen zusammengefaßt. Die Rahmendauer ist größer als ein RTD. Der Reservierungskanal besitzt eine wesentlich höhere Zeitschlitzrate als der Datenkanal. Sendewillige Stationen belegen einen Reservierungszeitschlitz. Pro Rahmen werden nur M Reservierungen angenommen, alle anderen müssen wiederholt werden. Bei *DRC I* gehen die Stationen davon aus, daß Reservierungsanforderungen niemals kollidieren. Es genügt für den Reservierungskanal also eine binäre Rückmeldung (frei, belegt). Bei *DRC II* können die Stationen auch Kollisionen erkennen. Für dieses Zugriffsverfahren ist also eine ternäre Rückmeldung (frei, einfach belegt, mehrfach belegt) erforderlich. Dadurch vermeidet *DRC II* Kollisionen auf dem Datenkanal. Zur Stabilisierung des Verfahrens messen alle Stationen das Gesamtangebot und berechnen eine Rückweisewahrscheinlichkeit für neu eintreffende Pakete.

Bei *TDMA Reservation* nach Tasaka [102] und bei *Connection Oriented bzw. Connectionless Logical Link Control (CO-LLC bzw. CL-LLC)* desselben Autors [104, 105] wird der Reservie-

runskanal in den Datenkanal integriert. Der Kanal wird getaktet betrieben. Jeder Zeitschlitz besitzt einen Kopf, der aus mehreren sogenannten Minizeitschlitzen besteht, die jeweils einer Bodenstation fest zugeordnet sind und deren Reservierungsanforderungen aufnehmen können.

Beim *Reservation System* nach Roberts [89] wird der Reservierungskanal durch Zeitmultiplex in den getakteten Datenkanal integriert. Das hat den Vorteil, daß die nicht durch Datenpakete belegten Zeitschlitze für die Übertragung von Reservierungsanforderungen verwendet werden können. Durch die Umwandlung erhält man ein stabileres Systemverhalten, da bei hoher Last nur wenige Reservierungsanforderungen beim ersten Versuch erfolgreich sind. Dadurch sinkt die Paketübertragungsrate, wodurch wieder eine größere Kapazität zur Übermittlung von Reservierungsanforderungen zur Verfügung steht.

Auf dem gleichen Prinzip basierend arbeitet auch *Contention Priority Oriented Demand Assignment (CPODA)* nach Aagsen [1]. Hier ist der Kanal allerdings nicht in Zeitschlitze, sondern in Rahmen konstanter Dauer strukturiert, die aus einem Reservierungssubrahmen und einem Datensubrahmen zur Übertragung von Paketen unterschiedlicher Länge bestehen. Die Grenze zwischen den beiden Subrahmen wird dem aktuellen Datenvolumen angepaßt. Der Zugriff auf den Reservierungsteil erfolgt durch S-ALOHA. Bei einer Variante dieses Verfahrens sind den einzelnen Bodenstationen Reservierungszeitschlitze jeweils fest im Reservierungssubrahmen zugeteilt (*Time Division Priority Oriented Demand Assignment, TPODA*).

Das von Yan [126] vorgeschlagene *Adaptive Mobile Access Protocol (AMAP)* ermöglicht die Übertragung von Paketen beliebiger Länge. Die Übertragungsstrecke besteht aus einer Anzahl von FDMA-Kanälen, von denen einige zur Übertragung von Reservierungsanforderungen und alle anderen für die Übertragung von Nutzinformation vorgesehen sind. Die Stationen greifen auf die Reservierungskanäle mittels ALOHA zu. Die Reservierungsanforderungen enthalten Informationen über die Länge des zu übertragenden Paketes. Eine Kontrollstation wählt für die zu erfolgreichen Reservierungsanforderungen gehörenden Pakete denjenigen FDMA-Kanal aus, der am frühesten frei wird. Über den Rückkanal wird der betreffenden Station mitgeteilt, zu welchem Zeitpunkt sie mit der Paketübertragung beginnen darf. Dadurch können die Datenkanäle lückenlos genutzt werden. Bei dem von demselben Autor vorgeschlagenen *Integrated-AMAP (I-AMAP)* [127] wird für den Zugriff auf die Reservierungskanäle S-ALOHA verwendet (siehe auch Kilpatrick [43] und Yan [128]).

Wang [113] schlägt ein Verfahren vor, bei dem mit der wahlfrei übertragenen Reservierungsanforderung schon das erste Teilpaket mitgesendet wird. Pakete, die kürzer als ein Teilpaket sind, werden dadurch immer wahlfrei übertragen. Für längere Pakete enthält die Reservierungsanforderung Angaben über die Anzahl der noch zu übertragenden Teilpakete.

Ein Vertreter eines DAMA-Verfahrens wird von Waters [114] beschrieben. Das *Universe-Zugriffsverfahren* wird zur Verbindung von Universitäts-LANs verwendet. Der Kanal ist in

Rahmen konstanter Dauer unterteilt. Jeder Rahmen enthält einen sog. Reference Burst, der Reservierungsinformation enthält. Jeder Station ist ein sog. Small Burst fest zugeordnet, in dem sie Reservierungsanforderungen und kurze Pakete übertragen kann. Assigned Bursts stellen jeder Station proportional zu ihrem Bedarf Übertragungskapazität zur Verfügung. Die Verteilung der Kapazität wird langsam an den Bedarf angepaßt.

Bei Reservierungsverfahren mit impliziter Reservierung gilt ein durch eine Station belegter Kanal als solange reserviert, bis er durch die betreffende Station wieder frei gegeben wird. Ein Vertreter dieser Familie ist das *Reservation-ALOHA (R-ALOHA)* von Lam [57]. Der Kanal wird in Rahmen konstanter Länge strukturiert. Die Rahmendauer ist größer als ein RTD. Der Rahmen ist in Zeitschlitz unterteilt, die jeweils ein Teilpaket eines beliebig langen Datenpaketes aufnehmen können. Das erste Teilpaket eines Datenpaketes belegt wahlfrei einen nicht reservierten Zeitschlitz. Ist dieses Teilpaket erfolgreich, sind alle Zeitschlitz der folgenden Rahmen mit derselben Ordnungsnummer implizit solange reserviert, bis das Paket übertragen ist. Ist ein vorher reservierter Zeitschlitz nicht mehr durch ein Teilpaket belegt, dann gilt er als frei und darf im nächsten Rahmen belegt werden. Alternativ kann das letzte Teilpaket eines Datenpaketes auch ein sog. *End-of-Use-Flag* enthalten. Dadurch kann der Zeitschlitz sofort wieder belegt werden.

Anticipated Reservation nach Zein [132] wurde speziell für das auf ATM basierende B-ISDN entwickelt. Es bietet feste Verbindungen für sog. *Stream Type*-Verkehr. Für *Burst Type*-Verkehr wird für jeden Daten-Burst durch eine *Start of Burst*-Meldung eine Verbindung aufgebaut, die nach dem Ende des Bursts durch eine *End of Burst*-Meldung wieder abgebaut wird.

White [116] beschreibt das zweistufige Zugriffsverfahren *Minislotted Alternating Priorities (MSAP)*. An die einzelnen Bodenstationen sind mehrere Datenendgeräte angeschlossen, die Datenpakete erzeugen. Die Bodenstationen können über terrestrische Netze Informationen austauschen und ihren Zugriff auf die Satellitenübertragungsstrecke regeln. Die Stationen dürfen nacheinander in einer fest vorgegebenen Reihenfolge senden. Eine sendende Station sendet solange, bis ihr Puffer leer ist, d.h. der Satellitenkanal wird durch die Belegung implizit reserviert. Danach gibt sie ihre Sendeberechtigung an die nächste Station in der sog. *Priority Sequence* über eine terrestrische Verbindung weiter. Das Verfahren eignet sich nur für nahe beieinander stehende Bodenstationen, die einen großen Anteil an Fernverkehr erzeugen.

Das von Celandroni [18] vorgestellte *FIFO Ordered Demand Assignment (FODA)* unterstützt *Stream Type*- und *Burst Type*-Verkehr. Der Kanal wird in Superrahmen strukturiert. Der Superrahmenkopf enthält die Zeitschlitzzuweisungen für den *Stream Type*-Verkehr. Der Superrahmen ist in Rahmen konstanter Länge aufgeteilt, die aus *Control*-, *Stream*- und *Datagram*-Teilrahmen bestehen. Der *Control*-Teilrahmen enthält die Zeitschlitzzuweisungen für den *Datagramm*-Verkehr. Reservierungsanforderungen können entweder zusammen mit der Nutz-

information oder in Minizeitschlitten, die im Kontrollteilrahmen enthalten sind, übertragen werden. Die Minizeitschlitzte werden den einzelnen Stationen rotierend zugeteilt.

Das von Wieselthier [118] vorgestellte *Wireless Integrated Multiple Access (WIMA)* unterstützt ebenfalls *Stream Type-* und *Burst Type-*Verkehr. Der Kanal ist in Rahmen strukturiert, die aus einer konstanten Anzahl von Zeitschlitten bestehen. Der erste Zeitschlitz eines Rahmens ist in Minizeitschlitzte unterteilt, die den Stationen fest zugeteilt sind. Der restliche Rahmen ist in einen CS- und einen PS-Teilrahmen unterteilt. In einem Minizeitschlitz kann eine Station Reservierungsanforderungen für alle Datenpakete, die während des letzten Rahmens angekommen sind, senden. Gleichzeitig kann eine Station in ihrem Minizeitschlitz auch den zusätzlichen Bedarf bzw. die Auslösung von CS-Kanälen signalisieren.

Für ortsfeste Bodenstationen, die in einem eng begrenzten Gebiet lokalisiert sind, eignet sich das von Petr [79] vorgeschlagene *BOD-FDMA-System* (*BOD = Bandwidth on Demand*). Die einzelnen Stationen eines Uplink-Gebietes sprechen über terrestrische Kanäle (z.B. über das terrestrische Telefonnetz) den Zugriff auf den Uplink ab. Ein mögliches Verfahren für die Absprache über einen terrestrischen Funkkanal ist die bitweise Arbitrierung [16].

2.8.3 Kombinierte Zugriffsverfahren

Beim wahlfreien Zugriff mit Vorankündigung nach Ng [74] wird der Kanal in Rahmen unterteilt, die aus mehreren Zeitschlitten und einem Rahmenkopf bestehen. Jeder Zeitschlitz kann frei oder reserviert sein und ein Datenpaket aufnehmen. Im Rahmenkopf teilt jede Station der zentralen Station über Minizeitschlitzte ihre aktuelle Warteschlangenlänge mit. Über den Rückkanal teilt die zentrale Station den sendewilligen Stationen Zeitschlitzte zu. Eine sendewillige Station belegt einen freien Zeitschlitz sofort und teilt dies ebenfalls der zentralen Station mit. Dadurch ist die zentrale Station in der Lage, für jede Station die genaue Anzahl der noch zu übertragenden Pakete zu berechnen. Eine weitere Analyse für dieses Verfahren befindet sich in [70].

Combined Random/Reservation Multiple Access (CRRMA) nach Lee [59] stellt einen getakteten Kanal zur Verfügung. Jeder Zeitschlitz besteht aus einem Datenteil und dem Kopf. Der Datenteil kann ebenfalls reserviert oder frei sein. Der Kopf ist in Minizeitschlitzte unterteilt, die jeweils eine Reservierungsanforderung aufnehmen können. Eine sendewillige Station belegt sofort einen freien Datenteil und sendet gleichzeitig in einem Minizeitschlitz eine Reservierungsanforderung. Wird das Paket erfolgreich übertragen, dann wird die Reservierungsanforderung, falls sie nicht kollidiert ist, verworfen. Andernfalls signalisiert die zentrale Station allen anderen Stationen über den Rückkanal die erfolgreiche Reservierung. In diesem Fall kann der nächste Zeitschlitz von der betrachteten Station durch das vorher kollidierte Paket belegt werden. Bei der Auflösung von Kollisionen, bei denen sowohl das Paket, als auch die Reservierungsanforderung kollidiert ist, unterscheidet Lee zwischen *Uncontrolled Channel*

Access (UCA) und *Controlled Channel Access (CCA)*. Bei UCA wird das Paket und die zugehörige Reservierungsanforderung wiederholt. Bei CCA wird nur die Reservierungsanforderung wiederholt. Neue Pakete müssen auf einen Zeitschlitz warten, der nicht für eine Kollisionauflösung benutzt wird. Bei CCA kann der Datenteil eines Zeitschlitzes zur Unterstützung einer Kollisionauflösung in Minizeitschlitz umgewandelt werden. Dadurch wird die Auflösung einer Kollision stark beschleunigt. Die Kollisionauflösung kann auch einzeln für alle betroffenen Minizeitschlitz erfolgen, wodurch die Anzahl der Stationen, die gleichzeitig ihre Kollision auflösen wollen, verringert wird. Derselbe Autor beschreibt in [60] eine Modifikation des CRRMA-Zugriffsverfahrens für Multibeam-Satellitensysteme (*Multibeam-CRRMA*). Wong untersucht in [119] eine mit CRRMA verwandte Familie von Zugriffsverfahren.

Das *Announced Arrival Random Access Protocol* nach Towsley [106] ist sehr ähnlich dem CRRMA/UCA mit gruppenweiser (minizeitschlitzweiser) Kollisionauflösung. Towsley stellt verschiedene Varianten des Verfahrens für binäre und ternäre Rückmeldung für Minizeitschlitz und Datenteil sowie für Rückmeldungen innerhalb des aktuellen Zeitschlitzes bzw. verspätete Rückmeldungen, falls das RTD größer als die Dauer eines Zeitschlitzes ist, vor.

Beim *Scheduled Retransmission Multiaccess (SRMA)* nach Yum [131] ist der Übertragungskanal in Rahmen konstanter (*Fixed Frame SRMA, FF-SRMA*) bzw. veränderlicher Länge (*Dynamic Frame SRMA, DF-SRMA*) unterteilt. Der Rahmen setzt sich aus reserviertem und wahlfreiem Teilrahmen zusammen. Beide Teilrahmen sind in Zeitschlitz unterteilt, die jeweils ein Datenpaket konstanter Länge aufnehmen können. Der Zeitschlitz des wahlfreien Teils besitzt zusätzlich noch einen Kopf, der in Minizeitschlitz unterteilt ist. Ein Paket, das im wahlfreien Teilrahmen ankommt, wird sofort gesendet. Kommt es im reservierten Teilrahmen an, dann wird seine Aussendung auf einen zufällig bestimmten wahlfreien Zeitschlitz, der nicht in demselben Rahmen liegen muß, verschoben. Für ein wahlfrei gesendetes Paket wird gleichzeitig eine Reservierungsanforderung in einem Minizeitschlitz gesendet, die bei erfolgreicher, d.h. nicht kollidierter, Paketübertragung verworfen wird. Die Länge des reservierten Teilrahmens entspricht der Anzahl erfolgreicher Reservierungsanforderungen (nicht kollidierte Reservierungsanforderungen, die zu kollidierten Datenpaketen gehören). Bei FF-SRMA werden maximal so viele Reservierungen angenommen, wie in einem Zeitschlitz übertragen werden können. Bei DF-SRMA wird die Mindestanzahl von wahlfreien Zeitschlitz pro Rahmen garantiert und die Rahmenlänge an die Anzahl erfolgreicher Reservierungen angepaßt.

Wong [120] beschreibt mit seinem *Controlled Multiaccess Protocol (CMAP)* ein sehr ähnliches Verfahren. Die Struktur des Rahmens ähnelt FF-SRMA. Allerdings besitzen die Zeitschlitz des reservierten Teilrahmens ebenfalls Minizeitschlitz. Für ein eintreffendes Paket wird in einem Minizeitschlitz des aktuellen Zeitschlitzes eine Reservierungsanforderung gesendet. Befindet sich der aktuelle Zeitschlitz im wahlfreien Teilrahmen, dann wird das

Datenpaket ebenfalls gesendet. In einer Erweiterung des Zugriffsverfahrens können Pakete, die im wahlfreien Teilrahmen ankommen, mit einer von der Auslastung abhängigen Wahrscheinlichkeit auf den reservierten Teilrahmen verschoben werden und umgekehrt.

Bei *Split Reservation upon Collision (SRUC)* nach Tasaka [101, 102, 103] ist der Kanal in Rahmen unterteilt. Der Rahmen besteht aus mehreren Zeitschlitzten, die jeweils ein Paket konstanter Länge aufnehmen können. Jeder Zeitschlitz enthält zudem einen Kopf bestehend aus mehreren Minizeitschlitzten, die den einzelnen Stationen fest zugeordnet sind und über die ständig die aktuelle Warteschlangenlänge signalisiert wird. Die einzelnen Stationen greifen wahlfrei auf die Zeitschlitzte zu. Tritt eine Kollision auf, dann wird der Kanal solange in den Reservierungsmodus umgeschaltet, bis alle beteiligten Pakete übertragen sind.

Beim *Hybrid Contention Based TDMA (HCB-TDMA)* nach Tsai [108] ist der Kanal in Rahmen variabler Länge strukturiert. Jeder Rahmen besteht aus einem wahlfreien und einem reservierten Teilrahmen sowie dem Rahmenkopf. Der Rahmenkopf ist in Minizeitschlitzte strukturiert, die jeweils einer Station fest zugeordnet sind. Alle Stationen sind in Gruppen eingeteilt. Der wahlfreie Teilrahmen enthält pro Gruppe einen nur für diese Gruppe wahlfrei zugänglichen Zeitschlitz. Jede Bodenstation signalisiert über ihren Minizeitschlitz die zusätzliche benötigte bzw. nicht mehr benötigte Übertragungskapazität. Im reservierten Teilrahmen wird die angeforderte Übertragungskapazität bereitgestellt. Die Dauer des wahlfreien Teilrahmens ist länger als ein RTD, so daß die Reservierungsanforderungen noch in demselben Rahmen berücksichtigt werden können. In dem von Livne [64] vorgeschlagenen FDMA/DA-Zugriffsverfahren (*DA = engl. Demand Assignment*) wird der Rahmen ebenfalls in einen wahlfreien und einen reservierten Teil getrennt. Allerdings ist die Rahmendauer konstant und die Dauer des wahlfreien Teils kann auch kürzer als ein RTD sein.

Beim *Announced Retransmission Random Access (ARRA)* nach Raychaudhuri [84, 85] wird der Kanal in Rahmen bestehend aus einer konstanten Anzahl von Zeitschlitzten strukturiert. Jeder Zeitschlitz enthält einen Kopf, der aus einer der Anzahl der Zeitschlitzte pro Rahmen entsprechenden Anzahl von Minizeitschlitzten besteht. Jedes neu ankommende Paket belegt wahlfrei einen nicht reservierten Zeitschlitz und im zugehörigen Kopf einen Minizeitschlitz. Der Minizeitschlitz dient als Ankündigung, welcher Zeitschlitz eines Rahmens belegt wird, falls das Datenpaket kollidiert. Dabei kann es zu Folgekollisionen kommen, falls sowohl Datenteil als auch Minizeitschlitz kollidiert sind. Bei *Extended-ARRA* können Minizeitschlitzkollisionen durch eine ternäre Rückmeldung für Minizeitschlitzte erkannt und Folgekollisionen somit verhindert werden.

2.8.4 Klassifikation der Zugriffsverfahren

Die in Abschnitt 2.8.1 bis 2.8.3 vorgestellten Zugriffsverfahren sollen klassifiziert werden. Dabei ist es günstig, die Klassifikationskriterien in zwei Gruppen zu unterteilen. Die speziellen

Klassifikationskriterien sind in drei Untergruppen unterteilt, die jeweils einer der drei Familien *wahlfreie Zugriffsverfahren*, *Reservierungsverfahren* und *kombinierte Zugriffsverfahren* zugeordnet sind. Die allgemeinen Klassifikationskriterien lassen sich auf mehr als eine Familie anwenden. Alle Kriterien werden im folgenden kurz vorgestellt:

a) spezielle Kriterien für *wahlfreie Zugriffsverfahren*:

- Der *Erstzugriff* kann bei *wahlfreien Zugriffsverfahren* *frei* oder *kontrolliert* erfolgen. Bei *freiem Zugriff* dürfen *sendewillige Stationen* unabhängig vom Zustand des Gesamtsystems sofort senden.
- Die *Kollisionsauflösung* kann durch zufälliges, gleichverteiltes Senden eines Paketes innerhalb eines *Intervalls*, durch *Tree Collision Resolution (TCR)* oder durch Vergabe eines *Senderechtes* durch eine zentrale Instanz erfolgen.
- Die Dauer des *Wiederholintervalls* kann *gesteuert* sein, um die Wahrscheinlichkeit einer Folgekollision zu verringern.
- Durch *Paketrekonstruktion* können manche Verfahren die Originalinformation aus fehlerhaft empfangenen Signalen wiederherstellen.
- Die Gesamtheit aller Stationen des Systems kann in *Stationsgruppen* eingeteilt sein.
- Der *Zugriff* kann *einstufig* bzw. *mehrstufig* erfolgen.

b) spezielle Kriterien für *Reservierungsverfahren*:

- Die *Reservierung* kann *explizit* durch Signalisierung oder *implizit* z.B. durch *wahlfreie Belegung* eines Kanals erfolgen.
- Der *Reservierungskanal* kann *wahlfrei* zugänglich sein, oder den einzelnen Stationen sind Reservierungs(sub)kanäle *fest zugeteilt*.
- Der *Datentyp* der zu übertragenden Information kann ‚Pakete‘ (*Blocks*) oder ein Datenstrom mit konstanter Bitrate (*Stream*) sein.
- Die *Rückmeldung des Reservierungskanals* kann *binär* (frei, belegt) oder *ternär* (frei, einfach belegt, Kollision) sein.
- Bei *vorausplanender Reservierung* werden Reservierungsanforderungen aufgrund von *Ankunftsprognosen* gesendet.

c) spezielle Kriterien für *kombinierte Zugriffsverfahren*:

- Die Entscheidung, ob ein Paket reserviert oder *wahlfrei* gesendet wird (*Umschalten reserviert / wahlfrei*), wird entweder unabhängig durch jede Station (*asynchron*) oder für das Gesamtsystem (*synchron*) durch die zentrale Station oder durch einen verteilten Algorithmus getroffen.

d) allgemeine Kriterien:

- Die *Zuteilung von Übertragungskapazität* kann entweder zentral durch den *On Board Processor (OBP)* des Satelliten bzw. durch eine Kontrollstation (*Master Control Station, MCS*) oder *dezentral* durch einen verteilten Algorithmus erfolgen.
- Die *Rückmeldung für den Datenkanal* kann, falls vorhanden, *binär* (frei, belegt) oder *ternär* (frei, einfach belegt, Kollision) sein.
- Die *Verbindungsart* kann *verbindungslos* oder *verbindungsorientiert* sein.
- Die *Synchronisation* kann sich, falls vorhanden (*getaktetes System*), auf *Zeitschlitze*, auf *Rahmen* (Zusammenfassung mehrerer Zeitschlitze) oder auf *Superrahmen* (Zusammenfassung mehrerer Rahmen) beziehen.
- Die *Rahmendauer* kann, falls das System auf Rahmenebene synchronisiert ist, *konstant* oder *variabel* sein.
- Ist eine *Flußkontrolle* vorhanden, kann der Datenstrom innerhalb einer Station bei Überlast am *Eingang* (z.B. Ablehnen von Paketen durch die Station) oder am *Ausgang* (z.B. Verschieben des Sendebeginns auf einen späteren Zeitpunkt) gesteuert werden.
- Manche Zugriffsverfahren sind speziell für *Multibeam*-Systeme ausgelegt.
- Die Datenpakete können in kleinere *Sub-Pakete* zerlegt sein.
- Die *Stationsanzahl* kann *beliebig* (d.h. 0 ... unendlich), *konstant* oder *begrenzt* sein.
- Manche Zugriffsverfahren verlangen eine *spezielle Multiplexart* wie *Code Division Multiple Access (CDMA)*, *Frequency Hopping (FH)*, *Space Division Multiple Access (SDMA)* oder *Time Hopping (TH)*.

Eine Tabelle mit der Einordnung aller beschriebenen Zugriffsverfahren anhand der beschriebenen Konfigurationskriterien befindet sich in Kapitel A3 im Anhang.

3 Methoden zur analytischen und simulativen Untersuchung von Satellitenzugriffsverfahren

Die analytische und simulative Untersuchung von Kommunikationssystemen dient zur Prognose der Leistungsfähigkeit der untersuchten Systeme. Umgekehrt können auch einzuhaltende Grenzwerte der Leistungskenngrößen des Systems vorgegeben sein. Die analytische und simulative Untersuchung kann dann zur Dimensionierung der Betriebsmittel des untersuchten Systems verwendet werden.

Eine wichtige Leistungskenngröße von Satellitenzugriffsverfahren ist die Übermittlungszeit der zu übertragenden Pakete. Sie sollte möglichst nahe bei der durch die Umlaufverzögerung festgelegten unteren Schranke liegen. Die Analyse bzw. Simulation der Satellitenzugriffsverfahren liefert u. a. die Dimensionierung der Übertragungskapazität, um die Vorgaben bezüglich der Übermittlungszeit bei gegebenem Verkehrsangebot einzuhalten.

Grundlage einer verkehrstheoretischen Analyse bzw. Simulation ist ein verkehrstheoretisches Modell, das die relevanten Systemeigenschaften möglichst realitätsnah abbildet. Soll dieses Modell mathematisch analysiert werden, so ist darauf zu achten, daß es nicht zu komplex für die gewählte Analysemethode ist. Oftmals müssen Annahmen getroffen werden, um bestimmte Analysemethoden anwendbar zu machen. Die Plausibilität einer Analyse und der notwendigen Näherungsannahmen sollte deshalb durch Vergleich der Analyseergebnisse mit Simulationsergebnissen nachgewiesen werden.

In Unterkapitel 3.1 werden die in der Literatur am häufigsten zur Untersuchung von Satellitenzugriffsverfahren verwendeten Analysemethoden vorgestellt. Eine davon, die in Abschnitt 3.1.1 gezeigte Analyse durch Bestimmung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten, wird auch für eigene Untersuchungen der in Kapitel 4 vorgestellten Satellitenzugriffsverfahren verwendet. In Unterkapitel 3.2 werden die Grundlagen der ereignisgesteuerten Simulation erläutert, die besonders bei der Untersuchung von LEO-Satellitensystemen auch dann noch Ergebnisse liefern kann, wenn analytische Methoden aufgrund des komplexen zeitabhängigen Systemverhaltens nicht mehr verwendet werden können.

3.1 Verkehrstheoretische Analysemethoden

3.1.1 Bestimmung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten

Im folgenden werden ausschließlich Modelle zur Beschreibung eines Ablaufgeschehens, die durch wohldefinierte, diskrete Zustände beschreibbar sind, betrachtet. Die allgemeinen Verfahren zur Analyse solcher Systeme sind in der Regel sehr komplex. Besitzt der zugrunde liegende Zustandsprozeß jedoch die Eigenschaft der Gedächtnisfreiheit (Markoffsche Eigenschaft), wird die Analyse signifikant vereinfacht. Bei einem gedächtnisfreien Zustands-

prozeß (Markoff-Prozeß) hängt die zukünftige Entwicklung des Systemzustandes nur vom aktuellen Zustand ab. Ein gedächtnisfreies System ‚vergißt‘ also seine Vergangenheit, d.h. den Weg, über den der aktuelle Zustand erreicht wurde, zum Zeitpunkt des Übergangs in den aktuellen Zustand. Wird der Systemzustand zum Zeitpunkt t durch $Z(t)$ bezeichnet, dann gilt für einen Markoff-Prozeß:

$$P\{Z(t_{n+1}) = z_{n+1} \mid Z(t_n) = z_n, \dots, Z(t_0) = z_0\} = \quad (6)$$

$$P\{Z(t_{n+1}) = z_{n+1} \mid Z(t_n) = z_n\}$$

für alle $t_0 < t_1 < \dots < t_n < t_{n+1}$

Die nach i geordnete Menge aller $Z(t_i)$, $i=0, 1, 2, \dots$ nennt man, falls Gl. (6) erfüllt ist, eine Markoff-Kette. Ist ein Zustandswechsel nur zu äquidistanten, diskreten Zeitpunkten möglich, dann spricht man von einem Markoff-Prozeß mit diskretem, andernfalls von einem Markoff-Prozeß mit kontinuierlichem Zeitparameter. Ein System, bei dem der zukünftige Zustand nur vom aktuellen Zustand und von der Zeit, die seit dem Eintritt in den aktuellen Zustand abgelaufen ist, abhängt, ist laut Gl. (6) *kein* Markoff-Prozeß. Die Zeit zwischen zwei Zustandswechseln muß bei einem Markoff-Prozeß mit kontinuierlichem Zeitparameter deshalb negativ-exponentiell verteilt sein. Im zeitdiskreten Fall muß die Anzahl der Zeitschlitze zwischen zwei Zustandswechseln einer geometrischen Verteilung gehorchen.

Zustände können durch Wechseln in andere Zustände verlassen werden. In zeitkontinuierlichen Systemen kann das Wechseln der Zustände durch Zustandsübergangsraten beschrieben werden. Zustandsübergangsraten werden wie folgt definiert:

$$r_{jk} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{jk}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \quad \text{für } j \neq k \quad (7)$$

Dabei ist $p_{jk}(t_1, t_2)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit, daß das System zum Zeitpunkt $t_2 = t + \Delta t$ im Zustand k ist, falls es zum Zeitpunkt $t_1 = t$ im Zustand j war. In einem zeitdiskreten System wird der Zustandswechsel durch Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten beschrieben, die wie folgt definiert sind:

$$P_{jk} = P\{\text{Folgezustand} = j \mid \text{aktueller Zustand} = k\} \quad (8)$$

Bild 3-1 zeigt das vom Zustand j aus betrachtete Zustandsübergangsdiagramm eines eindimensionalen Markoff-Prozesses mit kontinuierlichem Zeitparameter. Bei einem zeitdiskreten System sind alle Raten r_{jk} durch Übergangswahrscheinlichkeiten P_{jk} ersetzt. Die zugehörige Markoff-Kette wird homogen genannt, falls alle r_{jk} bzw. P_{jk} zeitunabhängig sind. In Bild 3-1 sind von einem Zustand Übergänge zu allen anderen Zuständen möglich. Können von jedem

gegebenem Zustand nur die direkten Nachbarzustände erreicht werden, dann spricht man von einem Geburts- und Sterbe-Prozeß.

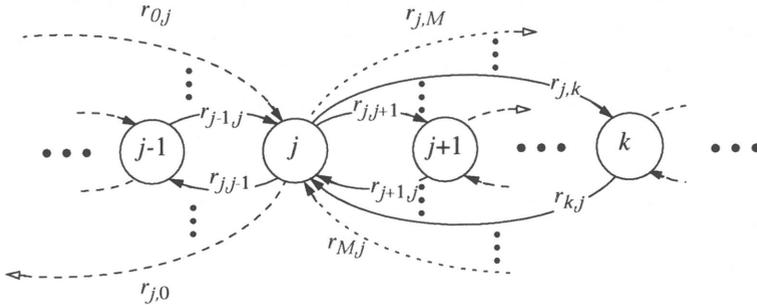


Bild 3-1: Zustandsübergangsdiagramm eines eindimensionalen Markoff-Prozesses mit kontinuierlichem Zeitparameter

Beispiel: Das wichtigste Kennzeichen eines Systems, bestehend aus einer FIFO-Warteschlange mit M Warteplätzen und einer Bedieneinheit, ist die Anzahl der Anforderungen, die sich im System aufhalten. Der Zustandsraum besteht in diesem einfachsten Fall aus den $M + 2$ möglichen Zuständen des Systems. Damit das System gedächtnisfrei ist, müssen sowohl der Ankunftsprozeß als auch der Bedienprozeß gedächtnisfrei sein. Sind Gruppenankünfte nicht erlaubt, dann verhält sich dieses System wie ein reiner Geburts- und Sterbe-Prozeß.

Verliert das System nur zu bestimmten Zeitpunkten sein Gedächtnis, dann kann man versuchen, das zugehörige Zustandsübergangsdiagramm auf einen Markoff-Prozeß abzubilden. Dazu stehen zwei Methoden zur Verfügung:

- Phasenmethode
- Eingebettete Markoff-Kette

Bei der Phasenmethode wird versucht, Zustände mit allgemein verteilter Aufenthaltszeit durch mehrere Zustände mit negativ-exponentiell verteilter Aufenthaltsdauer (Phasen), die nacheinander bzw. alternativ durchlaufen werden, anzunähern. Die zugehörige Markoff-Kette läßt sich als mehrdimensionales Gebilde darstellen. Die Zustandsnummer der Phasen wird vorteilhaft durch die Beschreibung (j, a, b, c, \dots) ersetzt. Dabei ist j die Zustandsnummer des ursprünglichen Zustandes, und a, b, c, \dots sind die Phasennummern der durch die Phasenmethode ersetzten allgemein verteilten Zufallszeiten. Die Phasenmethode eignet sich besonders gut für Systeme mit Zustandsaufenthaltsdauerverteilungen, die sich gut als reine Summe oder Alternative mehrerer Exponentialverteilungen ausdrücken lassen (z.B. hyperexponentielle Verteilungen). Das Gedächtnis des Systems wird bei dieser Methode durch die Phase, in der sich das System befindet, beschrieben.

Bei der Methode der eingebetteten Markoff-Kette werden nur solche Zeitpunkte betrachtet, an denen das System sein Wissen über seine Vergangenheit verliert (Regenerationszeitpunkte). Dazu wird ein Zustandsübergangsdiagramm für diese Zeitpunkte aufgestellt. Die berechneten Zustandswahrscheinlichkeiten gelten nur für die betrachteten Zeitpunkte. Im allgemeinen müssen die Zustandswahrscheinlichkeiten für einen beliebigen Zeitpunkt ausgehend von den Zustandswahrscheinlichkeiten an den Regenerationszeitpunkten berechnet werden. Bei speziellen Systemen, z.B. Warteschlangen mit beliebig verteilter Bedienzeit und negativ-exponentiell verteilten Zwischenankunftszeiten (M/G/1-System, siehe [48]), sind die Zustandswahrscheinlichkeiten zu den Regenerationszeitpunkten (Regenerationszeitpunkte sind in diesem Fall die Endezeitpunkte von Bedienungsphasen) gleich den Zustandswahrscheinlichkeiten zu beliebigen Zeitpunkten.

Im folgenden werden ausschließlich Markoff-Prozesse mit diskretem Zeitparameter betrachtet. Zur Berechnung der zeitabhängigen Zustandswahrscheinlichkeiten $\pi_j(n) = P\{Z_n = j\}$, d.h. der Wahrscheinlichkeit, daß sich das System zum Zeitpunkt n im Zustand j befindet, wird zunächst die mehrschrittige Zustandsübergangswahrscheinlichkeit definiert (siehe z.B. [48]):

$$p_{ij}(m, n) = P\{Z_n = j \mid Z_m = i\}, \quad m < n \quad (9)$$

Dabei ist Z_m bzw. Z_n der Zustand, den das System zum Zeitpunkt m bzw. n annimmt. Die Chapman-Kolmogoroff-Gleichung lautet im zeitdiskreten Fall:

$$p_{ij}(m, n) = \sum_k p_{ik}(m, u) \cdot p_{kj}(u, n), \quad m < u < n \quad (10)$$

In Matrixschreibweise wird Gl. (10) zu:

$$[p_{ij}(m, n)] = [p_{ij}(m, u)] \cdot [p_{ij}(u, n)], \quad m < u < n \quad (11)$$

Dabei ist $[p_{ij}(m, n)]$ die Matrix aller Elemente $p_{ij}(m, n)$. Die Gleichungen (10) und (11) beschreiben einen mehrschrittigen Zustandsübergang vom Zustand i zur Zeit m zum Zustand j zur Zeit n . Der Zustandsübergang vollzieht sich in $n - m$ Schritten über beliebige Zwischenzustände. In den Gleichungen (10) und (11) wird die mehrschrittige Zustandsübergangswahrscheinlichkeit in zwei Teile zerlegt, die den Zustandsübergang zwischen den Zeitpunkten m und u bzw. u und n beschreiben. Der Zeitpunkt u muß zwischen m und n liegen, ist ansonsten aber beliebig. Aus Gl. (10) wird ersichtlich, daß der Weg, auf dem der Zustand j zum Zeitpunkt n erreicht wird, über alle möglichen Zustände k zum Zeitpunkt u führen kann. Aus den Gleichungen (10) und (11) folgt die Chapman-Kolmogoroff-Vorwärtsgleichung, bei der der Zeitpunkt u an das Ende des Intervalls $[m, n]$ gelegt wird:

$$p_{ij}(m, n) = \sum_k p_{ik}(m, n-1) \cdot p_{kj}(n-1, n) \quad (12)$$

$$[p_{ij}(m, n)] = [p_{ij}(m, n-1)] \cdot [p_{ij}(n-1, n)] \quad (13)$$

Dabei ist $p_{ij}(n-1, n)$ die einschrittige Zustandsübergangswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $n-1$. Sie entspricht der in Gl. (8) definierten Zustandsübergangswahrscheinlichkeit P_{jk} für den zeitabhängigen Fall:

$$p_{ij}(n-1, n) = P_{ij}(n-1) \quad (14)$$

$$[p_{ij}(n-1, n)] = [P_{ij}(n-1)] \quad (15)$$

Durch mehrfache Anwendung von Gl. (13) kann $[p_{ij}(m, n)]$ wie folgt dargestellt werden:

$$[p_{ij}(m, n)] = [P_{ij}(m)] \cdot [P_{ij}(m+1)] \cdot \dots \cdot [P_{ij}(n-1)] \quad (16)$$

Gl. (16) zeigt, daß die mehrschrittige Zustandsübergangswahrscheinlichkeit zwischen den Zeitpunkten m und n durch sukzessives Anwenden der einschrittigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten berechnet werden kann.

Die Chapman-Kolmogoroff-Gleichung für die Zustandswahrscheinlichkeiten lautet:

$$\pi_j(n) = \sum_i p_{ij}(m, n) \cdot \pi_i(m) \quad (17)$$

In Matrixschreibweise lautet Gl. (17):

$$\vec{\pi}(n) = \vec{\pi}(m) \cdot [p_{ij}(m, n)] \quad (18)$$

Dabei beschreibt der Zeilenvektor $\vec{\pi}(n)$ die Zustandsverteilung des betrachteten Systems zum Zeitpunkt n , die sich also durch Anwendung der mehrschrittigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeit aus der Zustandsverteilung zum Zeitpunkt m berechnen läßt. Durch Einsetzen von Gl. (16) in Gl. (18) folgt:

$$\vec{\pi}(n) = \vec{\pi}(m) \cdot [P_{ij}(m)] \cdot [P_{ij}(m+1)] \cdot \dots \cdot [P_{ij}(n-1)] \quad (19)$$

Die Zustandsverteilung zum Zeitpunkt n folgt also aus der Zustandsverteilung zum Zeitpunkt m durch mehrmalige Multiplikation mit der einschrittigen, zeitabhängigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeitsmatrix. Für die in Kapitel 4 vorgestellten Analysemethoden sind insbesondere zwei Sonderfälle von Gl. (19) wichtig:

$$\vec{\pi}(n+1) = \vec{\pi}(n) \cdot [P_{ij}(n)] \quad (20)$$

$$\vec{\pi}(n) = \vec{\pi}(0) \cdot [P_{ij}(0)] \cdot [P_{ij}(1)] \cdot \dots \cdot [P_{ij}(n-1)] \quad (21)$$

Ausgehend vom Systemzustand zur Zeit ,0' mit der Zustandsverteilung $\vec{\pi}(0)$ kann man die Zustandsverteilung des Systems zu jedem beliebigen Zeitpunkt durch sukzessives Anwenden

der einschrittigen, zeitabhängigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeitsmatrix berechnen. Im homogenen Fall, d.h. für $[P_{ij}(m)] = [P_{ij}]$ reduziert sich Gl. (21) zu:

$$\vec{\pi}(n) = \vec{\pi}(0) \cdot [P_{ij}]^n \quad (22)$$

3.1.2 Einprägen des Gesamtangebotes

Bei wahlfreiem Zugriff von unendlich vielen Stationen auf einen gemeinsamen Kanal tritt häufig das Problem der Instabilität auf, falls die sendewilligen Stationen keine Information über die Anzahl aller kollidierten Pakete besitzen bzw. wenn sie diese Information nicht zur Steuerung ihrer Sendewahrscheinlichkeit verwenden. In diesem Fall bleibt die Gesamtankunftsrate λ neu generierter Pakete unabhängig vom Systemzustand konstant. Bildet man das Verhalten eines solchen Systems auf einen Markoff-Prozeß ab, dann ist eine daraus entstandene Markoff-Kette $Z_0, Z_1, \dots; Z_n = i \in \mathbb{N}_0$ nicht ergodisch. Für die Ergodizitätseigenschaft muß eine homogene, aperiodische, irreduzible Markoff-Kette die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$|E[(Z_{n+1} - Z_n) \mid Z_n = i]| < \infty \quad \forall i \quad (23)$$

$$\limsup_{i \rightarrow \infty} E[(Z_{n+1} - Z_n) \mid Z_n = i] < 0 \quad (24)$$

Gl. (23) sagt aus, daß sich der Folgezustand von einem gegebenem Zustand $Z_n = i$ niemals unendlich weit entfernen darf. Gl. (24) fordert, daß der Folgezustand von $Z_n = i, i \rightarrow \infty$ mit größerer Wahrscheinlichkeit bei $Z_{n+1} = j, j < i$ als bei $j \geq i$ liegt.

Die stochastischen Vorgänge in Systemen mit endlicher Anzahl von Stationen lassen sich, falls der zugrundeliegende Markoff-Prozeß homogen, aperiodisch und irreduzibel ist, wegen ihrer begrenzten Anzahl von Zuständen grundsätzlich auf eine ergodische Markoff-Kette abbilden. Bei wahlfreiem Zugriff in Systemen mit unendlich vielen Stationen besteht die Gefahr, daß die Anzahl der Stationen, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind, über alle Schranken wächst, da ab einer bestimmten Anzahl kollidierter Stationen die Rate, mit der kollidierte Pakete erfolgreich wiederholt werden, kleiner wird als die Rate der neu kollidierenden Pakete.

