

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Technische Universität München

Verbindungsnachführung und verlustfreier Handover in ATM-Netzen mit mobilen Teilnehmern

Johann-Georg Vögel

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Hagenauer
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Eberspächer
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Bossert, Universität Ulm

Die Dissertation wurde am 29.6.2000 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
am 24.10.2000 angenommen.

So, wie ein Netz
aus einer Reihe von Knoten besteht,
so ist auch alles in der Welt
verknüpft.

Wenn jemand meint, die Maschen
eines Netzes seien ein Ding für sich,
so irrt er.

Gautama Siddhartha

480 v. Chr.

It's dangerous
to put limits on wireless.

Guglielmo Marconi

1932

Abstract

A broad range of research, development and standardization projects is currently underway in the public, industrial and university sectors in order to investigate broadband mobile multimedia systems with bitrates beyond 2 Mbit/s. The rapid technological progress of recent years makes wireless broadband systems offering unlimited mobility look feasible within a few years from now. At the same time, a number of factors offer a strong motivation and demanding application scenarios for broadband mobile multimedia. These factors are: convergence of formerly separate markets like telecommunication, media and information technology, the continuing deployment of the Internet and rising penetration of mobile communication.

Due to these trends, extension of the Asynchronous Transfer Mode ATM broadband switching technology to wireless access networks and mobile subscribers is a popular topic in international research and standardization. This, besides a broadband radio interface, necessitates development of new mobile switching technologies. Wireless ATM systems will be operating with very small radio cells with a diameter in the order of 50 m to 300 m, which will display very sharp shadowing corners due to the propagation conditions. This, on the one hand, results in high handover rates. On the other hand, it requires flexible handover protocols capable of adapting to the varying radio situations and quality requirements of the ATM traffic categories. Where necessary, a lossless handover has to be realized.

This important core area of mobile ATM switching technology – low latency rerouting and lossless handover – is the central topic of this thesis. It gives an introductory overview of ongoing and completed projects in the area of wireless ATM systems and summarizes their key results. Application scenarios are developed and described.

Mobile ATM rerouting methods are systematically categorized and discussed. A new, low latency, anchor-based rerouting method based on virtual paths resulting in economical resource usage is proposed. This Mobile VP-based network Architecture (MVPA) has the advantages of proactive rerouting based on tree structures regarding the fast switching of connections while at the same time avoiding a tree's disadvantages of high resource usage. The use of virtual paths enables a logical multiple mesh topology across physical anchor domains. The new concept of handover hysteresis is introduced and we show, how this can be used to reduce the number of cost-intensive inter-anchor handovers. This part concludes by comparing MVPA to other rerouting methods.

When not protecting the ATM cell stream during the switching of the partial path after rerouting, the high handover rates result in a high mean cell loss ratio. The necessity of lossless is shown through analysis of estimated cell loss ratio caused by unprotected handover. A new method for lossless handover based on periodic in-slot signalling is proposed and discussed (Tag Insertion Hitless Handover TIHH). This method is applicable for all types of handover (backward, forward, soft). It can be used either for lossless handover or for limiting cell loss in real-time handover. The different variants of the protocol are introduced and discussed with analytic models.

Kurzfassung

An drahtlosen Breitbandssystemen für mobile Multimediakommunikation mit Datenraten jenseits von 2 Mbit/s wird derzeit intensiv in verschiedenen öffentlichen, universitären und industriellen Projekten geforscht, entwickelt und standardisiert. Der enorme technologische Fortschritt der letzten Jahre läßt drahtlose Breitbandssysteme bei uneingeschränkter Mobilität in den nächsten Jahren machbar erscheinen. Gleichzeitig liefern die Konvergenz bisher getrennter Märkte wie Telekommunikation, Medien und IT, die fortschreitende Verbreitung des Internet und die zunehmende Durchdringung der Mobilfunkdienste eine starke Motivation und anspruchsvolle Nutzungsszenarien für breitbandige, mobile Multimediaanwendungen.