Um bei nicht ergodischen Markoff-Prozessen trotzdem Aussagen über die Leistungsfähigkeit des zugrunde liegenden Systems machen zu können, wird das Gesamtangebot G bestehend aus neu generierten und wiederholten Paketen vorgegeben und die Anzahl aller Kanalzugriffe pro Zeiteinheit als Poisson-verteilt angenommen. Als Beispiel dieser Vorgehensweise wird hier die Analyse des ALOHA-Zugriffsverfahrens mit unendlich vielen Stationen vorgestellt. Als Zeiteinheit wird die Sendedauer eines Paketes gewählt, die bei getaktetem ALOHA der Zeitschlitzdauer entspricht. Wegen der Poisson-verteilten Anzahl der Ankünfte pro Zeiteinheit gilt für die Wahrscheinlichkeit, daß bei *getaktetem* ALOHA x Stationen einen Kanalzugriff in einem Zeitschlitz versuchen:

$$P\{x \text{ Stationen senden Paket}\} = \frac{G^x}{x!} \cdot e^{-G} \quad (25)$$

Ein Sendeversuch ist bei *getaktetem* ALOHA genau dann erfolgreich, falls in einem Zeitschlitz genau eine Station ein Paket gesendet hat. Daraus folgt für die Auslastung S_t des gemeinsamen Kanals:

$$S_t = P\{x = 1 \text{ Station sendet Paket}\} = G \cdot e^{-G} \quad (26)$$

Bei *ungetaktetem* ALOHA mit konstanter Paketsendedauer T_p ist eine erfolgreiche Übertragung mit Sendebeginn zum Zeitpunkt t nur dann möglich, falls im Zeitintervall $[t - T_p, t + T_p]$ kein Sendebeginn eines oder mehrerer weiterer Pakete liegt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist wegen der Poisson-Verteilung der Ankünfte pro Zeiteinheit:

$$P\{\text{erfolgreiche Paketübertragung} \mid \text{Paketübertragung}\} = e^{-2G} \quad (27)$$

Daraus folgt für die Auslastung S_u bei ungetaktetem ALOHA:

$$S_u = G \cdot e^{-2G} \quad (28)$$

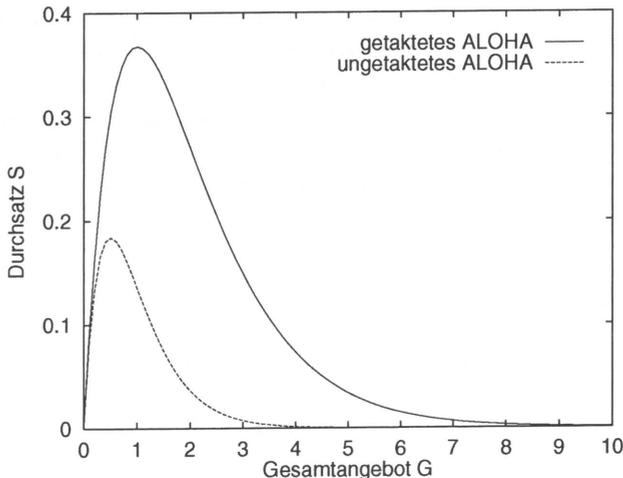


Bild 3-2: Nutzdurchsatz S als Funktion des Gesamtangebotes G , bestehend aus neu generierten und wiederholten Paketen für getaktetes und ungetaktetes ALOHA

Bild 3-2 zeigt den Durchsatz S_t bzw. S_u als Funktion des Gesamtangebotes G . Der maximal mögliche auf die Übertragungskapazität des gemeinsamen Kanals normierte Durchsatz beträgt bei getaktetem ALOHA $1/e$ und bei ungetaktetem ALOHA $1/2e$. Mit Hilfe von Bild 3-2

läßt sich auch die grundsätzlich vorhandene Instabilität des ALOHA-Zugriffsverfahrens nachweisen. Durch statistische Schwankungen ist es möglich, daß das Gesamtangebot G soweit zunimmt, daß die Steigung der Funktion $S(G)$ negativ wird. Bei einer weiteren geringfügigen Erhöhung des Gesamtangebotes G verringert sich dann der Durchsatz S , wodurch sich die Kollisionsrate und dadurch das Gesamtangebot G weiter erhöht. Man erhält also einen sich selbst verstärkenden Effekt, bei dem der Durchsatz S gegen Null strebt.

3.1.3 Stabilitätsuntersuchungen

Wie in Abschnitt 3.1.2 angedeutet, sind wahlfreie Zugriffsverfahren mit unendlich vielen Stationen nicht stabil, falls in den einzelnen Stationen keine Gegenkopplung implementiert ist, die das Angebot von neu generierten Paketen abhängig vom Zustand des Gesamtsystems drosselt. Kleinrock und Lam entwickelten eine Methode, um die Stabilität von wahlfreien Zugriffsverfahren mit begrenzter Anzahl M von Stationen zu untersuchen [47]. Diese Methode soll hier kurz anhand von getaktetem ALOHA (*engl. Slotted ALOHA, S-ALOHA*) dargestellt werden.

Zunächst wird der Kanaldurchsatz S_C in Abhängigkeit von der Anzahl k der kollidierten Pakete und von der Sendewahrscheinlichkeit σ berechnet. Eine Station, die in eine Kollisionsauflösung verwickelt ist, darf keine neuen Pakete generieren. Alle anderen Stationen generieren neue Pakete mit der Wahrscheinlichkeit σ . Eine Station, die ein Paket wiederholen muß, sendet es gleichverteilt in einem von I_w aufeinanderfolgenden Zeitschlitzes, nachdem sie über die Kollision informiert wurde. Dieser Vorgang wird durch die Annahme einer geometrischen Verteilung des Sendezeitpunktes berücksichtigt. Dabei wird angenommen, daß eine Station sofort nach dem Senden über eine Kollision informiert ist, d.h. das RTD von t_{RTD} Zeitschlitzes wird vernachlässigt. Die Wiederholwahrscheinlichkeit v innerhalb eines Zeitschlitzes ist deshalb:

$$v = \frac{1}{t_{RTD} + (I_w + 1)/2} \quad (29)$$

Der Kanaldurchsatz S_C ist mit den oben getroffenen Annahmen:

$$S_C(k, \sigma) = (1 - v)^k (M - k) \sigma (1 - \sigma)^{M - k - 1} + k v (1 - v)^{k - 1} (1 - \sigma)^{M - k} \quad (30)$$

Der linke Summand entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß in einem Zeitschlitz keines der k kollidierten Pakete wiederholt wird und genau ein neues Paket generiert und gesendet wird. Der rechte Summand entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß genau eines der k kollidierten Pakete wiederholt wird, während kein neues Paket generiert wird.

Für eine große Stationsanzahl M und für kleine Wahrscheinlichkeiten σ mit dem Angebot $S = (M - k) \cdot \sigma$, ergibt sich für Gl. (30) die Näherungslösung:

$$S_C(k, \sigma) = (1 - \nu)^k S e^{-S} + k\nu(1 - \nu)^{k-1} e^{-S} \quad (31)$$

Gl. (31) ist für $\sigma \ll 1$ eine sehr gute Näherung für Gl. (30). Im Gleichgewichtszustand des Systems ist das Angebot S aller M Stationen gleich dem Kanaldurchsatz S_C . Setzt man $S_C = S$, kann man mit Hilfe von Gl. (31) für jede gegebene Anzahl k von kollidierten Paketen iterativ einen Durchsatz S berechnen. Bild 3-3 zeigt die dabei entstehende Kurve für ein Wiederholintervall von $K = 40$ Zeitschlitzen und ein RTD von $R = 12$ Zeitschlitzen. In dasselbe Diagramm sind verschiedene Geraden eingezeichnet, auf denen ein Wertepaar (S, k) eines Systems mit $M = 100$, $M = 190$ bzw. $M \rightarrow \infty$ liegen muß. In Bild 3-3 wird angenommen, daß das maximal mögliche Angebot des Systems bei $k = 0$, d.h. wenn alle M Stationen sendeberechtigt sind, gleich $1/3$ ist. Die Gleichung einer Geraden lautet:

$$S = (M - k)\sigma \quad (32)$$

Gl. (32) folgt direkt aus der Annahme, daß nur Stationen, die nicht in eine Kollisionsauflösung verwickelt sind, mit der Wahrscheinlichkeit σ neue Pakete erzeugen dürfen. Der momentane Betriebspunkt eines Systems muß sich immer auf der zugehörigen Geraden befinden. Befindet sich der momentane Betriebspunkt (S, k) gleichzeitig auch auf der Kurve nach Gl. (31), dann ist das System im Gleichgewichtszustand. Ein Gleichgewichtszustand kann stabil, lokal stabil oder instabil sein.

Befindet sich ein momentaner Betriebspunkt links von der Kurve nach Gl. (31), dann ist das momentane Angebot S geringer als der Kanaldurchsatz S_C . Es werden also kollidierte Pakete abgebaut. Dadurch sinkt k und S muß ansteigen, da der momentane Betriebspunkt nur auf der Lastgeraden liegen kann. Der momentane Betriebspunkt wandert deshalb auf der Lastgeraden nach rechts unten. Umgekehrt verhält es sich, falls der momentane Betriebspunkt rechts der Kurve liegt. In diesem Fall ist das momentane Angebot S größer als der Kanaldurchsatz S_C . Dadurch vergrößert sich die Anzahl k der kollidierten Pakete und das Angebot S verkleinert sich. Der momentane Betriebspunkt wandert auf der Lastgeraden nach links oben.

Ein Gleichgewichtszustand ist genau dann stabil, falls der momentane Betriebspunkt bei Auslenkungen auf der Lastgeraden die Tendenz hat, wieder in den Schnittpunkt zurückzulaufen, d.h. wenn die Gleichgewichtskurve die Lastgerade für wachsende Sendewahrscheinlichkeit σ von links unten nach rechts oben schneidet. Existiert nur ein Schnittpunkt, dann handelt es sich aus diesem Grund immer um einen stabilen Betriebspunkt. Existieren mehrere Schnittpunkte, dann erhält man immer mindestens einen instabilen Betriebspunkt. In Bild 3-3 sind die vier Schnittpunkte 1, 2, 3 und 6 stabil. Die Schnittpunkte 4 und 5 sind instabil, da sich der momentane Betriebspunkt bei der kleinsten Auslenkung aus diesem Zustand in der Richtung der Auslenkung weiterbewegt.

Das System ist stabil, falls es genau einen stabilen Gleichgewichtszustand gibt (in Bild 3-3 für $M = 100$). Es ist bistabil, falls es genau einen instabilen und zwei stabile Gleichgewichtszustände gibt (in Bild 3-3 für $M = 190$). Für $M \rightarrow \infty$ erhält man einen weiteren stabilen Gleichgewichtszustand bei $S = 0$ und $k \rightarrow \infty$, der allerdings niemals verlassen werden kann.

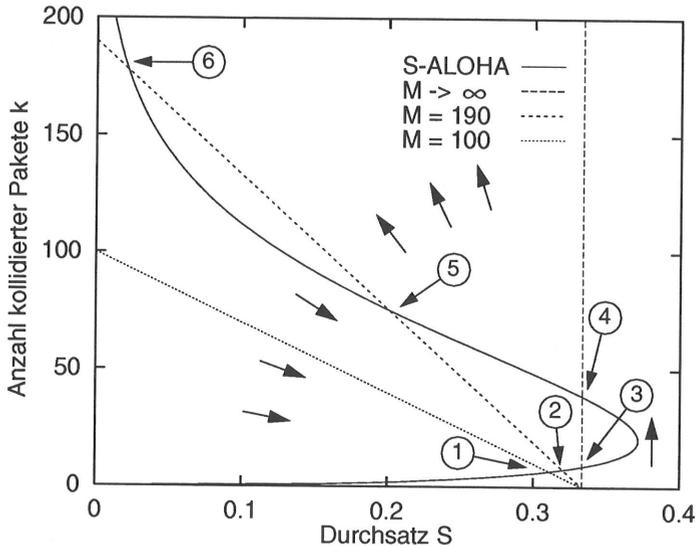


Bild 3-3: Stabilitätsuntersuchung eines getakteten ALOHA-Zugriffsverfahrens mit einem Wiederholintervall von $I_w = 40$ Zeitschlitzen, einem RTD von $t_{RTD} = 12$ Zeitschlitzen und einem Leerlaufangebot aller Stationen von $S = 1/3$

3.2 Ereignisgesteuerte Simulation

Sind die Abläufe in einem zu untersuchenden System analytisch nur schwer zu beschreiben, oder lassen sich interessierende Größen nur sehr umständlich berechnen, dann kann man mit Hilfe der Simulation des Systems meist sehr brauchbare Aussagen über seine Leistungsfähigkeit machen. Im folgenden soll nur auf die am meisten verbreitete zeitreue, ereignisgesteuerte Simulationstechnik eingegangen werden. Bei dieser Technik werden die Abläufe des realen Systems in einem Rechner nachgebildet.

Zunächst wird das reale System in ein Modell abgebildet, das alle interessierenden Komponenten (z.B. Warteschlangen und Bedieneinheiten) und Eigenschaften (z.B. Protokolle) enthalten muß. Annahmen, die bei der mathematischen Analyse des zu untersuchenden Systems oftmals notwendig sind, können bei der zeitreuen, ereignisgesteuerten Simulation entfallen. Insbesondere ist die bei der mathematischen Analyse oft getroffene Annahme der Gedächtnisfreiheit

nicht notwendig, da die Vergangenheit des Systems, soweit sie in seine Zukunft hineinwirkt, im Systemzustand sowie im sogenannten Simulationskalender festgehalten wird.

Das Simulationsmodell wird auf einem Rechner als Datenstruktur abgebildet. Die Datenstruktur enthält alle Komponenten des Simulationsmodells einschließlich aller Strukturen, die den Zustand der Komponenten beschreiben oder zur Meßwerterfassung dienen. Der Zustand der Komponenten und damit des Gesamtsystems ändert sich beim Auftreten bzw. bei der Bearbeitung von vorgeplanten Ereignissen. Durch den Zustandswechsel des Systems werden neue, in der Zukunft liegende Ereignisse vorgeplant. Diese Ereignisse müssen zeitlich geordnet in den Kalender eingetragen werden, der ebenfalls als Datenstruktur im Rechner vorliegt. Der Kalender hat die Aufgabe, neu entstandene Ereignisse zeitlich geordnet abzulegen.

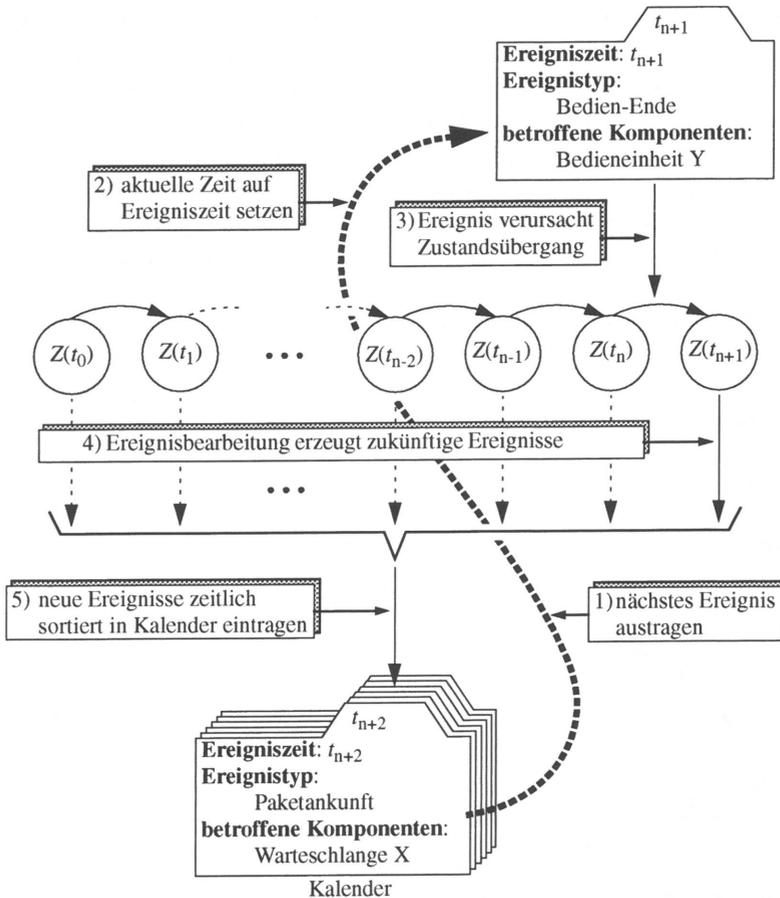


Bild 3-4: Vorgänge während eines Simulationslaufes

Während eines Simulationslaufes werden Zeitspannen, in denen sich der Systemzustand nicht ändert, übersprungen. Kontinuierliche Vorgänge müssen durch diskrete Ereignisse beschrieben werden. Die kontinuierliche Übertragung eines Datenpaketes kann z.B. durch den Sendebeginn und durch das Ende des Sendevorganges beschrieben werden.

Bild 3-4 zeigt die sich zyklisch wiederholenden Vorgänge während eines Simulationslaufes. Vor dem Start der Simulation muß der Initialzustand $Z(t_0)$ des Systems zum Zeitpunkt t_0 definiert werden. Üblicherweise wird für diesen Zustand ein leeres System angenommen. Gleichzeitig muß für jeden Lastgenerator, der im Simulationsmodell enthalten ist, ein Ankunftsereignis im Kalender stehen. Ein Lastgenerator kann beispielsweise Pakete erzeugen. Weitere Ereignisse, die zu Simulationsbeginn schon (einschließlich ihrer Ereigniszeit) vorhersehbar sind, können ebenfalls in den Kalender eingetragen werden. Der Simulationslauf beginnt mit dem Austragen des ersten Ereignisses aus dem Kalender. Sofort nach dem Austragen eines Ereignisses wird die aktuelle Systemzeit, d.h. die Zeit aus der Sicht des Simulationsmodells, auf die Ereigniszeit gesetzt. Während der Ereignisbearbeitung wird die Systemzeit angehalten. Abhängig vom Zustand $Z(t_n)$, in dem ein neu auftretendes Ereignis das Systemmodell antrifft, wechselt das Modell den Zustand von $Z(t_n)$ zu $Z(t_{n+1})$. Während der Bearbeitung des Ereignisses können ein oder mehrere in der Zukunft liegende Ereignisse erzeugt werden, die nach ihrer Ereigniszeit sortiert in den Kalender eingetragen werden.

Um den Zeitpunkt zukünftiger Ereignisse oder die zukünftige Entwicklung des Systemzustandes zu bestimmen, müssen kontinuierliche und diskrete zufallsabhängige Werte bestimmt (ausgewürfelt) werden. Beispiele hierfür sind die Bestimmung der Zeit zwischen zwei Paketankünften eines Paketgenerators bei einer vorgegebenen Verteilungsfunktion der Zwi-

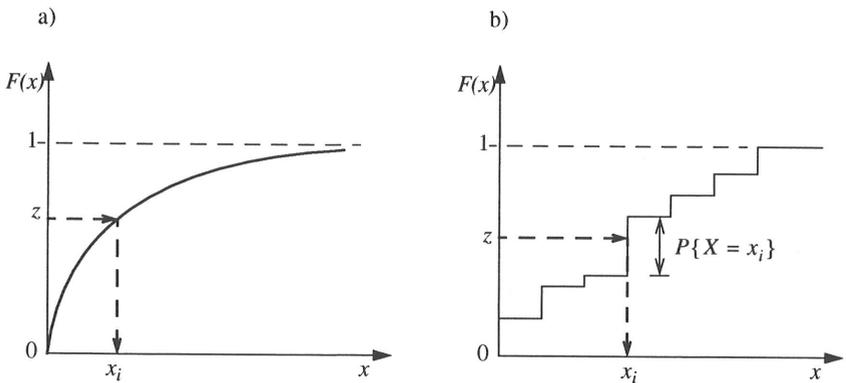


Bild 3-5: Bestimmung von Zufallszahlen x_i für kontinuierliche (Fall a) bzw. diskrete Verteilungsfunktionen (Fall b)

schenankunftszeit oder die Entscheidung, welche von mehreren vorgegebenen Möglichkeiten eintritt, falls die Wahrscheinlichkeit für alle Möglichkeiten gegeben ist. Die Bestimmung dieser zufallsabhängigen Werte erfolgt durch Bestimmung (Auswürfeln) einer zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallszahl z und durch Umkehrung der Verteilungsfunktion des zu bestimmenden Wertes (siehe Bild 3-5).

3.2.1 Stationäre Simulation

Bei der stationären Simulation wird davon ausgegangen, daß die zu messenden Größen zeitlich konstant sind. Sie eignet sich daher für die Messung von Langzeitmittelwerten. Da die Simulation aus einem definierten Systemzustand (meist mit einem ‚leeren‘ Systemmodell) gestartet wird, tritt ein Einschwingvorgang auf. Die während des Einschwingvorgangs auftretenden Meßwerte dürfen bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Am Ende des Einschwingvorgangs werden deshalb alle Meßwerte zurückgesetzt. Die restliche simulierte Systemzeit wird in sogenannte Teiltests unterteilt. Die Unterteilung in Einschwingvorgang und Teiltests beeinflusst nicht die Simulation der Abläufe im Simulationsmodell nach Bild 3-4 sondern lediglich die Auswertung der Meßwerte.

Jeder Teilttest liefert Teilttestergebnisse für alle gemessenen Größen. Durch die Unterteilung des Simulationslaufes in Teiltests kann eine Aussage über die statistische Zuverlässigkeit der Ergebnisse gemacht werden: Nach dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik ist eine Zufallsvariable, die als n -fache Summe einer anderen Zufallsvariable definiert ist, für $n \rightarrow \infty$ immer normalverteilt. Der zentrale Grenzwertsatz läßt sich auf die in den Teiltests gemessenen Mittelwerte und Varianzen anwenden, da sie als Summen einzelner Meßwerte, d.h. als Summen von Realisierungen einzelner Zufallsvariablen definiert sind. Der während eines Teiltests gemessene Schätzwert \bar{x} des Mittelwertes μ einer Zufallsvariablen ist:

$$\mu \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (33)$$

Für große n ist die Summe über alle x_i und damit auch \bar{x} annähernd normalverteilt. Gleiches gilt auch für den Schätzwert s^2 der Varianz σ^2 :

$$\sigma^2 \approx s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (34)$$

Durch die Aufteilung der Zeitdauer der Meßwerterfassung in Teiltests erhält man für jede gemessene Größe pro Teilttest einen Wert, das sogenannte Teilttestergebnis. Der Mittelwert der Teilttestergebnisse ist ein Schätzwert für die gemessene Größe. Sind genügend Meßwerte pro Teilttest aufgetreten (d.h. ist $n \gg 1$), darf man davon ausgehen, daß die Teilttestergebnisse normalverteilt sind. Dadurch kann nach Gosset (siehe [98], Gosset veröffentlichte unter dem

Pseudonym ‚Student‘) das Vertrauensintervall angegeben werden. Es gibt zwei Grenzen an, innerhalb denen der ‚wahre‘ Mittelwert der Teiltergebnisse und damit der ‚wahre‘ Wert der gemessenen Größe mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit β liegt. Sind n_T Teilterests durchgeführt worden und besitzen die n_T Teiltergebnisse den Mittelwert \bar{X} , dann ist das Vertrauensintervall für den ‚wahren‘ Mittelwert $E[\bar{X}]$:

$$\bar{X} - \frac{u \cdot s_T}{\sqrt{n_T - 1}} \leq E[\bar{X}] < \bar{X} + \frac{u \cdot s_T}{\sqrt{n_T - 1}} \quad (35)$$

Dabei ist s_T der Schätzwert für die Standardabweichung des Teiltergebnisses. Der Wert u hängt von der statistischen Sicherheit β sowie von der Anzahl der Teilterests n_T ab und kann Tabellen für die sog. Student-t-Verteilung entnommen werden (siehe z.B. [53]).

3.2.2 Instationäre Simulation

Die instationäre Simulation dient zur quantitativen Erfassung von zeitabhängigen Größen, wie sie z.B. bei Einschwingvorgängen oder Lastwechseln auftreten. Zusätzlich zu der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen stationären Simulation muß deshalb eine zeitabhängige Meßwerterfassung und eventuell eine zeitabhängige Lastgenerierung vorgesehen werden. Die Lastgenerierung mittels zeitabhängiger Poisson-Ankunftsprozesse wird z.B. in [107] und [39] beschrieben. Bei der in Kapitel 5 dieser Arbeit beschriebenen zeitdiskreten, instationären Simulation wird bei den Lastgeneratoren ein Poisson-Ankunftsprozeß verwendet, bei dem nur die Anzahl der innerhalb eines Zeitintervalls erzeugten Pakete, nicht aber die genaue Ankunftszeit wichtig ist. Während eines Zeitintervalls bleibt die Last konstant. Zur Bestimmung der Anzahl der erzeugten Pakete kann in diesem Fall direkt die Poisson-Verteilung mit der zeitabhängigen mittleren Anzahl erzeugter Pakete verwendet werden. Ein Zeitintervall entspricht bei der in Kapitel 5 beschriebenen Simulation einem Zeitschlitz.

Die instationäre Simulation beginnt mit der Warmlaufphase, nach der alle gemessenen Werte zurückgesetzt werden. An die Warmlaufphase schließt sich die für die Meßwerterfassung relevante Phase an. Die Kombination einer Warmlauf- und der sich daran anschließenden Meßwerterfassungsphase nennt man Elementartest. Die Warmlaufphase zwischen den Meßwerterfassungsphasen wird benötigt, um das System immer wieder in den Belastungszustand zu Beginn der Meßwerterfassungsphase zurückzuführen (siehe Bild 3-6).

Mehrere Elementartests werden zu einem Teilterest zusammengefaßt. Für die Meßwerterfassung gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder man mißt die interessierenden Größen während der Meßwerterfassungsphase nur zu bestimmten äquidistanten Zeitpunkten (Stichprobenmethode) oder man unterteilt die Meßwerterfassungsphase in kleine Meßintervalle (Meßintervallmethode). Letzteres hat den Vorteil, daß eine interessierende Größe nur dann erfaßt werden muß, wenn sie auftritt bzw. wenn sie sich ändert. Ein Nachteil der zweiten Methode ist, daß man für

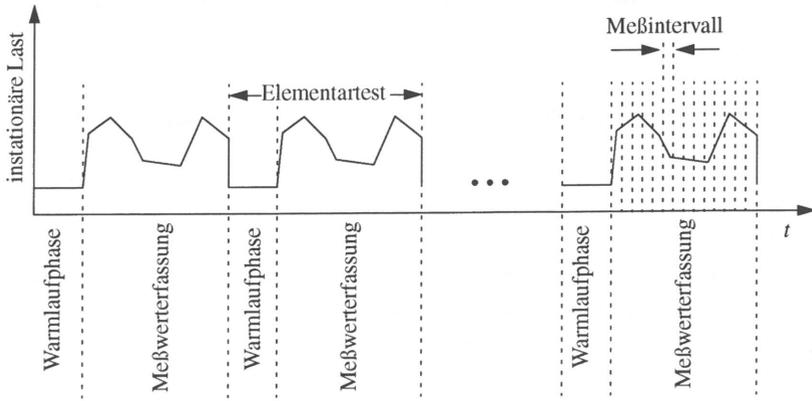


Bild 3-6: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Wärmelaufphase, Meßwertfassungsphase, Meßintervall und Elementartest

ein Meßintervall nur den Mittelwert der darin gemessenen Werte und nicht einen exakten Wert für einen bestimmten Zeitpunkt erhält.

Bei der Stichprobenmethode und bei der Meßintervallmethode kann man, falls ein Teiltest aus ausreichend vielen Elementartests besteht bzw. falls ausreichend viele Meßwerte innerhalb der zusammengehörenden Meßintervalle eines Teiltests erfaßt werden, Angaben über die statistische Aussagesicherheit der gemessenen Werte machen. Dabei wird die in Abschnitt 3.2.1 vorgestellte Methode verwendet.

4 Eine Analysemethode für eine Klasse getakteter Zugriffsverfahren

4.1 Gemeinsamkeiten der untersuchten Zugriffsverfahren

Das untersuchte Satellitensystem besteht im einfachsten Fall aus einem Satelliten mit globalem Richtstrahl, der als *Repeater* (siehe Abschnitt 2.3.1) arbeitet, und einer endlichen Anzahl von Bodenstationen, die untereinander nur über den Satelliten Informationen austauschen können. Die von einer Bodenstation ausgesendete Information wird nach einer Umlaufverzögerung von allen Bodenstationen empfangen. Die im folgenden beschriebene Analysemethode kann allerdings auch für Multibeam-Satellitensysteme verwendet werden. In diesem Fall muß der Satellit die Bodenstationen über den Rückkanal über Erfolg oder Mißerfolg eines Sendeversuches unterrichten.

Der Satellitenkanal ist in Zeitschlitz konstanter Dauer strukturiert. Jeder Zeitschlitz besteht aus einem Kopf und einem Datenteil. Der Datenteil kann ein Datenpaket aufnehmen. Der Kopf dient zur Übertragung von maximal N Reservierungsanforderungen (siehe Bild 4-1). Es wird angenommen, daß die Anzahl M aller Bodenstationen im System wesentlich größer als die Anzahl N der Minizeitschlitz ist. Falls eine Station eine Reservierungsanforderung senden will, bestimmt sie wahlfrei einen der N Minizeitschlitz. Um Ungenauigkeiten in der Synchronisation des Gesamtsystems auszugleichen, müssen sowohl Minizeitschlitz als auch Minizeit-schlitz und Datenteil durch kurze Schutzzeiten getrennt sein. Minizeitschlitz und Datenteil müssen also etwas größer als eine Reservierungsanforderung bzw. ein Datenpaket sein.

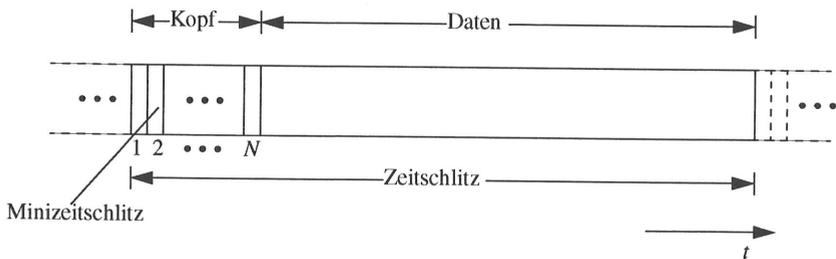


Bild 4-1: Prinzipieller Aufbau eines Zeitschlitzes der analysierten Zugriffsverfahren

Haben zwei oder mehr Bodenstationen innerhalb eines Minizeitschlitzes oder innerhalb des Datenteils gleichzeitig gesendet, können alle Stationen beim Empfang des Rückkanals nach einer Umlaufverzögerung erkennen, daß eine Kollision aufgetreten ist. Eine Kollision innerhalb eines Minizeitschlitzes beeinflusst weder die anderen Minizeitschlitz noch den Datenteil.

Umgekehrt können bei einer Kollision innerhalb des Datenteils nicht kollidierte Minizeitschlitz desselben Zeitschlitzes fehlerfrei empfangen werden.

Alternativ kann natürlich auch ein separater Reservierungskanal zur Übertragung der Reservierungsanforderungen implementiert sein (Siehe Bild 4-2). In diesem Fall ist der Reservierungskanal so in Zeitschlitz konstanter Länge aufgeteilt, daß das Ende jedes N -ten Reservierungszeitschlitzes mit dem Beginn des nächsten Zeitschlitzes des Datenkanals zusammenfällt.

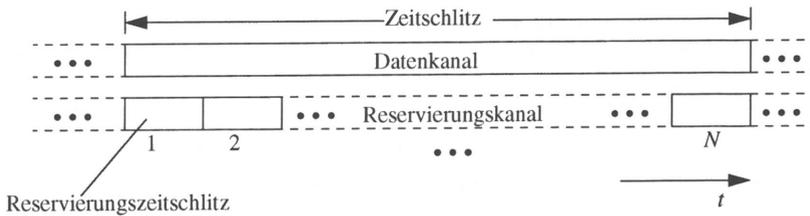


Bild 4-2: Zeitschlitz mit getrenntem Reservierungs- und Datenkanal

Erfolgreiche Reservierungsanforderungen werden in einer durch zwei Zähler in jeder Station realisierten verteilten Warteschlange gesammelt und gemäß dem gewählten Zugriffsverfahren abgearbeitet. Die aktuelle Länge der verteilten Warteschlange wird durch einen ‚öffentlichen‘ Zähler erfaßt, der in allen Bodenstationen vorhanden sein muß und beim Start des Systems auf den Wert ‚0‘ initialisiert wird. Der öffentliche Zähler wird in allen Stationen synchron inkrementiert bzw. dekrementiert, besitzt also für alle Stationen zu jedem Zeitpunkt denselben Wert. Als einzige Informationsquelle dient hierfür der vom Satelliten ausgehende Rückkanal. Eine Station, die eine erfolgreiche Reservierung erreicht hat, muß mit Hilfe eines weiteren Zählers, dem sog. ‚privaten‘ Zähler, den aktuellen Warteplatz ihres eigenen, auf die Aussendung wartenden, Datenpaketes berechnen. Beide Zähler werden beim Beginn eines Zeitschlitzes dekrementiert. Beim Eintreffen einer erfolgreichen Reservierungsanforderung wird der öffentliche Zähler inkrementiert. Detektiert eine Station eine erfolgreiche Reservierung für ihr eigenes Datenpaket, dann wird der aktuelle Stand des öffentlichen Zählers in den privaten Zähler übernommen. Die genaue Definition einer *erfolgreichen* Reservierungsanforderung hängt vom gewählten Zugriffsverfahren ab.

Im folgenden werden alle Zeiten in ganzzahligen Vielfachen eines Zeitschlitzes angegeben. Bild 4-3 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer Paketübertragung aus der Sicht einer Bodenstation. Eine Station ist in einem Zeitschlitz entweder im Zustand *blockiert* oder im Zustand *sendeberechtigt*. Blockiert ist sie genau dann, wenn sie an einer Kollisionauflösung beteiligt ist. Der neue Stationszustand wird deshalb jeweils nach der Auswertung eines über den Rückkanal empfangenen Zeitschlitzes bestimmt. Da sich dieser Zeitschlitz aus den eine Umlaufverzögerung

zung t_{RTD} zuvor ausgesendeten Paketen und Reservierungsanforderungen zusammensetzt, ist der Stationszustand vom Zustand des Gesamtsystems zum Zeitpunkt des Aussendens abhängig. Im folgenden wird die Umlaufverzögerung t_{RTD} auch RTD (*engl. Round Trip Delay*) genannt.

Ist eine Station sendeberechtigt, sendet sie - gemäß den in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Verfahren - mit der Wahrscheinlichkeit σ ein Paket und eine Reservierungsanforderung, bzw. nur eine Reservierungsanforderung. Im blockierten Zustand wiederholt die Station die vorher kollidierte Reservierungsanforderung. Gleichzeitig darf sie kein neues Paket generieren. In einem realen System gilt diese Annahme nur für die betrachtete Schicht des Medienzugriffs. Generierte Pakete werden auf einer höheren Schicht solange zurückgehalten, bis die betrachtete Station sendeberechtigt ist.

Die Sendeaufforderung für eine erfolgreiche Reservierung (siehe Bild 4-3) wird mittels des privaten Zählers durch die Station selbst generiert. Der Kanal ist entweder reserviert (Zustand $C=b$), d.h. durch ein zu einer erfolgreichen Reservierungsanforderung gehörendes Paket belegt, oder nicht reserviert (Zustand $C=\bar{b}$), d.h. entweder frei oder durch ein wahlfrei übertragenes Paket belegt. Der Kanalzustand C wird von allen Stationen synchron durch ihren öffentlichen Zähler bestimmt.

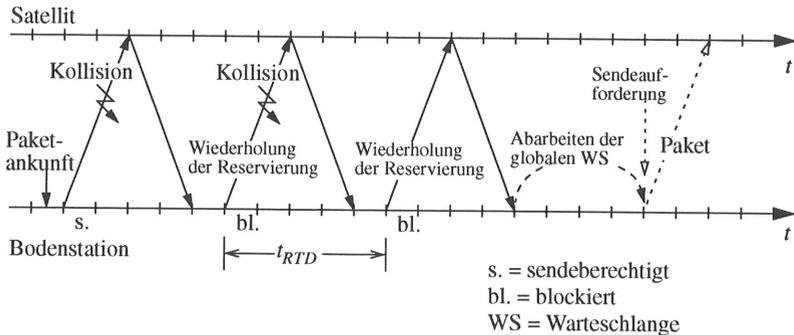


Bild 4-3: Zeitlicher Verlauf des Zustands einer Bodenstation

4.2 Das Grundprinzip der Analysemethode

Die Analyse aller noch vorzustellenden Zugriffsverfahren beruht auf der Definition eines Zustandsraumes, bestehend aus der Anzahl aller Stationen, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind. Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten sind abhängig vom Zustand der verteilten Warteschlange und vom Kanalzustand, was man durch Einführen eines dreidimensionalen Zustandsraumes berücksichtigen könnte. Wegen der Komplexität dieses Ansatzes

wurde allerdings ein anderer, einfacherer Weg gewählt, der in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.5 erläutert wird.

Im folgenden wird anstelle von ‚Station, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt ist‘ auch der Ausdruck ‚kollidierte Station‘ verwendet.

4.2.1 Definition des Zustandsraumes

Das untersuchte System besteht aus M Stationen und einem Satelliten. Zur Analyse der Zugriffsverfahren wird eine Folge von Zeitschlitzten betrachtet, die im zeitlichen Abstand t_{RTD} aufeinanderfolgen (siehe Bild 4-4). Für diese Zustandsfolge wird eine zeitdiskrete Markoff-Kette mit den Zustandswahrscheinlichkeiten π_j definiert. Dabei ist j eine Realisierung der Zufallsvariablen J , ($0 \leq J \leq M$). J bezeichnet die *aktuelle* Anzahl der an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen. Ist $J > 0$, findet eine Kollisionsauflösung statt.

Sendeberechtigte Stationen erzeugen im aktuellen Zeitschlitz mit der Wahrscheinlichkeit σ jeweils ein neues Paket. Die J kollidierten Stationen dürfen keine neuen Pakete generieren. Die Gesamtanzahl A der neu erzeugten Pakete ist deshalb $A \leq M - J$. Von den insgesamt $A + J$ Reservierungsanforderungen kollidieren nach einem RTD $K \leq A + J$. Die Anzahl der an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen beträgt dann $K = k$. Die Zufallsvariable K bezeichnet also die Anzahl der *nach einem RTD* kollidierten Stationen.

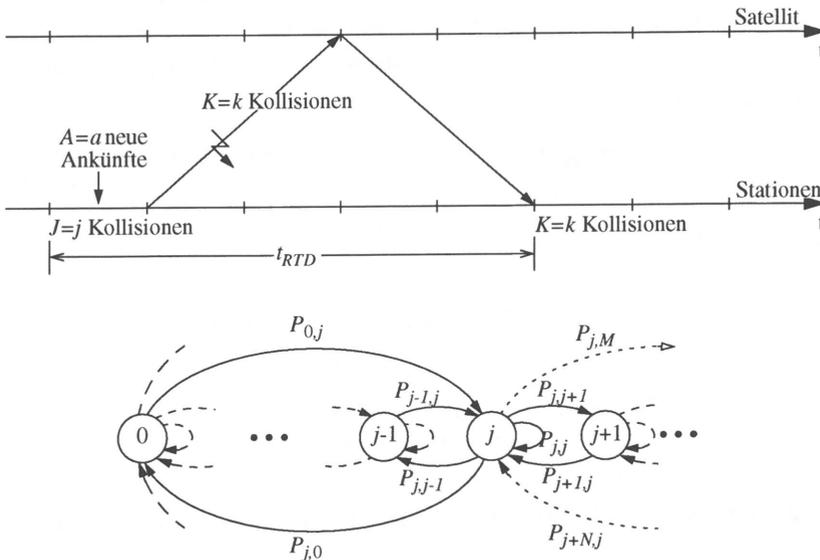


Bild 4-4: Zustandsübergangsdiaagramm für die Anzahl der Kollisionen in einer Folge von äquidistanten Zeitschlitzten mit Abstand t_{RTD}

4.2.2 Zeitabhängige Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten

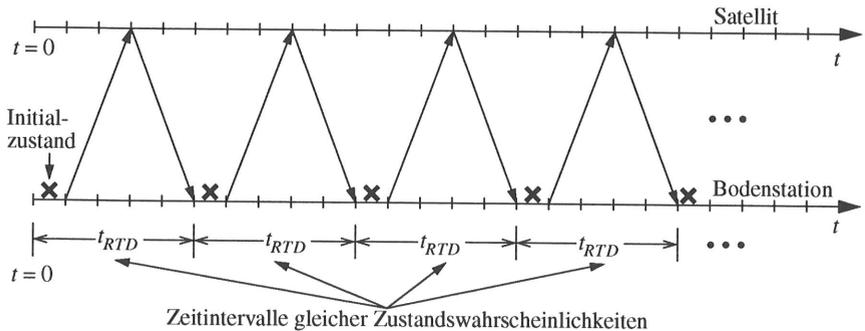
Da die Zustandswahrscheinlichkeiten des analysierten Modells für diskrete Zeitpunkte berechnet werden, können Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten P_{jk} angegeben werden, mit denen ein gegebener Zustand in einen Folgezustand verlassen wird. P_{jk} ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, daß das System nach einem RTD im Zustand $K = k$ kollidierte Stationen' ist, falls es momentan im Zustand $J = j$ kollidierte Stationen' ist:

$$P_{jk} = P\{\text{Folgezustand } K = k \mid \text{aktueller Zustand } J = j\} \quad (36)$$

In der beschriebenen Analyse wird nur eine der insgesamt t_{RTD} ineinander verschachtelten Zustandsfolgen betrachtet, nämlich diejenige, die den Initialzustand des Systems beinhaltet. Alle anderen Zustandsfolgen wirken über die globale Reservierungswarteschlange auf die betrachtete Zustandsfolge ein. Diese Abhängigkeit wird durch die folgende Annahme berücksichtigt:

Annahme: Die Verteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten ist für alle Zeitschlitze innerhalb eines RTDs, das mit einem Zeitschlitz der betrachteten Zustandsfolge beginnt, gleich (siehe Bild 4-3).

Daraus folgt, daß auch die an der globalen Warteschlange beobachtete Ankunftsrate von erfolgreichen Reservierungen, sowie die Reservierungswahrscheinlichkeit des Satellitenkanals innerhalb dieser RTDs gleich ist. Diese Annahme trifft ganz sicher für das eingeschwungene System zu, da sich dann die betrachtete Zustandsfolge nicht von den $(t_{RTD} - 1)$ anderen Zustandsfolgen unterscheidet.



x = betrachtete Zustandsfolge

Bild 4-5: Zeitintervalle mit gleicher Verteilung der Zustandswahrscheinlichkeiten

Zur Berechnung der Zustandsübergangswahrscheinlichkeit P_{jk} werden zunächst folgende Wahrscheinlichkeiten eingeführt:

$$P\{C=\mathbf{b}|J=j\} = P\{\text{Kanal ist reserviert}|j \text{ Stationen sind kollidiert}\} \quad (37)$$

$$P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\} = P\{\text{Kanal ist nicht reserviert}|j \text{ Stationen sind kollidiert}\} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} \\ = P\{a \text{ Stationen generieren ein Paket} | \\ (j \text{ Stationen sind kollidiert}) \wedge (\text{Kanal ist reserviert})\} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \\ = P\{a \text{ Stationen generieren ein Paket} | \\ (j \text{ Stationen sind kollidiert}) \wedge (\text{Kanal ist nicht reserviert})\} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} \\ = P\{k \text{ kollidierte Stationen im Folgezustand} | \\ (a \text{ Stationen generieren ein Paket}) \wedge (j \text{ Stationen sind kollidiert}) \\ \wedge (\text{Kanal ist reserviert})\} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \\ = P\{k \text{ kollisidierte Stationen im Folgezustand} | \\ (a \text{ Stationen generieren ein Paket}) \wedge (j \text{ Stationen sind kollidiert}) \\ \wedge (\text{Kanal ist nicht reserviert})\} \end{aligned} \quad (42)$$

Aus dem Gesetz der totalen Wahrscheinlichkeit folgt dann für die Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$P_{jk} = \sum_{a=0}^M P\{C=\mathbf{b}|J=j\} \cdot P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} \cdot P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} + P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\} \cdot P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \cdot P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \quad (43)$$

Gleichung (43) muß für jedes der zu untersuchenden Verfahren berechnet werden. Im folgenden werden die Schritte, die allen Analysen gemeinsam sind, erläutert.

Ein Zeitschlitz ist entweder reserviert (Kanalzustand $C=\mathbf{b}$) oder nicht reserviert (Kanalzustand $C=\bar{\mathbf{b}}$). Deshalb muß die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten $P\{C=\mathbf{b}|J=j\}$ und $P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}$ gleich eins sein. Der Kanal ist genau dann reserviert, wenn mindestens eine Reservierung in der globalen Warteschlange wartet oder, bei leerer Warteschlange, mindestens eine erfolgreiche Reservierung eintrifft. Daraus folgt für die Wahrscheinlichkeit, daß der Kanal reserviert ist, unter der Bedingung, daß $J = j$ Stationen kollidiert sind:

$$P\{C=\mathbf{b}|J=j\} = P\{Q = 0\} \cdot P\{R \geq 1|J=j\} + (1 - P\{Q = 0\}) \quad (44)$$

$$P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\} = 1 - P\{C=\mathbf{b}|J=j\} \quad (45)$$

Dabei entspricht die Zufallsvariable R der Anzahl der in einem Zeitschlitz eintreffenden erfolgreichen Reservierungsanforderungen. $P\{Q = 0\}$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß die globale Warteschlange leer ist. Es wird angenommen, daß diese Wahrscheinlichkeit nicht von J abhängt. Die Annahme ist gerechtfertigt, falls das RTD groß gegenüber der Dauer eines Zeitschlitzes ist, d.h. $t_{RTD} \gg 1$. Die globale Warteschlange läßt sich als $D^{(k)}/D/1$ -System modellieren. Die Analyse hierzu findet sich im Anhang A1. Aus Gleichung (141) im Anhang läßt sich die Wahrscheinlichkeit, daß die Warteschlange leer ist, berechnen:

$$P\{Q = 0\} = \begin{cases} \frac{1 - E[R]}{P\{R = 0\}} & \text{falls } E[R] \leq 1 \\ 0 & \text{falls } E[R] > 1 \end{cases} \quad (46)$$

Zur Berechnung von $P\{R \geq 1 | J=j\}$ wird wegen der einfacheren Betrachtungsweise K als *aktueller* Zustand und J als Zustand *vor* einem RTD definiert. $P\{R \geq 1 | K=k\}$ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit, daß mindestens eine erfolgreiche Reservierung an der globalen Warteschlange eintrifft, falls $K = k$ Stationen kollidiert sind. Sie ist komplementär zur bedingten Wahrscheinlichkeit $P\{R=0 | K=k\}$, die sich mit Hilfe des Gesetzes der totalen Wahrscheinlichkeit aus $P\{R=0 | J=j, K=k\}$ berechnen läßt. $P\{R=0 | J=j, K=k\}$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß bei einem Zustandsübergang von $J = j$ nach $K = k$, d.h., falls vor einem RTD j und zum aktuellen Zeitpunkt k Stationen kollidiert sind, keine Reservierung auftritt.

$$P\{R=0 | K=k\} = \sum_{j=0}^k P\{J=j | K=k\} \cdot P\{R=0 | J=j, K=k\} \quad (47)$$

$P\{J=j | K=k\}$ geht aus der Zustandsübergangswahrscheinlichkeit P_{jk} hervor, wenn man das Ereignis und die Bedingung vertauscht. $P\{J=j | K=k\}$ kann deshalb mit Hilfe des Multiplikationssatzes der Wahrscheinlichkeitsrechnung aus P_{jk} berechnet werden:

$$P\{J=j | K=k\} = \frac{\pi_j}{\pi_k} \cdot P_{jk} \quad (48)$$

Dabei sind π_j und π_k die Zustandswahrscheinlichkeiten für den Zustand $J = j$ bzw. $K = k$. Die Wahrscheinlichkeit $P\{R=0 | J=j, K=k\}$ aus Gl. (47) wird ebenfalls mit Hilfe des Gesetzes der totalen Wahrscheinlichkeit durch eine Summation über die Anzahl aller möglichen Ankünfte gewonnen:

$$P\{R=0 | J=j, K=k\} = \sum_{a=k-j}^M P\{C=\mathbf{b} | J=j, K=k\} P\{A=a | J=j, K=k, C=\mathbf{b}\} P\{R=0 | J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\} + P\{C=\bar{\mathbf{b}} | J=j, K=k\} P\{A=a | J=j, K=k, C=\bar{\mathbf{b}}\} P\{R=0 | J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\} \quad (49)$$

Die in Gl. (49) verwendeten bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{C=\mathbf{b}|J=j, K=k\}$ und $P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j, K=k\}$ beschreiben die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer reservierten Übertragung zum Zeitpunkt des Auftretens des Systemzustandes $J = j$, falls ein Zustandsübergang des Systems von $J = j$ nach $K = k$ stattfindet. Sie können durch $P\{C=\mathbf{b}|J=j\}$ bzw. $P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}$ ersetzt werden, da der Kanalzustand nicht von der Zukunft des Systems abhängt. Daraus folgt:

$$P\{R=0|J=j, K=k\} = \sum_{a=k-j}^M P\{C=\mathbf{b}|J=j\}P\{A=a|J=j, K=k, C=\mathbf{b}\}P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\} + P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}P\{A=a|J=j, K=k, C=\bar{\mathbf{b}}\}P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\} \quad (50)$$

Die Wahrscheinlichkeiten $P\{A=a|J=j, K=k, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{A=a|J=j, K=k, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ lassen sich durch Vertauschen der Zufallsvariablen A und K mit Hilfe des Multiplikationssatzes der Wahrscheinlichkeitsrechnung, wie im folgenden für $C=\mathbf{b}$ gezeigt, berechnen:

$$P\{A=a|J=j, K=k, C=\mathbf{b}\} = \frac{P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}}{P\{K=k|J=j, C=\mathbf{b}\}} \cdot P\{K=k|J=j, A=a, C=\mathbf{b}\} \quad (51)$$

Die hierbei benötigte bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|J=j, A=a, C=\mathbf{b}\}$, daß k Kollisionen entstehen, falls j Stationen kollidiert sind, a neue Pakete eintreffen und der Kanal reserviert ist, ist abhängig vom verwendeten Zugriffsverfahren. Die Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|J=j, C=\mathbf{b}\}$ erhält man durch Summation von $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ über die Anzahl a der neu generierten Pakete:

$$P\{K=k|J=j, C=\mathbf{b}\} = \sum_{a=k-j}^M P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} \cdot P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} \quad (52)$$

Die in Gl. (46) benötigte Wahrscheinlichkeit $P\{R=0\}$, daß in einem Zeitschlitz keine erfolgreiche Reservierung eintrifft, kann durch Summation von $P\{R=0|K=k\}$ aus Gl. (47) über alle Zustände k berechnet werden:

$$P\{R=0\} = \sum_{k=0}^M P\{R=0|K=k\} \cdot \pi_k \quad (53)$$

Zur Berechnung von Gl. (46) sowie der Wartezeit in der globalen Warteschlange (siehe Anhang Gl. (146)) wird die unbedingte Wahrscheinlichkeit $P\{R=r\}$ benötigt. $P\{R=r\}$ läßt sich mittels der beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ bestimmen. Sie beschreiben die Wahrscheinlichkeit, daß r Reservierungen erzeugt werden, falls a neue Pakete eintreffen, j Stationen kollidiert sind und der

Kanal reserviert bzw. nicht reserviert ist und lassen sich mittels folgender Beziehung direkt aus den vom Zugriffsverfahren abhängigen Wahrscheinlichkeiten $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ herleiten:

$$R = A + J - K \quad (54)$$

Durch Summation über j und a erhält man:

$$P\{R = r\} = \sum_{j=0}^M \pi_j \cdot \sum_{a=0}^{M-j} P\{C=\mathbf{b}|J=j\}P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} + P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \quad (55)$$

Für die zu analysierenden Zugriffsverfahren müssen nun noch folgende, vom jeweiligen Verfahren abhängige, bedingte Wahrscheinlichkeiten berechnet werden:

- $P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß a neue Pakete generiert werden, falls j Stationen kollidiert sind und der aktuelle Zeitschlitz reserviert bzw. nicht reserviert ist.
- $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß nach einem RTD k Stationen kollidiert sein werden, falls zum betrachteten Zeitpunkt j Stationen kollidiert sind, a neue Pakete erzeugt werden und der Kanal reserviert bzw. nicht reserviert ist.
- $P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß r Reservierungen erzeugt werden, falls zum betrachteten Zeitpunkt j Stationen kollidiert sind, a neue Pakete erzeugt werden und der Kanal reserviert bzw. nicht reserviert ist.
- $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß keine erfolgreiche Reservierung erzeugt wird, falls zum betrachteten Zeitpunkt j Stationen kollidiert sind, a neue Pakete erzeugt werden, der Kanal reserviert bzw. nicht reserviert ist und nach einem RTD k Stationen kollidiert sind.

4.2.3 Iterative Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten

Während des Einschwingvorgangs ändern sich die Zustandübergangswahrscheinlichkeiten $P_{jk}(t)$ in Abhängigkeit von der als Vielfaches einer Zeitschlitzdauer gemessenen diskreten Zeit t . Die Matrix aller $P_{jk}(t)$ bildet den aktuellen zeitabhängigen Zustandsvektor $\vec{\pi}_c(t)$ auf den Zustandsvektor zur Zeit $t + t_{RTD}$ ab (vergl. Gl. (20) aus Abschnitt 3.1.1):

$$\vec{\pi}_c(t + t_{RTD}) = \vec{\pi}_c(t) \cdot [P_{jk}(t)] \quad (56)$$

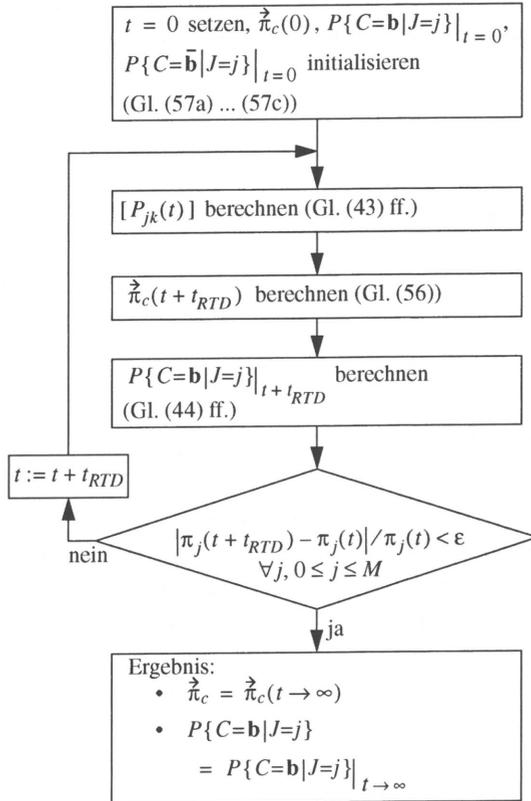


Bild 4-6: Iterative Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten

Die iterative Berechnung des Zustandsvektors $\vec{\pi}_c$ wird in Bild 4-6 in Form eines Flußdiagramms dargestellt. Die Anfangsbedingungen $\vec{\pi}_c(0)$, $P\{C=\mathbf{b}|J=j\}|_{t=0}$ und $P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}|_{t=0}$ werden wie folgt initialisiert:

$$P\{C=\mathbf{b}|J=j\}|_{t=0} = 0, \quad \forall j, 0 \leq j \leq M \quad (57a)$$

$$P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\}|_{t=0} = 1, \quad \forall j, 0 \leq j \leq M \quad (57b)$$

$$\vec{\pi}_c(t=0) = \begin{pmatrix} \pi_0(0) \\ \pi_1(0) \\ \dots \\ \pi_M(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (57c)$$

Im stationären Zustand bildet die (in diesem Fall nicht zeitabhängige) Matrix $[P_{jk}]$ aller Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten P_{jk} den Zustandsvektor $\vec{\pi}_c$ des Systems auf sich selbst ab:

$$\vec{\pi}_c = \vec{\pi}_c \cdot [P_{jk}] \quad (58)$$

4.2.4 Berechnung der mittleren Auslastung

Die Auslastung S des Kanals setzt sich aus dem durch Reservierung und dem durch wahlfreien Zugriff übertragenen Verkehr zusammen. Sie läßt sich deshalb wie im folgenden gezeigt berechnen:

$$S = \sum_{j=0}^M \pi_j \cdot (P\{C=\mathbf{b}|J=j\} + P\{W=\mathbf{w}|J=j\}) \quad (59)$$

$P\{W=\mathbf{w}|J=j\}$ ist die vom Zugriffsverfahren abhängige bedingte Wahrscheinlichkeit, daß eine erfolgreiche wahlfreie Übertragung stattfindet, falls $J = j$ Stationen in eine Kollisionsauflösung verwickelt sind. Eine wahlfreie Übertragung setzt zunächst einen nicht reservierten Kanal voraus. Weiterhin muß genau eine der $M - J$ nicht kollidierten Stationen ein neues Paket erzeugen. Daraus folgt:

$$P\{W=\mathbf{w}|J=j\} = P\{C=\bar{\mathbf{b}}|J=j\} \cdot P\{A = 1 | J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \quad (60)$$

4.2.5 Berechnung der mittleren Verzögerungszeit

Die gesamte in Vielfachen einer Zeitschlitzdauer gemessene Übermittlungszeit eines Nutzpaketes bei einem Satellitensystem setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- der Zeit t_1 vom ersten bis zum erfolgreichen Sendeversuch der Reservierungsanforderung oder des Pakets (falls das Paket im wahlfreien Zugriff erfolgreich ist)
- der Zeit t_2 zwischen dem ersten erfolgreichen Sendeversuch der Reservierungsanforderung oder des Paketes (falls das Paket im wahlfreien Zugriff erfolgreich ist) und dem Aussenden des Pakets
- der Zeit t_3 vom Aussenden des Pakets bis zum Eintreffen im Empfänger

Die Zeit t_1 kann mit dem Theorem von Little berechnet werden. Die Zeit, in der sich eine Reservierungsanforderung im Kollisionszustand befindet, entspricht dem Erwartungswert der Anzahl K_{sys} aller kollidierten Anforderungen im System, dividiert durch das Angebot, das bei einem stabilen System der Auslastung S entspricht:

$$t_1 = \frac{E[K_{Sys}]}{S} \quad (61)$$

Die Anzahl aller kollidierten Anforderungen im System entspricht dabei der Summe aller unaufgelösten Kollisionen innerhalb eines RTD. Der Erwartungswert für die Anzahl von Kollisionen im Gesamtsystem entspricht deshalb dem Erwartungswert der Anzahl aller Kollisionen innerhalb eines Zeitschlitzes, multipliziert mit der Anzahl t_{RTD} von Zeitschlitzes innerhalb eines RTD:

$$E[K_{Sys}] = t_{RTD} \cdot \sum_{j=0}^M j \cdot \pi_j \quad (62)$$

Die Zeit t_2 setzt sich zusammen aus dem RTD und der Wartezeit der Anforderung in der globalen Warteschlange:

$$t_2 = (t_{RTD} + E[w_q]) \cdot P\{\text{Paket wird durch Reservierung übertragen}\} \quad (63)$$

mit (siehe Anhang A1, Gl. (146)):

$$E[w_q] = \frac{E[R^2] - E[R]}{2E[R](1 - E[R])} \quad (64)$$

Die Erwartungswerte $E[R^2]$ und $E[R]$ lassen sich mit Hilfe von Gl. (55) berechnen:

$$E[R^2] = \sum_{r=0}^N P\{R=r\} \cdot r^2 \quad (65)$$

$$E[R] = \sum_{r=0}^N P\{R=r\} \cdot r \quad (66)$$

Die Wahrscheinlichkeit $P\{\text{Paket wird durch Reservierung übertragen}\}$ entspricht dem Anteil des durch Reservierung übertragenen Verkehrs am Gesamtverkehr:

$$P\{\text{Paket wird durch Reservierung übertragen}\} = \frac{E[R]}{S} \quad (67)$$

Die Zeit t_3 vom Aussenden des Pakets bis zum vollständigen Eintreffen im Empfänger ist gleich der Summe aus der Ausbreitungsverzögerung t_{prop} in Zeitschlitzes und der Zeitdauer eines Zeitschlitzes:

$$t_3 = t_{prop} + 1 \quad (68)$$

Die gesamte mittlere Übermittlungsverzögerung ist also:

$$t_d = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{E[K_{Sys}]}{S} + \left(t_{RTD} + \frac{E[R^2] - E[R]}{2E[R](1 - E[R])} \right) \cdot \frac{E[R]}{S} + t_{prop} + 1 \quad (69)$$

4.3 Analyse des Zugriffs durch Reservierung

4.3.1 Zugriff durch Reservierung bei endlicher Kapazität des Reservierungskanals

Bei der Analyse des Zugriffs durch Reservierung wird oftmals davon ausgegangen, daß die für die Übertragung der Reservierungsanforderungen zur Verfügung stehende Übertragungskapazität unbegrenzt groß ist oder daß jeder Station ein eigener Reservierungskanal exklusiv zugeteilt ist. In beiden Fällen entstehen keine zusätzlichen Verzögerungen durch Kollisionen von Reservierungsanforderungen oder durch die Abarbeitung eines Protokolls zur Regelung des Zugriffs auf den Reservierungskanal.

In Systemen mit einer unbekanntenen oder stark wechselnden Anzahl von Stationen kann ein exklusiv zugeteilter Reservierungskanal nicht realisiert werden. Weiterhin wird sehr viel Übertragungskapazität verschwendet, falls die Reservierungsanforderungen von einer großen Anzahl von Stationen mit einem jeweils sehr geringen Angebot erzeugt werden. Diese Situation tritt z.B. bei der Signalisierung in Mobilfunksatellitensystemen auf, in dem eine sehr große Anzahl von Satellitenmobilfunkgeräten mit einer relativ geringen Rate von wenigen Rufen pro Tag auf die Satellitenkanäle zugreifen. In diesem Fall ist es von Vorteil, einen von allen Stationen gemeinsam genutzten Reservierungskanal vorzusehen. Durch das große RTD ist ein direktes Mithören des Reservierungskanals nicht möglich. Die dadurch entstehenden Kollisionen müssen durch ein spezielles Protokoll aufgelöst werden.

Im analysierten System wird von einem Reservierungskanal mit einer Kapazität von N Reservierungsanforderungen pro Zeitschlitz ausgegangen. Bild 4-1 bzw. 4-2 zeigt die Zeitschlitzstruktur. Das System enthält M Stationen. Eine sendewillige Station greift nach dem Auftreten eines Sendewunsches mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf einen der N Minizeitschlitz bzw. Reservierungszeitschlitz zu. Ist die Reservierung erfolgreich, d.h. ist sie nicht durch eine Kollision mit einer anderen, zum gleichen Zeitpunkt sendenden Station zerstört worden, wird sie in der globalen Warteschlange solange gespeichert, bis alle anderen, vorher erfolgreichen Reservierungsanforderungen durch Aussenden des zugehörigen Paketes abgearbeitet sind. Jede Station, die nicht an einer Kollisionsauflösung beteiligt ist, erzeugt in jedem Zeitschlitz mit der Wahrscheinlichkeit σ , $0 \leq \sigma \leq 1$, ein neues Paket. Daher gilt:

$$P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} = P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = P\{A=a|J=j\} \quad (70)$$

Die Anzahl der neu auftretenden Kollisionen K ist ebenfalls nicht vom Kanalzustand abhängig, da Reservierungs- und Nutzkanal vollständig voneinander getrennt sind. Es gilt deshalb:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = P\{K=k|A=a, J=j\} \quad (71)$$

Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeit P_{jk} nach Gl. (43) vereinfacht sich deshalb zu:

$$P_{jk} = \sum_{a=0}^M P\{A=a|J=j\} \cdot P\{K=k|A=a, J=j\} \quad (72)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{A=a|J=j\}$, daß a neue Pakete generiert werden, falls j Stationen kollidiert sind, ergibt sich aus einer Binomialverteilung:

$$P\{A=a|J=j\} = \binom{M-j}{a} \cdot \sigma^a \cdot (1-\sigma)^{M-j-a} \quad (73)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j\}$, daß k Kollisionen auftreten, falls j kollidierte Stationen ihre Reservierungsanforderungen wiederholen und gleichzeitig a neue Reservierungsanforderungen generiert werden, läßt sich durch die hypergeometrische Verteilungsfunktion $B(x, y, N)$ ausdrücken (siehe Gl. (147) und (148) im Anhang A2). $B(x, y, N)$ entspricht für $0 \leq a+j \leq M$ der Wahrscheinlichkeit für die erfolgreiche Übertragung von $x = a+j-k$ erfolgreichen Reservierungsanforderungen innerhalb von N Minizeitschlitz bei $y = a+j$ Reservierungsversuchen. Daraus folgt:

$$P\{K=k|A=a, J=j\} = B(a+j-k, a+j, N), \quad 0 \leq a+j \leq M \quad (74)$$

Beim reinen Reservierungsverfahren kann wegen der Entkopplung des Nutzkanalzustands vom Ankunftsprozeß auf die Berechnung von $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ verzichtet werden. Diese beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten dienen zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit $P\{R=r\}$ für das Auftreten von r erfolgreichen Reservierungen in einem Zeitschlitz. $P\{R=r\}$ aus Gl. (55) reduziert sich beim reinen Reservierungsverfahren zu:

$$P\{R=r\} = \sum_{j=0}^M \pi_j \cdot \sum_{a=0}^{M-j} P\{A=a|J=j\} \cdot P\{R=r|A=a, J=j\} \quad (75)$$

mit

$$P\{R=r|A=a, J=j\} = P\{K=a+j-r|A=a, J=j\} \quad (76)$$

Die Auslastung S kann beim Reservierungsverfahren mit Gl. (59) berechnet werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß $P\{W=w|J=j\} = 0$ ist, da kein wahlfreier Zugriff auf den Nutzkanal erlaubt ist. Einfacher ist die Berechnung von S allerdings über den Erwartungswert $E[R]$ der Anzahl der erfolgreichen Reservierungen pro Zeitschlitz (siehe Gl. (66)). $E[R]$ entspricht für ein stabiles System, d.h. für $E[R] \leq 1$ der Auslastung S . Ist $E[R]$ größer als eins,

dann wird die Auslastung S auf die Maximalkapazität des Nutzkanales begrenzt. Für das Reservierungsverfahren gilt also:

$$S = \max(1, E[R]) \quad (77)$$

4.3.2 Zugriff durch Reservierung bei unendlicher Kapazität des Reservierungskanals

Aus den in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Ergebnissen läßt sich leicht die Analyse für ein reines Reservierungsverfahren mit unendlicher Kapazität des Übertragungskanals herleiten. Da grundsätzlich alle Reservierungsanforderungen erfolgreich sind, gilt für $P\{R=r|A=a, J=j\}$:

$$P\{R=r|A=a, J=j\} = \begin{cases} 0 & \text{falls } r \neq a \\ 1 & \text{falls } r = a \end{cases} \quad (78)$$

Da keine Kollisionen zwischen Reservierungsanforderungen entstehen können, gilt für die Zustandswahrscheinlichkeit π_j :

$$\pi_j = \begin{cases} 0 & \text{falls } j \neq 0 \\ 1 & \text{falls } j = 0 \end{cases} \quad (79)$$

Die Wahrscheinlichkeit $P\{R=r\}$ für das Auftreten von r erfolgreichen Reservierungen ist deshalb gleich der Wahrscheinlichkeit $P\{A=a\}$, daß a neue Pakete generiert werden. Daraus folgt für $P\{R=r\}$:

$$P\{R=r\} = \binom{M}{r} \cdot \sigma^r \cdot (1-\sigma)^{M-r} \quad (80)$$

Das erste und zweite Moment dieser Binomialverteilung ist:

$$E[R] = M \cdot \sigma \quad (81)$$

$$E[R^2] = M \cdot (M-1) \cdot \sigma^2 + M \cdot \sigma \quad (82)$$

Daraus folgt für die Wartezeit in der globalen Warteschlange (siehe Gl. (146) im Anhang):

$$E[w_q] = \frac{E[R^2] - E[R]}{2E[R](1-E[R])} = \frac{(M-1) \cdot \sigma}{2 \cdot (1-M \cdot \sigma)} \quad (83)$$

Berücksichtigt man, daß die Anzahl K_{sys} der kollidierten Stationen immer gleich Null ist und daß für $E[R] \leq 1$ nach Gl. (77) $E[R] = S$ ist, folgt für die gesamte Paketübermittlungszeit aus Gl. (69):

$$t_d = t_{RTD} + \frac{(M-1) \cdot \sigma}{2 \cdot (1-M \cdot \sigma)} + t_{Prop} + 1 \quad (84)$$

Läßt man nun die Anzahl M der Bodenstationen gegen unendlich und gleichzeitig die Paketankunftswahrscheinlichkeit σ so gegen 0 gehen, daß gilt

$$\lim_{\substack{M \rightarrow \infty \\ \sigma \rightarrow 0}} M \cdot \sigma = S, \quad (85)$$

so gehorcht der Paketankunftsprozeß einer Poisson-Verteilung. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen von a neuen Paketen in einem Zeitschlitz ist dann:

$$P\{A = a\} = \frac{S^a}{a!} \cdot e^{-S} \quad (86)$$

Aus Gl. (84) und (85) folgt dann für die Verzögerungszeit:

$$t_d = t_{RTD} + \frac{S}{2 \cdot (1-S)} + t_{prop} + 1, \quad S < 1 \quad (87)$$

4.4 Analyse des CRRMA/UCA-Zugriffsverfahrens

CRRMA/UCA bedeutet *Combined Random/Reservation Multiple Access / Uncontrolled Channel Access*. Das Zugriffsverfahren ist also eine Kombination aus reserviertem und wahlfreiem Zugriff. Der Kanalzugriff erfolgt unkontrolliert, d.h. eine sendewillige Station darf, unabhängig vom Zustand des Gesamtsystems, immer sofort auf den Reservierungskanal zugreifen. Das analysierte Zugriffsverfahren entspricht bis auf ein später erläutertes Detail dem in [59] vorgestellten UCA-CRRMA.

Das gesamte System besteht aus M Stationen und einem Satelliten. Die Zeitschlitzstruktur entspricht Bild 4-1 bzw. 4-2. Eine Station ist in einem Zeitschlitz entweder *blockiert*, falls sie an einer Kollisionsauflösung teilnehmen muß, oder *sendeberechtigt*. Ist sie sendeberechtigt, dann erzeugt sie mit der Wahrscheinlichkeit σ ein neues Paket. Für jedes neue Paket sendet eine Station immer eine Reservierungsanforderung in einem zufällig ausgewählten Minzeitschlitz des aktuellen Zeitschlitzes. Falls der aktuelle Zeitschlitz nicht reserviert ist (Kanalzustand $C=\bar{b}$), sendet sie gleichzeitig eine Kopie des Paketes. Ist die betrachtete Station blockiert, wiederholt sie die vorher kollidierte Reservierungsanforderung. Im Gegensatz zum UCA-CRRMA dürfen Stationen, die an einer Kollisionsauflösung teilnehmen, ihr vorher kollidiertes *Paket* nicht wiederholen. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, daß neu eintreffende Pakete im wahlfreien Zugriff erfolgreich übertragen werden.

Der Unterschied zu dem in Unterkapitel 4.3 analysierten Reservierungsverfahren besteht also nur in der Möglichkeit, das Paket sofort beim Eintreffen wahlfrei zu senden, falls der Nutzkanal nicht reserviert ist. Da der Kanalzugriff vom Kanalzustand C abhängig ist, muß C bei der CRRMA/UCA-Analyse immer berücksichtigt werden. Deshalb ist die CRRMA/UCA-Analyse weit aufwendiger als die in Unterkapitel 4.3 vorgestellte Analyse des Zugriffs durch Reservie-

zung. Ziel dieses Unterkapitels ist es, die in Abschnitt 4.2.2 aufgelisteten, vom Verfahren abhängigen bedingten Wahrscheinlichkeiten zu berechnen.

Die vom Kanalzustand und von der Anzahl $J = j$ kollidierter Stationen abhängige Wahrscheinlichkeit, daß $A = a$ neue Pakete generiert werden, wird wie im folgenden gezeigt berechnet. Ist der Kanal wahlfrei zugänglich, dann erzeugen alle nicht kollidierten Stationen mit der Wahrscheinlichkeit σ ein Paket. Deshalb gilt:

$$P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \binom{M-j}{a} \cdot \sigma^a \cdot (1-\sigma)^{M-j-a} \quad (88)$$

Ist der Nutzkanal reserviert, dann darf diejenige Station, die ihr Paket reserviert überträgt, kein neues Paket erzeugen. Ist die globale Warteschlange leer, dann ist die Reservierungsbestätigung gerade eben eingetroffen. In diesem Fall gehört die Station, die reserviert übertragen darf, nicht zu den j kollidierten Stationen, d.h. es dürfen $M-j-1$ Stationen mit Wahrscheinlichkeit σ neue Pakete generieren. Enthält die globale Warteschlange mehr als ein Paket, dann stammt die Reservierungsbestätigung aus einer anderen Zustandsfolge (siehe Abschnitt 4.2.1). In diesem Fall stammt die Station, die reserviert übertragen darf, mit einer Wahrscheinlichkeit von j/M aus der Menge aller kollidierten Stationen. Für $P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}$ gilt also:

$$P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} = \quad (89)$$

$$\begin{cases} P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} \cdot P\{Q \geq 1\} \cdot \frac{j}{M} + \\ P\{A=a|J=j+1, C=\bar{\mathbf{b}}\} \cdot \left(P\{Q=0\} + P\{Q \geq 1\} \cdot \frac{M-j}{M} \right) & \text{falls } j < M \\ 1 & \text{falls } (j=M) \wedge (a=0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ entspricht genau der für das Reservierungsverfahren hergeleiteten bedingten Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j\}$ (siehe Gl. (74)). Dies folgt direkt aus der Tatsache, daß sowohl beim Reservierungsverfahren, als auch beim CRRMA/UCA nur eine Reservierungsanforderung, nicht aber das zugehörige Paket gesendet werden darf, falls der Nutzkanal reserviert ist:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = B(a+j-k, a+j, N), \quad 0 \leq a+j \leq M \quad (90)$$

Ist der Nutzkanal nicht reserviert, d.h. er ist wahlfrei zugänglich, dann muß unterschieden werden, ob im gesamten System genau ein neues Paket erzeugt wird oder nicht. Falls nicht genau ein Paket erzeugt wird, d.h. es ist $a \neq 1$, dann ist der Nutzkanal entweder frei oder er enthält mehrere kollidierte Pakete. In beiden Fällen wird kein Paket wahlfrei übertragen. Daraus folgt, daß die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ für $a \neq 1$ ebenfalls der bedingten Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j\}$ nach Gl. (74) entspricht.

Ist $A = 1$ und der Kanal wahlfrei zugänglich, dann wird das neu erzeugte Paket erfolgreich im wahlfreien Zugriffsmodus übertragen. Die gleichzeitig gesendete Reservierungsanforderung wird, falls sie nicht mit anderen Reservierungsanforderungen kollidiert ist, verworfen, d.h. sie zählt *nicht* als erfolgreiche Reservierung. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, daß $K = k$ kollidierte Reservierungsanforderungen erzeugt werden, falls $J = j$ Stationen kollidiert sind, genau $A = 1$ neues Paket generiert wird und der aktuelle Zeitschlitz wahlfrei zugänglich ist, berechnet sich zu:

$$\begin{aligned}
 P\{K=k|A=1, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} & \quad (91) \\
 &= \frac{\eta(j-k, j, N) \cdot (N-j+k)}{N^{j+1}} + \frac{\eta(j-k+1, j, N) \cdot (j-k+1)}{N^{j+1}} \\
 &= B(j-k, j, N) \cdot \frac{N-j+k}{N} + B(j-k+1, j, N) \cdot \frac{j-k+1}{N}
 \end{aligned}$$

Dabei ist $\eta(j-k, j, N) \cdot (N-j+k)$ die Anzahl aller Möglichkeiten, die j zu wiederholenden Reservierungsanforderungen so auf die N Minizeitschlitzte so zu verteilen, daß $R = j-k$ unkollidierte Reservierungen entstehen und die neue Reservierungsanforderung auf einen der übrigen $N-R = N-j+k$ Minizeitschlitzte zu legen, wo sie keine der R Reservierungen zerstört.

$\eta(j-k+1, j, N) \cdot (j-k+1)$ ist die Anzahl aller Möglichkeiten, die j zu wiederholenden Reservierungsanforderungen so zu verteilen, daß zunächst $R+1 = j-k+1$ unkollidierte Reservierungen entstehen und die neue Reservierungsanforderung eine dieser $R+1$ Reservierungen zerstört. Dabei entstehen wieder genau $R = j-k$ gültige, d.h. erfolgreiche Reservierungen.

Ist $A = 1$, dann muß $j \geq k$ sein, da keine neue Kollision zu den $J = j$ bestehenden hinzukommen kann. Insgesamt läßt sich die Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ für alle möglichen Fälle von A, J und K folgendermaßen darstellen:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} B(a+j-k, a+j, N) & \text{falls } (a \neq 1) \\ B(j-k, j, N) \cdot \frac{N-j+k}{N} + B(j-k+1, j, N) \cdot \frac{j-k+1}{N} & \text{falls } (a = 1) \wedge (j \geq k) \\ 0 & \text{falls } (a = 1) \wedge (j < k) \end{cases} \quad (92)$$

Die beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ lassen sich sehr leicht aus den Gleichungen (90) und (92) herleiten, wenn man $K = a+j-r$ setzt, falls $a \neq 1$ ist oder falls der Kanal reserviert ist. Für $a = 1$ muß $K = j-r$ gesetzt werden, falls der Kanal wahlfrei zugänglich ist, da das einzige neu

erzeugte Paket wahlfrei übertragen wird und deshalb keine erfolgreiche Reservierung erzeugen kann. Zusammengefaßt gilt also:

$$P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = P\{K = a + j - r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} \quad (93)$$

$$P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} P\{K = a + j - r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} & \text{falls } a \neq 1 \\ P\{K = j - r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} & \text{falls } a = 1 \end{cases} \quad (94)$$

Die beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ können durch einfache Überlegungen direkt aus der Anschauung gewonnen werden. Ist der Nutzkanal reserviert, dann muß die neue Anzahl von Kollisionen k gleich der Anzahl j vor einem RTD plus der vor einem RTD neu eingetroffenen Pakete a sein, damit keine Reservierung erzeugt wird. Dies gilt auch für einen wahlfrei zugänglichen Nutzkanal, falls $a \neq 1$ ist, da in diesem Fall keine wahlfreie Übertragung zustande kommen kann. Ist bei wahlfreiem Zugang zum Nutzkanal $a = 1$, dann muß $j = k$ sein, damit keine Reservierung erzeugt wird, da das einzige neu eintreffende Paket wahlfrei übertragen wird und deshalb keine erfolgreiche Reservierung erzeugen kann. Zusammengefaßt gilt deshalb:

$$P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } k = j + a \\ 0 & \text{falls } k \neq j + a \end{cases} \quad (95)$$

$$P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } [(k = j) \wedge (a = 1)] \vee \\ & [(k = j + a) \wedge (a \neq 1)] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (96)$$

4.5 Analyse des CRRMA/CCA1-Zugriffsverfahrens

Das in Unterkapitel 4.4 vorgestellte und analysierte CRRMA/UCA-Zugriffsverfahren besitzt eine konstante Kapazität des Reservierungskanals von N Minizeitschlitzen pro Nutzkanalzeitschlitz. Zur Auflösung einer Kollision ist es wünschenswert, die Kapazität des Reservierungskanals zu erhöhen, damit die Zeit, die eine Kollisionsauflösung benötigt, so kurz wie möglich gehalten wird. Dadurch wird die Belastung des Reservierungskanals durch wiederholte Reservierungsanforderungen verringert. Um die Übertragungskapazität des Gesamtkanals bestehend aus Reservierungs- und Nutzkanal konstant zu halten, wird der Nutzkanal bei CRRMA/CCA1 (CCA = engl. *Controlled Channel Access*) während einer Kollisionsauflösung zusätzlich zur Übertragung von Reservierungsanforderungen genutzt. Dadurch erhöht sich die Reservierungskapazität während einer Kollisionsauflösung auf $N' > N$ Minizeitschlitze pro Nutzkanalzeitschlitz (siehe Bild 4-7).

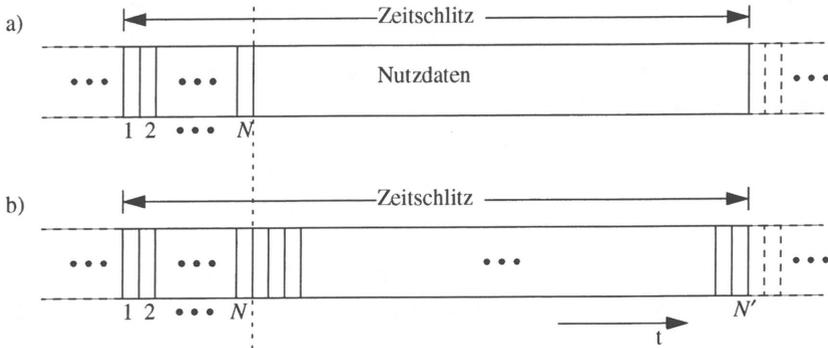


Bild 4-7: Wahlfrei zugänglicher oder reservierter Zeitschlitz (a) und Zeitschlitz während einer Kollisionsauflösung (b) bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2

Während einer Kollisionsauflösung dürfen keine neuen Pakete erzeugt werden. Eine reservierte Übertragung hat immer eine höhere Priorität als die Erhöhung der Reservierungskapazität während einer Kollisionsauflösung. Beim Eintreffen einer Sendeaufforderung (siehe Bild 4-3) wird das zugehörige Paket deshalb sofort reserviert übertragen. Findet zeitgleich eine Kollisionsauflösung statt, muß sie sich deshalb mit N Minizeitschlitzen begnügen.

Für die Analyse des vorgestellten Zugriffsverfahrens wird zunächst die vom Kanalzustand und von der Anzahl der kollidierten Stationen abhängige Wahrscheinlichkeit, daß $A = a$ neue Pakete erzeugt werden, berechnet. Ist der Kanal reserviert und findet keine Kollisionsauflösung statt, d.h. ist $J = 0$, dann dürfen alle Stationen, außer der Station, die ihr Paket reserviert übertragen darf, mit der Wahrscheinlichkeit σ ein neues Paket generieren. Ist $J > 0$, dann darf kein neues Paket generiert werden, da eine Kollisionsauflösung stattfindet. Daraus folgt für $P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}$:

$$P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} \binom{M-1}{a} \cdot \sigma^a \cdot (1-\sigma)^{M-1-a} & \text{falls } (j = 0) \\ 0 & \text{falls } (j > 0) \wedge (a > 0) \\ 1 & \text{falls } (j > 0) \wedge (a = 0) \end{cases} \quad (97)$$

Ist der Nutzkanal nicht reserviert, dann dürfen neue Pakete nur erzeugt werden, falls keine Kollisionsauflösung stattfindet, d.h. J muß gleich 0 sein. In diesem Fall erzeugen alle der M Stationen mit der Wahrscheinlichkeit σ ein neues Paket. Daraus folgt:

$$P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} \binom{M}{a} \cdot \sigma^a \cdot (1-\sigma)^{M-a} & \text{falls } (j = 0) \\ 0 & \text{falls } (j > 0) \wedge (a > 0) \\ 1 & \text{falls } (j > 0) \wedge (a = 0) \end{cases} \quad (98)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ folgt direkt aus der hypergeometrischen Verteilungsfunktion. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß mindestens eine der beiden Größen a und j gleich Null sein muß, da während einer Kollisionsauflösung keine neuen Pakete generiert werden dürfen:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} B(a+j-k, a+j, N) & \text{falls } (a=0) \vee (j=0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (99)$$

Ist der Kanal nicht reserviert, dann wird bei einer Kollisionsauflösung, d.h. für $J > 0$, die Anzahl der Minizeitschlitze auf N' erhöht. Für $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ ergibt sich deshalb:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} B(j-k, j, N') & \text{falls } (j > 0) \wedge (a=0) \\ B(a-k, a, N) & \text{falls } (j=0) \wedge (a \geq 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (100)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ folgt direkt aus Gl. (99), wenn man $K = a + j - r$ setzt:

$$P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = P\{K = a + j - r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} \quad (101)$$

Falls der Nutzkanal nicht reserviert ist, muß man die beiden Fälle $a = 1$ und $a \neq 1$ unterscheiden. Im ersten Fall erhält man eine erfolgreiche wahlfreie Übertragung und es werden grundsätzlich keine Reservierungen erzeugt, da $j = 0$ sein muß, damit $a \geq 0$ sein kann. Unter Berücksichtigung von Gl. (100) folgt:

$$P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} P\{K = a + j - r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} & \text{falls } a \neq 1 \\ 1 & \text{falls } (a=1) \wedge (r=0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (102)$$

Die beiden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ lassen sich übersichtlicher darstellen, wenn man sie getrennt für die beiden Fälle $j = 0$ und $a = 0$ herleitet. Zunächst wird der Fall $j = 0$ betrachtet, d.h. es findet keine Kollisionsauflösung statt. Ist der Kanal reserviert, dann muß $k = a$ sein, d.h. es müssen alle Reservierungsanforderungen kollidieren, damit keine neuen Reservierungen entstehen. Dies ist allerdings für $a = 1$ nicht möglich:

$$P\{R=0|J=0, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } (k=a) \wedge (a \neq 1) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (103)$$

Ist der Nutzkanal nicht reserviert, dann entstehen keine neuen Reservierungen, falls kein neues Paket erzeugt wird, falls alle $a \geq 2$ neu erzeugten Reservierungsversuche kollidieren oder falls genau ein neues Paket generiert wird, das erfolgreich im wahlfreien Modus übertragen wird:

$$P\{R=0|J=0, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } [(k = a) \wedge (a \neq 1)] \vee \\ & [(k = 0) \wedge (a = 1)] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (104)$$

Falls $a = 0$ ist, d.h. falls keine neuen Pakete generiert werden, erhält man genau dann keine neue Reservierung, wenn sich die Anzahl der kollidierten Stationen nicht ändert, d.h. wenn $j = k$ ist. Daraus folgt:

$$P\{R=0|J=j, K=k, A=0, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \quad (105)$$

$$P\{R=0|J=j, K=k, A=0, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } j = k \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

4.6 Analyse des CRRMA/CCA2-Zugriffsverfahrens

Das in diesem Unterkapitel vorgestellte Zugriffsverfahren CRRMA/CCA2 (CCA = engl. *Controlled Channel Access*) unterscheidet sich vom in Unterkapitel 4.5 vorgestellten CRRMA/CCA1 dadurch, daß neue Pakete auch während einer Kollisionsauflösung erzeugt werden dürfen. Da der Nutzkanal in diesem Fall für die Übertragung von Reservierungsversuchen genutzt wird, darf für das neue Paket nur eine Reservierungsanforderung, nicht aber das Paket selbst, gesendet werden. Das Generieren eines neuen Paketes ist einer Station deshalb genau dann erlaubt, wenn sie nicht an einer Kollisionsauflösung teilnimmt und wenn sie kein Paket reserviert überträgt. Dies entspricht der Paketgenerierung bei CRRMA/UCA (siehe Unterkapitel 4.4). Die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{A=a|J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{A=a|J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ können deshalb durch die Gleichungen (88) und (89) beschrieben werden.

Ist der Kanal reserviert, dann stehen grundsätzlich nur N Minizeitschlitze zur Übertragung der Reservierungsanforderungen zur Verfügung. Dies entspricht ebenfalls CRRMA/UCA. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$, $P\{R=r|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\mathbf{b}\}$ lassen sich deshalb mit Gl. (90), (93) bzw. (95) ausdrücken.

Im Unterschied zu CRRMA/UCA wird die Anzahl der Minizeitschlitze bei einer Kollisionsauflösung auf $N' > N$ erhöht, falls der Nutzkanal nicht reserviert ist. Zur Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$, $P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ und $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$ müssen deshalb die Fälle $j = 0$ und $j > 0$ unterschieden werden.