Die Erweiterung der Breitbandvermittlungstechnik Asynchroner Transfermodus ATM für drahtlose Zugangsnetze und mobile Teilnehmer ist wegen dieser Trends ein bestimmendes Thema der internationalen Forschung und Standardisierung. Neben einer breitbandigen Netzzugangsschnittstelle ist dafür die Entwicklung von mobilen Vermittlungstechniken notwendig. Drahtlose ATM-Systeme werden mit sehr kleinen Zellen (Größenordnung 50-300m) betrieben werden, die aufgrund der Ausbreitungsbedingungen sehr harte Abschattungskanten aufweisen können. Das hat zu hohen Handoverraten zur Folge. Daher sind effiziente Verfahren für die Verbindungsnachführung notwendig. Zum anderen müssen flexible Handoververfahren für die unterschiedlichen Funksituationen und Qualitätsanforderungen der ATM-Dienstkategorien angeboten und bei Bedarf ein verlustfreies Umschalten realisiert werden.

Mit diesem wichtigen Kernbereich der ATM-Mobilvermittlungstechnik, der latenzarmen Verbindungsnachführung und dem verlustfreien Handover, beschäftigt sich vorliegende Arbeit. Sie gibt zunächst einen Überblick über abgeschlossene und laufende Projekte im Bereich der drahtlosen ATM-Systeme und faßt deren wesentliche Ergebnisse zusammen. Applikationsszenarien werden entwickelt und vorgestellt.

Die Verfahren zur Verbindungsnachführung werden systematisch klassifiziert. Ein neues, latenzarmes Ankerverfahren mit vertretbarer Ressourcenökonomie basierend auf Virtuellen Pfaden wird vorgeschlagen. Diese Mobile VP-basierte Netzarchitektur (MVPA) bietet die Vorteile proaktiver Verfahren mit Baumstrukturen hinsichtlich des schnellen Umschaltens und vermeidet gleichzeitig deren Nachteile hinsichtlich des hohen Ressourcenaufwandes. Durch die Virtuellen Pfade wird außerdem die logische Mehrfach-Direktvermaschung über die Grenzen einer Ankerdomäne hinweg möglich. Das Konzept der Handoverhysterese wird in dieser Arbeit eingeführt und es wird gezeigt, wie damit die Zahl der kostenintensiven Handover zwischen physikalischen Ankerdomänen reduziert werden kann. Ein Vergleich der MVPA mit Verfahren anderer Kategorien wird vorgenommen.

Aufgrund der hohen Handoverraten ergibt sich eine hohe mittlere Zellverlusthäufigkeit bei ungeschütztem Umschalten der partiellen Pfade nach der Verbindungsnachführung. Die Notwendigkeit verlustfreier Handoververfahren wird anhand von Abschätzungen der Zellverlusthäufigkeit ungeschützter Handover begründet. Ein neues Verfahren für verlustfreien Handover basierend auf periodischen In-Slot-Signalen wird vorgeschlagen (Tag Insertion Hitless Handover TIHH). Dieses Verfahren ist für alle Handoverarten (Backward, Forward, Soft) geeignet. Es kann für verlustfreien Handover verwendet werden oder für verlustbegrenzten Echtzeit-Handover. Die verschiedenen Protokollvarianten werden vorgestellt und analytisch behandelt.

Dank und Anerkennung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter und Assistent am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze (LKN) der TU München in einem sehr anregenden und zugleich fordernden Umfeld, das wesentlich zu ihrem Gelingen beigetragen hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Eberspächer danke ich für die Gestaltung dieses Umfelds, für die konzentrierten Fachgespräche und die aufmerksame Betreuung dieser Arbeit sowie für die vielfältigen Möglichkeiten und Freiheiten, über mein Promotionsprojekt hinaus wissenschaftlich tätig zu sein.

Ich hatte die Freude, in meinen Forscherjahren am LKN mit einer großartigen Truppe von Kollegen zusammenzuarbeiten und wunderbare Freundschaften zu schließen. Ich danke allen für ein Arbeitsklima, das seinesgleichen sucht und für Erfahrungen, die mich mein gesamtes Leben begleiten werden. Für die nicht selbstverständliche Unterstützung während der Schlußphase meiner Arbeit danke ich Dipl.-Ing. Christian Bettstetter, Dipl.-Ing. Christian Hartmann, Dipl.-Ing. Peter Jocher und Dipl.-Ing. Wolfgang Kellerer.

Ein großes Dankeschön gilt auch allen Diplomanden, ohne deren Mithilfe diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bossert für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Hagenauer, der als Vorsitzender der Prüfungskommission gewirkt hat.