Ist bei nicht reserviertem Nutzkanal $j = 0$ und $a \leq 1$, können grundsätzlich keine Folgekollisionen erzeugt werden. Ist bei ebenfalls nicht reserviertem Nutzkanal $j = 0$ und $a \geq 2$, dann erzeugen die neu eintreffenden Pakete eine Kollision auf dem Nutzkanal. Kollisionen auf dem Reservierungskanal können in diesem Fall nur durch die a neu generierten Pakete verursacht werden. Ist $j > 0$, dann findet eine Kollisionsauflösung statt. In diesem Fall ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Minizeitschlitze N' , da keine Pakete im reservierten Modus übertragen werden müssen. Da der Nutzkanal nicht durch neu generierte Pakete belegt werden darf, kann keine wahlfreie Übertragung stattfinden. Zusammengefaßt gilt deshalb für $P\{K=k|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$:

$$P\{K=k|A=a, J=j, C=\mathbf{b}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } (j = 0) \wedge (k = 0) \wedge (a \leq 1) \\ B(a-k, a, N) & \text{falls } (j = 0) \wedge (a \geq 2) \\ B(a+j-k, a+j, N') & \text{falls } j > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (106)$$

Ist bei nicht reserviertem Kanal $a \neq 1$ oder findet gerade eine Kollisionsauflösung statt, d.h. es ist $j > 0$, dann muß die Anzahl der erzeugten Kollisionen $K = a + j - r$ sein. Ist der Kanal wahlfrei zugänglich, d.h. es ist $j = 0$, dann kann bei Eintreffen genau eines neuen Paketes keine Reservierung erzeugt werden, da dieses Paket wahlfrei übertragen wird. Deshalb gilt für $P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\}$:

$$P\{R=r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} P\{K = a + j - r|A=a, J=j, C=\bar{\mathbf{b}}\} & \text{falls } (a \neq 1) \vee (j > 0) \\ 1 & \text{falls } (r = 0) \wedge (a = 1) \wedge (j = 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (107)$$

Keine Reservierung wird erzeugt, falls ein Paket entweder wahlfrei übertragen wird, d.h. falls $j = k = 0$ und $a = 1$ ist oder falls aus allen j wiederholten Reservierungsversuchen und allen a neu eintreffenden Paketen keine erfolgreiche Reservierung hervorgeht. Daraus folgt für $P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\}$:

$$P\{R=0|J=j, K=k, A=a, C=\bar{\mathbf{b}}\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } [(j = 0) \wedge (k = 0) \wedge (a \leq 1)] \vee \\ & [(a + j = k) \wedge (j > 0)] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (108)$$

4.7 Analyse des getakteten ALOHA-Zugriffsverfahrens

Der Vollständigkeit wegen wird an dieser Stelle auch die Analyse des ALOHA-Zugriffsverfahrens mit einer endlichen Anzahl von Stationen vorgestellt. Die Analyse wird für ein RTD von

einem Zeitschlitz in [91] gezeigt. Da keine Minzeitslitze existieren, muß für Stationen, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind, eine andere zufallsabhängige Wahlmöglichkeit für die Wiederholung kollidierter Pakete geschaffen werden. Beim analysierten ALOHA-Zugriffsverfahren wird für ein kollidiertes Paket in jedem Zeitschlitz nach dem Eintreffen der Kollisionsbestätigung durch ein Bernoulli-Experiment mit der Wahrscheinlichkeit von v bestimmt, ob es wiederholt wird. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Paket tatsächlich gesendet wird. Die Zeitdauer t (in Zeitschlitzen) vom Eintreffen der Kollisionsbestätigung bis zur Wiederholung des Paketes kann also durch eine geometrische Verteilung beschrieben werden:

$$P\{t_w = t\} = (1 - v)^{(t-1)} \cdot v \quad (109)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß genau i von j kollidierten Stationen ihr Paket wiederholen, ist:

$$P\{i \text{ kollidierte Stationen wiederholen ihr Paket} | j \text{ kollidierte Stationen}\} = \binom{j}{i} v^i (1 - v)^{j-i} \quad (110)$$

Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeit P_{jk} wird wie folgt berechnet:

$$P_{jk} = \begin{cases} 0 & \text{falls } k < j - 1 \\ [jv(1 - v)^{j-1}](1 - \sigma)^{M-j} & \text{falls } k = j - 1 \\ [1 - jv(1 - v)^{j-1}](1 - \sigma)^{M-j} + (M - j)\sigma(1 - \sigma)^{M-j-1}(1 - v)^j & \text{falls } k = j \\ (M - j)\sigma(1 - \sigma)^{M-j-1}[1 - (1 - v)^j] & \text{falls } k = j + 1 \\ \binom{M-j}{k-j} \sigma^{k-j} (1 - \sigma)^{M-k} & \text{falls } k > j + 1 \end{cases} \quad (111)$$

Es kann immer nur maximal ein Paket erfolgreich übertragen werden. Die Anzahl der Folgekollisionen k kann deshalb nie kleiner als $j - 1$ sein. Ist $k = j - 1$, dann wird ein vorher kollidiertes Paket erfolgreich wiederholt. Dies geschieht genau dann, wenn nur eine der j kollidierten Stationen ihr Paket wiederholt und die $M - j$ nicht kollidierten Stationen kein neues Paket generieren. Die Anzahl der kollidierten Stationen ändert sich nicht, falls entweder kein neues Paket generiert wird und keine erfolgreiche Paketwiederholung erfolgt oder falls genau ein neu generiertes Paket erfolgreich übertragen wird. Ist $k = j + 1$, dann ist genau ein neu erzeugtes Paket mit mindestens einem wiederholten Paket kollidiert. Ist $k > j + 1$, dann sind $k - j \geq 2$ neue Pakete generiert worden und kollidiert.

Mit Hilfe der in Gl. (111) gezeigten Übergangswahrscheinlichkeiten wird die Gleichgewichtsbedingung nach Gl. (58) gelöst. Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Unterkapiteln untersuchten CRRMA- und CRRMA-varianten Zugriffsverfahren muß die Zustandsverteilung

lung hier nicht iterativ bestimmt werden, da die Übergangswahrscheinlichkeiten P_{jk} wegen der fehlenden globalen Warteschlange über der Zeit t konstant sind.

Zur Berechnung der mittleren Auslastung wird zunächst die bedingte Wahrscheinlichkeit bestimmt, daß eine erfolgreiche Übertragung erfolgt, falls j Stationen kollidiert sind. Eine erfolgreiche Übertragung entsteht entweder, wenn genau eine der kollidierten Stationen ihr Paket wiederholt und alle nicht kollidierten Stationen kein Paket erzeugen oder falls nur eine Station ein neues Paket erzeugt und alle kollidierten Stationen ihr Paket nicht wiederholen:

$$P\{\text{erfolgreiche Übertragung} | j \text{ Stationen kollidiert}\} = j\nu(1-\nu)^{j-1}(1-\sigma)^{M-j} + (M-j)\sigma(1-\sigma)^{M-j-1}(1-\nu)^j \quad (112)$$

Aus dem Gesetz der totalen Wahrscheinlichkeit folgt dann für die Auslastung S :

$$S = \sum_{j=0}^M \pi_j \cdot [j\nu(1-\nu)^{j-1}(1-\sigma)^{M-j} + (M-j)\sigma(1-\sigma)^{M-j-1}(1-\nu)^j] \quad (113)$$

Die mittlere Übermittlungszeit eines Paketes folgt aus Gl. (69), wenn man die Zeit t_2 , die die bei einer notwendigen Reservierung zusätzlich entstehende Verzögerungszeit beschreibt, wegläßt. Daraus folgt für die gesamte Verzögerungszeit bei ALOHA:

$$t_d = t_1 + t_3 = \frac{E[K_{Sys}]}{S} + t_{prop} + 1 \quad (114)$$

Im Gegensatz zur Analyse in [91] muß berücksichtigt werden, daß das RTD größer als ein Zeitschlitz ist. Zur Berechnung von $E[K_{Sys}]$ wird deshalb Gl. (62) verwendet.

4.8 Validierung und Diskussion der Analysen

Zur Überprüfung der Genauigkeit der in diesem Unterkapitel vorgestellten Analysen wurden die berechneten Ergebnisse mit den Ergebnissen von Simulationsläufen verglichen. Das zugrundeliegende Simulationsmodell enthält keine Warteschlangen in den einzelnen Bodenstationen. Bezüglich der Paketankünfte entspricht die Simulation also exakt der Analyse. In der Simulation darf eine Station deshalb auch nur dann mit der Wahrscheinlichkeit σ ein neues Paket generieren, wenn sie im aktuellen Zeitschlitz nicht an einer Kollisionsauflösung teilnehmen oder ein Paket reserviert übertragen muß. Ansonsten wurden in der Simulation keine weiteren vereinfachenden Annahmen zugrundegelegt.

Im folgenden werden einige Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Als RTD wurden 50 Zeitschlitze angenommen. Die Sendewahrscheinlichkeit σ wurde von 0 bis 1 variiert. Es wurden jeweils $M = 20$ Stationen angenommen. Als Anzahl der Minizeitschlitze wurde $N = 3$ bzw. $N = 5$ gewählt. Bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 wurde für die Anzahl der Minizeitschlitze bei Kollisionsauflösung $N' = 10$ gewählt.

Bei der Simulation wurden jeweils 10 Teiltests durchgeführt. Um genügend kleine Vertrauensintervalle zu erhalten, wurden während eines Teiltests zwischen 10^4 und 10^5 Paketankünfte simuliert. Das Konfidenzniveau liegt bei 95%. Die Simulation arbeitet zeitdiskret, da sich der Systemzustand des realen Systems nur nach jedem Zeitschlitz ändert. Während eines Simulationslaufes werden Auslastung, Verzögerungszeit und Anzahl der an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen statistisch erfaßt. Zur Überprüfung der Eingabeparameter und der korrekten Implementierung des Simulationsprogramms wird die Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines neuen Paketes ebenfalls statistisch erfaßt.

In der Literatur (siehe z.B. [91]) wird als Ergebnis ähnlicher Leistungsuntersuchungen oftmals die Übermittlungsverzögerung in Abhängigkeit von der Auslastung des Systems gezeigt. Übermittlungsverzögerung und Auslastung sind in der vorliegenden Analyse allerdings beides Werte, die aus den iterativ berechneten Zustandswahrscheinlichkeiten des Systems abgeleitet werden. Eingabeparameter der Analyse und der Simulation ist die Sendewahrscheinlichkeit σ . Deshalb werden, neben der üblichen Darstellung, die berechneten Werte der Auslastung und der Übermittlungsverzögerung auch als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit dargestellt.

Alle *Kurven*, die in den im folgenden gezeigten Schaubildern enthalten sind, wurden durch die in diesem Kapitel beschriebenen *Analysen* berechnet. Zum Vergleich sind in die meisten dieser Schaubilder *Punkte mit Vertrauensintervallen* eingezeichnet, die durch *Simulation* bestimmt wurden.

Bild 4-8 zeigt die Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ des in Unterkapitel 4.4 beschriebenen CRRMA/UCA-Zugriffsverfahrens für ein System mit 20 Stationen und 3 bzw. 5 Minizeitschlitz pro Rahmen. Die Auslastung ist dabei auf die Nutzkapazität normiert. Sind alle Zeitschlitz durch ein Paket belegt, erhält man deshalb eine Auslastung von 100%. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Analyse.

Da im vorliegenden Modell keine Verluste auftreten können, entspricht die Auslastung dem effektiven Angebot. Die Auslastung und damit auch das effektive Angebot steigen zunächst proportional zu σ mit der Proportionalitätskonstante $M = 20$ an. Bei sehr kleinem σ erhält man zunächst eine sehr geringe Kollisionswahrscheinlichkeit der Pakete. Sollte es dennoch zu einer Paketkollision kommen, ist die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung der zugehörigen Reservierungsanforderung sehr groß, da bei kleinem σ meist nur sehr wenige Pakete in die Kollision verwickelt sind.

Bei weiter ansteigendem σ steigt auch die Wahrscheinlichkeit an, daß der Kanal reserviert ist und sendewillige Stationen nur eine Reservierungsanforderung, nicht aber das Paket selbst senden dürfen. Abhängig von der Anzahl der Minizeitschlitz pro Rahmen erreicht die Auslastung deshalb ein mehr oder weniger großes lokales Maximum. Bei $N = 5$ Minizeitschlitz wird sogar die maximal mögliche Auslastung von 100% erreicht. In diesem Bereich geht aller-

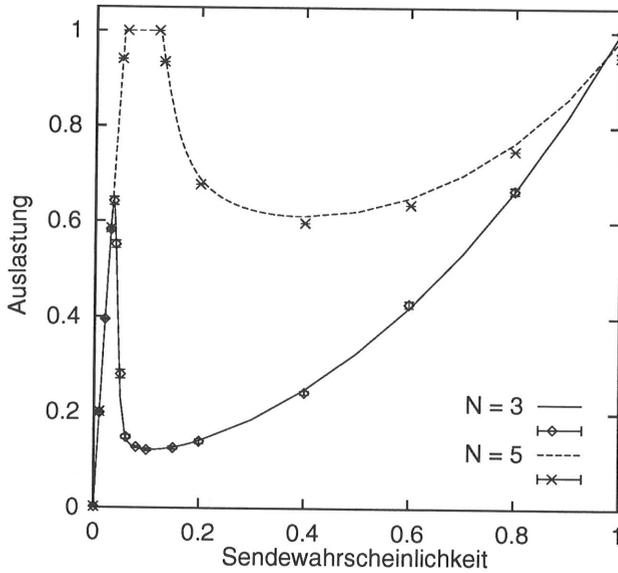


Bild 4-8: Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bzw. 5 Minizeitschlitz

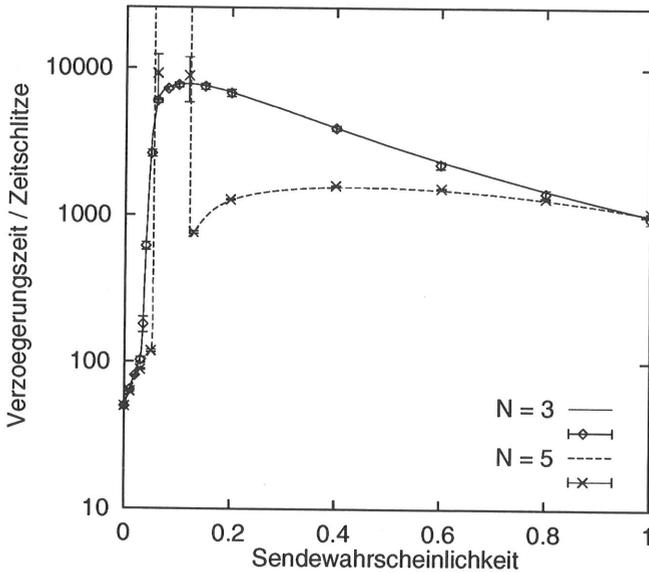


Bild 4-9: Verzögerungszeit als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bzw. 5 Minizeitschlitz

dings die Übermittlungszeit für ein Paket gegen unendlich, da die Ankunftsrate der Reservierungen gemessen an der verteilten Warteschlange größer als eins wird (siehe Bild 4-9).

Der Betriebspunkt des Systems sollte immer im linearen Bereich des Schaubildes 4-8 liegen. Für kleine Sendewahrscheinlichkeiten σ sind die erhaltenen Ergebnisse auch eine sehr gute Näherung für Systeme mit Pufferspeicher (d.h. unter Einbeziehung der höheren Schichten) bei denen blockierte Stationen neue Pakete generieren dürfen, deren Aussendung aber solange verschoben wird, bis die Station wieder sendeberechtigt ist. Für kleine σ ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine kollidierte Station ein neues Paket generiert, sehr gering. Die im folgenden vorgestellten Effekte für größere σ dienen vor allem zur Untersuchung der Stabilität des Systems.

Wird die Sendewahrscheinlichkeit σ der unkollidierten Stationen über den linearen Bereich hinaus weiter erhöht, dann erhöht sich auch die Kollisionswahrscheinlichkeit für Pakete und Reservierungsanforderungen und die Rate der beim ersten Versuch erfolgreich übertragenen Pakete sowie der erfolgreichen Reservierungsanforderungen sinkt. Dadurch erhöht sich der Anteil der an einer Kollisionsauflösung beteiligten Stationen und die Auslastung des Gesamtsystems sinkt, da diese Stationen keine neuen Pakete erzeugen dürfen.

Nach Erreichen eines lokalen Minimums steigt die Auslastung bei weiterer Erhöhung von σ wieder an. Dieser Effekt entsteht dadurch, daß bei hoher Sendewahrscheinlichkeit innerhalb eines Zyklus (siehe Bild 4-4) zunächst die Pakete und die zugehörigen Reservierungsanforderungen aller Stationen kollidieren. Nach einer gewissen Zeit wird eine der M Stationen ihre Reservierungsanforderung erfolgreich übertragen. Diese Station sendet ihr Paket reserviert aus und darf nach einem RTD ein neues Paket erzeugen. Das neu erzeugte Paket wird mit hoher Wahrscheinlichkeit im wahlfreien Modus erfolgreich übertragen, da alle anderen Stationen noch an der Kollisionsauflösung beteiligt sind und deshalb keine neuen Pakete erzeugen dürfen. Die betrachtete Station kann solange ihre Pakete erfolgreich im wahlfreien Modus übertragen, bis eine andere der $M - 1$ an der Kollisionsauflösung beteiligten Stationen erfolgreich ist, d.h. bis deren Reservierungsanforderung unkollidiert übertragen wird. In diesem Fall wird diese Station ihr Paket reserviert übertragen und die bisher erfolgreiche Station darf nur eine Reservierungsanforderung senden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit kollidiert. Auf diese Weise wechseln sich alle M Stationen in der Kanalbenutzung ab. Wichtig ist hierbei, daß bei sehr hoher Sendewahrscheinlichkeit σ immer eine Station den Kanal sehr lange für sich behalten kann (Halteeffekt), während sich alle anderen $M - 1$ Stationen um die Auflösung ihrer Kollisionen bemühen. Durch den beschriebenen Effekt kann für $\sigma = 1$ fast die maximale mögliche Auslastung von $S = 1$ erreicht werden. Durch die große Varianz der Verzögerungszeit ist dieser Halteeffekt allerdings im realen System nicht erwünscht. Das System sollte so dimensioniert werden, daß die Sendewahrscheinlichkeit σ immer kleiner ist als die Sendewahrscheinlichkeit, die dem lokalen Maximum der Auslastung entspricht.

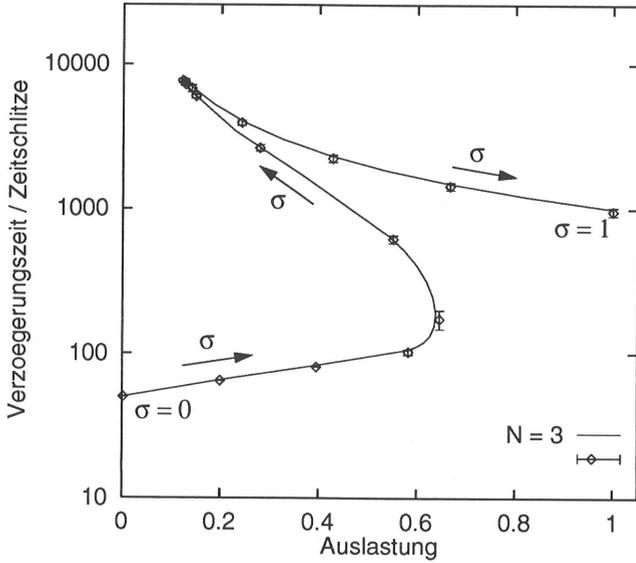


Bild 4-10: Verzögerungszeit als Funktion der Auslastung für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 Minizeitschlitz

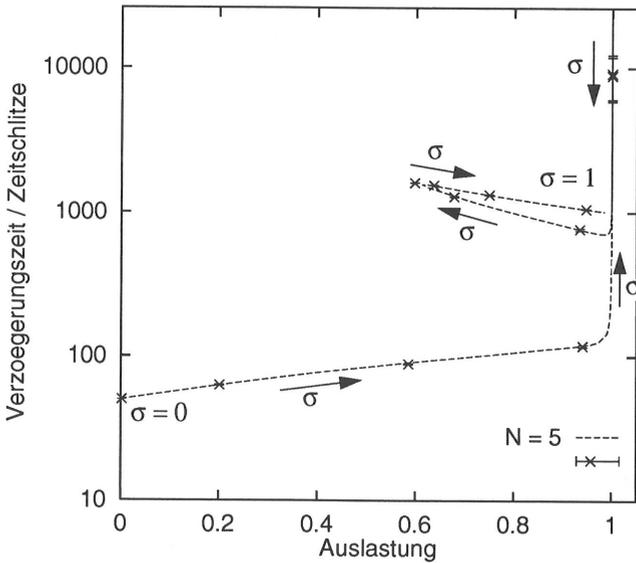


Bild 4-11: Verzögerungszeit als Funktion der Auslastung für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 5 Minizeitschlitz

Eine Station kann gleichzeitig an bis zu t_{RTD} Kollisionsauflösungen beteiligt sein. Sind bei $\sigma = 1$ gleichzeitig zwei Reservierungsanforderungen erfolgreich, dann wird eines der beiden zugehörigen Pakete sofort übertragen. Die reservierte Übertragung des zweiten Paketes wird auf den nächsten Zeitschlitz und damit auf den Nachbarzyklus verschoben. Da in diesem Zeitschlitz wegen des Halteeffekts mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls genau eine Station ein neues Paket erzeugen darf, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Kollision aller M Stationen erzeugt, da für das neu generierte Paket wegen des reservierten Kanals nur eine Reservierungsanforderung gesendet werden darf, die mit allen anderen $M - 1$ Reservierungsanforderungen konkurriert. Tritt dieser Fall auf, kann es erst dann wieder zum Halteeffekt kommen, wenn in diesem Zyklus mindestens eine der M kollidierten Stationen mit der Übertragung einer Reservierungsanforderung erfolgreich ist. Aus diesem Grund ist in Bild 4-8 die Auslastung für $\sigma = 1$ bei $N = 3$ Minizeitschlitzen größer als bei $N = 5$ Minizeitschlitzen. Die Wartezeit nähert sich für $\sigma = 1$ dem Wert $t_{RTD} \cdot M$ an, was sich leicht mit Hilfe des Satzes von Little nachprüfen läßt: Innerhalb eines Zyklus sind immer M Stationen aktiv. Das System ‚Zyklus‘ enthält also zu jedem Zeitpunkt M Anforderungen. Innerhalb eines Zyklus verläßt nach jedem RTD, d.h. alle t_{RTD} Zeitschlitzte, genau eine dieser Anforderungen das System.

Die Bilder 4-10 und 4-11 zeigen die Übermittlungsverzögerung t_d als Funktion der Auslastung S . Auch hier zeigt sich die sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Analyse. Diese Kurven entstehen, wenn man zusammengehörende Wertepaare t_d und S für verschiedene Werte des Eingabeparameters σ , $0 \leq \sigma \leq 1$, mit Hilfe der Analyse bzw. der Simulation bestimmt und in ein Diagramm einzeichnet. Die in die Diagramme eingezeichneten Pfeile zeigen die Richtung, in der σ ansteigt. Wichtig ist der Bereich, in dem die Übermittlungsverzögerung bei steigender Auslastung ebenfalls ansteigt. Nur in diesem Bereich, der kleinen Werten von σ entspricht, ist ein sinnvoller Betrieb des Systems möglich. Für $N = 5$ Minizeitschlitze kann eine Auslastung von $S = 1$ bei gegen unendlich gehender Übermittlungsverzögerung erreicht werden. Wird σ weiter erhöht, vergrößert sich auch Kollisionswahrscheinlichkeit, weshalb die Verzögerungszeit bei abnehmender Auslastung ansteigt. Bei noch weiterer Erhöhung von σ kommt das System in den Bereich des oben beschriebenen Halteeffekts.

Bild 4-12 zeigt die Anzahl der kollidierten Stationen als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für $M = 20$ und $N = 3$ bzw. 5. Auch hier zeigt sich die sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Analyse. Sinnvoll nutzbar ist das System nur, falls die Anzahl kollidierter Stationen im Mittel kleiner als eins ist. Der in Bild 4-12 sichtbare steile Anstieg der Anzahl der kollidierten Stationen korrespondiert mit dem in Bild 4-8 gezeigten Rückgang der Auslastung bei steigender Sendewahrscheinlichkeit. Für $\sigma = 1$ geht die Anzahl der kollidierten Stationen gegen $M - 1$. Durch die einzige nicht kollidierte Station entsteht der oben beschriebene Halteeffekt.

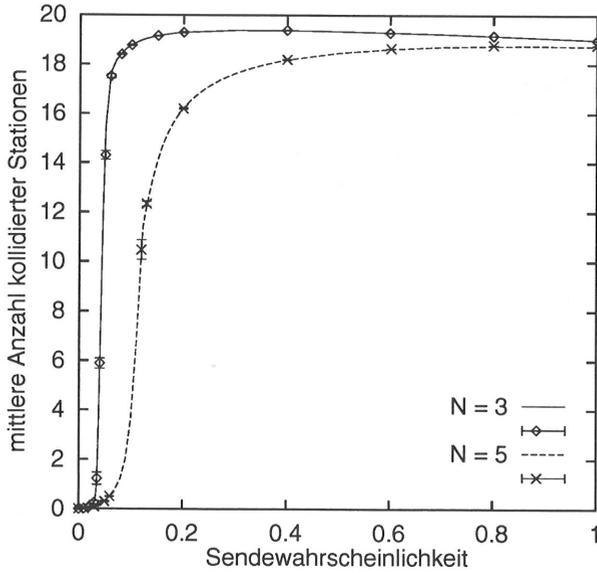


Bild 4-12: Anzahl der kollidierten Stationen als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bzw. 5 Minizeitschlitzen

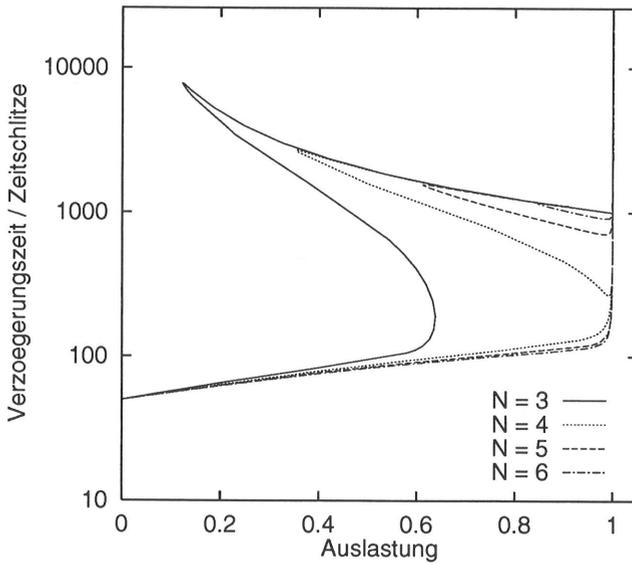


Bild 4-13: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bis 6 Minizeitschlitzen

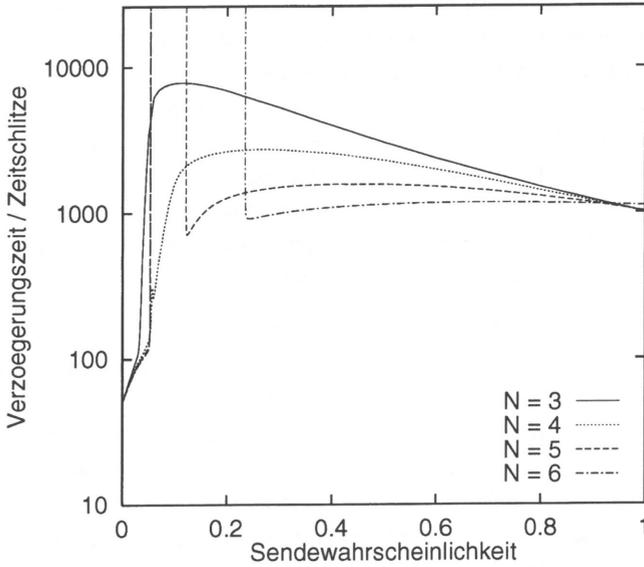


Bild 4-14: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bis 6 Minzeitschlitzten

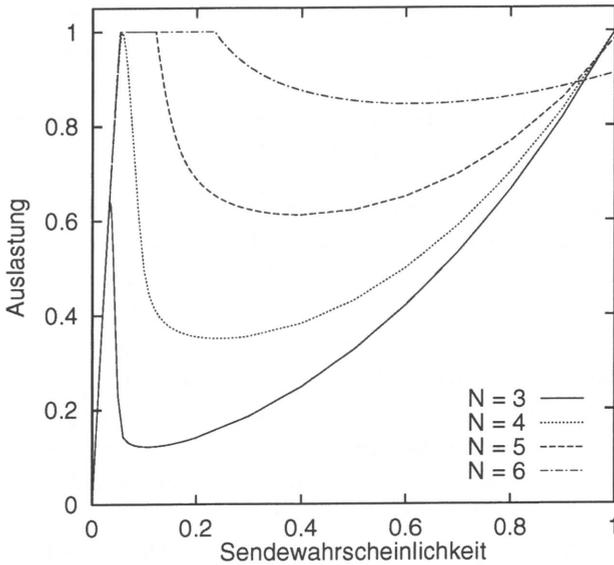


Bild 4-15: Vergleich der Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und 3 bis 6 Minzeitschlitzten

Zu Vergleichszwecken zeigen die Bilder 4-13 bis 4-15 die Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung bzw. der Sendewahrscheinlichkeit und die Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/UCA mit 20 Stationen und $N = 3 \dots 6$ Minizeitschlitzen. Es zeigt sich, daß das System bei 20 aktiven Stationen schon mit 4 Minizeitschlitzen die maximal mögliche Auslastung von einem Paket pro Zeitschlitz erreicht. Im sinnvoll nutzbaren Bereich, d.h. bei einer Übermittlungsverzögerung kleiner als 300 Zeitschlitze, verhalten sich die Systeme mit 4 bis 6 Zeitschlitzen annähernd gleich. Ein System mit $N = 4$ Minizeitschlitzen hat gegenüber Systemen mit $N > 4$ einen geringeren Bandbreitebedarf. Allerdings verhalten sich Systeme mit größerem N in realen Umgebungen stabiler.

Bei dem in Unterkapitel 4.5 vorgestellten CRRMA/CCA1, wird die Anzahl der Minizeitschlitze bei einer Kollisionsauflösung von N auf $N' > N$ erhöht. Dies geschieht durch Umwandlung des Datenteils eines betroffenen Zeitschlitzes in $N' - N$ Minizeitschlitze. Dadurch ist der oben beschriebene Halteeffekt, der bei CRRMA/UCA bei hohen Sendewahrscheinlichkeiten auftritt, nicht mehr möglich, da bei einer Kollisionsauflösung keine neuen Pakete erzeugt werden dürfen (vgl. Bilder 4-10, 4-11 und 4-18). Allerdings wird die Kollisionsauflösung im sinnvoll nutzbaren Bereich der Sendewahrscheinlichkeit σ durch die zusätzlich zur Verfügung stehende Reservierungskapazität deutlich beschleunigt. Dadurch ist es im Vergleich zu CRRMA/UCA möglich, die maximal mögliche Auslastung mit weniger Minizeitschlitzen pro Zeitschlitz zu erreichen. Die Bilder 4-16 bis 4-18 zeigen Vergleiche zwischen Simulation und Analyse für CRRMA/CCA1 mit $N = 3$ bzw. $N = 5$ Minizeitschlitzen. Bei einer Kollisionsauflösung beträgt die Anzahl der Minizeitschlitze in allen Fällen $N' = 10$. Die Simulations- und Analyseergebnisse stimmen sehr gut überein. Wie man aus den Bildern 4-16, 4-18, 4-19 und 4-21 ersehen kann, wird eine 100%-ige Auslastung des Nutzkanals schon bei $N = 3$ Minizeitschlitzen erreicht.

Das CRRMA/CCA1-Zugriffsverfahren beinhaltet einen Mechanismus, der einer unnötig häufigen Umwandlung des Nutzkanals in Minizeitschlitze entgegenwirkt: Die Übertragung eines Paketes im Reservierungsmodus hat eine höhere Priorität als eine Kollisionsauflösung. Solange einige Reservierungsanforderungen erfolgreich sind, bleibt die Anzahl der Minizeitschlitze auf dem Wert N . Selbst wenn noch Kollisionen von weiteren Reservierungsanforderungen erkannt werden, wird die Anzahl der Minizeitschlitze nicht auf den Wert $N' > N$ erhöht, falls gleichzeitig mindestens ein Reservierungsversuch erfolgreich war. Ist dies der Fall, dann kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, daß nur wenige Reservierungsanforderungen an der Kollision beteiligt sind. Die Kollision läßt sich deshalb auch mit nur N Minizeitschlitzen schnell auflösen. Erst wenn die globale Wartschlange leer ist, keine erfolgreiche Reservierung erzeugt wurde und gleichzeitig Kollisionen von Reservierungsanforderungen auftreten, wird die Anzahl der Minizeitschlitze auf N' erhöht. Dieser Fall tritt besonders häufig auf, wenn das System überlastet ist. In diesem Fall sind sehr viele Stationen in Kollisionen verwickelt. Die Rate, mit der erfolgreiche Reservierungen auftreten, sinkt

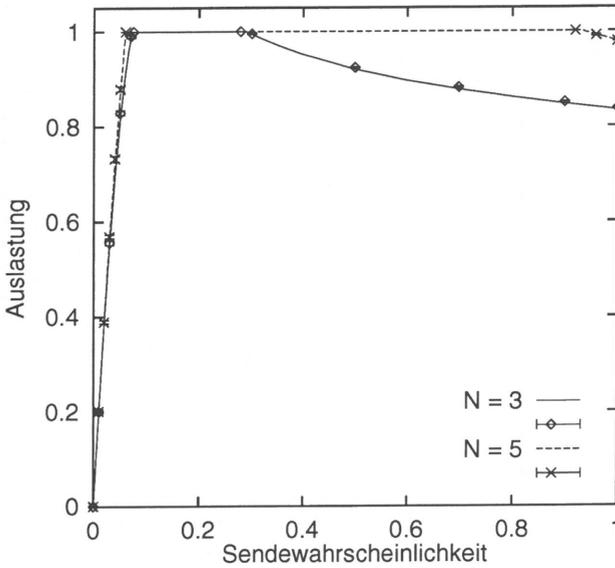


Bild 4-16: Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitzen

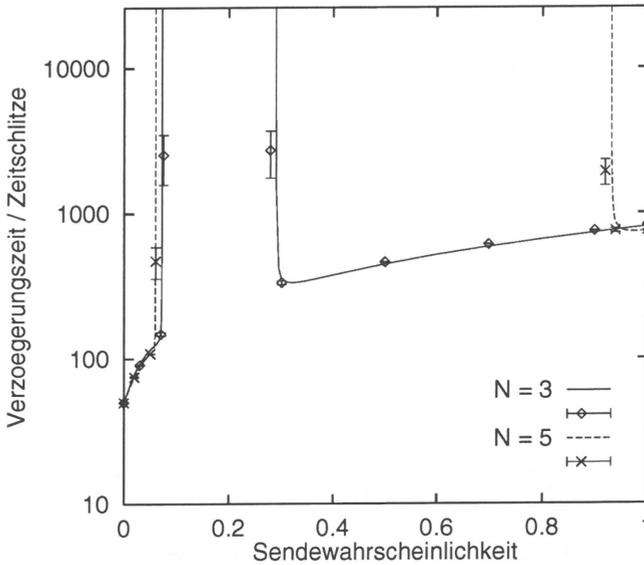


Bild 4-17: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitzen

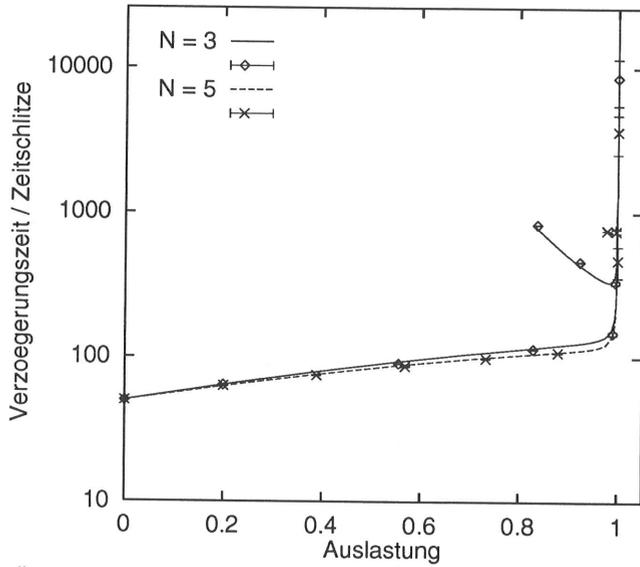


Bild 4-18: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

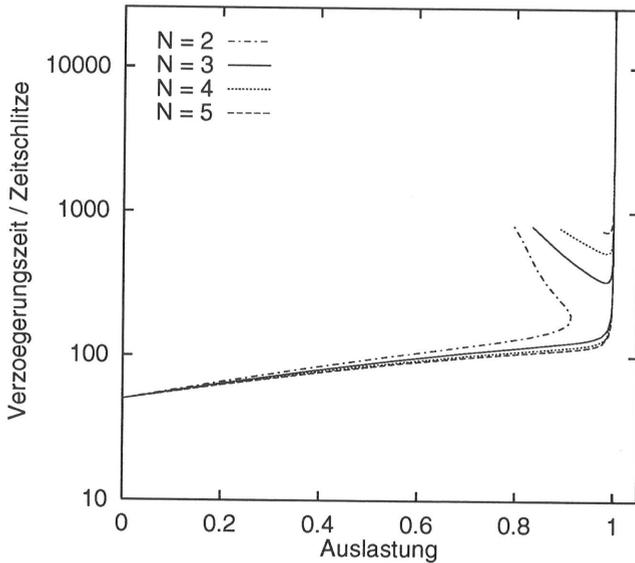


Bild 4-19: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 2$ bis 6 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

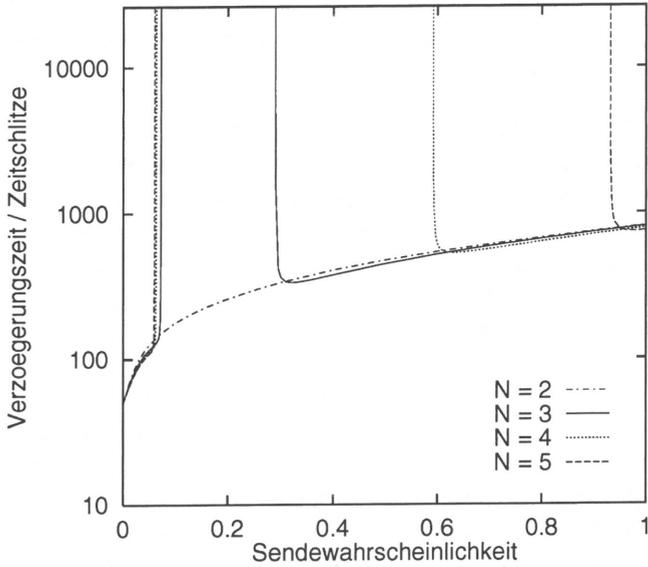


Bild 4-20: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 2$ bis 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitzen

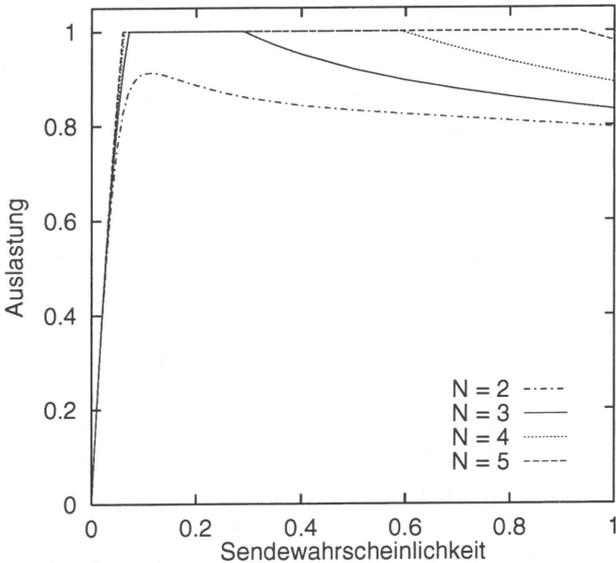


Bild 4-21: Vergleich der Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/CCA1 mit 20 Stationen, $N = 2$ bis 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitzen

deshalb stark ab. Dadurch leert sich die globale Warteschlange, der Nutzkanal kann in Minizeitschlitz umgewandelt werden, und der Rückstau an kollidierten Reservierungsanforderungen wird schnell abgebaut.

Die Bilder 4-19 bis 4-21 zeigen Vergleiche des CRRMA/CCA1-Zugriffsverfahrens für Systeme mit 20 Stationen, $N' = 10$ Minizeitschlitz während Kollisionsauflösungen und $N = 2$ bis 5 Minizeitschlitz im Normalbetrieb. Es zeigt sich, daß man schon mit nur $N = 2$ Minizeitschlitz eine maximale Auslastung von über 90% erhält. Im sinnvoll nutzbaren Bereich verhalten sich die Zugriffsverfahren für $N \geq 3$ nahezu gleich, so daß es bei gegebener Anzahl von $M = 20$ aktiven Stationen nicht sinnvoll erscheint, mehr als $N = 3$ Minizeitschlitz pro Zeitschlitz vorzusehen.

Allerdings werden in einem realen System Pakete unabhängig vom Systemzustand generiert. Das Aussenden von Paketen bzw. den zugehörigen Reservierungsanforderungen, die während einer Kollisionsauflösung generiert wurden, wird in einem realen System auf den nächsten ‚zugänglichen‘ Zeitschlitz verschoben. Dadurch erhöht sich in den zugänglichen Zeitschlitz die Sendewahrscheinlichkeit. Betrachtet man Bild 4-21, so fällt auf, daß für höhere Auslastungen zwei verschiedene Verzögerungszeiten möglich sind, die einer niedrigeren und einer höheren Sendewahrscheinlichkeit σ entsprechen. Bei einem realen System besteht wegen des beschriebenen Zwischenspeicherns von Paketen und der dadurch verursachten Erhöhung der Sendewahrscheinlichkeit eine Tendenz, die höhere der beiden möglichen Verzögerungszeiten anzunehmen. Diese Tendenz ist um so weniger ausgeprägt, je größer die Differenz zwischen den beiden, der Auslastung entsprechenden, Sendewahrscheinlichkeiten ist. In Bild 4-21 sieht man, daß die Differenz zwischen den beiden Sendewahrscheinlichkeiten bei gegebener (hoher) Auslastung mit der Anzahl der Minizeitschlitz N stark ansteigt. Systeme mit größerem N verhalten sich deshalb bei hoher Auslastung stabiler.

Bei dem in Unterkapitel 4.6 vorgestellten CRRMA/CCA2 dürfen auch während einer Kollisionsauflösung neue Pakete erzeugt werden. Wie bei CRRMA/CCA1 wird die Anzahl der Minizeitschlitz pro Zeitschlitz bei einer Kollisionsauflösung von N auf $N' > N$ erhöht. Da dies ebenfalls durch Umwandeln des Datenteils in Minizeitschlitz geschieht, ist auch bei diesem Zugriffsverfahren kein Halteeffekt möglich. Wie bei CRRMA/CCA1 hat auch bei CRRMA/CCA2 eine reservierte Paketübertragung eine höhere Priorität als eine Kollisionsauflösung. Da der Datenteil des Zeitschlitzes bei einer reservierten Übertragung belegt ist, bleibt die Anzahl der Minizeitschlitz in diesem Fall selbst bei einer Kollisionsauflösung auf dem Wert N . Für die im folgenden gezeigten Diagramme wurde wie bei CRRMA/CCA1 die Anzahl der Stationen $M = 20$ und die Anzahl der Minizeitschlitz bei Kollisionsauflösung $N' = 10$ gewählt. Wie man aus den Bildern 4-22 bis 4-24 sehen kann, erhält man wieder eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Analyse. Im Gegensatz zu CRRMA/CCA1 wird die maximal mögliche Auslastung von einem Paket pro Zeitschlitz für $N = 3$ noch nicht erreicht. Die

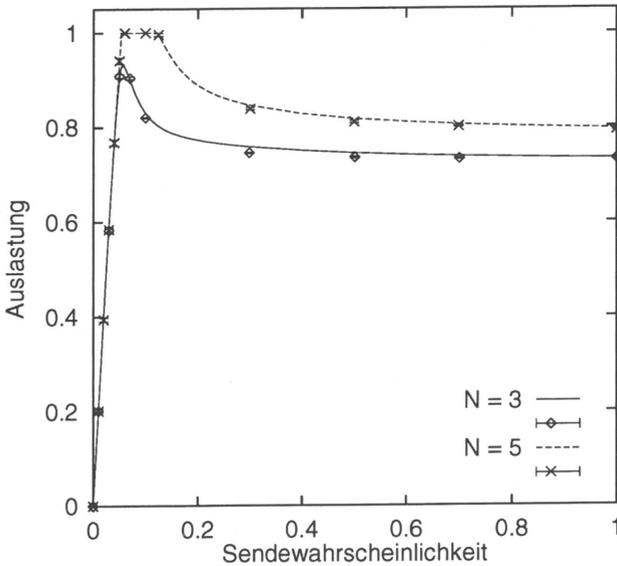


Bild 4-22: Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

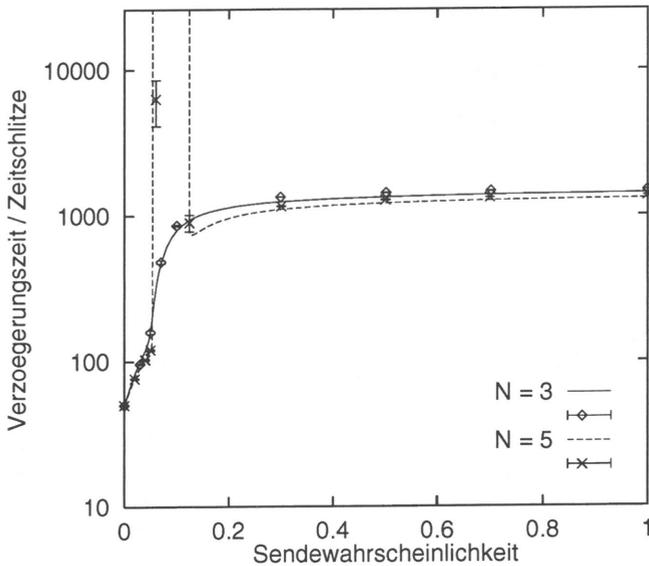


Bild 4-23: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

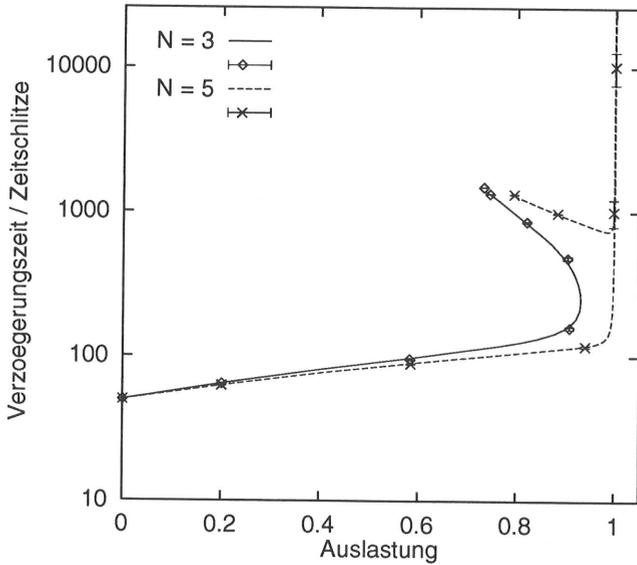


Bild 4-24: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bzw. 5 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

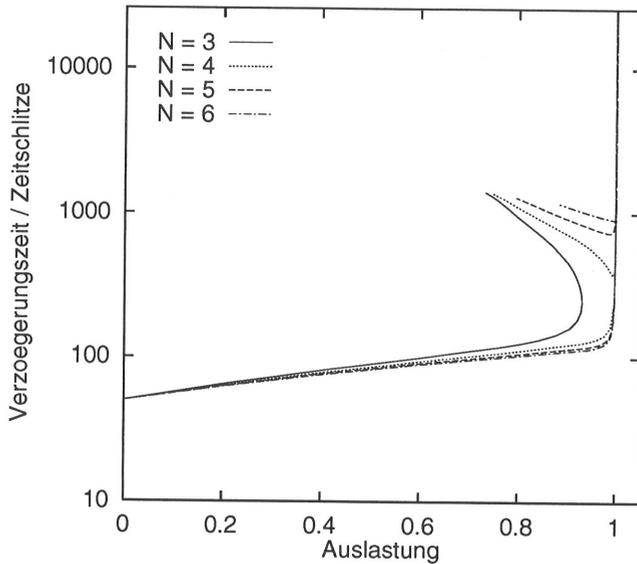


Bild 4-25: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bis 6 und $N' = 10$ Minizeitschlitz

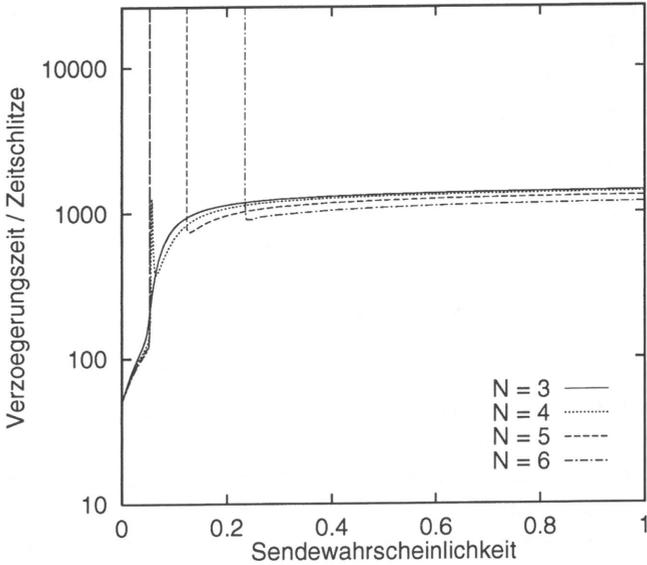


Bild 4-26: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bis 6 und $N' = 10$ Minzeitschlitz

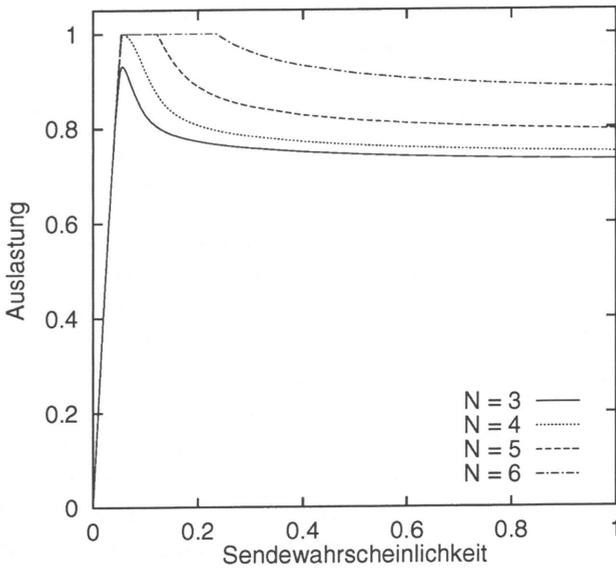


Bild 4-27: Vergleich der Auslastung als Funktion der Sendewahrscheinlichkeit σ für CRRMA/CCA2 mit 20 Stationen, $N = 3$ bis 6 und $N' = 10$ Minzeitschlitz

Übermittlungsverzögerung t_d ist für $\sigma = 1$ größer als 1000 Zeitschlitz. Dies läßt sich mit dem Satz von Little erklären, wenn man berücksichtigt, daß die Rate der Abgänge bei $\sigma = 1$ kleiner als ein Paket pro Zeitschlitz ist (siehe Bild 4-22) und daß die Anzahl der im System ‚Zyklus‘ enthaltenen Stationen gleich M ist.

Die Bilder 4-25 bis 4-27 zeigen Vergleiche für ein CRRMA/CCA2-Zugriffsverfahren mit 20 Stationen und 3 bis 6 Minizeitschlitzen. Wie man sieht, wird die maximal mögliche Auslastung von einem Paket pro Zeitschlitz bei $N = 4$ Minizeitschlitzen knapp erreicht.

4.9 Leistungsvergleich der Zugriffsverfahren

In Bild 4-28 wird die Verzögerungszeit als Funktion der Auslastung der drei kombinierten Zugriffsverfahren CRRMA/UCA, CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 verglichen. Um die Leistungsfähigkeit der kombinierten Protokolle zu beurteilen, werden in dieses Diagramm auch die Kurven für getaktetes ALOHA sowie für zwei Reservierungsverfahren mit wahlfreiem Zugriff auf den Reservierungskanal eingezeichnet. Das Reservierungsverfahren und seine Analyse wurde in Unterkapitel 4.3 beschrieben. Analyse und Beschreibung des ALOHA-Zugriffsverfahrens finden sich in Unterkapitel 4.7.

Alle Kurven beziehen sich auf ein System mit 20 Stationen. Das RTD beträgt in allen dargestellten Fällen 50 Zeitschlitz. Die kombinierten Zugriffsverfahren sowie eines der beiden gezeigten Reservierungsverfahren arbeiten mit $N = 3$ Minizeitschlitzen pro Zeitschlitz. Die Anzahl der Minizeitschlitze während einer Kollisionsauflösung bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 ist $N' = 10$. Das zweite Reservierungsverfahren arbeitet mit unendlicher Bandbreite im Reservierungskanal. Dieses ‚ideale‘ Reservierungsverfahren liefert die obere Schranke zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit aller realen Reservierungsverfahren.

Wie in Unterkapitel 2.8 gezeigt, kann ein kombiniertes Zugriffsverfahren für Sendewahrscheinlichkeiten $\sigma \rightarrow 0$ und damit für Auslastungen $S \rightarrow 0$ im günstigsten Fall die Übermittlungszeit des ALOHA-Zugriffsverfahrens von einem RTD erreichen. Diese Forderung erfüllen alle drei in Bild 4-28 dargestellten kombinierten Zugriffsverfahren. In diesem Bereich entspricht die Verzögerungszeit des Reservierungsverfahrens dem zweifachen RTD. Bei ansteigender Sendewahrscheinlichkeit erreicht das getaktete ALOHA eine maximale Auslastung von $S = 1/e \approx 0,37$. Das Reservierungsverfahren mit $N = 3$ Minizeitschlitzen pro Zeitschlitz erreicht eine höhere Maximalauslastung von $S = 0,44$ was durch die geringere Kollisionswahrscheinlichkeit auf dem Reservierungskanal erklärt werden kann. Die Übermittlungszeit der kombinierten Zugriffsverfahren ist wegen der begrenzten Kapazität des Reservierungskanals von $N = 3$ Minizeitschlitzen pro Zeitschlitz für große σ immer größer als die des idealen Reservierungsverfahrens. Das beste Zugriffsverfahren mit $N = 3$ Minizeitschlitzen pro Zeitschlitz ist CRRMA/CCA1.

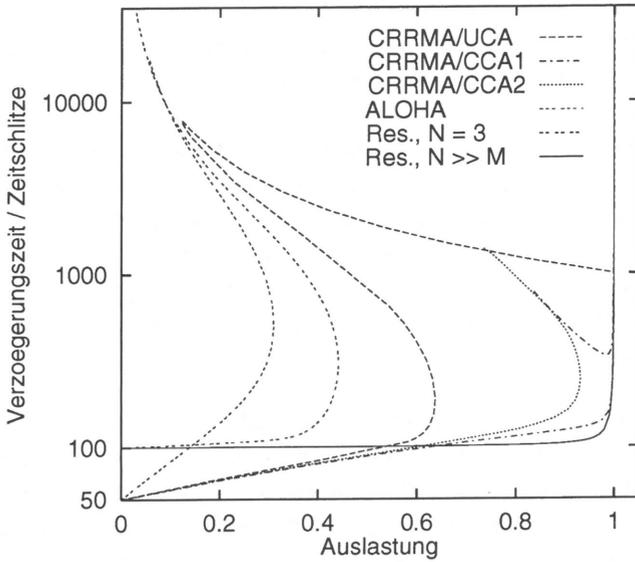


Bild 4-28: Vergleich der Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für alle vorgestellten Zugriffsverfahren, mit $N = 3$, $N' = 10$ und $M = 20$

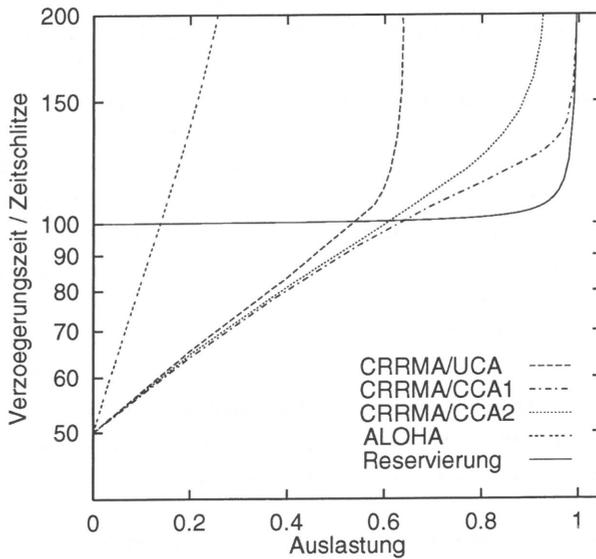


Bild 4-29: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für ALOHA, ideales Reservierungsverfahren und CRRMA-Zugriffsverfahren mit $N = 3$, $N' = 10$ und $M = 20$

Die Bilder 4-29 und 4-30 zeigen Vergleiche der Leistungsfähigkeit der kombinierten Zugriffsverfahren im Bereich sinnvoll nutzbarer Verzögerungszeiten zwischen 50 und 200 Zeitschlitzen. Die Anzahl der Minizeitschlitze pro Zeitschlitz ist $N = 3$ (Bild 4-29) bzw. $N = 5$ (Bild 4-30). Wie man sieht, wirken sich die Vorteile von CRRMA/CCA1 gegenüber den beiden anderen kombinierten Zugriffsverfahren nur bei kleiner Anzahl von Minizeitschlitzen aus. Bei größeren N verhalten sich die Zugriffsverfahren im sinnvoll nutzbaren Bereich sehr ähnlich. Bei Systemen, die genug Bandbreite für den Reservierungskanal zur Verfügung stellen, kann deshalb CRRMA/UCA der Vorzug gegeben werden. CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 sind bezüglich ihrer Komplexität sehr ähnlich. Bei Systemen mit geringer zur Verfügung stehender Bandbreite sollte deshalb das leistungsfähigere CRRMA/CCA1-Zugriffsverfahren gewählt werden.

Bild 4-31 zeigt die Anzahl kollidierter Pakete als Funktion der Auslastung für ALOHA, ideales Reservierungsverfahren und CRRMA-Zugriffsverfahren mit $N = 3$ Minizeitschlitzen, $N' = 10$ Minizeitschlitzen bei Kollisionsauflösung (nur bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2) und $M = 20$ Stationen. In dasselbe Schaubild sind nach der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Methode drei Lastgeraden für $\sigma = 0,0125$ (1), $\sigma = 0,025$ (2) und $\sigma = 0,05$ (3) eingezeichnet. Alle untersuchten Zugriffsverfahren liefern für kleine Sendewahrscheinlichkeiten σ immer stabile Betriebspunkte. Eine hohe Auslastung ist allerdings nur mit den CRRMA-Modifikationen CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 möglich. CRRMA/UCA zeigt bei $\sigma = 0,05$ zwar genau einen (und deshalb stabilen) Betriebspunkt, ist aber fehlangepaßt, da für kleinere Sendewahrscheinlichkeit σ höhere Auslastungen bei kleinerer Anzahl kollidierter Stationen möglich sind. Dasselbe gilt für ALOHA bei $\sigma = 0,025$.

CRRMA/CCA1 stellte sich in der Analyse und der stationären Simulation als das leistungsfähigste Zugriffsverfahren heraus. Es erlaubt bei $M = 20$ Stationen schon mit $N = 3$ Minizeitschlitzen 100%-ige Kanalauslastung und weist bei gegebener Kanalauslastung eine sehr gute Übermittlungsverzögerung auf, die nur noch vom idealen Reservierungsprotokoll mit der unrealistischen Annahme $N \gg M$ bei hohen Auslastungen unterboten wird. Gleichzeitig ist CRRMA/CCA1 selbst für hohe Werte von σ stabil. Gegenüber CRRMA/UCA und gegenüber dem Reservierungsprotokoll ist es durch die bei einer Kollisionsauflösung notwendige Umwandlung des Datenteils in Minizeitschlitze allerdings etwas aufwendiger. CRRMA/CCA2 hat bezüglich des benötigten Aufwandes gegenüber CRRMA/CCA1 keine Vorteile. Deshalb ist das leistungsfähigere CRRMA/CCA1 gegenüber CRRMA/CCA2 vorzuziehen.

Eine detailliertere Bewertung aller untersuchten Zugriffsverfahren mit Berücksichtigung der Ergebnisse der in Kapitel 5 beschriebenen instationären Simulation und unter Einbeziehung des durch die Minizeitschlitze notwendigen Bandbreitenmehraufwandes befindet sich in Kapitel 5.5.3.

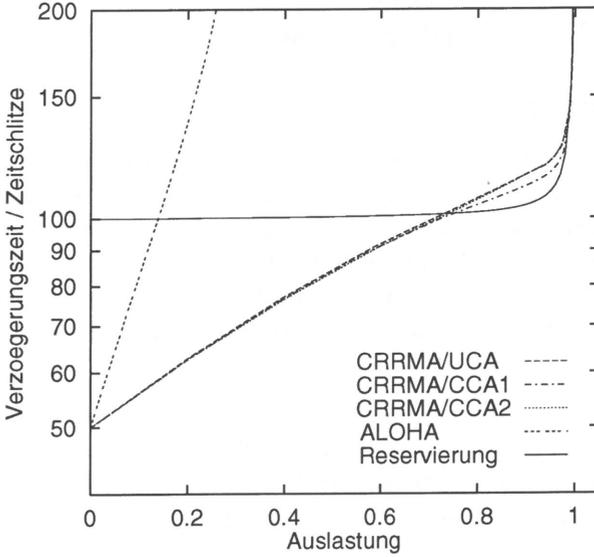


Bild 4-30: Übermittlungsverzögerung als Funktion der Auslastung für ALOHA, ideales Reservierungsverfahren und CRRMA-Zugriffsverfahren mit $N = 5$, $N' = 10$ und $M = 20$

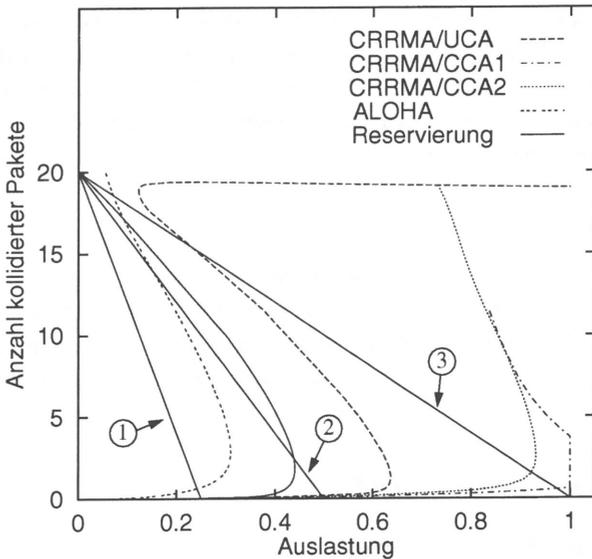


Bild 4-31: Anzahl kollidierter Pakete als Funktion der Auslastung für ALOHA, ideales Reservierungsverfahren und CRRMA-Zugriffsverfahren mit $N = 3$, $N' = 10$ und $M = 20$ sowie Lastgeraden mit $\sigma = 0,0125$ (1), $\sigma = 0,025$ (2) und $\sigma = 0,05$ (3)

5 Simulative Untersuchung der Zugriffsverfahren in einer LEO/ICO-Umgebung

5.1 Motivation

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines LEO- bzw. ICO-Satellitensystems im Hinblick auf das verwendete Zugriffsverfahren ist die mathematische Analyse nur bedingt geeignet. Durch die Bewegung der Satelliten relativ zur Erdoberfläche und durch die sehr unterschiedliche Dichte der Teilnehmer auf verschiedenen Kontinenten, über dem Meer oder auf dem Land versorgt ein Satellit eine sich ständig ändernde Anzahl von Teilnehmern, die sich abhängig von der Tageszeit unterschiedlich verhalten. So wird ein Teilnehmer in den Nachtstunden weniger Nachrichtenverkehr erzeugen als tagsüber.

Durch eine Simulation läßt sich ein LEO/ICO-Satellitensystem beliebig detailliert untersuchen. Dadurch läßt sich die Leistungsfähigkeit des Systems feststellen, bevor es zum Einsatz kommt. Weiterhin können mittels einer Simulation auch verschiedene Systemparameter wie z.B. die Anzahl der Nutzkanäle pro Richtstrahl optimiert werden.

Im folgenden wird die Vorgehensweise bei der Simulation eines LEO/ICO-Satellitensystems auf der Ebene der Signalisiermeldungen für den Erstzugriff der Teilnehmer auf den momentan zuständigen Satelliten dargestellt. Erstzugriffe entstehen immer dann, wenn noch keine Verbindung, z.B. in Form einer durchgeschalteten Sprachverbindung, zwischen Teilnehmer und Satellit besteht. In diesem Fall muß der Teilnehmer zur Übertragung seiner Signalisiermeldungen den Signalisierkanal benutzen. Der Signalisierkanal eines Satelliten dient zur Übertragung der Erstzugriffssignalisiermeldungen der instationären Menge aller Teilnehmer, für die der betrachtete Satellit ‚zuständig‘ ist.

5.2 Modelldefinition

Vor der eigentlichen Simulation muß das reale System in ein sog. Simulationsmodell abgebildet werden. Dieses Modell soll alle für das zu untersuchende System relevanten Komponenten und deren Verhalten detailliert nachbilden. Andere Komponenten, die für die durch die Simulation zu beantwortenden Fragen uninteressant sind, können weggelassen oder stark vereinfacht abgebildet werden (siehe auch Unterkapitel 3.2).

5.2.1 Geometrie des Systems

5.2.1.1 Umlaufbahn eines Satelliten

Bild 5-1 zeigt die Parameter der Umlaufbahn eines Satelliten. x -, y - und z -Achse bilden ein kartesisches Koordinatensystem. Die x - und y -Achse liegen in der Äquatorebene. Die z -Achse

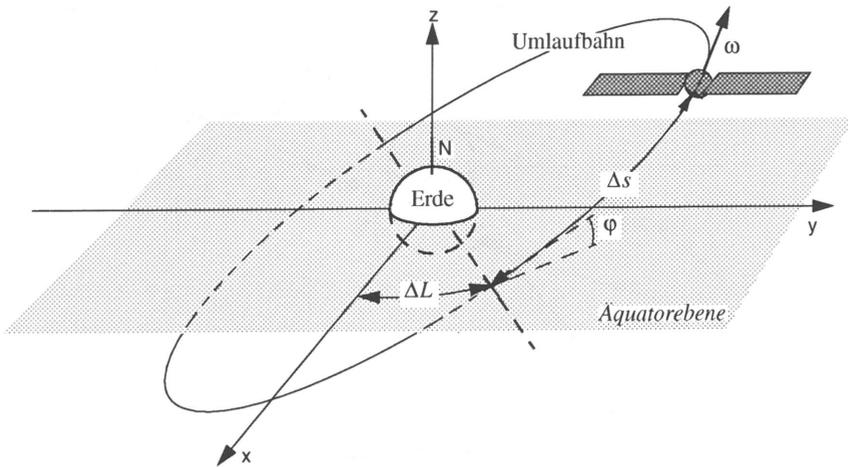


Bild 5-1: Parameter einer Umlaufbahn

entspricht der Drehachse der Erde. Die Erde dreht sich mit einer Winkelgeschwindigkeit von $360^\circ/\text{Sternentag}$ um die z -Achse. Die Winkelgeschwindigkeit ω des Satelliten beträgt (siehe auch Unterkapitel 2.4):

$$\omega = \sqrt{\frac{Gm_e}{(r_E + h)^3}} \quad (115)$$

Dabei ist G die Gravitationskonstante und M die Masse der Erde. Gm_e beträgt:

$$Gm_e = 3,986 \times 10^{14} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (116)$$

Die aktuelle Systemzeit t wird definiert als die Ortszeit der Erde beim nullten Längengrad (Greenwich-Zeit). Die Lage der Umlaufbahn eines Satelliten ist bezüglich des kartesischen Koordinatensystems konstant. Umlaufbahn- und Äquatorebene schließen den Inklinationswinkel φ ein. Die Schnittgerade von Umlaufbahn- und Äquatorebene schließt mit der x -Achse den Winkel ΔL ein. Der Winkel Δs entspricht dem Weg (im Bogenmaß), den der Satellit zur Systemzeit 0^{00} seit dem letzten Durchstoßen der Äquatorebene von Süd nach Nord zurückgelegt hat.

Bild 5-2 zeigt die zeitabhängigen Ortskoordinaten eines Satelliten mit Startposition $\Delta s = 0$ innerhalb einer Umlaufbahn mit Rotationswinkel der Umlaufbahnebene $\Delta L = 0$. Bezüglich

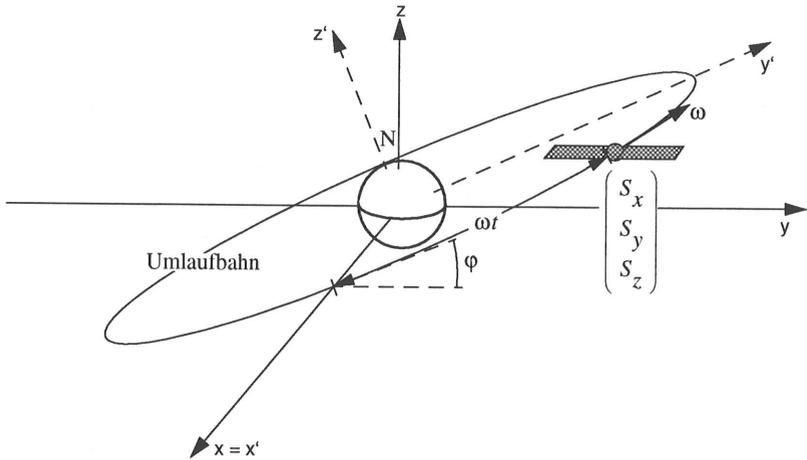


Bild 5-2: Zeitabhängige Satellitenkoordinaten

des Hilfs-Koordinatensystems (x', y', z') sind die auf den Radius der Umlaufbahn normierten Koordinaten des Satelliten zur Zeit t :

$$\begin{pmatrix} S_{x'} \\ S_{y'} \\ S_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \\ 0 \end{pmatrix} \quad (117)$$

Das Koordinatensystem (x', y', z') geht durch eine Drehung um die x' -Achse in das Koordinatensystem (x, y, z) über. Daraus folgt:

$$\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega t \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (118)$$

Durch Transformation der kartesischen Koordinaten des Satelliten in Kugelkoordinaten und unter Berücksichtigung der Erddrehung um $15^\circ = \pi/12$ pro Stunde läßt sich der Längengrad L und der Breitengrad B des Fußpunktes des Satelliten berechnen, d.h. des Ortes, über dem der Satellit zur Zeit t genau senkrecht steht:

$$L = \arctan(\tan \omega t \cdot \cos \varphi) - \frac{\pi}{12h} t \quad (119)$$

$$B = \arcsin(\sin \omega t \cdot \sin \varphi) = \arctan \frac{\sin \omega t \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 - (\sin \omega t \cdot \sin \varphi)^2}}$$

Gl. (119) gilt für einen Satelliten, der zum Zeitpunkt $t = 0$ senkrecht über dem Punkt $L = 0$ und $B = 0$ steht. Unter Berücksichtigung der Drehung ΔL der Umlaufbahnebene bezüglich der z -Achse und des Startwinkels Δs zum Zeitpunkt $t = 0$ erhält man Längen- und Breitengrad für einen beliebigen Satelliten:

$$L = \Delta L + \arctan(\tan(\omega t + \Delta s) \cdot \cos \varphi) - \frac{\pi}{12h} t$$

$$B = \arcsin(\sin(\omega t + \Delta s) \cdot \sin \varphi) = \arctan \frac{\sin(\omega t + \Delta s) \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 - (\sin(\omega t + \Delta s) \cdot \sin \varphi)^2}} \quad (120)$$

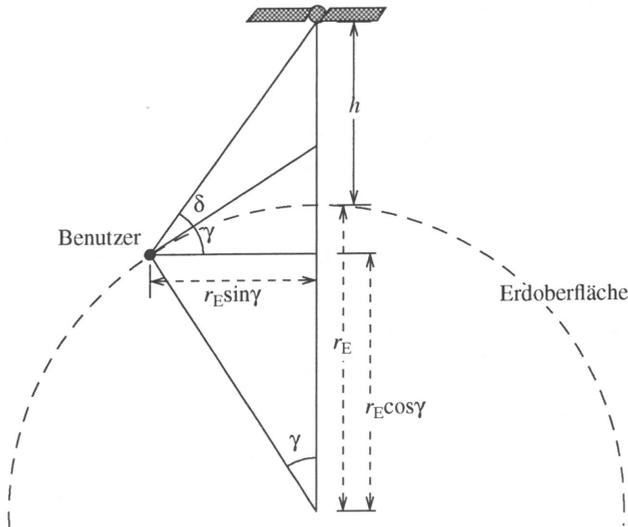


Bild 5-3: Berechnung des Sichtwinkels δ eines Satelliten

Zur Bestimmung des für einen bestimmten Ort auf der Erdoberfläche zuständigen Satelliten müssen die Winkel berechnet werden, unter denen ein Benutzer alle für ihn erreichbaren Satelliten ‚sieht‘ (siehe Bild 5-3). Ein Satellit ist nur dann erreichbar, wenn er über dem Horizont steht, d.h. wenn der Sichtwinkel δ positiv ist. Mit Hilfe der in Bild 5-3 definierten Größen läßt sich folgende Gleichung herleiten:

$$\tan(\gamma + \delta) = \frac{h + r_E - (r_E \cdot \cos \gamma)}{r_E \cdot \sin \gamma} \quad (121)$$

Dabei ist γ der im Bogenmaß gemessene Abstand zwischen dem Benutzer und dem Fußpunkt des Satelliten. Der Sichtwinkel δ läßt sich durch Auflösen der Gl. (121) nach δ berechnen:

$$\delta = \arctan\left(\frac{h + r_E \cdot (1 - \cos\gamma)}{r_E \cdot \sin\gamma}\right) - \gamma \quad (122)$$

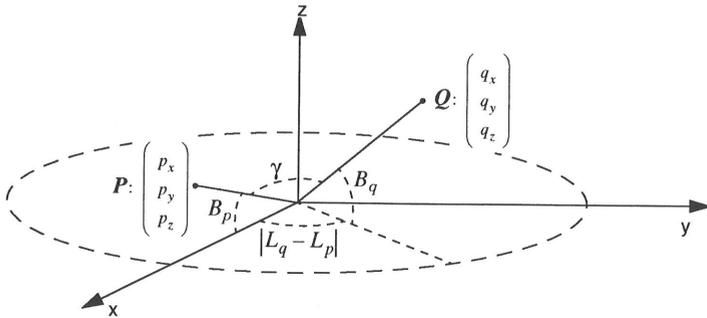


Bild 5-4: Abstand γ (im Bogenmaß) zwischen zwei beliebigen auf der Erdoberfläche liegenden Punkten P und Q

Der Abstand γ läßt sich folgendermaßen herleiten (siehe Bild 5-4). Zunächst werden die Kugelkoordinaten der beiden Punkte in kartesische Koordinaten bezüglich des Koordinatensystems (x, y, z) umgerechnet. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit kann der Längengrad eines der beiden Punkte zu Null gesetzt werden:

$$P: \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos B_p \\ 0 \\ \sin B_p \end{pmatrix} \quad (123)$$

$$Q: \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos B_q \cdot \cos |L_q - L_p| \\ \cos B_q \cdot \sin |L_q - L_p| \\ \sin B_q \end{pmatrix}$$

Der Cosinus des Winkels γ entspricht dem Skalarprodukt der beiden Vektoren (p_x, p_y, p_z) und (q_x, q_y, q_z) . Daraus folgt für γ :

$$\gamma = \arccos[\cos B_p \cdot \cos B_q \cdot \cos |L_q - L_p| + \sin B_p \cdot \sin B_q] \quad (124)$$

Bild 5-5 zeigt den Ansatz zur Berechnung des minimalen Sichtwinkels δ_{\min} eines Satelliten bei gegebenem Öffnungswinkel α des Signalisierstrahls des Satelliten. Für δ_{\min} ergibt sich:

$$\delta_{\min} = \begin{cases} \arccos \frac{(r_E + h) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{r_E} & \text{falls } \alpha < 2 \cdot \arcsin \frac{r_E}{r_E + h} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (125)$$

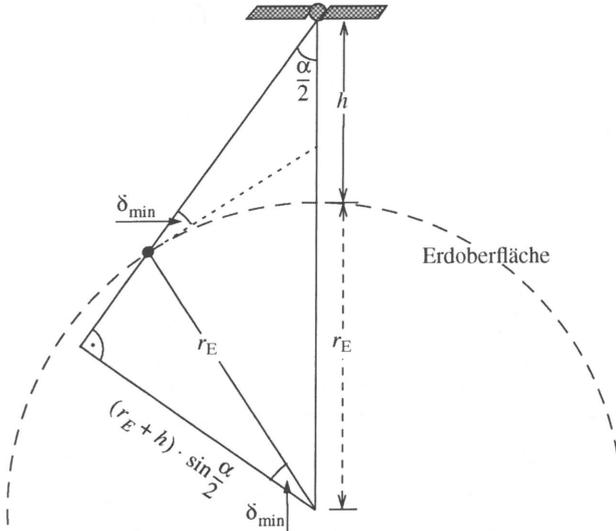


Bild 5-5: Berechnung des minimalen Sichtwinkels δ_{\min} eines Satelliten in Abhängigkeit des Öffnungswinkels α seines Signalisierstrahls

5.2.1.2 Die geographische Verteilung der Satellitenkommunikationsteilnehmer

Zur Erzeugung einer möglichst realistischen Verteilung der Teilnehmer auf der Erdoberfläche wurden Prognosen über die weltweite Gesamtanzahl von Satellitenkommunikationsteilnehmern mit deren kontinentaler Aufteilung gewichtet. Dabei wurde angenommen, daß die kontinentale Aufteilung der Satellitenkommunikationsteilnehmer gleich der bekannten Aufteilung für Mobilfunkteilnehmer ist (siehe [7]). Die Erdoberfläche wird in Rasterelemente von z.B. 1° Länge und 1° Breite aufgeteilt. Jedem dieser Rasterpunkte wird eine Anzahl von Teilnehmern zugeordnet. Liegt ein Rasterelement auf dem Meer, dann ist die in ihm enthaltene Teilnehmeranzahl gleich Null.

Zur Berechnung der Verteilung der Teilnehmer auf der Landfläche wird angenommen, daß sie sich mit exponentiell abfallender Dichte um alle größeren Städte mit mehr als einer Million

Größenfaktor G_S	Nord- Amerika	Süd- Amerika	Europa	Asien (ohne Japan)	Japan	Afrika	Austra- lien
15	1	2	0	0	2	0	0
10	1	2	1	4	0	0	0
5	3	1	1	13	0	1	0
3	7	4	7	11	1	3	1
2	8	7	10	17	0	4	1
1,5	3	5	10	23	4	4	0
1	11	15	19	48	1	10	3
gewichtete Σ	92,5	103,5	90,0	254,5	40,0	38,0	8,0
Anzahl Teil- nehmer in %	48,26	3,17	28,35	8,48	8,48	0,16	3,10
Anzahl Teil- nehmer in 10^6	2,413	0,1585	1,4175	0,424	0,424	0,008	0,155

Tabelle 5-1: Anzahl der nach Größenfaktoren sortierten Städte auf den verschiedenen Kontinenten sowie relative und absolute Anzahl von Satellitenkommunikationsteilnehmern

Einwohnern aufhalten (siehe z.B. [111]). Der Standort einer Stadt wird durch Längen- und Breitengrad definiert. Alle Städte werden in verschiedene Kategorien eingeteilt, z.B. Städte mit 1×10^6 bis $1,5 \times 10^6$ Einwohnern oder Städte mit $1,5 \times 10^6$ bis 2×10^6 Einwohnern. Jeder Stadt wird entsprechend ihrer Kategorie ein Größenfaktor G_S zugeteilt, z.B. $G_S = 1$ oder $G_S = 1,5$ (siehe Tabelle 5-1). Der Einfluß $g(\phi_n)$ einer Stadt auf ein Rasterelement n , das ϕ_n (im Bogenmaß) von der Stadt entfernt ist, wird folgendermaßen definiert:

$$H(\phi_n) = \begin{cases} e^{-\frac{\phi_n}{U}} \cdot \cos B_n & \text{falls Rasterelement } n \text{ auf Land} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (126)$$

$$g(\phi_n) = \frac{G_S \cdot H(\phi_n)}{\sum_i H(\phi_i)}$$

$H(\phi_n)$ ist eine Hilfsfunktion. Die Konstante U ist die Entfernung (im Bogenmaß), bei welcher der Einfluß einer Stadt auf $1/e$ abgefallen ist. Den Abstand ϕ_n zwischen einer Stadt und einem Rasterelement kann man mit Gl. (124) berechnen. Die Fläche eines Rasterelements und damit die Teilnehmeranzahl, die sich in diesem Rasterelement befindet, ist proportional zum Cosinus des Breitengrades B_n auf dem sich das Rasterelement befindet. Es wird angenommen, daß die Teilnehmerdichte über dem Meer gleich Null ist. Nach der Berechnung von $H(\phi_n)$

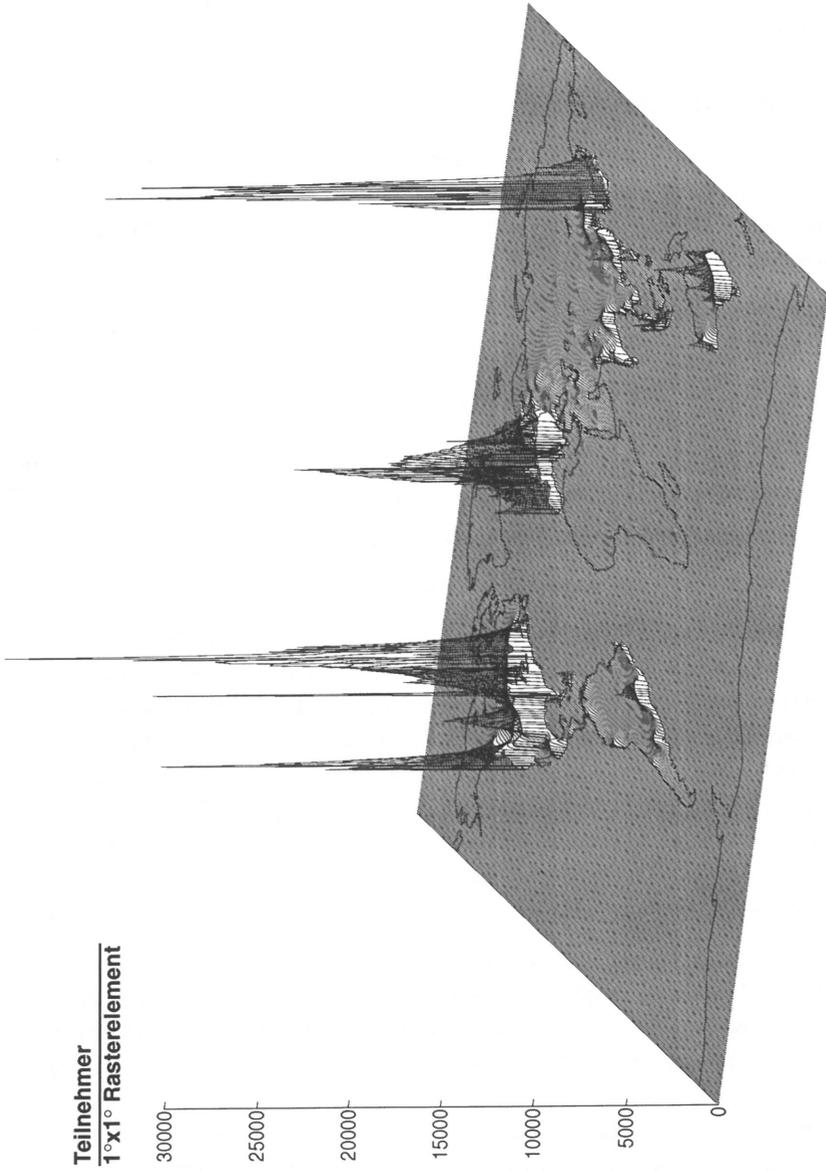


Bild 5-6: Teilnehmersdichte auf der Erdoberfläche

für alle auf einer Landfläche liegenden Rasterelemente wird deren Summe auf den Größenfaktor G_S der Stadt normiert. Die Anzahl der Teilnehmer in einem Rasterelement ergibt sich aus der auf die weltweite Gesamtanzahl aller Teilnehmer normierten Summe der Einflüsse $g(\phi_n)$ aller Städte.

5.2.2 Signalisierszenarien

In diesem Abschnitt sollen die grundsätzlichen Signalisiermeldungen hergeleitet werden, die bei einem Erstzugriff eines mobilen Endgerätes auf das Satellitensystem auftreten. Folgende grundsätzliche Signalisierszenarien werden in einem Satellitensystem zur Mobilkommunikation benötigt:

- Verbindungsaufbau
- Verbindungsabbau
- Rufübernahme von Richtstrahl zu Richtstrahl
- Rufübernahme von Satellit zu Satellit
- Anmeldung des Endgeräts nach dem Einschalten
- Abmeldung des Endgeräts vor dem Abschalten
- Ortswechsel des auf Bereitschaft stehenden mobilen Endgerätes.

Bei der Ausführung der Verbindungsabbau- und Rufübernahmeszenarien ist ein durchgeschalteter Nutzkanal vorhanden. Sie können deshalb mittels *Inband*-Signalisierung ausgeführt werden und belasten deshalb nicht den Signalisierkanal. Alle anderen Szenarien werden zumindest teilweise über den Signalisierkanal abgewickelt. Zur Untersuchung des Verhaltens der in Kapitel 4 beschriebenen und analysierten Zugriffsverfahren ist nur die Übertragungsrichtung vom mobilen Endgerät zum Satelliten interessant. In der Richtung vom Satelliten zum mobilen Endgerät (Rückkanal) tritt kein Zugriffskonflikt auf, da der Satellit die zu übertragenden Meldungen nacheinander aussendet. Ein kleiner Teil der Bandbreite des Rückkanals muß für die Übertragung der Auswertung der Minizeitschlitze (siehe Bild 4-1) zur Verfügung stehen.