Besonders dankbar bin ich dafür, daß ich die Freude über die abgeschlossene Arbeit mit meiner Familie und insbesondere meiner Frau Birgit teilen kann, deren Rückhalt ich mir stets sicher sein konnte.

Lugano, im November 2000

Inhalt

Inhalt	I
1 Einleitung	1
1.1 Mobilfunknetze	1
1.1.1 Grundfunktionen eines Mobilfunknetzes	1
1.1.2 Historie	3
1.1.3 Zukünftige Entwicklung	5
1.2 Breitbandnetze	7
1.2.1 Hintergrund, Entwicklung und Technologie	7
1.2.2 Asynchroner Transfermodus ATM	9
1.2.3 Märkte und Bedeutung von Breitbandnetzen	12
1.3 Anforderungen an mobile Breitbandsysteme	14
1.4 Überblick dieser Arbeit	16
1.5 Beiträge dieser Arbeit	17
2 Mobile ATM Netzarchitektur	19
2.1 Mobile Breitbandsysteme	19
2.1.1 Anwendungsszenarien für mobile Breitbanddienste	19
2.1.2 Aktuelle Entwicklungen	20
2.2 Funksubsystem und Zonenkonzept	26
2.2.1 Funkschnittstelle	26
2.2.2 Funkkanalmodellierung	29
2.2.3 Funkkanalszenarios für die Protokollbeurteilung	33
2.2.4 Zonenkonzept	39
2.3 Netzsubsystem	40
2.3.1 Referenzszenario und Netzarchitektur	40
2.3.2 Mobilitätsunterstützende Netzfunktionen	42
2.3.3 Handoverprotokolle des Standardentwurfs für WATM CS 1	46
2.4 Handoververkehr	52
2.4.1 Analytisches Modell	52
2.4.2 Numerische Studie	56
3 Verbindungsnachführung in Mobile ATM Netzen	59
3.1 ATM Vermittlungsebenen und Wegesuche	59
3.1.1 Wegesuche in der ATM-Vermittlungsschicht	59
3.1.2 Virtuelle Pfade in ATM-Netzen	61
3.2 Anforderungen an Verfahren für die Verbindungsnachführung	62
3.3 Klassifizierung der Verfahren zur Verbindungsnachführung	64
3.3.1 Verbindungsnachführung in WATM-Netzen	64
3.3.2 Wegesuche und Umschaltpunkt	66
3.3.3 Grundtypen der Verbindungsnachführung beim Handover	70
3.3.4 Proaktive und Reaktive Verbindungsnachführung	77
3.3.5 Umschalten der Teilwege	79
3.3.6 Weitere Aspekte der Verbindungsnachführung	81
3.4 Ein neues Verfahren zur effizienten Verbindungsnachführung	82

3.4.1 VC-basierte und VP-basierte Verbindungsnachführung	83
3.4.2 Grundkonzept einer VP-basierten Netzarchitektur für WATM	84
3.4.3 Handoverhysterese in MVPA	87
3.4.4 Analyse des Hystereseverfahrens	89
3.4.5 Gesamtübersicht und Einsatzbereiche von MVPA	94
3.5 Andere Konzepte für die Verbindungsnachführung	97
3.5.1 Verbindungsnachführung mit Baumstrukturen	98
3.5.2 Dynamic Cross-Over Switch Discovery Rerouting	99
3.5.3 Nearest Common Node Rerouting	99
3.5.4 Verbindungsnachführung in WATM CS 1	99
3.6 Vergleich der Verfahren zur Verbindungsnachführung	100
3.6.1 Kriterien und Parameter zur Beurteilung von Reroutingverfahren	101
3.6.2 Gegenüberstellung der Verfahren zur Verbindungsnachführung	103
3.6.3 Beitrag der Reroutingverfahren zur Handoverlatenz	105
4 Verlustfreier Mobile ATM Handover	111
4.1 Umschalten, Synchronisieren, Zellverluste und Zellduplikationen	111
4.2 Abschätzung der Zellfehlerhäufigkeit bei nicht verlustfreiem Handover	117
4.2.1 Berechnung der Verletzbarkeitsperiode	117
4.2.2 Abschätzung der mittleren Zellverlusthäufigkeit	122
4.3 Verlustfreier Handover	125
4.3.1 In-Slot Signalisierung	126
4.3.2 Verlustfreier Handover mit VC-Flushing	128
4.3.3 Einschränkungen des VC-Flushing	131
4.3.4 Robustheitsaspekte des VC-Flushing	133
4.4 Ein neues Verfahren für verlustfreien Handover	134
4.4.1 Grundprinzip des Tag Insertion Hitless Handover TIHH	134
4.4.2 Puffermanagement, optimaler Tagabstand und maximaler Pufferbedarf	136
4.4.3 Bestmöglicher Backward Handover mit TIHH-BR	139
4.4.4 Erzwungener Backward Handover mit TIHH-BR	145
4.4.5 Forward Handover mit TIHH-BR	148
4.4.6 Robustheitsaspekte bei TIHH-BR	148
4.5 Synchronisieren von Dualcastströmen (TIHH-DC)	149
4.5.1 Latenzarmer verlustfreier Handover für Echtzeitdienste	149
4.5.2 Soft Handover	151
4.6 Definition der OAM-Signale und F5-Flüsse für TIHH	152
5 Zusammenfassung und Ausblick	155
Literatur	159
Anhang A: WATM-Kanalmodell	171

Abkürzungen

3G	Mobilfunksystem der dritten Generation, 3rd Generation Mobile System
4G	Mobilfunksystem der vierten Generation, 4th Generation Mobile System
ABR	Available Bit Rate
ACS	Area Communications Server
APCP	Access Point Control Protocol
ASP	Application Service Provisioning
ATM	Asynchroner Transfermodus
BRAN	Broadband Radio Access Network
CAC	Call Admission Control
CAP	Connection Anchor Point
CBR	Constant Bit Rate
CDV	Cell Delay Variation
CDVT	Cell Delay Variation Tolerance
CER	Cell Error Ratio
CLR	Cell Loss Ratio
CMR	Cell Misinsertion Rate
COS	Cross-Over Switch
CTD	Cell Transfer Delay
DAB	Digital Audio Broadcast
DVB	Digital Video Broadcast
DCOSDR	Dynamic Cross-Over Switch Discovery Rerouting
ERP	Enterprise Resource Planning
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDDSF	Field Direction Delay Spread Function
GFR	Guaranteed Frame Rate
GSM	Global System for Mobile Communication
HIPERLAN	High Performance Radio LAN
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LMCS	Local Multipoint Communication System
LMDS	Local Multipoint Distribution System
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non-Line-Of-Sight
MAS	Mobility supporting ATM Switch
MBS	Maximum Burst Size
MCR	Minimum Cell Rate
MFS	Maximum Frame Size
MP3	MPEG Layer 3
MPEG	Moving Pictures Expert Group
MVPA	Mobile VP-basierte Netzarchitektur
NCNR	Nearest Common Node Rerouting
nrt-VBR	Non-Real-Time VBR
OAM	Operation and Maintenance
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
OQPSK	Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying
PCR	Peak Cell Rate
PDDS	Power Delay-Direction Spectrum
PT	Payload Type
RAP	Radio Access Point
rt-VBR	Real-Time VBR
SCR	Sustainable Cell Rate
SECBR	Severely Errored Cell Block Ratio
SNR	Signal-Geräusch-Verhältnis, Signal-to-Noise-Ratio
TIHH	Tag Insertion Hitless Handover
TIHH-BR	Tag Insertion Hitless Handover with Buffer Retransmission
TIHH-DC	Tag Insertion Hitless Handover with Dualcasting

TIME	Telecommunication, Information, Media, Entertainment
TRX	Transceiving (Transmitting/Receiving) Unit
UBR	Unspecified Bit Rate
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UPC	Usage Parameter Control
URAN	UMTS Radio Access Network
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VBR	Variable Bit Rate
VCI	Virtual Connection Identifier
VCT	Virtual Connection Tree
VPC	Virtual Path Connection
VPI	Virtual Path Identifier
WAP	Wireless Application Protocol
WATM	Wireless ATM
xDSL	Digital Subscriber Line (x: Asymmetric/Symmetric/Very-High-Speed)

1 Einleitung

1.1 Mobilfunknetze

1.1.1 Grundfunktionen eines Mobilfunknetzes

Der Begriff Mobilfunknetz wird im allgemeinen synonym für die zellular organisierten Mobilfunknetze verwendet. Ein zellulares Mobilfunknetz ist ein "Netz zur drahtlosen Kommunikation, bei dem die im Anschlußbereich verwendeten Funkkanäle verschiedenen Funkzellen zugeordnet sind. Durch geeignete Gruppierung dieser Zellen (Clusterbildung) können die Funkkanäle störungsarm räumlich wiederverwendet werden. Je nach Ausgestaltung ist (insbesondere in überregionalen Zellulernetzen) ein freizügiger Ortswechsel im Netz mit automatischem Weiterreichen von Zelle zu Zelle (handover) und zwischen verschiedenen Mobilfunknetzen (roaming) möglich" [69].