Bild 5-7 zeigt als Beispiel den grundsätzlichen Ablauf eines Signalisierszenarios bei einem Ortswechsel eines in Bereitschaft stehenden mobilen Endgerätes. Nachdem das mobile Endgerät den Wechsel von einer Aufenthaltszone in eine Nachbarzone feststellt, sendet sie eine Ortswechselankündigung über den betrachteten Signalisierkanal. Die Berechnung der Aufenthaltszone könnte z.B. mit Hilfe des GPS-Systems oder eines systemeigenen Navigationssignals ausgeführt werden. Die Ortswechselankündigung wird vom Satelliten empfangen und an die Kontrollbodenstation gesendet. Die Kontrollbodenstation muß das mobile Endgerät authentifizieren, was durch eine Abfrage des HLR (*engl. Home Location Register*) geschieht. Das HLR verwaltet Einträge von jedem mobilen Endgerät des Systems.

Falls das betrachtete mobile Endgerät legal betrieben wird, wird sein HLR-Eintrag mit der neuen Aufenthaltszone aktualisiert und das HLR sendet eine Bestätigung an die Kontrollbodenstation. Die Kontrollbodenstation aktualisiert mittels einer VLR-Anfrage das VLR (*engl. Visiting Location Register*). Danach sendet die Kontrollbodenstation über den Satelliten eine Ortswechselbestätigung an das mobile Endgerät.

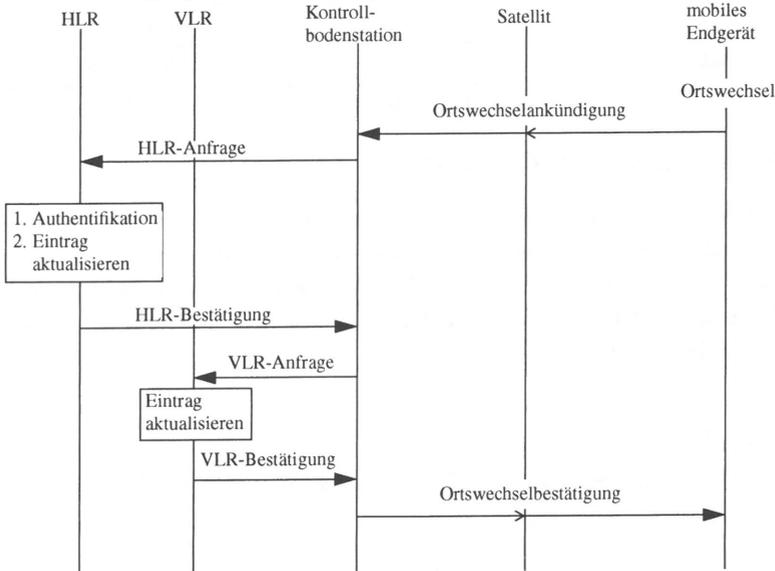


Bild 5-7: Beispielhaftes Signalisierszenario bei einem Wechsel der Aufenthaltszone des in Bereitschaft stehenden mobilen Endgerätes

Wichtig für die Untersuchung des Verkehrs auf dem betrachteten Signalisierkanal (d.h. in Richtung vom mobilen Endgerät zum Satelliten) ist beim Ortswechselszenario nur die Ortswechsellankündigung. Anmeldungs- und Abmeldungsszenario sind sehr ähnlich zum Ortswechselszenario. Zu betrachtende Signalisiermeldungen sind hier nur die Anmeldungsankündigung und die Abmeldungsankündigung. Beim Verbindungsaufbau muß man unterscheiden, ob das mobile Endgerät den Verbindungsaufbau initiiert oder ob es durch einen anderen Teilnehmer adressiert wird. Im ersten Fall sendet das mobile Endgerät eine Kanalanforderung. Im zweiten Fall wird dem Endgerät von der Kontrollbodenstation eine Rufankündigung über den Satelliten gesendet. Das mobile Endgerät muß in diesem Fall, falls der Teilnehmer den Ruf annimmt, eine Rufbestätigung über den Signalisierkanal senden. Alle anderen beim Verbindungsaufbau auftretenden Signalisiermeldungen können über den nach dem Erstzugriff durchgeschalteten Sprachkanal übertragen werden (*Inband-Signalisierung*). Tabelle 5-2 zeigt alle Szenarien, die im betrachteten Beispielsystem teilweise über den Signalisierkanal ablaufen, sowie die dabei auftretenden Erstzugriffssignalisiermeldungen.

Szenario	Erstzugriffssignalisierungsmeldung
Verbindungsaufbau (durch mobiles Endgerät initiiert)	Kanalanforderung
Verbindungsaufbau (durch B-Teilnehmer initiiert)	Rufbestätigung
Anmeldung	Anmeldungsankündigung
Abmeldung	Abmeldungsankündigung
Ortswechsel	Ortswechselankündigung

Tabelle 5-2: Erstzugriffssignalisierungsmeldungen

5.2.3 Transientes Quellverhalten

Das Verhalten der Mobilteilnehmer ist abhängig von der lokalen Tageszeit ihres Aufenthaltsortes. Vereinfachend wird angenommen, daß eine Zeitzone einem Bereich von $L = (2z - 1) \cdot \pi/24$ bis $L = (2z + 1) \cdot \pi/24$ entspricht. Die Zeitzonen sind von $z = 0$ bis $z = 23$ numeriert. Bei gegebenem Längengrad L (im Bogenmaß) berechnet sich die Zeitzone z aus folgender Gleichung:

$$z = \left\lfloor 12 \frac{L}{\pi} + \frac{1}{2} \right\rfloor \bmod 24 \quad (127)$$

Dabei ist $\lfloor x \rfloor$ die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich x ist. Die lokale Zeit t_l ist in Abhängigkeit von der Zeitzone z :

$$t_l = (t + z) \bmod 24 \quad (128)$$

Ein Teilnehmer schaltet sein mobiles Endgerät mit einer von der lokalen Tageszeit abhängigen Rate ein bzw. aus. Ist sein Endgerät im eingeschalteten Zustand, dann generiert bzw. empfängt er Rufe und erzeugt Ortswechsel. Im abgeschalteten Zustand erzeugt das mobile Endgerät keine Signalisierungsmeldungen. Die gesamte Last, die ein Satellit über den Signalisierkanal von den mobilen Endgeräten empfängt, ist die Summe der aufgrund der Aktionen der Mobilteilnehmer erzeugten Signalisierungsmeldungen. Der Ein- und Abschaltvorgang kann am einfachsten und sehr flexibel durch Arcustangensfunktionen beschrieben werden. Geht man davon aus, daß ein Anteil von b , $0 \leq b \leq 1$, der Teilnehmer ihr mobiles Endgerät auch nachts eingeschaltet lassen, dann erhält man für den von der lokalen Tageszeit t_l abhängigen Anteil $n_B(t_l)/n_{ges}$ der eingeschalteten mobilen Endgeräte innerhalb einer Zeitzone:

$$\begin{aligned} \frac{n_B(t_l)}{n_{ges}} &= P_B = b + (1-b)s_e(t_l) - (1-b)s_a(t_l) & (129) \\ &= b + (1-b) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan d_e(t_l - T_e) \right] - (1-b) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan d_a(t_l - T_a) \right] \\ &= b + \frac{1-b}{\pi} [\arctan d_e(t_l - T_e) - \arctan d_a(t_l - T_a)] \end{aligned}$$

Der Anteil der innerhalb einer Zeitzone eingeschalteten Endgeräte wird im folgenden Bereitschaftswahrscheinlichkeit P_B genannt. Der Index ,e' in Gl. (129) bezeichnet den morgendlichen Einschaltvorgang, der Index ,a' den abendlichen Abschaltvorgang. T_e bzw. T_a ist die lokale Tageszeit, bei der der Einschalt- bzw. Abschaltvorgang zur Hälfte abgeschlossen ist, d.h. bei der der Anteil der eingeschalteten Endgeräte ca. $b + (1 - b)/2$ beträgt. Die beiden Funktionen $s_e(t_l)$ und $s_a(t_l)$ bezeichnen die Wahrscheinlichkeit, daß ein Endgerät morgens schon eingeschaltet bzw. abends schon abgeschaltet wurde. Sie sind stetig und differenzierbar. Es gilt:

$$\lim_{t_l \rightarrow -\infty} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan d_e (t_l - T_e) \right] = 0 \quad (130)$$

$$\lim_{t_l \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctan d_e (t_l - T_e) \right] = 1$$

Mit Hilfe der beiden Konstanten d_a und d_e läßt sich die Dauer des morgendlichen Ein- bzw. des abendlichen Ausschaltens der mobilen Endgeräte variieren. Zunächst wird der Einschaltvorgang der Teilnehmer, die ihr mobiles Endgerät nachts abschalten, betrachtet. Der Anteil der Teilnehmer aus dieser Gruppe, die ihr Endgerät morgens schon eingeschaltet haben, entspricht der linken eckigen Klammer in Gl. (129). Dieser Anteil soll sich während der Einschaltzeit $T_e - (\Delta T_e/2) \dots T_e + (\Delta T_e/2)$ im Bereich $(1 - c_e) \dots c_e$ aufhalten (z.B. $c_e = 0,95$). Daraus folgt für d_e :

$$d_e = \frac{2 \tan \left[\pi \left(c_e - \frac{1}{2} \right) \right]}{\Delta T_e} \quad (131)$$

Zur Berechnung von d_a muß in Gl. (131) c_e durch c_a und ΔT_e durch ΔT_a ersetzt werden. Bild 5-8 zeigt die Bereitschaftswahrscheinlichkeit P_B nach Gl. (129) für $c_e = c_a = 0,95$ und für $\Delta T_e = \Delta T_a = 2\text{h}, 4\text{h}$ und 8h . Da sich Einschalt- bzw. Abschaltvorgänge über eine unendlich lange Zeit erstrecken, wird die maximale Bereitschaftswahrscheinlichkeit von 100% nicht erreicht, da manche Endgeräte abgeschaltet werden, bevor der letzte Teilnehmer sein Endgerät in Bereitschaft setzt. Dieses Verhalten entspricht dem realen System.

Mit der in Abschnitt 5.2.2 begründeten Annahme, daß beim Abarbeiten jedes Szenarios genau eine Signalisierungsmeldung vom Endgerät zum Satelliten über den Signalisierungskanal gesendet wird, kann jetzt die von der lokalen Zeit t_l abhängige Rate $\lambda_u(t_l)$ berechnet werden, mit der ein Teilnehmer diese Meldungen generiert. Sie setzt sich zusammen aus der Rufankunftsrate $\lambda_c(t_l)$, der Ortswechselrate $\lambda_o(t_l)$ sowie der Einschalt- und der Abschaltrate $\lambda_e(t_l)$ bzw. $\lambda_a(t_l)$. Rufankunfts- und Ortswechselrate sind beide proportional zur Bereitschaftswahrscheinlichkeit. Die Summe aus Einschalt- und Abschaltrate entspricht der Ableitung der Bereitschaftswahrscheinlichkeit. Daraus folgt für $\lambda_u(t_l)$:

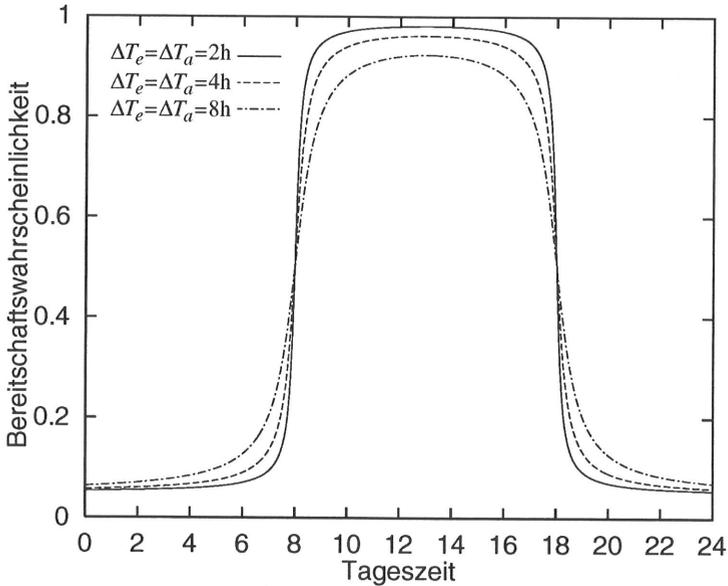


Bild 5-8: Bereitschaftswahrscheinlichkeit eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Tageszeit für 95%-Einschalt- bzw. Abschaltzeit von $\Delta T_e = \Delta T_a = 2, 4$ und 8 Stunden und $b = 0,05$

$$\begin{aligned}
 \lambda_u(t_l) &= \lambda_c(t_l) + \lambda_o(t_l) + \lambda_e(t_l) + \lambda_a(t_l) \\
 &= P_B(\lambda_{ce} + \lambda_{oe}) + \frac{d}{dt_l} s_e(t_l) + \frac{d}{dt_l} s_a(t_l) \\
 &= P_B(\lambda_{ce} + \lambda_{oe}) + \frac{1-b}{\pi} \left(\frac{d_e}{1 + d_e^2(t_l - T_e)^2} + \frac{d_a}{1 + d_a^2(t_l - T_a)^2} \right)
 \end{aligned} \tag{132}$$

λ_{ce} bzw. λ_{oe} ist die konstante Rate, mit der ein in Bereitschaft stehendes Endgerät Rufe generiert und empfängt bzw. Ortswechsel generiert. Bild 5-9 zeigt die von der lokalen Zeit abhängige Signaliserrate $\lambda_u(t_l)$ eines mobilen Endgerätes für Einschalt- bzw. Abschaltzeiten von 2 h bis 8 h und einer Grundlast von $b = 0,05$. Die Ruftrate in diesem Beispiel ist $\lambda_{ce} = 0,1$ Rufe/h, die Ortswechselrate beträgt $\lambda_{oe} = 0,05$ Ortswechsel/h. Die Signaliserrate zwischen Einschalt- und Abschaltvorgang (z.B. bei $\Delta T_e = \Delta T_a = 2$ h zwischen 9 Uhr und 17 Uhr) entsteht vorrangig durch eintreffende bzw. abgehende Rufe und Ortswechsel des Endgerätes. Sie ist $1/b$ -mal größer als die Signaliserrate in den Nachtstunden. Um 8 Uhr und um 18 Uhr erhält man aufgrund der in dieser Zeit stattfindenden Anmelde bzw. Abmeldevorgänge der Endgeräte eine starke Zunahme der Signaliserrate. Je kürzer die Zeit ΔT_e bzw.

ΔT_a ist, um so größer ist die maximale Signalisiererate, da die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Aussenden der beim Anmelde- bzw. Abmeldevorgang erzeugten Signalisiermeldungen zur lokalen Zeit T_e bzw. T_a beim Verkleinern von ΔT_e bzw. ΔT_a ansteigt. Bei $c_e = 0,95$ beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilnehmer sein Endgerät innerhalb des Intervalls ΔT_e anmeldet $0,95 - (1 - 0,95) = 90\%$.

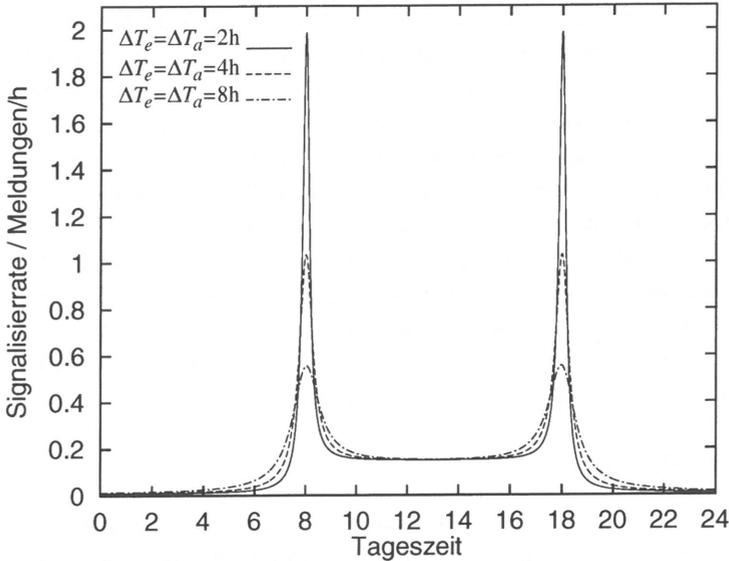


Bild 5-9: Signalisiererate eines mobilen Endgerätes in Abhängigkeit von der lokalen Tageszeit für 95%-Einschalt- bzw. Abschaltzeit von $\Delta T_e = \Delta T_a = 2$ bis 8 Stunden und $b = 0,05$

5.3 Definition der Leistungskenngrößen

Bei der instationären Simulation des von Erstzugriffssignalisiermeldungen genutzten Signalisierkanals eines LEO/ICO-Satellitensystems ist die Übermittlungszeit die wichtigste Leistungskenngröße. Sie ist definiert als die Zeit, die von der Generierung einer Signalisiermeldung bis zu deren Eintreffen beim Empfänger verstreicht. Gemessen wird der Mittelwert, der zeitliche Verlauf der Meßgröße, d.h. die Mittelwerte innerhalb der kurzen Meßintervalle, in die die gesamte Meßdauer unterteilt ist, und die Verteilung der Übermittlungszeit. Aus der Verteilung kann auch das sogenannte $X\%$ -Quantil berechnet werden. Das $X\%$ -Quantil der Übermittlungszeit ist diejenige Übermittlungszeit, die von $X\%$ aller übermittelten Signalisiermeldungen nicht überschritten wird. $X\%$ wird üblicherweise auf 95% oder 99% gesetzt. Das Quantil der Übermittlungszeit ist sehr wichtig im Hinblick auf die Qualität des erbrachten

Dienstes aus der Sicht des Benutzers. Im Falle des betrachteten LEO/ICO-Satellitensystems ist der erbrachte Dienst die Bereitstellung von Mobilkommunikationsverbindungen. Wichtig ist das Quantil der Übermittlungszeit besonders beim Aufbau einer Verbindung, da hier der Benutzer die Übermittlungszeit einer abgesendeten Kanalanforderungssignalisierungsmeldung durch eine Verzögerung des Verbindungsaufbaus direkt bemerkt.

Wichtig im Hinblick auf die Dimensionierung des Systems ist auch die Auslastung des Signalisierkanals. Im Gegensatz zur Übermittlungszeit werden hier nur zeitabhängige Werte, d.h. Meßintervallmittelwerte, gemessen. Zur Auslastung tragen nur die erfolgreich übertragenen Meldungen bei. Zeitschlitze, in denen mehr als eine Meldung gesendet wird, d.h. in denen eine Kollision stattfindet, tragen nicht zur Auslastung bei. Die Auslastung hängt direkt mit der Stabilität des Systems zusammen. Die Stabilität kann nicht direkt gemessen werden. Allerdings kann durch Beobachten der Auslastung entschieden werden, ob ein System stabil oder instabil ist. Bei einem stabilen System folgt die Auslastung immer direkt dem Angebot. Bei einem instabilen System folgt die Auslastung zunächst ebenfalls dem Angebot, geht dann aber, meist während einer Lastspitze, gegen null, obwohl das Angebot größer als Null ist. Dieser Effekt tritt auf, wenn in Zeiten hohen Angebots sehr viele Kollisionen stattfinden, die auch in Zeiten eines kleinen Angebotes nicht mehr aufgelöst werden können.

5.4 Simulation

Die transiente Simulation des Signalisierkanals eines LEO/ICO-Satellitensystems erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die zeitabhängige Last des Signalisierkanals eines Satelliten bestimmt. In einem zweiten Schritt wird mit diesem von der Zeit abhängigen Angebot das Zugriffsverfahren des Signalisierkanals eines Satelliten simuliert.

5.4.1 Simulation der Bewegungsabläufe des Satellitensystems

Zur Bestimmung des Angebotes, das der Signalisierkanal eines Satelliten ‚sieht‘, wird die von der Systemzeit abhängige geometrische Konstellation des Systems, bestehend aus Satelliten und Erdoberfläche, zu äquidistanten, diskreten Zeitpunkten berechnet. Diese Zeitpunkte entsprechen den Meßintervallen für die instationäre Simulation. Innerhalb eines Meßintervalls wird davon ausgegangen, daß das Angebot an einen Satelliten konstant ist. Die Erdoberfläche wird, wie in Unterabschnitt 5.2.1.2 beschrieben, in Rasterelemente aufgeteilt, denen eine während eines Simulationslaufs konstante Anzahl von Teilnehmern zugewiesen wird. Für jedes Rasterelement und für jeden Satelliten wird mit Hilfe von Gl. (122) der Sichtwinkel δ bestimmt, unter dem ein in diesem Rasterelement lokalisierter Benutzer einen Satelliten sieht. Danach wird unter allen Satelliten derjenige bestimmt, dessen Winkel δ vom Rasterelement aus gesehen am nächsten bei 90° liegt, d.h. derjenige, der am höchsten über dem betrachteten Rasterelement steht. Ist dieser Winkel größer als ein bestimmter Mindestsichtwinkel, dann

wird das Angebot, das das Rasterelement erzeugt, dem Satelliten zugeteilt. Ist der Sichtwinkel δ des am höchsten stehenden Satelliten kleiner als der Mindestsichtwinkel, dann sind die Benutzer, die sich im betrachteten Rasterelement aufhalten, zur aktuellen Systemzeit nicht über einen Satelliten erreichbar. In diesem Fall muß das Satellitensystem durch Vergrößern des Öffnungswinkels des Signalisierstrahls oder durch Vergrößern der Anzahl der Satelliten anders dimensioniert werden. Der Mindestsichtwinkel δ_{\min} läßt sich mit Gl. (125) aus dem Öffnungswinkel α des Signalisierstrahls des Satelliten berechnen. Führt man die beschriebenen Berechnungen für jedes Zeitintervall, für jedes Rasterelement und für jeden Satelliten aus, dann erhält man

- das Angebot für den Signalisierstrahl jedes Satelliten in Abhängigkeit von der Systemzeit
- die Zuordnung jedes Rasterelements zum (vom Rasterelement aus gesehen) höchsten Satelliten für jedes Zeitintervall.

Wie in jedem System, ist es auch in einer LEO/ICO-Umgebung wichtig, die Qualität eines erbrachten Dienstes aus der Sicht eines Teilnehmers zu bewerten. Für eine ‚worst case‘-Betrachtung könnte dieser Teilnehmer z.B. in einem Rasterelement mit sehr großer Teilnehmerdichte enthalten sein. Da im LEO/ICO-System der für einen Teilnehmer zuständige Satellit ständig wechselt, ist es sinnvoll, das zeitabhängige Angebot des für den betrachteten Teilnehmer jeweils zuständigen Satelliten zu bestimmen. Auf diese Weise erhält man das zeitabhängige Angebot, mit dem der betrachtete Teilnehmer konkurriert.

5.4.2 Instationäre Simulation der Zugriffsverfahren

Der zweite Schritt ist die Simulation des eigentlichen Zugriffsverfahrens. Bild 5-10 zeigt das dabei verwendete Simulationsmodell. Das im ersten Schritt berechnete zeitabhängige Angebot für den Signalisierstrahl eines Satelliten wird als gegeben angenommen. Der Paketgenerator erzeugt die gesamte Signalisierrate aller Teilnehmer, für die der betrachtete Satellit zuständig ist. Die zeitabhängige Rate wird in Bild 5-10 mit $\mu_A(t)$ bezeichnet. Sie wird in der Form des zeitabhängigen Mittelwertes der Anzahl der in einem Zeitschlitz neu generierten Signalisierungsmeldungen verwendet. Wie in Abschnitt 5.4.1 beschrieben, wird auch bei der Simulation des Zugriffsverfahrens davon ausgegangen, daß $\mu_A(t)$ innerhalb eines Meßintervalls konstant ist. Für die Simulation wird angenommen, daß die Anzahl der Ankünfte von Signalisierungsmeldungen während eines Zeitschlitzes einer Poisson-Verteilung gehorcht.

$$P\{a \text{ Neuankünfte}\} = \frac{\mu_A(t)^a}{a!} e^{-\mu_A(t)} \quad (133)$$

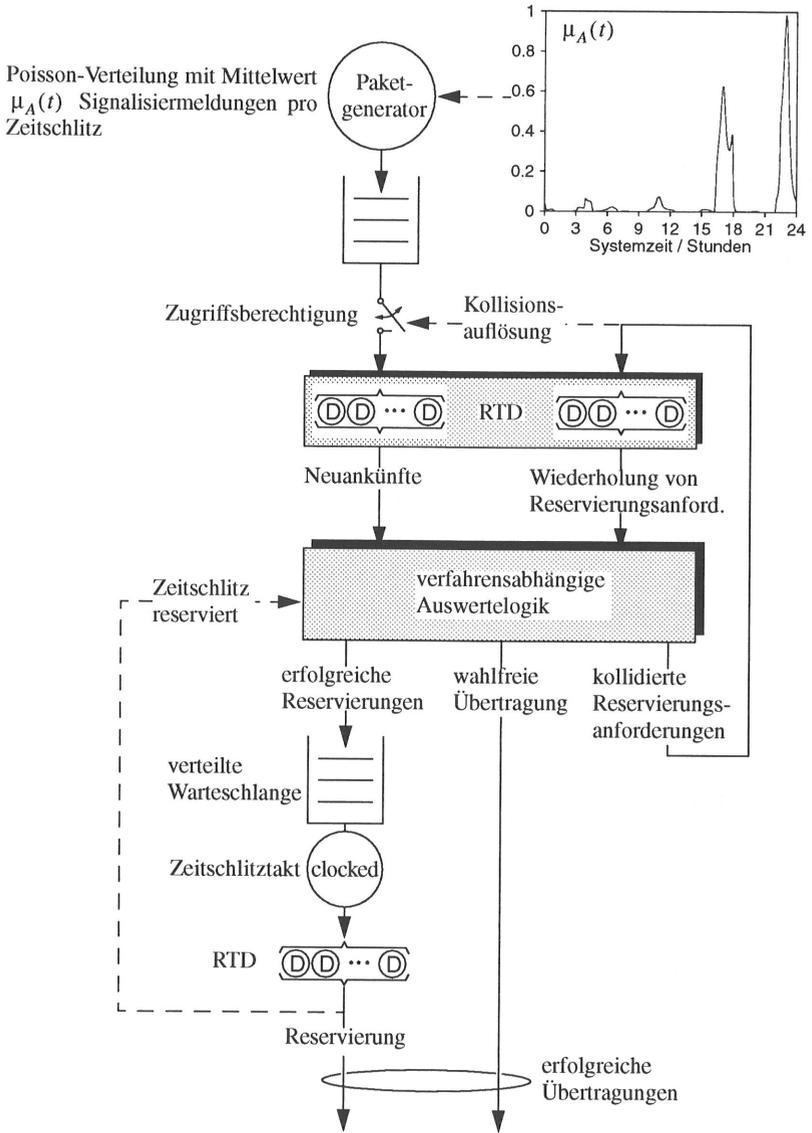


Bild 5-10: Simulationsmodell für die instationäre Simulation der Zugriffsverfahren

Diese Annahme ist gerechtfertigt, falls ein Satellit für sehr viele Teilnehmer zuständig ist und jeder einzelne Teilnehmer nur einen sehr kleinen Anteil des Gesamtangebotes erzeugt. Diese Situation ist typisch für die Mobilkommunikation über Satelliten.

Alle erzeugten Signalisiermeldungen durchlaufen eine Warteschlange und einen Schalter, der die Zugriffsberechtigung auf den Satellitenkanal repräsentiert. Der Schalter ist bei der Simulation von ALOHA, CRRMA/UCA, CRRMA/CCA2 und beim Zugriff durch Reservierung grundsätzlich geschlossen, da diese Verfahren keine Zugriffskontrolle für den Kanal enthalten. Im Gegensatz zu CRRMA/CCA1 werden bei diesen Verfahren neu erzeugte Signalisiermeldungen bzw. Reservierungsanforderungen für neu erzeugte Signalisiermeldungen immer sofort gesendet. Bei CRRMA/CCA1 wird der Schalter geöffnet, falls eine Kollisionsauflösung stattfindet, d.h. falls vorher kollidierte Reservierungsanforderungen wiederholt werden. In diesem Fall müssen die neu erzeugten Signalisiermeldungen in der Warteschlange bis zum nächsten Zeitschlitz, in dem keine Kollisionsauflösung stattfindet, warten. Beim Schließen des Schalters verlassen alle wartenden Signalisiermeldungen gleichzeitig die Warteschlange.

Die erzeugten Signalisiermeldungen werden in einem als sog. ‚*Infinite Server*‘ modellierten Verzögerungsglied um die dem RTD entsprechende Zeit t_{RTD} verzögert. Der Zeitpunkt des Eintreffens der Signalisiermeldungen bzw. der Reservierungsanforderungen in der vom Zugriffsverfahren abhängigen Auswertelogik entspricht im simulierten System dem Zeitpunkt des Eintreffens der Auswertung der Sendeveruche bei den mobilen Endgeräten über den Rückkanal. Ab diesem Zeitpunkt sind die mobilen Endgeräte über Erfolg bzw. Mißerfolg ihres Übertragungsversuches informiert und können weitere Aktionen einleiten. Im Simulationsprogramm wird erst zu diesem Zeitpunkt die genaue Belegung der Minizeitslitze und des Datenteils durch die gegebene Anzahl von Signalisiermeldungen und die zugehörigen Reservierungsanforderungen sowie durch wiederholte Reservierungsanforderungen bestimmt. Diese Vorgehensweise ist bezüglich der erhaltenen Ergebnisse mit dem realen System identisch und einfacher zu implementieren. Eingabeparameter der Auswertelogik sind die Anzahl der neu eintreffenden Signalisiermeldungen, die Anzahl der wiederholten Reservierungsanforderungen und die Information, ob der eintreffende Zeitschlitz reserviert oder wahlfrei zugänglich ist. Erzeugt werden erfolgreiche und kollidierte Reservierungen und erfolgreiche wahlfreie Übertragungen, die das Simulationsmodell verlassen. Erfolgreiche Reservierungen durchlaufen eine FIFO-Warteschlange, die im simulierten System der verteilten globalen Warteschlange entspricht. In jedem Zeitschlitz wird genau eine wartende Signalisiermeldung entnommen, die nach einer Verzögerungszeit von t_{RTD} das System verläßt. Aus dem Verlassen des Systems wird auch das Signal ‚Zeitschlitz reserviert‘ für die Auswertelogik abgeleitet. Kollidierte Reservierungsanforderungen werden im simulierten System wiederholt. Die Auswertung des wiederholten Sendeveruches trifft nach t_{RTD} über den Rückkanal wieder bei den mobilen Endgeräten ein, was im Simulationsmodell durch ein Verzögerungsglied (engl. *Infinite Server*) nachgebildet wird.

Durchlaufzeiten und die Belegungswahrscheinlichkeit der Zeitschlitz werden nach jeder erfolgreichen Übertragung einer Signalisiermeldung im Simulationsmodell ausgewertet. Aus den Simulationsergebnissen lassen sich Dimensionierungshinweise für den Signalisierstrahl der Satelliten ableiten.

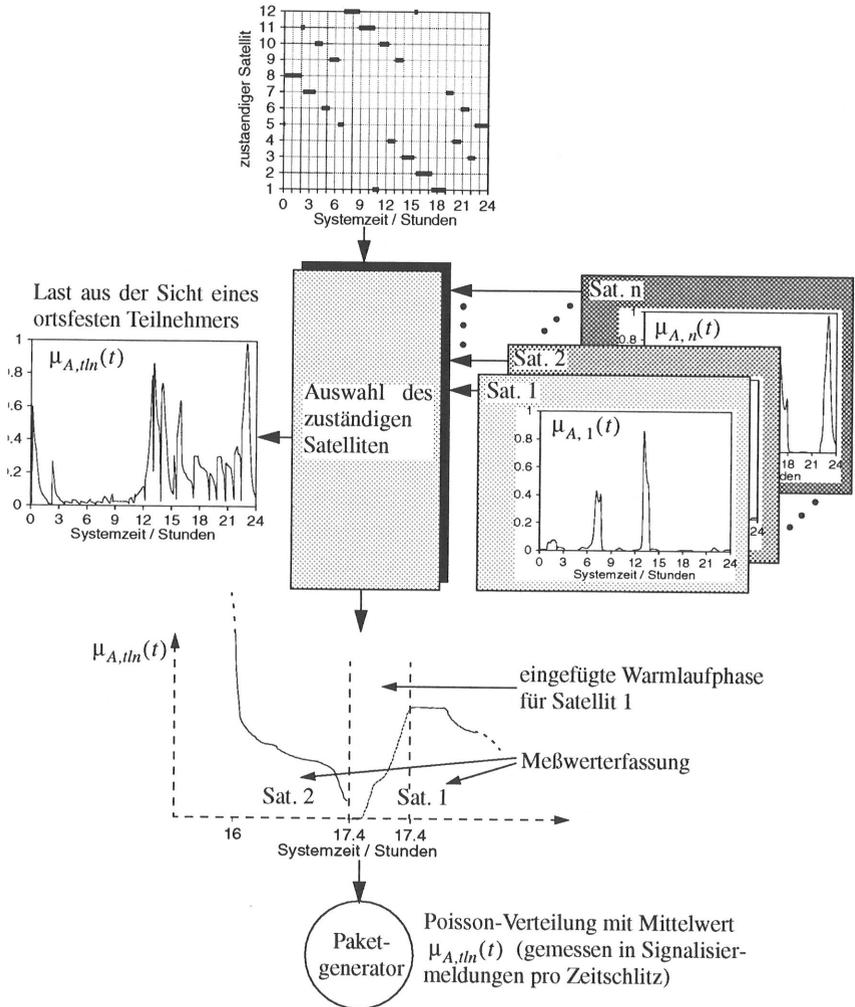


Bild 5-11: Generatormodell für die instationäre Simulation des Systemverhaltens aus der Sicht eines ortsfesten Teilnehmers

Bis jetzt wurden die Leistungskenngrößen aus der Sicht eines vor dem Simulationslauf festgelegten Satelliten bestimmt. Für die Planung eines Satellitensystems ist es aber von großer Wichtigkeit, das Verhalten bzw. die Qualität des Systems aus der Sicht eines Benutzers zu bestimmen, der sich z.B. in einem Bereich hoher Teilnehmerdichte aufhält. Sollen die Leistungskenngrößen aus der Sicht eines ortsfesten Teilnehmers bestimmt werden, muß der Paketgenerator modifiziert werden (siehe Bild 5-11). Zunächst muß der von der Systemzeit abhängige Satellit bestimmt werden, der für den betrachteten Teilnehmer zuständig ist. Um eine realistische Simulation des Lastsprunges beim Wechsel des zuständigen Satelliten zu erhalten, wird vor dem Übergang auf den neuen zuständigen Satelliten eine Warmlaufphase eingefügt, in der der Lastverlauf des neuen Satelliten vor dem Wechsel simuliert wird, in der aber keine Meßwerte aufgenommen werden.

5.5 Leistungsuntersuchungen

5.5.1 Simuliertes System

Als Beispiel für die Simulation der Signalisierung innerhalb eines Satellitensystems wurde das in [115] veröffentlichte Odyssey-System gewählt. Das System beinhaltet 12 Satelliten, die sich auf drei Umlaufbahnen verteilen. Der Inklinationwinkel φ aller Umlaufbahnen beträgt 55° (siehe Bild 5-1). Es wurde angenommen, daß einer der Satelliten zum Zeitpunkt 0^{00} Uhr den Äquator bei 90° östlicher Länge in nördlicher Richtung überfliegt, d.h. er hat zu diesem Zeitpunkt die Koordinaten $L = 90^\circ$ und $B = 0^\circ$. Da er sich in nördliche Richtung bewegt, ist $\Delta s = 0$. Dadurch sind die Positionen aller anderen Satelliten festgelegt, wenn man von den folgenden, für eine optimale Ausleuchtung der Erdoberfläche sinnvollen Regeln ausgeht (siehe Bild 5-1):

- Der im Bogenmaß gemessene Abstand $|\Delta s_{(O,S)} - \Delta s_{(O,S+1)}|$ zweier Nachbarsatelliten S und $S+1$ innerhalb einer Umlaufbahn O ist bei allen Satelliten gleich groß.
- Der Winkel $|\Delta L_O - \Delta L_{O+1}|$ zwischen den Schnittgeraden von Umlaufbahn- und Äquatorebene zweier Nachbarumlaufbahnen O und $O+1$ ist für alle Umlaufbahnen gleich groß.
- Die kleinste Differenz $\min_{S_1, S_2} |\Delta s_{(O, S_1)} - \Delta s_{(O+1, S_2)}|$ des Standortes zweier Satelliten S_1 bzw. S_2 aus zwei Nachbarumlaufbahnen O bzw. $O+1$ (engl. *Phasing*) ist gleich dem Abstand zweier Nachbarsatelliten innerhalb einer Umlaufbahn dividiert durch die Anzahl aller im System enthaltenen Umlaufbahnen.

Aus der Festlegung der Koordinaten eines Satelliten und aus den drei Regeln lassen sich für das simulierte System die in Tabelle 5-3 gezeigten Startkoordinaten aller Satelliten berechnen.

Satellit (Umlaufbahn, Nr.)	$\frac{\Delta L}{1^\circ}$	$\frac{\Delta s}{1^\circ}$	$\frac{L}{1^\circ}$	$\frac{B}{1^\circ}$
(1,1)	90,00	90,00	-180,00	55,00
(1,2)	90,00	180,00	-90,00	0,00
(1,3)	90,00	-90,00	0,00	-55,00
(1,4)	90,00	0,00	90,00	0,00
(2,1)	-150,00	120,00	-14,81	45,19
(2,2)	-150,00	-150,00	48,32	-24,18
(2,3)	-150,00	-60,00	165,19	-45,19
(2,4)	-150,00	30,00	-131,68	24,18
(3,1)	-30,00	60,00	14,81	45,19
(3,2)	-30,00	150,00	131,68	24,18
(3,3)	-30,00	-120,00	-165,19	-45,19
(3,4)	-30,00	-30,00	-48,32	-24,18

Tabelle 5-3: Startpositionen aller Satelliten zur Systemzeit 0⁰⁰ Uhr

Längengrad L und Breitengrad B in Tabelle 5-3 lassen sich mit Hilfe der Gl. (120) aus ΔL und Δs berechnen. Die Höhe h der Satelliten über der Erdoberfläche beträgt 10373km. Die Winkelgeschwindigkeit läßt sich mit Hilfe von Gl. (115) berechnen. Sie beträgt $\omega = 60^\circ/h$. Der minimale Sichtwinkel δ_{\min} wurde zu 0° gewählt. Die Gesamtanzahl der Teilnehmer ist 5.000.000, was Schätzungen der Anzahl der Satellitenmobilkommunikationsteilnehmer für das Jahr 2000 entspricht (siehe [7]). Die Belegungsdauer ist negativ exponentiell mit Mittelwert 5 min verteilt. Die Rufankunftsrate, die der Besitzer eines in Bereitschaft stehenden mobilen Endgerätes erzeugt, beträgt 0,1 Rufe/h, die Ortswechselrate 0,05 Ortswechsel/h. Die Dauer des Einschalt- bzw. Abschaltzeitraumes wird mit jeweils 4 Stunden bei $c_e = c_a = 0,95$ angenommen. Die Mitte des Einschalt- und Abschaltzeitraumes liegt bei 8⁰⁰ Uhr bzw. 18⁰⁰ Uhr (siehe Gl. (131) und (132)). Der Anteil der Teilnehmer, die ihr mobiles Endgerät dauerhaft eingeschaltet lassen, beträgt 5 %.

5.5.2 Simulationsergebnisse

Die Bilder 5-12 bis 5-17 zeigen Ergebnisse der Bewegungssimulation des Satellitensystems. Die Bilder 5-18 und 5-19 zeigen Ergebnisse aus der Simulation der Signalisierkanäle zwischen Mobilteilnehmer und Satelliten.

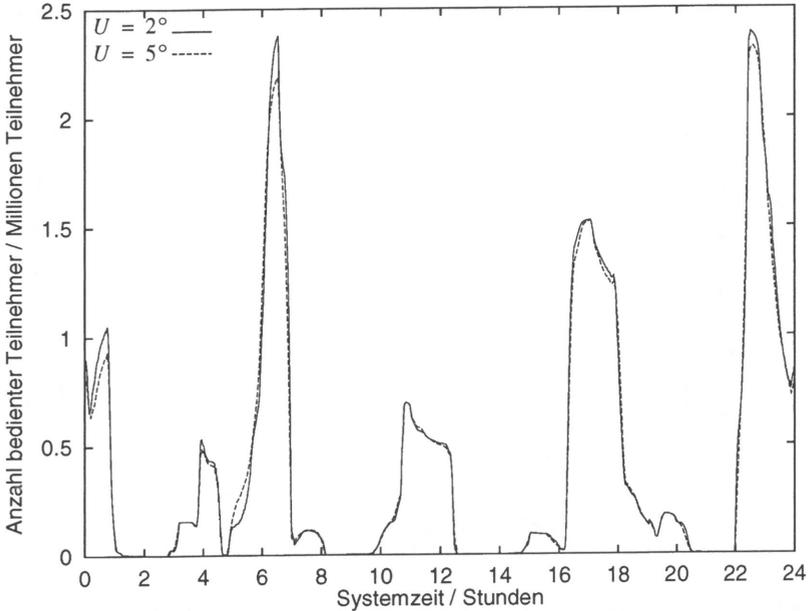


Bild 5-12: Anzahl der bedienten Teilnehmer als Funktion der Systemzeit für den Satelliten Nr. 1 aus Umlaufbahn Nr. 2 für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$

Bild 5-12 zeigt die von der Systemzeit abhängige Anzahl der Teilnehmer, die der Satellit Nr. 1 aus Umlaufbahn Nr. 2 während eines Tages, d.h. während vier Umläufen um die Erde, versorgt. Nach 24 h entspricht die Position von Satelliten und Erdoberfläche wieder der Anfangsposition. Die Simulation wurde für zwei verschiedene Werte der geographischen Konstante U (siehe Gl. (126)) berechnet. Ein kleinerer Wert von U entspricht einer ungleichmäßigeren geographischen Verteilung der Teilnehmer auf den Landflächen. Die Kurven für die beiden Werte von U sind nahezu gleich, da jeder der 12 Satelliten im Mittel für 1/12 der Erdoberfläche zuständig ist und dadurch die Teilnehmer eines sehr großen Gebietes integriert. Um 6⁰⁰ Uhr und um 23⁰⁰ Uhr ist der Satellit kurzzeitig für nahezu 50% aller Teilnehmer zuständig. Zu diesen Zeitpunkten befindet er sich über dem New Yorker Raum, wo sich sehr viele Teilnehmer aufhalten (siehe Bild 5-6).