Ein modernes Mobilfunknetz ist zunächst ein Kommunikationsnetz, das seinen Teilnehmern die Nutzung eines persönlichen, d.h. individuell abonnierten und konfigurierten Satzes von Diensten ermöglicht. Diese Dienste sollen dem Teilnehmer unabhängig von Ort und Zeit zur Verfügung stehen und werden ihm deshalb über sein persönliches Endgerät mit einer (drahtlosen) Funkschnittstelle zugänglich gemacht. Teilnehmer und Endgerät werden als separate, vom (festen) Netzanschluß gelöste Instanzen betrachtet. Die Grundfunktionen eines Mobilfunknetzes fallen in zwei Kategorien: Funkübertragung und Mobilvermittlung.

Die Funkübertragung realisiert den drahtlosen Teilnehmeranschluß und gehört somit in den Bereich der Netzzugangstechnologien. Durch den drahtlosen Netzzugang ist der Teilnehmer bei Einsatz eines entsprechenden Endgerätes mobil, d.h. der Punkt seines Netzzugangs kann sich ändern. Zur präziseren Unterscheidung sprechen wir im folgenden für den Bereich der drahtlosen Anschlußtechnik von der Gerätemobilität.

Verfahren der Mobilvermittlung sorgen dafür, daß Informationen im Netz den richtigen Weg nehmen und den Teilnehmer an seinem momentanen Netzzugangspunkt erreichen. Darüber hinaus werden mobilspezifische Dienste realisiert und Zusatzfunktionen wie Authentifizierung und Verschlüsselung erbracht. Einige Verfahren und Funktionen der Mobilvermittlung sind nicht auf den drahtlosen Netzzugang beschränkt und können an drahtgebundenen Anschlüssen mobilen Teilnehmern die Registrierung und den Zugang zu persönlichen Diensten erlauben. Für diesen Fall sprechen wir im folgenden von der Teilnehmermobilität oder der persönlichen Mobilität. Insbesondere der Satz von persönlichen und personalisierten Dien-

sten, der unabhängig von Zeit, Ort und Zugangstechnologie in der gewünschten Qualität zur Verfügung stehen soll, ist momentan einer der treibenden Faktoren für die Entwicklung neuer Technologien. Dies beinhaltet sowohl Technologien zur flexiblen Unterstützung personalisierter und betreiberspezifischer Dienste bei gleichzeitiger internationaler, betreiberübergreifender Mobilität als auch Technologien für die hochbitratige Daten-, Sprach- und Videoübertragung.

Die von einem Mobilfunknetz zu erbringenden Grundfunktionen bleiben davon allerdings unberührt. Es handelt sich um die fünf Bereiche Lokalisierung, Roaming, Sicherheit, Wegesuche und Handover.

Die Teilnehmer eines Mobilfunknetzes sind mobil und wechseln häufig ihren Standort. Damit Rufe und Datenpakete den Teilnehmer erreichen können, muß dessen Aufenthaltsort bekannt sein. Für die **Lokalisierung** werden entsprechende Informationen in Datenbanken abgelegt und regelmäßig aktualisiert. Um die Transaktionsraten dieser Datenbanken beherrschbar zu machen, wird ein Mobilfunknetz üblicherweise in logische Bereiche aufgeteilt, sog. Location Areas. Beim Wechsel der Location Area erfolgt eine Aktualisierung der Datenbank (Location Registration/Update).