Mit Hilfe der Bereitschaftswahrscheinlichkeit der mobilen Endgeräte (siehe Bild 5-8) und den in Abschnitt 5.5.1 getroffenen Annahmen läßt sich aus der zeitabhängigen Anzahl der bedienten Teilnehmer das Angebot an Nutzverkehr für den betrachteten Satelliten berechnen. Bild 5-13 zeigt das Angebot für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$. Das

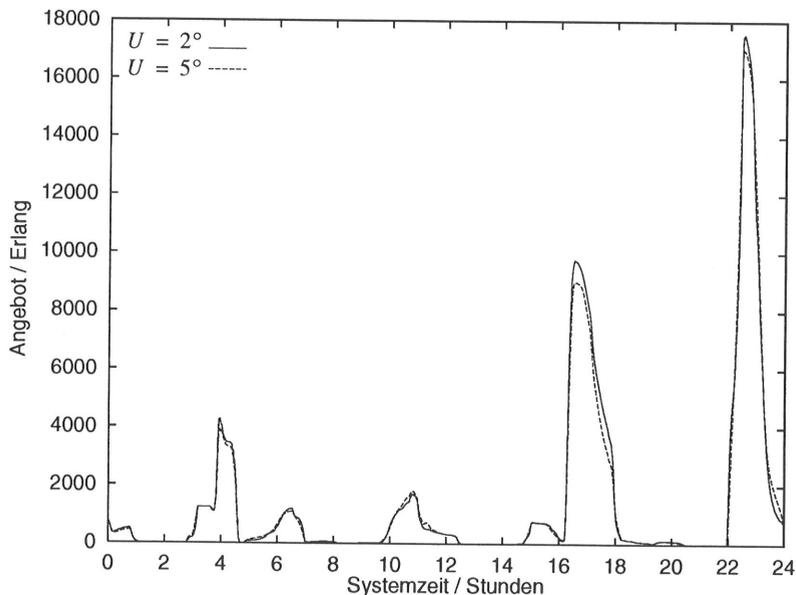


Bild 5-13: Bearbeitetes Nutzangebot als Funktion der Systemzeit für den Satelliten Nr. 1 aus Umlaufbahn Nr. 2 für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$

6⁰⁰ Uhr-Maximum aus Bild 5-12 ist stark reduziert, da die lokale Zeit beim Überfliegen des entsprechenden Gebietes ca. 1⁰⁰ Uhr beträgt und dementsprechend wenige Endgeräte in diesem Gebiet eingeschaltet sind. Demgegenüber entsteht ein starkes Maximum um 23⁰⁰ Uhr, da beim Überfliegen des Gebietes bei einer lokalen Zeit von ca. 18⁰⁰ Uhr noch sehr viele mobile Endgeräte eingeschaltet sind. Es entstehen Angebote von bis zu 18000 Erlang. Die Anzahl der Nutzkanäle der Satelliten muß dementsprechend dimensioniert sein. Das Nutzangebot der Teilnehmer wird im gesamten Ausleuchtgebiet des Satelliten erzeugt und verteilt sich auf die verschiedenen Nutzkanalrichtstrahlen, aus denen sich das Ausleuchtgebiet zusammensetzt. Um genauere Angaben über die Anzahl der notwendigen Nutzkanäle für die einzelnen Richtstrahlen machen zu können, muß das Angebot, das innerhalb eines Richtstrahlausleuchtgebietes erzeugt wird, aufsummiert werden. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf den Signalisierkanal eines Satelliten, dessen Ausleuchtgebiet alle Nutzkanalrichtstrahlen umfaßt. Deshalb soll im folgenden nicht weiter auf die Problematik der Nutzkanäle eingegangen werden.

Bild 5-14 zeigt die Rate der Signalisiermeldungen als Funktion der Systemzeit. Da der 23⁰⁰ Uhr-Spitzenwert für die Anzahl der bedienten Teilnehmer (siehe Bild 5-12) mit dem abendlichen Abmeldevorgang des Gebietes, für das der betrachtete Satellit zuständig ist (siehe

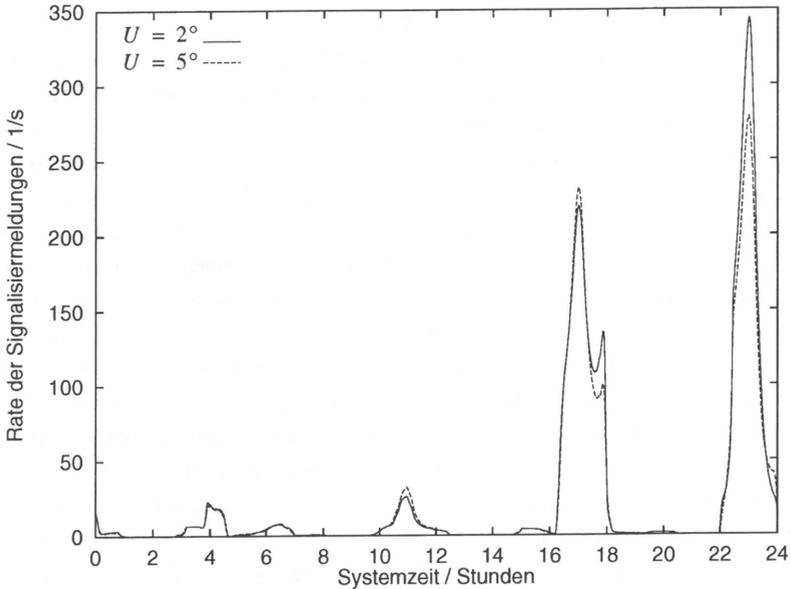


Bild 5-14: Rate der Signalisiermeldungen als Funktion der Systemzeit für den Satelliten Nr. 1 aus Umlaufbahn Nr. 2 für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$

Bild 5-9), zusammenfällt, entsteht bei dieser Systemzeit ebenfalls ein sehr hoher Spitzenwert für die Rate der Signalisiermeldungen. Hierbei zeigt sich eine etwas stärkere Abhängigkeit von der geographischen Konstante U , da der Maximalwert der Rate der Abmeldesignal­isier­mel­dungen eines Teilnehmers bei gegebener Systemzeit nur in einer der 15° breiten Zeit­zonen erreicht wird. Verteilen sich die Teilnehmer bei $U = 5^\circ$ gleichmäßiger über die Landfläche der Erde, dann ‚sieht‘ der betrachtete Satellit wegen des großen Gebietes, für das er zuständig ist, zwar ungefähr die gleiche Anzahl von Teilnehmern. Allerdings halten sich bei $U = 5^\circ$ weniger Teilnehmer in der vom Satelliten erfaßten Zeitzone mit maximaler Abmelde­signalisier­rate auf als bei $U = 2^\circ$. Bei $U = 2^\circ$ beträgt die maximale Rate der Signalisier­mel­dungen 343,9 Meldungen/s. Die maximale Rate wird um 23⁵⁹ Uhr erreicht. Zwischen 22⁵⁰ Uhr und 23⁰⁶ Uhr ist die Signalisier­rate größer als 300 Meldungen/s. Der betrachtete Satellit erreicht unter allen Satelliten den größten Maximalwert der Rate der Signalisier­mel­dungen. Für diesen Maximalwert muß das Satellitensystem ausreichend dimensioniert sein.

Bei der Dimensionierung der Kapazität der Signalisierkanäle muß die Qualität berücksichtigt werden, die der erbrachte Dienst, d.h. im vorliegenden Fall die Übertragung von Signalisier­mel­dungen, aus der Sicht eines Teilnehmers besitzt. Die Qualität bezüglich der Übertragung

von Signalisiermeldungen läßt sich, wenn man den Einfluß eines fehlerbehafteten Kanals auf die übertragenen Daten außer acht läßt, als Verzögerungszeit zwischen dem Generieren einer Meldung und dem Empfang dieser Meldung beim Adressaten angeben. Die Bestimmung der Dienstqualität muß für einen Teilnehmer erfolgen, der innerhalb des Gebietes mit der größten Teilnehmerdichte lokalisiert ist. In unserem betrachteten Fall ist das sowohl für $U = 2^\circ$ als auch für $U = 5^\circ$ ein Teilnehmer in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite. Bild 5-15 zeigt den am höchsten über dem Teilnehmer stehenden Satelliten in Abhängigkeit von der Systemzeit. Die Angabe des Satelliten erfolgt durch (O, S) , wobei O die Nummer des Umlaufbahn (engl. *Orbit*) und S die Nummer des Satelliten innerhalb der Umlaufbahn angibt. Auffällig ist in Bild 5-15, daß der betrachtete Teilnehmer innerhalb einer Umlaufbahn meist von Satellit Nr. 4 bis Satellit Nr. 1 durchgereicht wird. Dieser Effekt entsteht dadurch, daß die Satelliten in Bewegungsrichtung durchnummeriert sind und deshalb innerhalb einer Umlaufbahn immer Satelliten mit absteigender Nummer nacheinander für den betrachteten Teilnehmer zuständig werden. Das Durchreichen wird unterbrochen von Satelliten anderer Umlaufbahnen. Im folgenden wird davon ausgegangen, daß ein Teilnehmer grundsätzlich von dem Satelliten mit dem größten Sichtwinkel δ bedient wird, da er von diesem das stärkste Signal empfängt. In der Realität muß das nicht immer der Fall sein, da es z.B. durch Gebäude zu Abschattungen kommen kann, so daß ein Satellit mit kleinerem Sichtwinkel ein stärkeres Empfangssignal beim mobilen Endgerät erzeugt.

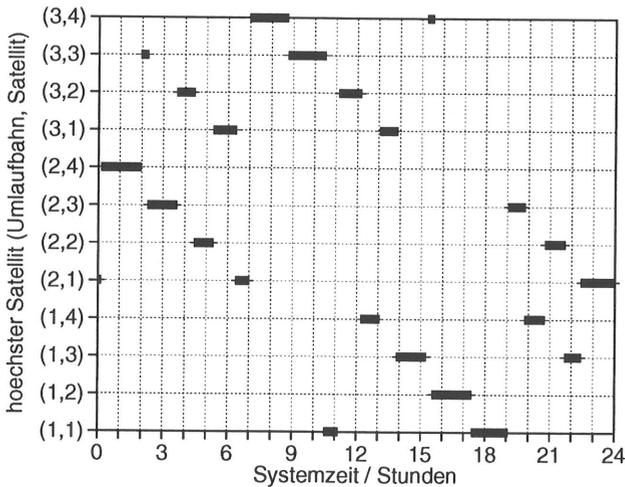


Bild 5-15: Zuständiger Satellit als Funktion der Systemzeit aus Sicht eines Teilnehmers, lokalisiert in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite

Bild 5-16 zeigt die Anzahl der Teilnehmer als Funktion der Systemzeit, mit denen der betrachtete Teilnehmer um den jeweils höchsten Satelliten konkurriert. Die Form erinnert stark an die

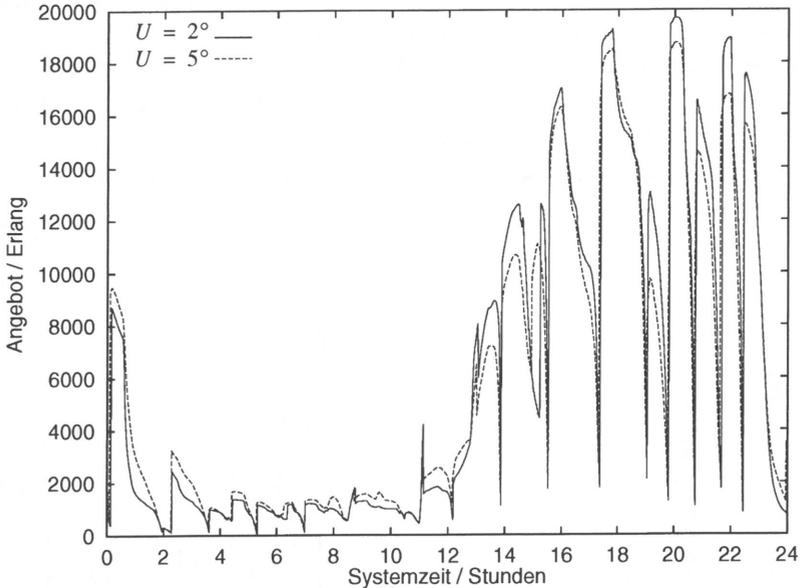


Bild 5-16: Nutzangebot aller vom selben Satelliten bedienten aktiven Teilnehmer über der Systemzeit aus Sicht eines Teilnehmers in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$

in Bild 5-8 gezeigte Bereitschaftswahrscheinlichkeit eines Teilnehmers. Allerdings ist die Kurve durch die Zeitverschiebung von 1 h pro 15° -Zeitzone zwischen der Systemzeit und der lokalen Zeit bei 74° westlicher Länge um fünf Stunden verschoben. Die Einbrüche in der gezeigten Kurve entstehen dadurch, daß sich alle Satelliten dem Teilnehmer aus Richtung Südwest nähern, d.h. aus einer Richtung mit hoher Teilnehmerdichte (siehe Bild 5-6). Wird ein Satellit für den betrachteten Teilnehmer zuständig, dann trägt er schon eine relativ hohe Last. Bewegt sich der Satellit weiter in nordöstliche Richtung, dann erreicht er Gebiete über dem Meer mit sehr niedriger Teilnehmerdichte. Dadurch nimmt die Gesamtzahl der Teilnehmer, für die er zuständig ist, wieder ab. Es entsteht aus der Sicht des betrachteten Teilnehmers deshalb ein sägezahnförmiger zeitlicher Verlauf der Last mit sehr kurzen Anstiegen und einem sich daran jeweils anschließenden längeren Abfall.

Gewichtet man die Anzahl der Teilnehmer aus den verschiedenen Zeitzonen, mit denen der betrachtete Teilnehmer konkurriert, mit der jeweiligen zeitabhängigen Rate der Signalisiermeldungen, die die Teilnehmer erzeugen, dann erhält man die Rate der Signalisiermeldungen, die über den jeweiligen, für den betrachteten Teilnehmer zuständigen, Satelliten übertragen werden (siehe Bild 5-17).

Zur Simulation des Verhaltens des Signalisierkanals aus der Sicht eines Teilnehmers wird die zeitabhängige Rate der Signalisermeldungen nach Bild 5-17 zur Steuerung des in Bild 5-11 gezeigten Paketgenerators verwendet. Bei der Simulation wird bei jedem Satellitenwechsel des Teilnehmers eine Warmlaufphase eingefügt, die zur realistischen Simulation der Lastsprünge, die beim Satellitenwechsel auftreten, dient.

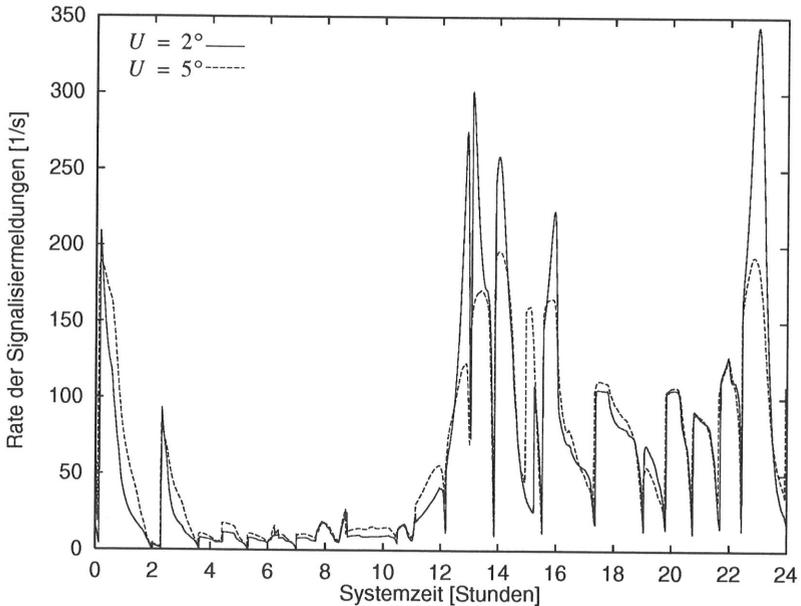


Bild 5-17: Rate der Signalisermeldungen als Funktion der Systemzeit aus Sicht eines Teilnehmers in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite für die beiden geographischen Konstanten $U = 2^\circ$ bzw. $U = 5^\circ$

Im folgenden werden die Eingabeparameter für die Simulation des Signalisierkanals beschrieben. Für alle Simulationen wurden die im ersten Schritt erhaltenen Ergebnisse für $U = 2^\circ$ verwendet. Die Zeitschlitzrate beträgt beim Zugriff durch Reservierung und bei den kombinierten Verfahren 360/s. Das Verfahren des getakteten ALOHA wäre bei dieser Zeitschlitzrate und bei einer maximalen Signaliserrate von 343,9 Meldungen/s allerdings instabil. Aus diesem Grund muß für dieses Zugriffsverfahren mehr als die dreifache Übertragungskapazität des Signalisierkanals vorgesehen werden. Als Zeitschlitzrate wurde für ALOHA deshalb 1100/s gewählt. Die nur für ALOHA benötigte Wahrscheinlichkeit, daß eine kollidierte Signalisierung in einem Zeitschlitz wiederholt wird, beträgt 1/12. Ein Zeitschlitz enthält bei den kombinierten Verfahren und beim Zugriff durch Reservierung sieben Minizeitschlitzte. Bei Kollisionsauflösung wird die Reservierungskapazität bei CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2

auf 14 Minzeitschlitz pro Zeitschlitz vergrößert. Das RTD beträgt in allen Fällen 69 ms. Tabelle 5-4 faßt nochmals die wesentlichen Simulationsparameter zusammen.

Parameter	Reservierung	CRRMA/ UCA	CRRMA/ CCA1	CRRMA/ CCA2	S-ALOHA
Minzeitschlitz pro Nutzeitschlitz	7	7	7	7	
Minzeitschlitz bei Kollisionsauflösung			14	14	
Wiederhol- wahrscheinlichkeit					1/12
Zeitschlitzrate in 1/s	360	360	360	360	1100
RTD in ms	69	69	69	69	69
RTD in Zeitschlitz	25	25	25	25	76

Tabelle 5-4: Simulationsparameter

Als Ergebnis der Simulation erhält man u.a. die Verteilungsfunktion der Übermittlungszeit. Wegen der besseren Darstellung wird sie in die komplementäre Verteilungsfunktion umgerechnet. Aus diesem Grund und wegen der besseren Übersichtlichkeit sind in die Bilder 5-18 und 5-19 keine Vertrauensintervalle eingezeichnet. Alle Vertrauensintervalle sind aber wesentlich kleiner als 0,1% der gemessenen Werte der Verteilungsfunktion.

Bild 5-18 zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Übermittlungszeit für die Übertragung einer Signalisierung über den Signalisierkanal aus Sicht eines Teilnehmers in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite für die drei CRRMA-Alternativen. Zum Vergleich ist die komplementäre Verteilungsfunktion für ALOHA und Reservierungsverfahren ebenfalls eingezeichnet. Die Messung erfolgte mit der zeitabhängigen Rate nach Bild 5-17.

Die minimal mögliche Übermittlungszeit beträgt bei ALOHA und bei den CRRMA-Verfahren genau ein RTD. Beim Reservierungsverfahren beträgt sie zwei RTDs. Wegen der dreifach erhöhten Übertragungskapazität ist die Wahrscheinlichkeit, daß bei der ersten Übertragung keine Kollision stattfindet, bei ALOHA am größten. Übermittlungszeiten, die bei wahlfreien und kombinierten Zugriffsverfahren genau zwischen einem und zwei RTDs liegen, sind nicht möglich, da für die Wiederholung einer kollidierten Signalisierung, nachdem die Stationen über die Kollision informiert sind, mindestens ein weiteres RTD benötigt wird. Deshalb entsteht zwischen einem und zwei RTDs eine harte Stufe. Der weitere stufenförmige Verlauf bei den kombinierten Verfahren und beim Zugriff durch Reservierung entsteht dadurch, daß sich die Übermittlungszeit bei diesen Verfahren aus einem ganzzahligen Vielfachen eines

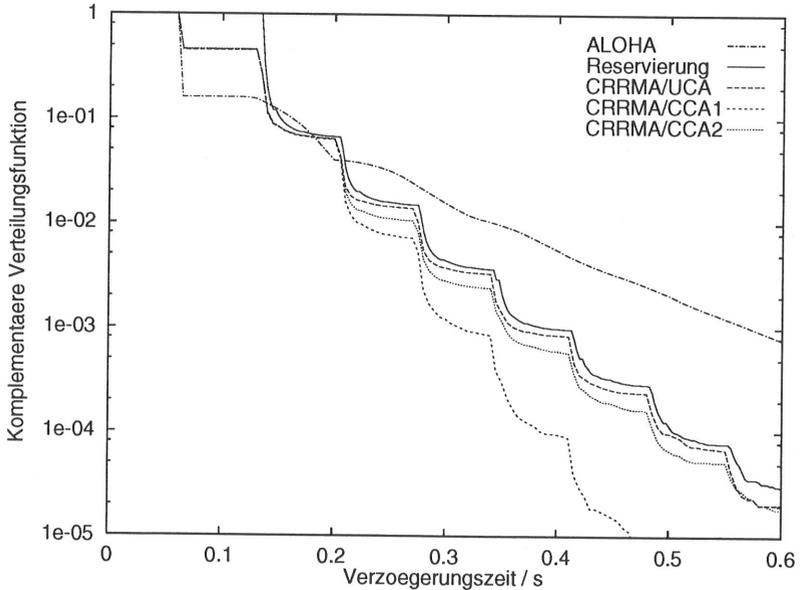


Bild 5-18: Komplementäre Verteilungsfunktion der Übermittlungsverzögerung aus Sicht eines Teilnehmers in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite, gemessen zwischen 0⁰⁰ Uhr und 24⁰⁰ Uhr, Zeitschlitzrate: 360 1/s, außer bei ALOHA: 1100 1/s

RTDs und der Wartezeit in der verteilten Warteschlange zusammensetzt. Die Wartezeit in der verteilten Warteschlange beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Dauer eines Zeitschlitzes.

Alle kombinierten Verfahren sind grundsätzlich besser als der Zugriff durch Reservierung, der wegen seiner begrenzten Anzahl von sieben Minizeitschlitz gegenüber den kombinierten Verfahren selbst bei hoher Auslastung keinen Vorteil hat. Bis zu einer Übermittlungszeit des dreifachen RTDs verhalten sich alle kombinierten Zugriffsverfahren nahezu gleich, was mit den möglichen Szenarien zusammenhängt, die diese Übermittlungszeit erzeugen können:

- die erste wahlfreie Übertragung der Signalisiermeldung ist erfolgreich
- die Signalisiermeldung kollidiert, aber die zugehörige Reservierungsanforderung ist erfolgreich
- der Kanal ist reserviert, aber eine übertragene Reservierungsanforderung ist erfolgreich.

Diese Szenarien der kombinierten Zugriffsverfahren treten bevorzugt bei niedriger Auslastung des Systems auf, wo nur sehr selten eine Kollisionsauflösung von kollidierten Reservierungsanforderungen stattfindet. Da sich die kombinierten Verfahren nur in der Behandlung einer Kollisionsauflösung unterscheiden, verhalten sie sich bei Übermittlungszeiten zwischen einem und drei RTDs nahezu gleich. Höhere Übermittlungszeiten treten bei CRRMA/CCA2 etwas

seltener auf als bei CRRMA/UCA, da bei den nun häufigeren Kollisionsauflösungen bei CRRMA/CCA2 mehr Kapazität für Reservierungsanforderungen zur Verfügung steht. Noch wesentlich seltener treten höhere Übermittlungszeiten bei CRRMA/CCA1 auf, da Kollisionen durch das Zurückhalten neu generierter Signalisiermeldungen wesentlich schneller aufgelöst werden können.

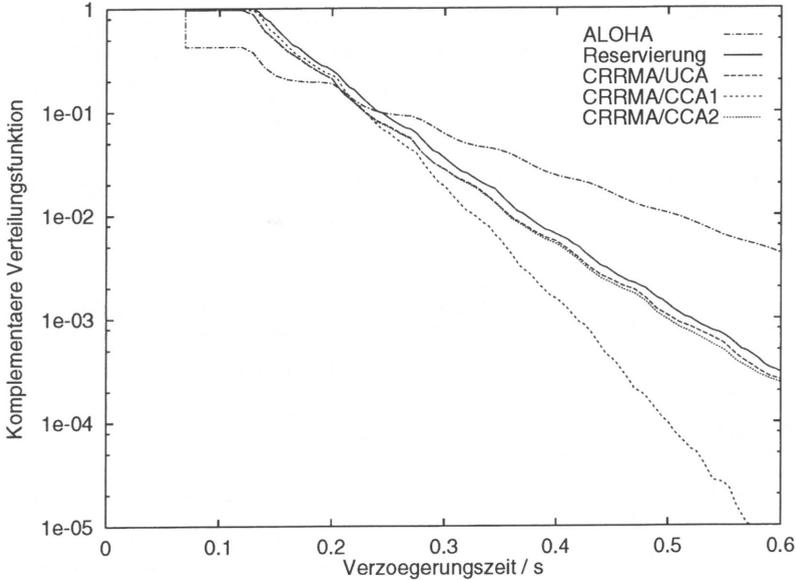


Bild 5-19: Komplementäre Verteilungsfunktion der Übermittlungszeit aus Sicht eines Teilnehmers lokalisiert in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite, gemessen während des Maximums der Signalisiertrate, Zeitschlitzrate: 360/s, außer bei ALOHA: 1100/s

Bild 5-19 zeigt ebenfalls die komplementäre Verteilungsfunktion der verschiedenen Zugriffsverfahren. Im Gegensatz zu Bild 5-18 beziehen sich die gemessenen Übermittlungszeiten nur auf den Spitzenwert der Signalisiertrate des Systems von 343,9 Signalisiermeldungen/s. Man sieht deutlich, daß sich die Verteilungen der kombinierten Verfahren und des Zugriffs durch Reservierung in diesem Hochlastfall einander annähern, da der Kanal fast immer reserviert ist und ein Kanalzugriff nur noch über die Reservierungsminizeitschlitzte möglich ist. Höhere Übermittlungszeiten treten bei CRRMA/CCA1 deutlich seltener auf als bei den beiden anderen kombinierten Verfahren. Hier wirkt sich wieder die schnellere Kollisionsauflösung durch Zurückhalten von neu generierten Signalisiermeldungen aus. Verglichen mit den anderen Zugriffsverfahren mußte die Kapazität des Signalisierkanals für ALOHA wieder verdreifacht werden, damit ein stabiler Betrieb des Systems möglich ist. Dadurch treten bei ALOHA wesentlich häufiger Übermittlungszeiten von einem RTD auf. Allerdings ist die Streuung der

Meßwerte bei ALOHA wesentlich größer, da häufiger Übermittlungszeiten über dem dreifachen RTD gemessen werden als bei den anderen Zugriffsverfahren.

5.5.3 Vergleich und Bewertung der Zugriffsverfahren

Bei der Dimensionierung eines Systems spielen die Quantile der verschiedenen Meßgrößen eine entscheidende Rolle. Das 99%-Quantil einer Meßgröße ist derjenige Wert, der von 99% der gemessenen Werte nicht über- bzw. unterschritten wird, je nachdem, ob ein kleiner bzw. ein großer Wert der Meßgröße für die Qualität des Systems günstig ist.

Mit Hilfe der in den Bildern 5-18 und 5-19 gezeigten komplementären Verteilungsfunktion der Übermittlungszeit kann man deren 99%-Quantil durch Ablesen des zur Wahrscheinlichkeit 0,01 gehörenden Wertes der Übermittlungszeit bestimmen.

Zugriffsverfahren	99%-Quantil (24h-Wert) in ms	99%-Quantil (Spitzenlastwert) in ms
Reservierung	280	375
CRRMA/UCA	280	360
CRRMA/CCA1	225	330
CRRMA/CCA2	275	360
ALOHA	350	510

Tabelle 5-5: 99%-Quantile aus Sicht eines Teilnehmers in 74° westlicher Länge und 40° nördlicher Breite, 24 h-Wert und Spitzenlastwert

Tabelle 5-5 zeigt die 99%-Quantile der Übermittlungszeit für der verschiedenen Verfahren, gemessen über 24 Stunden (vgl. Bild 5-18) bzw. während der Spitzenlast (vgl. Bild 5-19). Auf der Grundlage des 99%-Quantils der Übermittlungszeit ist ALOHA trotz seiner dreifach höheren Zeitschlitzrate grundsätzlich schlechter einzustufen als kombinierte und Reservierungsverfahren. Der Zugriff durch Reservierung besitzt auf Grundlage des 99%-Quantils eine mit CRRMA/UCA und CRRMA/CCA2 vergleichbare Qualität. Lediglich CRRMA/CCA1 besitzt durch seine beschleunigte Kollisionsauflösung eine bessere Qualität hinsichtlich des 99%-Quantils der Übermittlungszeit.

Die für den Signalisierkanal benötigte Bandbreite hängt neben der Länge der zu übertragenden Signalisiermeldungen auch von dem durch Schutzzeiten und Minizeitslitze verursachten Bandbreitenmehraufwand ab. Abhängig von der Präzision, mit der ein mobiles Endgerät zum Satellitensystem synchronisiert werden kann, bevor eine Signalisiermeldung gesendet wird, muß die Schutzzeit mehr oder weniger groß sein. Benutzen Nutzdaten und Reservierungsanforderungen den selben Kanal (siehe Bild 4-1), dann werden für die kombinierten Verfahren

$N + 1$ Schutzzeiten pro Zeitschlitz benötigt. Die benötigte Übertragungsbitrate für die kombinierten Verfahren beträgt:

$$R_{BK} = [l_P + N \cdot l_M + (N + 1) \cdot t_S \cdot R_{BK}] \cdot R_Z \quad (134)$$

Dabei ist R_{BK} die Bitrate des Signalisierkanals, R_Z die Zeitschlitzrate in Nutzzeitschlitzen pro Zeiteinheit, l_P die Länge der Signalisiermeldung in Bits, l_M die Länge eines Minizeitschlitzes in Bits, N die Anzahl der Minizeitschlitze pro Zeitschlitz und t_S die Dauer der Schutzzeit. Gleichung (134) muß noch nach R_{BK} aufgelöst werden:

$$R_{BK} = \frac{l_P + N \cdot l_M}{\frac{1}{R_Z} - (N + 1) \cdot t_S} \quad (135)$$

Für ALOHA benötigt man eine wesentlich höhere Zeitschlitzrate, damit das Zugriffsverfahren stabil ist. Bei $N \geq 3$ Minizeitschlitzen und einer Maximalauslastung der Nutzzeitschlitze von mehr als 90% muß man bei getaktetem ALOHA ca. die dreifache Nutzkapazität vorsehen, da die Maximalauslastung bei diesem Verfahren $1/e$ beträgt. Die Zeitschlitzrate des ALOHA-Verfahrens wird im folgenden mit $b_A \cdot R_Z$ angegeben. Dabei ist $b_A \approx 3$ das Verhältnis der Zeitschlitzraten von ALOHA und kombinierten Verfahren. Die Bitrate des Signalisierkanals läßt sich, falls ALOHA verwendet wird, folgendermaßen angeben:

$$R_{BA} = \frac{l_P}{\frac{1}{b_A \cdot R_Z} - t_S} \quad (136)$$

Setzt man $R_{BK} = R_{BA}$, dann kann man bei gegebener Anzahl von Minizeitschlitzen und bei gegebenem b_A berechnen, bei welchem Verhältnis von Schutzzeit und Zeitschlitzdauer ($t_S \cdot R_Z$) und bei welchem Verhältnis von Minizeitschlitz- und Signalisiermeldungslänge (l_M/l_P) die kombinierten Verfahren genau gleich viel Bandbreite wie ALOHA beanspruchen:

$$t_S \cdot R_Z = \frac{\frac{b_A - 1}{N} - \frac{l_M}{l_P}}{b_A \cdot \left(1 - \frac{l_M}{l_P}\right)} \quad (137)$$

Gl. (137) läßt sich auch mit Hilfe von Bild 5-20 herleiten. Bei gleicher Kanalbitrate setzt man den Mehraufwand durch die N Minizeitschlitze gleich den bei ALOHA notwendigen $b_A - 1$ zusätzlichen Zeitschlitzen.

Setzt man $b_A = 3$, so erhält man aus Gl. (137) für $N = 3 \dots 7$ die in Bild 5-21 dargestellte Abhängigkeit der auf die Zeitschlitzdauer normierten Schutzzeit von der auf die Länge einer Signalisiermeldung normierten Minizeitschlitzlänge. Liegt ein Wertepaar ($l_M/l_P, t_S \cdot R_Z$)

Reservierungs- bzw. kombiniertes Verfahren

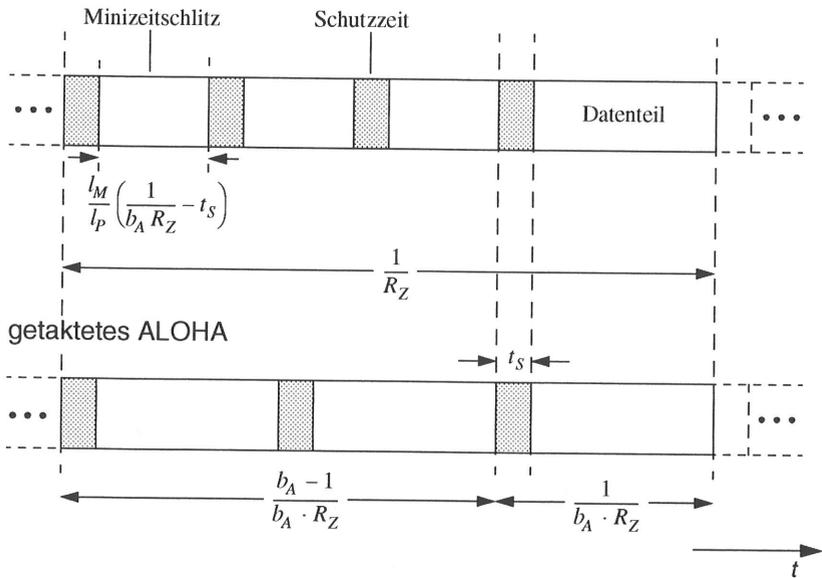


Bild 5-20: Vergleich der kombinierten Zugriffsverfahren bzw. des Zugriffs durch Reservierung mit ALOHA bei gleicher Kanalbitrate, $N = 3$ Minizeitschlitz und $b_A = 3$ -facher notwendiger Zeitschlitzrate des ALOHA-Verfahrens

oberhalb einer Kurve, dann ist das ALOHA-Zugriffsverfahren bezüglich der benötigten Übertragungskapazität günstiger. Liegt ein Wertepaar unterhalb einer Kurve, dann benötigt jedes der kombinierten Verfahren weniger Übertragungskapazität und bietet gleichzeitig noch den Vorteil der günstigeren Quantile der Übermittlungsverzögerung.

Geht man, wie bei der oben dargestellten Gegenüberstellung des Bandbreitebedarfs davon aus, daß die notwendige Schutzzeit für alle vorgestellten Zugriffsverfahren gleich groß ist, dann ist der Aufwand, der zur Synchronisation eines Endgerätes vor jedem Senden einer Signalisierungsmeldung über den Signalisierkanal notwendig ist, ebenfalls gleich groß.

Ein Nachteil der kombinierten Verfahren und des Zugriffs durch Reservierung gegenüber ALOHA ist die notwendige Verwaltung einer verteilten Warteschlange. Weiterhin sollte der Absolutwert der wartenden Anforderungen periodisch durch den zentralen Knoten (z.B. durch den Satelliten) bekannt gemacht werden. Andernfalls müßten die Endgeräte mindestens ein RTD abwarten und vom nächsten freien, d.h. nicht reservierten Zeitschlitz durch Rückrechnen die Belegung der verteilten Warteschlange bestimmen. Bei einem freien Zeitschlitz kann das mobile Endgerät davon ausgehen, daß die verteilte Warteschlange vor einem RTD leer war. Aus den Zu- und Abgängen, die es seither gezählt hat, kann es deshalb die Belegung der ver-

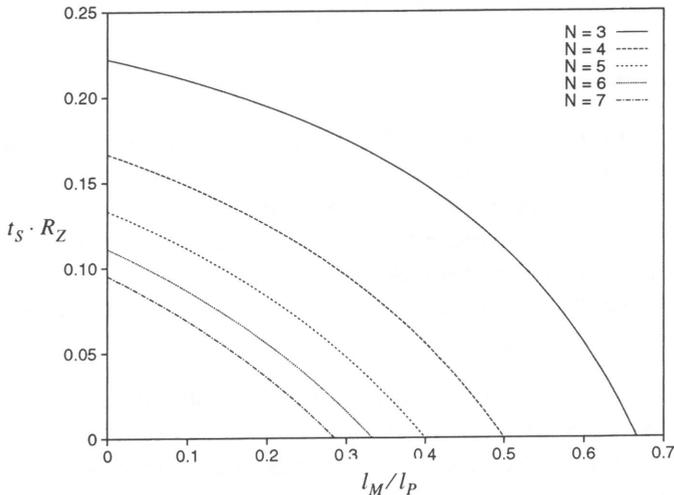


Bild 5-21: Normierte Schutzzeit in Abhängigkeit von der normierten Länge eines Minizeitschlitzes bei gleichem Bandbreitebedarf von getaktetem ALOHA- und kombinierten Zugriffsverfahren ($b_A = 3, N = 3 \dots 7$)

teilten Warteschlange berechnen. Weiterhin ist es für die kombinierten Verfahren notwendig, daß Kollisionen innerhalb eines Minizeitschlitzes und innerhalb des Datenteils erkannt und dem jeweiligen Minizeitschlitz bzw. dem Datenteil zugeordnet werden können. Gleichzeitig müssen alle Endgeräte auch erkennen können, ob ein Minizeitschlitz frei, einfach oder mehrfach belegt war (ternäre Rückmeldung), um die Zugänge in die verteilte Warteschlange berechnen zu können. Beim Datenteil genügt eine binäre Rückmeldung (Kollision, keine Kollision), falls die Warteschlangenlänge durch die zentrale Station periodisch bekannt gemacht wird. Damit alle Stationen ungültige Reservierungsanforderungen erkennen können, muß auch eine Zuordnung von Signalisierung und Reservierungsanforderung möglich sein.

Die beiden Zugriffsverfahren CRRMA/CCA1 und CRRMA/CCA2 sind gegenüber CRRMA/UCA etwas aufwendiger, da der Datenteil eines Zeitschlitzes bei einer Kollisionauflösung in Minizeitschlitz umgewandelt wird. Der Zufallszahlengenerator zur Bestimmung eines zu belegenden Minizeitschlitzes sowie die Auswertung der Reservierungsversuche muß deshalb abhängig vom Systemzustand (Kollisionauflösung, keine Kollisionauflösung) umgeschaltet werden. Bei CRRMA/CCA1 muß zusätzlich zu CRRMA/CCA2 eine neu generierte Signalisierung solange zurückgehalten werden, bis in einem Zeitschlitz keine Kollision aufgelöst werden muß. Vorteilhaft ist bei CRRMA/CCA1 dagegen seine schnelle Kollisionauflösung. Gegenüber allen anderen Verfahren kann bei CRRMA/CCA1 die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität des Signalisierkanals stark reduziert werden, ohne daß das System instabil wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die globale Mobiltelekommunikation über Satellitensysteme. Nach der Vorstellung der Dienste, die ein Satellitensystem anbieten kann, und der daraus resultierenden Anforderungen wurden die verschiedenen Architekturen und Komponenten eines Satellitensystems erläutert. Besonderer Wert wurde dabei auf die Lokalisierung der Vermittlungsfunktionen, Umlaufbahnen, Eigenschaften der Übertragungsstrecken und die Beschreibung der in der Satellitenkommunikation gebräuchlichen Mehrfachzugriffsverfahren FDMA, TDMA, SDMA und CDMA gelegt.

Wichtigster Aspekt dieser Arbeit ist die Untersuchung von Zugriffsverfahren, die für die Übertragung von Datenpaketen, insbesondere Signalisierungsmeldungen, zwischen Bodenstationen und Satelliten geeignet sind. Folgende Anforderungen müssen von einem solchen Zugriffsverfahren erfüllt werden:

- Die lange Ausbreitungsverzögerung zwischen Bodenstationen und Satellit muß toleriert werden.
- Die Bodenstationen können nur über den Satelliten Informationen austauschen. Deshalb muß die Absprache des Kanalzugriffs immer über den Satelliten abgewickelt werden.
- Da keine unendlich große Übertragungskapazität zur Verfügung steht, kann es zu Kollisionen kommen, die vom Zugriffsverfahren möglichst schnell aufgelöst werden müssen.
- Das Zugriffsverfahren soll auch bei einer großen Anzahl von Bodenstationen und bei einem großen Gesamtangebot eine möglichst hohe Stabilität aufweisen, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß der Nutzdurchsatz des Kanals gegen null geht, während der Durchsatz an notwendiger Steuerinformation ständig steigt, soll möglichst gering sein.
- Mittelwert und Varianz der Übermittlungszeit von Nutzpaketen sollen möglichst klein sein.

Zur besseren Übersicht wurde zunächst ein ausführlicher Überblick über die in der Literatur vorgestellten, für Satellitensysteme geeigneten Zugriffsverfahren gegeben. Danach wurde eine Analyseverfahren für eine Klasse getakteter Zugriffsverfahren vorgestellt, die die Vorteile des wahlfreien Zugriffs und des Zugriffs durch Reservierung vereinen. Beim wahlfreien Zugriff werden Datenpakete sofort nach ihrem Eintreffen in der Bodenstation und ohne Rücksicht auf den Zustand des Gesamtsystems ausgesendet. Dadurch erhält man bei niedrigem Gesamtangebot die kürzestmögliche Übermittlungszeit für Datenpakete von einer Umlaufverzögerung. Allerdings treten bei höherem Angebot immer mehr Kollisionen auf. Dadurch neigt der wahlfreie Zugriff sehr zur Instabilität. Ein hoher Nutzdurchsatz kann nicht erreicht werden. Im

Gegensatz dazu kann beim Zugriff durch Reservierung ein hoher Nutzdurchsatz erreicht werden. Allerdings ist die bei geringem Gesamtangebot auftretende minimal mögliche Übermittlungsverzögerung doppelt so groß wie beim wahlfreien Zugriff. Die kombinierten Verfahren versuchen nun, den Vorteil des wahlfreien Zugriffs bei niedrigem Gesamtangebot mit den Vorteilen des Zugriffs durch Reservierung bei hohem Gesamtangebot zu vereinen.

Kombinierte Zugriffsverfahren bieten Kapazität zur Übermittlung von Nutzdaten und Reservierungsanforderungen. Auf den Reservierungsteil wird grundsätzlich wahlfrei zugegriffen. Die Grundidee der kombinierten Verfahren ist, daß auf einen nicht reservierten Nutzdatenteil wahlfrei zugegriffen werden darf und daß mit jedem wahlfreien Aussenden von Nutzdaten immer ‚vorsichtshalber‘ eine Reservierungsanforderung mitgesendet wird, die bei erfolgreicher Übertragung der Nutzdaten verworfen wird. Wichtig ist bei den kombinierten Verfahren, daß die Anzahl der sog. Minizeitschlitze wesentlich größer als die Anzahl der Nutzzeitschlitze ist. Minizeitschlitze dienen zur Übertragung von Reservierungsanforderungen. Da Reservierungsanforderungen wesentlich kürzer als Nutzdatenpakete sind, erhält man trotzdem ein günstiges Verhältnis der Übertragungskapazitäten von Reservierungs- und Nutzkanal.