Durch die Lizenzvergabe an den Betreiber ist der Einzugsbereich eines Mobilfunknetzes bestimmt und damit meist auf nationale Grenzen festgelegt. Um Mobilfunkteilnehmern weltweit Erreichbarkeit und Zugang zu ihren Diensten anbieten zu können, muß die netzübergreifende Mobilität ermöglicht werden. Dieses internationale **Roaming** erlaubt einem Teilnehmer mit seinem persönlichen Endgerät den Zugang zu seinen abonnierten Diensten bzw. einer Untermenge davon auch dann, wenn er sich nicht in seinem Heimatnetz (Netz seines Diensteanbieters) aufhält. Mobilfunkbetreiber schließen entsprechende Roamingverträge ab, die ihren Mobilfunkteilnehmern den Zugang zu Fremdnetzen öffnen. Voraussetzung sind entsprechende internationale Standards bzw. betreiberunabhängige Dienstplattformen [13].

Eine weitere wichtige Voraussetzung sind entsprechende Sicherheitstechniken. Die eindeutige Identität des jeweiligen Teilnehmers stellen Algorithmen zur **Authentifizierung** fest. Ist die Identität zweifelsfrei geklärt und verifiziert, kann dieser Teilnehmer auch im Fremdnetz Zugang zu seinen Diensten erhalten und für deren Nutzung das entsprechende Entgelt berechnet werden. Für zusätzliche Sicherheit sorgen Verfahren, welche die übertragenen Daten gegen Abhören sichern (**Chiffrierung**).

Mobilität verhindert die eindeutige Zuordnung zwischen Netzzugangspunkt, Teilnehmer und Gerät. Entsprechend ist die feste Teilnehmernummer (z.B. nach ITU-T E.164 [110]) anders als im Festnetz alleine wertlos für den Aufbau mobilterminierter Verbindungen bzw. das Durchstellen von Datenpaketen. Ein mehrstufiges, datenbankgestütztes Verfahren zur **Wegesuche** wird dafür im allgemeinen eingesetzt. Anhand der festen Adresse wird üblicherweise

das Heimatnetz des Teilnehmers und damit die Datenbank identifiziert, in welcher sein momentaner Aufenthaltsbereich verzeichnet ist. Mit dieser Information wird die Verbindung bzw. das Datenpaket zu dem Vermittlungszentrum geleitet, das für die aktuelle Location Area verantwortlich ist. Nach einer weiteren Datenbankabfrage kann schließlich die Basisstation identifiziert werden, über welche die Mobilstation/der Teilnehmer erreichbar ist.

Der Sendebereich dieser Basisstation wird im Laufe einer Verbindung unter Umständen verlassen. Soll die Verbindung nicht abgebrochen werden, muß sie im Netz umgeleitet und an der Luftschnittstelle an die aktuell mit der besten Qualität empfangbare Basisstation übergeben werden. Dieser **Handover** der Verbindung ist also in zwei Komponenten aufgeteilt: der **Nachführung der Verbindung** (Rerouting) im Netz einerseits und dem Freigeben und erneuten Aufbau einer Funkverbindung andererseits. Das Rerouting betrifft in der Regel nicht den gesamten Weg einer Verbindung im Netz bzw. den beteiligten Netzen, sondern nur einen möglichst kurzen Teil innerhalb des Mobilfunknetzes, in dem sich der Teilnehmer aktuell aufhält. Der Handover ist in heutigen Mobilfunknetzen nicht unterbrechungsfrei realisiert. Bei Sprachverbindungen etwa macht er sich durch ein hörbares Knacken bemerkbar, bei Datenübertragungen würde das den Verlust eines oder mehrerer Pakete bedeuten. Besondere Maßnahmen auf der Nutzdatenebene können für paketorientierte Netze ergriffen werden, um einen **verlustfreien Handover** zu erreichen.

1.1.2 Historie

Die Deregulierung der europäischen Telekommunikationsmärkte in den Jahren ab 1985 brachten den bis dahin staatlichen Post- und Telekommunikationskonzernen neben der Privatisierung auch gleichzeitig eine ganze Reihe von neuen Wettbewerbern. Es ist bezeichnend, daß die erste private Telefongesellschaft in Deutschland ein Mobilfunkbetreiber ist. Begünstigt von der Deregulierung, dem damit einhergehenden Wettbewerb und den dadurch verursachten sinkenden Preisen war eine starke Nachfrage nach neuen Telekommunikationsprodukten entstanden, von denen vor allem die Mobilfunkindustrie profitierte.

Paradebeispiel für diesen Megatrend des ausgehenden 20. Jahrhunderts ist das Global System for Mobile Communication GSM. Entwickelt in Europa ab etwa 1982 hat der GSM-Standard seit dem kommerziellen Start der ersten Netze im Jahr 1992 mittlerweile einen Anteil von über 50% am weltweiten Mobilfunkmarkt erobert (Stand: Ende 1999), was einem Anteil von etwa 70% bei den digitalen Systemen entspricht (Abb. 1.1).

Doch diese Entwicklung mit allen ihren heute bekannten Ausprägungen hat einige Jahre früher begonnen. Netze, die nach dem GSM-Standard gebaut sind, werden bereits in die zweite Generation von Mobilfunksystemen eingeordnet.

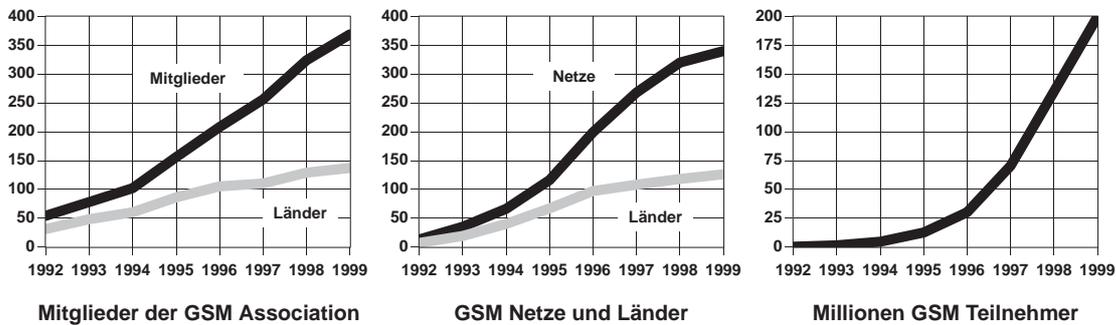


Abb. 1.1: Zahlenmäßige Entwicklung von GSM [13][94]

Während die Ursprünge der mobilen, auf Funkübertragung basierenden Kommunikation weit vorher datieren (wichtige Daten sind z.B. in Deutschland im Jahr 1926 ein Zugtelefonsystem auf der Strecke Berlin-Hamburg, im Jahr 1958 die Einführung des A-Netzes und im Jahr 1972 der Start des B-Netzes), begannen um 1980 die Systeme zu entstehen, die mittlerweile als erste Generation der Mobilfunksysteme bezeichnet werden (Abb. 1.2). In Deutschland wurde 1985 mit dem C-Netz das erste Mobilfunknetz eröffnet, das alle entscheidenden Kennzeichen aufwies: ein zellulares System mit flächendeckender Versorgung, das im Selbstwählbetrieb automatisch den aktuellen Aufenthaltsort der Mobilstation finden und Sprachverbindungen herstellen konnte. In anderen europäischen Ländern wurde ein ähnliches System, das Nordic Mobile Telephone NMT, eingeführt. Nordamerika besaß bereits seit einigen Jahren das Advanced Mobile Phone System AMPS. Allen gemeinsam ist die analoge Funkübertragungstechnik. Bei der ersten Generation von Mobilfunksystemen erfolgt die Sprachübertragung im Funkkanal analog, meist basierend auf Frequenzmodulationsverfahren.

Mit der Digitalisierung der Übertragungstechnik der Luftschnittstelle war der nächste Meilenstein erreicht. Diese Entwicklung wurde von GSM angeführt, parallel entstanden in USA die Systeme IS-95 und IS-136. Es folgten digitale Schnurlostelefonssysteme (DECT) und der digitale Bündelfunk (TETRA); weltweite Versorgung und Roaming mit GSM-Partnern versuchen die neuen Satellitenmobilfunknetze (IRIDIUM, Globalstar etc.) zu realisieren [13]. Neben der digitalen Sprach- und Datenübertragung ist für die Systeme der zweiten Generation kennzeichnend, daß es sich weitgehend um internationale, in manchen Fällen (insbesondere GSM) sogar weltweite Standards handelt. Weiter wurde in der zweiten Generation neben einer ganzen Reihe von an ISDN orientierten Diensten und Dienstmerkmalen bereits teilweise eine Trennung von Teilnehmer, Dienst und Endgerät eingeführt. So ist die Nutzung eines persönlichen Satzes von Diensten bei gleichzeitigem internationalem, also weltweit netzübergreifendem Roaming möglich geworden.