Es wurden verschiedene Verbesserungen zu einer in der Literatur vorgestellten Klasse von kombinierten Zugriffsverfahren vorgeschlagen und untersucht. Die vorgestellte Analysemethode beruht auf einer zeitdiskreten Markoff-Kette mit zeitabhängigen Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten, die, ausgehend von einer vorgegebenen Sendewahrscheinlichkeit der Bodenstationen, berechnet werden. Jeder Zustand entspricht einer Anzahl von Bodenstationen, die an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind und keine neuen Datenpakete generieren dürfen. Die daraus resultierenden Gleichungen für den Zustandsübergang werden iterativ gelöst. Zur Überprüfung der vorgestellten Analysemethode wurde ein Simulationsprogramm entwickelt. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Analyse und der Simulation. Die Analysemethode erlaubt nicht nur eine detaillierte Leistungsuntersuchung der Zugriffsverfahren, sondern sie ermöglicht durch die schrittweise (iterative) Berechnung von Folgezuständen, die annähernd einem Einschwingvorgang, ausgehend von einem leeren System, entsprechen, auch ein tieferes Verständnis der auftretenden Effekte:

- Bei kleiner Sendewahrscheinlichkeit verhalten sich die kombinierten Zugriffsverfahren wie wahlfreie Zugriffsverfahren.
- Erhöht man die Sendewahrscheinlichkeit, nähern sie sich in ihrem Verhalten dem Zugriff durch Reservierung an. Je nach Anzahl von Minizeitschlitzen pro Nutzzeitschlitz kann die vorhandene Nutzkapazität auch zu 100% ausgenutzt werden.
- Erhöht man die Sendewahrscheinlichkeit weiter, dann sinkt der Nutzdurchsatz bei steigender Übermittlungsverzögerung durch die stark ansteigende Kollisionswahrscheinlichkeit für Reservierungsanforderungen.

- Bei noch weiter erhöhter Sendewahrscheinlichkeit erhält man bei manchen Zugriffsverfahren einen Halteeffekt, bei dem eine Station den Kanal fortlaufend wahlfrei nutzen kann, während alle anderen Stationen an einer Kollisionsauflösung beteiligt sind und deshalb keine neuen Pakete generieren dürfen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Arbeit sind Leistungsuntersuchungen bei Einsatz der Zugriffsverfahren für den Erstzugriff in Mobilfunksatellitensystemen. Erstzugriffe entstehen immer dann, wenn (noch) keine Verbindung zwischen der Bodenstation und dem Satellitensystem aufgebaut ist. Sie müssen über einen speziellen Signalisierkanal übertragen werden. Für Mobilfunksatellitensysteme werden LEO- bzw. ICO-Satelliten verwendet, die nicht synchron zur Erde umlaufen. Durch die Bewegung der Satelliten relativ zur Erdoberfläche ändert sich ständig die Anzahl der Teilnehmer, für die ein Satellit ‚zuständig‘ ist. Gleichzeitig ändert sich die Aktivität der Teilnehmer in Abhängigkeit von der Tageszeit. Abhängig von der Tageszeit werden Szenarios, die Erstzugriffssignalisiermeldungen erzeugen (Verbindungsaufbau, An- und Abmeldung, Ortswechsel), mit unterschiedlicher Rate abgearbeitet.

Da eine mathematische Analyse eines solch komplexen Systems nicht möglich ist, wurde eine zweistufige Simulation entwickelt. Das Benutzerverhalten wurde in ein sehr einfaches und gleichzeitig flexibles Quellmodell abgebildet. Durch eine Simulation der dynamischen Geometrie des Gesamtsystems wurde die zeitabhängige Rate von Erstzugriffssignalisiermeldungen sowohl aus der Sicht jedes Satelliten als auch aus der Sicht eines Teilnehmers bestimmt. Durch eine anschließende ereignisgesteuerte Simulation wurde die Leistungsfähigkeit des jeweils verwendeten Zugriffsverfahrens bestimmt. Von besonderer Wichtigkeit sind hierbei die gemessenen Verteilungen der Übermittlungszeit der Erstzugriffssignalisiermeldungen, die zur Dimensionierung des Signalisierkanals bzw. zur Bestimmung der Qualität des erbrachten Dienstes aus der Sicht eines Teilnehmers dienen können. Alle untersuchten Zugriffsverfahren wurden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und des benötigten Mehraufwands durch zusätzliche Schutzzeiten und Minizeitschlitze verglichen. Bei einer der vorgeschlagenen Verbesserungen dürfen neu generierte Pakete nur dann übertragen werden, wenn im selben Zeitschlitz *keine* Kollisionsauflösung stattfindet. Dadurch läßt sich das 99%-Quantil der Übermittlungszeit signifikant verringern. Schließlich wurden einfache Regeln hergeleitet, mit deren Hilfe das optimale Zugriffsverfahren, unter Berücksichtigung des für die kombinierten Verfahren notwendigen Bandbreitenmehraufwandes, bestimmt werden kann.

6.2 Ausblick

Die Mobilkommunikation spielt in der aktuellen Telekommunikation eine wichtige Rolle und wird in Zukunft sicher noch an Bedeutung hinzugewinnen. Durch Integration verschiedener Netzzugangsprotokolle in einem mobilen Endgerät kann die Attraktivität noch weiter gesteigert werden, da eine größere Auswahl an empfangbaren Basisstationen zur Verfügung steht.

Eine optimale, weltweite Versorgung können allerdings nur die zukünftigen LEO- bzw. ICO-Satellitensysteme bieten, deren Dienste für den Benutzer sicher etwas teurer sein werden.

Hat der Benutzer mobiler Dienste die Wahl zwischen mehreren Diensteanbietern, wird seine Entscheidung u.a. von den zu erwartenden Kosten für eine Verbindung beeinflusst. Sind in einem zukünftigen UMTS mobile terrestrische *und* Satellitendienste mit einem universellen mobilen Endgerät erreichbar, wird die Entscheidung, welcher Dienst in Anspruch genommen wird, vom Endgerät getroffen. Hierbei können neben den Kosten auch noch weitere Faktoren, wie z.B. die zu erwartende Qualität der aufzubauenden Verbindung in die Entscheidung einbezogen werden.

Eine zukünftige Integration der mobilen Systeme beeinflusst die Abschätzung des zu erwartenden orts- und zeitabhängigen Rufangebotes an ein Mobilfunksatellitensystem und damit die in Kapitel 5 dargestellte simulative Leistungsuntersuchung eines LEO- bzw. ICO-Systems. Das in Abschnitt 5.2.3 beschriebene transiente Quellverhalten muß in diesem Fall durch eine, von der geographischen Dichte der Basisstationen der terrestrischen Mobilfunksysteme abhängige Systembenutzungswahrscheinlichkeit erweitert werden. Mit Hilfe dieser Wahrscheinlichkeit läßt sich, in Abhängigkeit von dem Ort, an dem ein Ruf generiert wird, bestimmen, ob das Satellitensystem oder ein terrestrisches System in Anspruch genommen wird. Diese Erweiterung des Simulationsprogrammes hat allerdings nur bei LEO-Systemen mit einer großen Anzahl von Satelliten, die jeweils nur ein relativ kleines Gebiet versorgen, signifikante Auswirkungen.

Ein weiterer Aspekt, der in Zukunft auch für Mobilfunksysteme an Bedeutung gewinnen wird, ist die Dienstintegration. In Satellitensystemen werden zunächst durchschaltevermittelte Kanäle mit fester Bandbreite angeboten. Diese Vermittlungsart ist besonders für die Sprachübertragung aber auch für die Übertragung großer Dateien geeignet, bei der die notwendige Verbindungsauf- und -abbauphase gegenüber der langen Datenübertragungsphase vernachlässigt werden kann. Für die Übertragung kurzer Meldungen ist die Durchschaltevermittlung allerdings weniger geeignet. Hierfür wird vorteilhaft ein spezieller PS-Kanal implementiert, für den die in Kapitel 4 analysierten Zugriffsverfahren für den Signalisierkanal eingesetzt werden können. Auch der Signalisierkanal selbst für kann für die Übertragung von kurzen Meldungen herangezogen werden, muß aber in diesem Fall für die zusätzliche Belastung ausreichend dimensioniert sein.

Anhang

A1 Analyse der $D^{[x]}/D/1$ -Warteschlange

Die globale verteilte Warteschlange der in Kapitel 4 beschriebenen Protokolle lässt sich durch eine $D^{[x]}/D/1$ -Warteschlange beschreiben (siehe [41] und [48]). In jedem Takt (d.h. in jedem Zeitschlitz) kommen gleichzeitig r neue Anforderungen an. Die Anzahl r kann beliebig verteilt sein. Bild A1-1 zeigt den zeitlichen Ablauf der Ankünfte und Abgänge der Reservierungsanforderungen in der Anforderungswarteschlange.

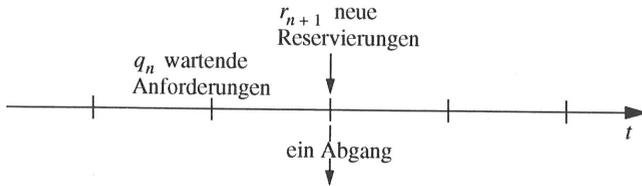


Bild A1-1: Zeitlicher Ablauf der Ankünfte und Abgänge der Reservierungsanforderungen in der Anforderungswarteschlange

Es ergibt sich folgende Zustandsgleichung:

$$q_{n+1} = q_n + r_{n+1} - \Delta(q_n + r_{n+1}) \quad (138)$$

mit

$$\Delta(q_n + r_{n+1}) = \begin{cases} 0 & \text{für } q_n + r_{n+1} = 0 \\ 1 & \text{für } q_n + r_{n+1} \geq 1 \end{cases} \quad (139)$$

Die erzeugende Funktion der Anzahl wartender Anforderungen lässt sich wie im folgenden gezeigt berechnen:

$$\begin{aligned} E[z^{q_{n+1}}] &= E[z^{q_n + r_{n+1} - \Delta(q_n + r_{n+1})}] = \sum_{k=0}^{\infty} P\{q_n + r_{n+1} = k\} \cdot z^{k - \Delta(k)} \\ &= P\{q_n + r_{n+1} = 0\} + \sum_{k=1}^{\infty} P\{q_n + r_{n+1} = k\} \cdot z^{k-1} \\ &= P\{q_n + r_{n+1} = 0\} + \frac{1}{z} \sum_{k=0}^{\infty} P\{q_n + r_{n+1} = k\} \cdot z^k - \frac{1}{z} \cdot P\{q_n + r_{n+1} = 0\} \end{aligned} \quad (140)$$

Dabei ist

$$\begin{aligned}
 P\{q_n + r_{n+1} = 0\} &= P\{q_n = 0\} \cdot P\{r_{n+1} = 0\} = P\{q = 0\} \cdot P\{r = 0\} \\
 &= P\{\text{Warteschlange ist leer} \wedge \text{keine Ankunft}\} \\
 &= P\{\text{Kanal ist nicht reserviert}\} = 1 - E[R]
 \end{aligned}
 \tag{141}$$

$E[R]$ ist die mittlere Anzahl erfolgreicher Reservierungen pro Zeitschlitz. Die noch verbleibende Summe kann folgendermaßen vereinfacht werden.

$$\sum_{k=0}^{\infty} P\{q_n + r_{n+1} = k\} \cdot z^k = E[z^{q_n + r_{n+1}}] = E[z^{q_n}] \cdot E[z^{r_{n+1}}] = Q(z) \cdot R(z)
 \tag{142}$$

Durch Einsetzen und Auflösen erhält man

$$Q(z) = \frac{(1 - E[R]) \cdot (1 - z)}{R(z) - z}
 \tag{143}$$

Der Erwartungswert der Anzahl wartender Anforderungen in der Warteschlange $E[Q]$ ist:

$$E[Q] = \left. \frac{dQ(z)}{dz} \right|_{z=1}
 \tag{144}$$

Bei der Berechnung von Gl. 144 muß man die zweite Ableitung von $R(z)$ berechnen. $R(z)$ ist die erzeugende Funktion der Anzahl der pro Zeitschlitz eintreffenden Reservierungsanforderungen. Allgemein gilt:

$$\left. \frac{d^2 R(z)}{dz^2} \right|_{z=1} = E[R^2] - E[R]
 \tag{145}$$

Mit dem Gesetz von Little erhält man aus Gl. 144 die mittlere Wartezeit in der Anforderungswarteschlange:

$$\frac{E[w_q]}{t_{Slot}} = \frac{E[R^2] - E[R]}{2E[R](1 - E[R])}
 \tag{146}$$

A2 Die hypergeometrische Verteilungsfunktion

Zur Analyse des Zugriffs von Reservierungsanforderungen auf den Reservierungskanal wird die hypergeometrische Verteilungsfunktion $B(x, y, N)$ benötigt (siehe z.B. [27]). Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß bei einer zufälligen und unabhängigen Verteilung von y Gegenständen auf N Zellen genau x Zellen genau einen Gegenstand enthalten. Die Verteilungsfunktion läßt sich entweder geschlossen oder rekursiv angeben. Die geschlossene Lösung lautet (siehe [27]):

$$B(x, y, N) = \frac{(-1)^x \cdot N! \cdot y!}{x! \cdot N^y} \sum_{i=x}^{\min(N, y)} \frac{(-1)^i \cdot (N-i)^{y-i}}{(i-x)! \cdot (N-i)! \cdot (y-i)!} \quad (147)$$

Die geschlossene Lösung ist numerisch allerdings sehr kritisch, da bei der Berechnung für größere N sehr große Zwischenergebnisse entstehen können. Für die Berechnung von $B(x, y, N)$ durch einen Computer eignet sich besser eine rekursive Lösung (siehe [59]). Dabei wird zunächst die Anzahl $\eta(x, y, N)$ aller Kombinationen, bei denen genau x der insgesamt N Zellen genau einen Gegenstand enthalten, berechnet:

$$\eta(x, y, N) = \binom{N}{x} \cdot \binom{y}{x} \cdot x! \cdot (N-x)^{y-x} - \sum_{i=1}^{r(y)-x} \binom{x+i}{i} \cdot \eta(x+i, y, N) \quad (148)$$

Der erste Summand auf der rechten Seite von Gl. (148) entspricht der Anzahl von Kombinationen, bei denen sich mindestens x der y Gegenstände einzeln in einer Zelle befinden. Der zweite Summand ist die Summe aller Kombinationen, bei denen sich mehr als x Gegenstände einzeln in einer Zelle befinden. Dabei ist $r(y)$ die maximal mögliche Anzahl von durch einzelne Gegenstände belegten Zellen in Abhängigkeit von y :

$$r(y) = \begin{cases} y & \text{für } y \leq N \\ N-1 & \text{für } y > N \end{cases} \quad (149)$$

Durch Division mit der Anzahl aller möglichen Kombinationen von y Gegenständen in N Zellen erhält man die hypergeometrische Verteilungsfunktion $B(x, y, N)$:

$$B(x, y, N) = \frac{\eta(x, y, N)}{N^y} \quad (150)$$

kA = Artikel enthält keine Angaben

1. Protokoll ist auch ungetaktet realisierbar
2. Erstzugriff nur auf Kanal 1 erlaubt
3. Protokoll funktioniert auch ohne Rahmen, ist aber unter Verwendung eines Rahmens definiert
4. Es werden keine räumlich getrennten Links verwendet
5. Das Protokoll setzt die Kenntnis der Anzahl aller in eine Kollisionsauflösung verwickelten Stationen voraus
6. TCR geht bei hoher Auslastung in TDMA aller aktiven Stationen über
7. Es ist keine Kollisionsauflösung vorgesehen
8. Vor Sendebeginn wird ein terrestrischer Belegton-Kanal abgehört
9. Alle Stationen einer Gruppe müssen über einen terrestrischen Funkkanal miteinander kommunizieren können
10. Gesicherte Datenübertragung durch Acknowledgements auf dem Rückkanal
11. Die Wiederholwahrscheinlichkeit wird gesteuert
12. Es wird eine Wiederholwahrscheinlichkeit verwendet
13. Synchronisation auf Symbolebene
14. Im Artikel wird von binärem Feedback (idle, collision) gesprochen
15. Beides ist möglich
16. HCB-TDMA ist ein kombiniertes Zugriffsprotokoll mit voneinander unabhängigen wahlfreien und reservierten Protokollteilen (siehe Kapitel 2.8.3)
17. Hybrides Protokoll: zwei getrennte Protokollteile für Reservierungs- und wahlfreien Modus
18. Kollidierte Pakete werden im Reservierungsmodus wiederholt
19. Piggybacking ist möglich
20. Empfangsstation sendet Acknowledgement im Reservierungsslot
21. Kein spezieller Reservierungskanal
22. Kollision wird durch Timer festgestellt
23. Bei MSAP ist nur das terrestrische Zusammenfassen von Quellen in wenigen Bodenstationen beschrieben
24. Beide Reservierungsarten sind möglich
25. Freie PS-Zeitslitze können auch wahlfrei belegt werden

Literatur

- [1] F.A. AAGSEN: A Traffic Study on the Satellite Channel Access Algorithm CPODA. *Proceedings of the Ninth International Teletraffic Congress*, Torremolinos, Spanien, Oktober 1979.
- [2] NORMAN ABRAMSON: Packet Switching with Satellites. *AFIPS Conference Proceedings*, Vol. 42, National Computer Conference, S. 695-702, New York, New York, Juni 1973.
- [3] NORMAN ABRAMSON: The Throughput of Packet Broadcast Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-25, No. 1, S. 117-128, Januar 1977.
- [4] NORMAN ABRAMSON: VSAT Data Networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 78, No. 7, S. 1267-1274, Juli 1990.
- [5] NORMAN ABRAMSON: Fundamentals of Packet Multiple Access for Satellite Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 309-316, Februar 1992.
- [6] MICHELE AICARDI, GUISEPPE CASALINO, FRANCO DAVOLI: Independent Stations Algorithm for the Maximization of One-Step Throughput in a Multiaccess Channel. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 8, S. 795-800, August 1987.
- [7] FULVIO ANANASSO, FRANCESCO DELLI PRISCOLI: The Role of Satellites in Personal Communication Services. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, No. 2, S. 180-196, Februar 1995.
- [8] M. ANNONI, G. GAROFALO: Access and Synchronization Schemes in the ESA OBP System. *Proceedings of the Globecom '91*, Session 7, Paper 7, S. 206-211, Phoenix, Arizona, Dezember 1991.
- [9] TAKEMI ARITA, SHIGEFUSA SUZUKI, FUKUYA ISHINO: A High Speed Digital Satellite Switching Network without Random Access Memory. *Proceedings of the Eleventh International Switching Symposium*, Session 41 c, Paper 4, Florenz, Italien, Mai 1984.
- [10] ANDREA BAIOCCHI, MARCO CAROSI, MARCO LISTANTI, ALDO ROVERI: Modeling of a Distributed Access Protocol for an ATM Satellite System: An Algorithmic Approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 9, No. 1, S. 65-75, Januar 1991.
- [11] GIULIANO BENELLI, ENRICO DEL RE, ROMANO FANTACCI, FRANCESCO MANDELLI: Performance of Uplink Random-Access and Downlink TDMA Techniques for Packet Satellite Networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, No. 11, S. 1583-1593, November 1984.
- [12] IGNACIO BERBERANA, CARLOS L. SANGIL: Performance Analysis of a Multiple-Access Protocol for VSAT Networks. *Proceedings of the 13th International Teletraffic Congress*, S. 653-657, Kopenhagen, Dänemark, Juni 1991.

- [13] ALAN A. BERTOSSI, GIANCARLO BONGIOVANNI, MAURIZIO A. BONUCCELLI: Time Slot Assignment in SS/TDMA Systems with Intersatellite Links. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 6, S. 602-608, Juni 1987.
- [14] SANJAY K. BOSE, J.J. GORDON: A Mobile Communication System Providing Integrated Voice/Data Services over Power Limited Satellite Channels. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 5, Session 21, S. 760-764, Dallas, Texas, November 1989.
- [15] ALAN L. MCBRIDE: Application of Renewal Theory to Unslotted ALOHA in VSAT Networks. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 36, No. 5, S. 617-621, Mai 1988.
- [16] DOUGLAS W. BROWNING, JOHN B. THOMAS: Optimal Coding Schemes for Conflict-Free Channel Access. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37, No. 10, S. 1004-1013, Oktober 1989.
- [17] MILENA BUTTO, GIOVANNI COLOMBO, CARLO SCARATI: Performance Evaluation of DA/SS-TDMA Satellite Systems with Wide Band Traffics. *Tenth International Teletraffic Congress*, Montreal, Kanada, Session 4.3A, Paper #6, 1983.
- [18] NEDO CELANDRONI, ERINA FERRO: The FODA-TDMA Satellite Access Scheme: Presentation, Study of the System, and Results. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 12, S. 1823-1831, Dezember 1991.
- [19] JIN-FU CHANG: A Multibeam Packet Satellite using Random Access Techniques. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-31, No. 10, S. 1143-1154, Oktober 1983.
- [20] JIN-FU CHANG: A Random Access Packet Satellite with Buffer and Arbitrary Transition Overhead. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-33, No. 8, S. 878-880, August 1985.
- [21] IMRICH CHLAMTAC, ORA GANZ: Performance of Multibeam Packet Satellite Systems with Conflict Free Scheduling. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-34, No. 10, S. 1016-1023, Oktober 1986.
- [22] ROBERT J. DIERSING, JEFFREY W. WARD: Packet Radio in the Amateur Satellite Service. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 7, No. 2, S. 226-234, Februar 1989.
- [23] REUBEN E. EAVES: ALOHA/TDM System with Multiple Downlink Capacity. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-27, No. 3, S. 537-541, März 1979.
- [24] PANOS ECONOMOPOULOS, MART L. MOLLE: On the Performance of Slotted ALOHA in a Spread Spectrum Environment. *Tagungsband der Sigcomm '84*, S. 234-241, Montreal, Kanada, Juni 1984.
- [25] AHMED K. ELHAKHEEM, STEPHAN BOHM, MOHAMED HACHICHA, THO LE-NGOC, H. T. MOUFTAH: Analysis of a New Multiaccess/Switching Technique for Multibeam Satellites in a Prioritized ISDN Environment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 378-390, Februar 1992.

- [26] P.J. EMSTAD: Models of Demand Access of Satellite Communication Channels. *Tenth International Teletraffic Congress*, Montreal, Kanada, Session 3.1, Paper #4, 1983.
- [27] W. FELLER: An Introduction to Probability Theory and its Applications. *Wiley Verlag*, Volume 1, 2. Auflage, S. 103, New York, 1957.
- [28] AURA GANZ, YAO GAO: SS/TDMA Scheduling for Satellite Clusters. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 40, No. 3, S. 597-603, März 1992.
- [29] EDWARD P. GREENE, ANTHONY EPHEMIDES: Distributed Reservation Control Protocols for Random Access Broadcasting Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-29, No.5, S. 726-735, Mai 1981.
- [30] TRI T. HA: Personal Computer Communications via VSAT Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 7, No. 2, S. 235-245, Februar 1989.
- [31] JIAN-CHENG HUANG, TOBY BERGER: Delay Analysis of 0.487 Contention Resolution Algorithms. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-34, No. 9, S. 916-926, September 1986.
- [32] WILLIAM D. IVANCIC, MARY J. SCHALKHAUSER, JORGE A. QUINTANA: A Network Architecture for a Geostationary Communication Satellite. *IEEE Communications Magazine*, S. 72-84, Juli 1994.
- [33] BIJAN JABBARI, DAVID MCDYSAN: Performance of Demand Assignment TDMA and Multicarrier TDMA Satellite Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No.2, S. 478-486, Februar 1992.
- [34] BIJAN JABBARI, GÉRALD MARAL: Response-Time Evaluation of Transaction-Oriented Applications in VSAT Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No.6, S. 1048-1053, August 1992.
- [35] PHILIPPE JACQUET, PAUL MÜHLETHALER: MACHNET: A Simple Access Protocol for High Speed or Long Haul Communications. *Proceedings of the SIGCOMM '90*, S. 90-100, Philadelphia, Pennsylvania, September 1990.
- [36] MASOUD AGHADAVOODI JOLFAEI: Onboard-Processing-Satelliten: Probleme und Lösungsansätze. 7. *Kolloquium im DFG-Schwerpunktprogramm 'Grundlagen digitaler Kommunikationssysteme'*, Vortrag am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung der Universität Stuttgart, Juni 1992.
- [37] KURIACOSE JOSEPH, DIPANKAR RAYCHAUDHURI: Simulation Models for Performance Evaluation of Satellite Multiple Access Protocols. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 6, No.1, S. 210-222, Januar 1988.
- [38] SHERIN S. KAMAL, SAMY A. MAHMOUD: A Study of Users' Buffer Variations in Random Access Satellite Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-27, No. 6, S. 857-868, Juni 1979.

- [39] FRANK C. KAMINSKY, DAVID L. RUMPF: Simulating Nonstationary Poisson Processes: a Comparison of Alternatives Including the Correct Approach. *SCS Simulation, Technical Journal of the Society for Computer Simulation*, Vol. 29, No. 1, S. 17-20, Juli 1977.
- [40] JAIDEV KANIYIL, JUN TAKEI, SHIGERU SHIMAMOTO, YOSHIKUNI ONOZATO, TOMONORI USUI, IKUO OKA, TSUTOMU KAWABATA: A Global Message Network Employing Low Earth-Orbiting Satellites. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 418-427, Februar 1992.
- [41] MARK J. KAROL, MICHAEL G. HLUCHYI, SAMUEL P. MORGAN: Input Versus Output Queuing on a Space-Division Packet Switch. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 12, S. 1347-1356, Dezember 1987.
- [42] L. A. KEYES: Flexible Power and Bandwidth Allocation in Mobile Satellites. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 3, Session 21, S. 750-753, Dallas, Texas, November 1989.
- [43] J.A. KILPATRICK, B.E. WHITE: Proposed Integrated Voice and Data Protocol for a U.S. Mobile Satellite System. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Paper 41.2.1, S. 1439-1444, Seattle, Juni 1987.
- [44] SANG WU KIM: Frequency-Hopped Spread-Spectrum Random Access with Retransmission Cutoff and Code Rate Adjustment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 344-349, Februar 1992.
- [45] SEYOUNG KIM, JOHN J. METZNER: Performance Improvement of Frequency Hopping-CDMA System Utilizing Memorized Prior Data. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 4, S. 496-502, April 1991.
- [46] LEONARD KLEINROCK, SIMON S. LAM: Packet-Switching in a Slotted Satellite Channel. *AFIPS conference proceedings*, Vol. 42, National Computer Conference, S. 703-710, New York, Juni 1973.
- [47] LEONARD KLEINROCK, SIMON S. LAM: Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-23, No. 4, S. 410-423, April 1975.
- [48] LEONARD KLEINROCK: Queueing Systems Volume 1: Theory. *John Wiley & Sons*, New York, 1975.
- [49] LEONARD KLEINROCK: On a New Class of Queuing Models for Distributed Environments. *Proceedings of the Ninth International Teletraffic Congress*, Torremolinos, Spanien, Oktober 1979.
- [50] KING-TIM KO, BRUCE R. DAVIS: Space Division Multiple Access Protocols for a Satellite Switched Spotbeam Communication Network. *Tagungsband der IEEE International Conference on Communications*, ICC '84, S. 603-607, Amsterdam, Mai 1984.
- [51] HISASHI KOBAYASHI, YOSHIKUNI ONOZATO, DIEU HUYNH: An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-25, No. 1, S. 148-157, Januar 1977.

- [52] RYUJI KOHNO, REUVEN MEIDAN, LAURENCE B. MILSTEIN: Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications. *IEEE Communications Magazine*, S. 58-67, Januar 1995.
- [53] ERWIN KREYSZIG: Statistische Methoden und ihre Anwendung. *Vandenhoeck & Ruprecht*, 7. Auflage, Göttingen, 1979.
- [54] DIETER KÜHNER: Vom Himmel hoch: Mehrwertdienste über Satelliten sollen terrestrische bald ablösen. *Computer Zeitung*, Nr. 22, Juni 1995.
- [55] ALEX W. LAM, DILIP V. SARWATE: Time-Hopping and Frequency-Hopping Multiple-Access Packet Communications. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 6, S. 875-888, Juni 1990.
- [56] SIMON S. LAM: Dynamic Control Schemes for a Packet Switched Multi-Access Broadcast Channel. *AFIPS Conference Proceedings*, Vol. 44, National Computer Conference, S. 143-153, Anaheim, California, Mai 1975.
- [57] SIMON S. LAM: Packet Broadcast Networks - a Performance Analysis of the R-ALOHA Protocol. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 7, S.596-603, Juli 1980.
- [58] SHAUL LAUFER, JAKOV SNYDERS: Feedforward Multiple Access Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 6, S. 1003-1011, August 1992.
- [59] HYONG W. LEE, JON W. MARK: Combined Random/Reservation Access for Packet Switched Transmission Over a Satellite with On-Board Processing: Part I - Global Beam Satellite. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-31, No. 10, S. 1161-1171, Oktober 1983.
- [60] HYONG W. LEE, JON W. MARK: Combined Random/Reservation Access for Packet-Switched Transmission Over a Satellite with On-Board Processing - Part II: Multibeam Satellite. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-32, No. 10, S. 1093-1104, Oktober 1984.
- [61] VICTOR C.M. LEUNG: Multichannel Access Protocol for Satellite Mobile Data Services. *Proceedings of the 40th IEEE Vehicular Technology Conference*, S. 714-719, Orlando, Florida, May 1990.
- [62] JONG-TAE LIM, SEMYON M. MEERKOV: Theory of Markovian Access to Collision Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 12, S. 1278-1288, Dezember 1987.
- [63] JONG-TAE LIM, SEMYON M. MEERKOV: Performance of Markovian Access Protocols in Satellite Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 3, S. 273-276, März 1990.
- [64] ADAM LIVNE: An Efficient Multiple Access Protocol for Integrated Small Earth Stations Network. *Proceedings of the Eighth International Congress on Computer Communication*, S. 708-711, München, September 1986.

- [65] MAN-KEUNG LO, TAK-SHING P. YUM: The Tone Sense Multiaccess Protocol with Partial Collision Detection (TSMA/PCD) for Packet Satellite Communications. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 41, No. 6, S. 820-824, Juni 1993.
- [66] CHUN LOO: Digital Transmission through a Land Mobile Satellite Channel. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 5, S. 693-697, Mai 1990.
- [67] DIMITRIOS MAKRAKIS, SANDARA MURTHY: Spread Slotted ALOHA Techniques for Mobile and Personal Satellite Communication Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 6, S. 985-1002, August 1992.
- [68] G. MARAL, M. BOUSQUET: Satellite Communications Systems, Second Edition, Systems, Techniques and Technologies. *B.G. Teubner*, Stuttgart, 1993.
- [69] NADER MEHRAVARI: TDMA in a Random-Access Environment: An Overview. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 22, No. 11, S. 54-59, November 1984.
- [70] HISASHI MINE, KATSUHIKA OHNO, TADAYOSHI SHIOYAMA: Delay Analysis of Packet Switching System with a Satellite Having Processing Capability. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-32, No. 5, S. 642-644, Mai 1984.
- [71] K. MITTAL, A. N. VENETSANOPOULOS: A Note on Optimal Control Policy for an ALOHA Access Scheme. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 2, 197-199, Februar 1991.
- [72] TAKESHI MIZUIKE, YASUHIKO ITO, DAVID J. KENNEDY, LAN N. NGUYEN: Burst Scheduling Algorithms for SS/TDMA Systems. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No.4, S. 533-539, April 1991.
- [73] JEANNINE MOSELY, PIERRE A. HUMBLET: A Class of Efficient Contention Resolution Algorithms for Multiple Access Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-33, No. 2, S. 145-151, Februar 1985.
- [74] STEPHEN F.W. NG, JON W. MARK: A Multiaccess Model for Packet Switching with a Satellite Having some Processing Capability. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM -25, No. 1, S 128-135, Januar 1977.
- [75] YUJUI OIE, TATSUYA SUDA, HIDEO MIYAHARA, TOSHIHARU HASEGAWA: Throughput and Delay Analysis of Free Access Tree Algorithms with Mini-Slots, *Proceedings of the Infocom 1987*, S. 258-267, San Franzisco, Kalifornien, 1987.
- [76] YUJY OIE, TATSUYA SUDA, HIDEO MIYAHARA, TOSHIHARU HASEGAWA: Throughput Analysis of Free Access Tree Algorithm with Minislots. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No.2, S. 137-141, Februar 1990.
- [77] LARRY C. PALMER, LAWRENCE W. WHITE: Demand Assignment in the ACTS LBR System. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 5, S. 684-692, Mai 1990.

- [78] BERND-PETER PARIS, BEHNAAM AAZHANG: Near-Optimum Control of Multiple-Access Collision Channels. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 40, No. 8, S. 1298-1309, August 1992.
- [79] DAVID W. PETR, K. M. S. MURTHY, VICTOR S. FROST, LYN A. NEIR: Modeling and Simulation of Resource Allocation Process in a Bandwidth-On-Demand Satellite Communications Network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 465-477, Februar 1992.
- [80] LAWRENCE C. POND, VICTOR O. K. LI: Throughput Analysis of CDMA Access Policies in Radio Determination Satellite Service. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 6, Session 17, S. 617-621, Dallas, Texas, November 1989.
- [81] I. E. POUNTOURAKIS, E. D. SYKAS: Analysis, Stability and Optimization of ALOHA-Type Protocols for Multichannel Networks. *Computer Communications*, Vol. 15, No. 10, S. 619-629, Dezember 1992.
- [82] CHRIS J. POWELL, VICTOR C. M. LEUNG: Demand Assignment Multiple Access and Dynamic Channel Allocation Strategies for Integrating Radio Dispatch and Telephone Services Over Mobile Satellite Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 6, S. 1020-1029, August 1992.
- [83] DIPANKAR RAYCHAUDHURI: ALOHA with Multipaket Messages and ARQ-Type Retransmission Protocols - Throughput Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-32, No. 2, S. 148-154, Februar 1984.
- [84] DIPANKAR RAYCHAUDHURI: Announced Retransmission Random Access Protocols. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-33, No. 11, S. 1183-1190, November 1985.
- [85] D. RAYCHAUDHURI: On the Stability of Announced Retransmission Random Access Systems. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-34, No. 1, S. 85-89, Januar 1986.
- [86] D. RAYCHAUDHURI: Stability, Throughput, and Delay of Asynchronous Selective Reject ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 7, S. 767-772, Juli 1987.
- [87] D. RAYCHAUDHURI, K. JOSEPH: Channel Access Protocols for Ku-Band VSAT Networks: A Comparative Evaluation. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 26, No. 5, S. 34-44, Mai 1988.
- [88] DIPANKAR RAYCHAUDHURI, JAMES HARMAN: Dynamic Performance of ALOHA-type VSAT Channels: A Simulation Study. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 2, S. 251-259, Februar 1990.
- [89] LAWRENCE G. ROBERTS: Dynamic Allocation of Satellite Capacity through Packet Reservation. *AFIPS Conference Proceedings*, Vol. 42, National Computer Conference, S. 711-716, New York, Juni 1973.

- [90] J.W. ROBERTS: Teletraffic Models for the TELECOM 1 Integrated Services Network. *Tenth International Teletraffic Congress*, Montreal, Kanada, Session 1.1, Paper #2, 1983.
- [91] RAPHAEL ROM, MOSHE SIDI: Multiple Access Protocols - Performance and Analysis. *Springer Verlag*, New York, 1990.
- [92] RICHARD ROY, MARTYN WARWICK: Journey into Space. *Communications International*, Volume 21, Number 2, S. 49-52, August 1994.
- [93] SHOHEI SATOH, SEN'ICHI TANABE, HIROYUKI MOCHIZAI: Traffic Characteristics of DAMA TASI/DSI System. *Proceedings of the Eleventh International Teletraffic Congress*, Paper 2.3 B-2, Kyoto, Japan, September 1985.
- [94] T. SCARCELLA, R.V. ABBOTT: Orbital Efficiency Through Satellite Digital Switching. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 21, Num. 3, S. 38-46, Mai 1983.
- [95] FRITS C. SCHOUTE: Optimal Delays for Retransmission in Multi-Access Communication Systems. *Proceedings of the Eleventh International Teletraffic Congress*, Paper 4.1A-2, Kyoto, Japan, September 1985.
- [96] M. HOSSEIN SHARIFI, MOHAMMED AROZULLAH: A Multiple Access Technique for Centralized Multiple Satellite Networking with On-Board Processing in the Central Node. *Proceedings of the Infocom '88*, Paper 3, Session 10B, S. 1012-1021, New Orleans, Louisiana, März 1988.
- [97] OTTO SPANIOL: Satellitenkommunikation. *Informatik-Spektrum*, Vol. 6, Nr. 3, S. 124-141, März 1983.
- [98] ‚STUDENT‘: The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, Nr. 6, S. 1-25, März 1908.
- [99] TATSUYA SUDA, HIDEO MYIAHARA, TOSHIHARU HASEGAWA: Optimal Bandwidth Assignment on Up- and Downlinks of Satellite with Buffer Capacity. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-28, No. 10, S. 1809-1818, Oktober 1980.
- [100] FUMIO TAKAHATA: An Optimum Traffic Loading to Intersatellite Links. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-5, No. 4, S. 662-675, Mai 1987.
- [101] SHUJI TASAKA, YUTAKA ISHIBASHI: A Reservation Protocol for Satellite Packet Communication - a Performance Analysis and Stability Considerations. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-32, No. 8, S. 920-927, August 1984.
- [102] SHUJI TASAKA: Multiple-Access Protocols for Satellite Packet Communication Networks: a Performance Comparison. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, No. 11, S. 1573-1582, November 1984.
- [103] SHUJI TASAKA, KENICHI ISHIDA: The SRUC Protocol for Satellite Packet Communication - a Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-34, No. 9, S. 937-945, September 1986.

- [104] SHUJI TASAKA: An Analysis of a Connection Oriented LLC Protocol in the TDMA-Reservation Satellite Network. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 6, Session 39, S. 1416-1422, Dallas, Texas, November 1989.
- [105] SHUJI TASAKA: Link-Level Connection Control Schemes in a High-Speed Satellite Data Network: a Performance Comparison. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 437-446, Februar 1992.
- [106] DON TOWSLEY, PEDRO ORLANDO VALES: Announced Arrival Random Access Protocols. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-35, No. 5, S. 513-521, Mai 1987.
- [107] PHUOC TRAN-GIA: Simulation of Instationary Processes for Performance Evaluations of Switching Systems. *Proceedings of the 1st European Simulation Congress*, Aachen, September 1983.
- [108] DUEI TSAI, JIN-FU CHANG: A Hybrid Contention-Based TDMA Technique for Data Transmission. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 36, No. 2, S. 225-228, Februar 1988.
- [109] ANDREW J. VITERBI: A Perspective on the Evolution of Multiple Access Satellite Communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10. No. 6, S. 980-984.
- [110] RENÉ J. VAN DER VLEUTEN, WIM C. VAN ETTEN, HENRICUS P.A. VAN DEN BOOM: Optimal Controlled ALOHA for Two-Way Data Communication in a Cable Television Network. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, No. 7, S. 2453-2458, Juli 1994.
- [111] RUSSELL L. VOISIN ET. AL.: Internationaler Atlas. *Kümmerly + Frey, Rand McNally, Westermann*, Stuttgart, 1987.
- [112] MUYA WACHIRA, DAN BOSSLER, BRIAN SKERRY: FDMA Implementation for Domestic Mobile Satellite Systems. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 4, Session 21, S. 754-759, Dallas, Texas, November 1989.
- [113] XIANGYI WANG, JAIDEV KANIYIL, YOSHIKUNI ONOZATO, JIN LIU, SHIGERU SHIMAMOTO, SHOICHI NOGUCHI: Performance Analysis of a Combined Random-Reservation Access Scheme. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 4, S. 478-481, April 1991.
- [114] A. GILLIAN WATERS, CHRISTOPHER J. ADAMS: The Satellite Transmission Protocol of the UNIVERSE Project. *Tagungsband der Sigcomm '84*, S. 18-24, Montreal, Kanada, Juni 1984.
- [115] MARKUS WERNER, AXEL JAHN, ERICH LUTZ, AXEL BÖTTCHER: Analysis of System Parameters for LEO/ICO-Satellite Communication Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, No. 2, S. 371-381, Februar 1995.

- [116] B. E. WHITE, S. L. KOTA: Two-Level Multiaccess Schemes for Packet Satellite Systems with Low Duty Factor Terminals. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-33, No. 8, S. 880-883, August 1985.
- [117] JEFFREY E. WIESELTHIER, ANTHONY EPHREMIDES, LARRY A. MICHAELS: An Exact Analysis and Performance Evaluation of Framed ALOHA with Capture. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37, No. 2, S. 125-137, Februar 1989.
- [118] JEFFREY E. WIESELTHIER, ANTHONY EPHREMIDES: Performance Analysis of Fixed- and Movable-Boundary Channel Access-Schemes for Integrated Voice/Data Wireless Networks. *Proceedings of the IEEE Infocom '93*, Session 10b, Paper 1, S. 1204-1213, San Francisco, März 1993.
- [119] ERIC W.M. WONG, TAK-SHING YUM: Delay Bounds for Packet Satellite Protocols. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 5, Session 39, S. 1409-1415, Dallas, Texas, November 1989.
- [120] ERIC W.M. WONG, TAK-SHING YUM: A Controlled Multiaccess Protocol for Packet Satellite Communication. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 39, No. 7, S. 1133-1140, Juli 1991.
- [121] KEVIN WONG, NICOLAS D. GEORGANAS: Strategies for Optimal Capacity Allocations in DAMA Satellite Communication Systems. *Ninth Data Communications Symposium*, Whistler Mountain, British Columbia, ACM Sigcomm Computer Communication Review, Vol. 15, No. 4, September 1985.
- [122] CHENG-SHONG WU, VICTOR O. K. LI: Random Access for a Multibeam Satellite with Dynamic Transponder Switching. *Proceedings of the Infocom '88*, Paper 4, Session 10B, S. 1022-1031, New Orleans, Louisiana, März 1988.
- [123] CHENG-SHONG WU, VIKTOR, O. K. LI: Random Access for a Multibeam Satellite with Dynamic Transponder Switching. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37, No. 6, S. 651-655, Juni 1989.
- [124] WILLIAM W. WU, EDWARD F. MILLER, WILBUR L. PRITCHARD, RAYMOND L. PICKHOLTZ: Mobile Satellite Communications. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 9, S. 1431-1448, September 1994.
- [125] MASAMI YABUSAKI, SHIGEFUSA SUZUKI: Approximate Performance Analysis and Simulation Study for Variable-Channel-Per-Burst SS-TDMA. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 38, No. 3, S. 318-326, März 1990.
- [126] TSUN-YEE YAN, VICTOR O. K. LI: Performance Analysis of an Adaptive Multiple Access Scheme for the Message Service of a Land Mobile Satellite Experiment (MSAT-X). *Tagungsband der IEEE International Conference on Communications*, ICC '84, S. 580-583, Amsterdam, Mai 1984.

- [127] TSUN-YEE YAN, VICTOR O. K. LI: A Reliable Pipeline Protocol for the Message Service of a Land Mobile Satellite Experiment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-5, No. 4, S. 637-647, Mai 1987.
- [128] T.-Y. YAN, C. WANG, U. CHENG, K. DESSOUKY, W. RAFFERTY: A FD/DAMA Network Architecture for the First Generation Land Mobile Satellite Services. *Proceedings of Globecom '89*, Paper 2, Session 21, S. 738-749, Dallas, Texas, November 1989.
- [129] OLIVER W. W. YANG, XIAO-XIONG YAO, K. M. S. MURTHY: Modeling and Performance Analysis of File Transfer in a Satellite Wide Area Network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 10, No. 2, S. 428-436, Februar 1992.
- [130] P.A. MOHD. YASEEN: Satellite Based Data Network. *International Conference on Computer Communication*, ICCC 90, Neu Delhi, Indien, 1990.
- [131] TAK-SHING P. YUM: The Design and Analysis of the Scheduled-Retransmission Multi-access Protocol for Packet Satellite Communications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Paper 8.7, S. 278-283, Seattle, Juni 1987.
- [132] TARIF ZEIN, GÉRARD MARAL, DOMINIQUE SERET, MARC TONDRIAUX: Satellite Access to the Broadband ISDN: A DAMA Approach. *Proceedings of the 2nd Joint Workshop on High Speed Networks*, S. 37-40, Stuttgart, September 1991.