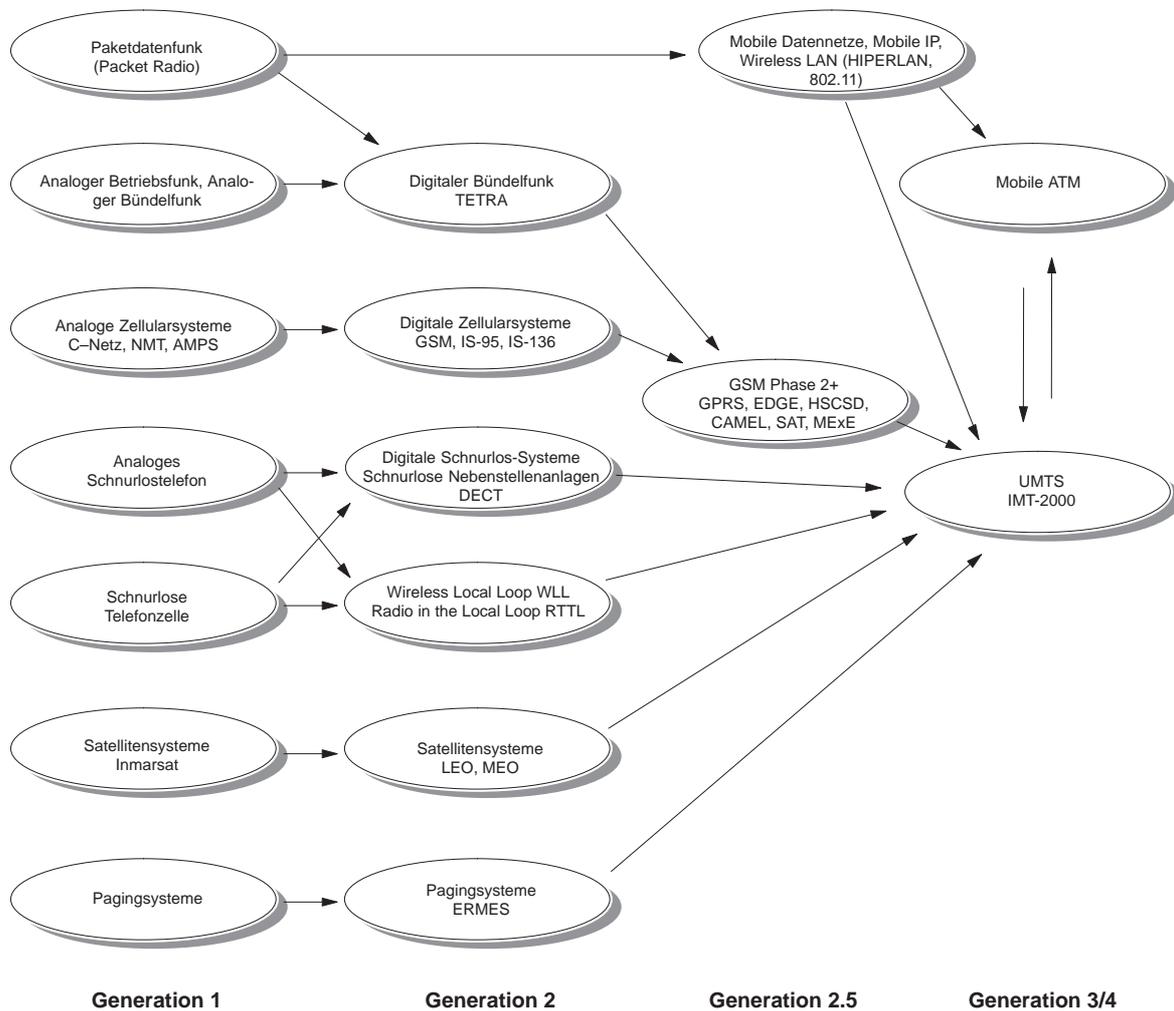


Abb. 1.2: Heutige und zukünftige Mobilkommunikationssysteme

1.1.3 Zukünftige Entwicklung

Das Hauptverkehrsaufkommen liegt in den Systemen der zweiten Generation nach wie vor bei den Sprachdiensten. Einzelne neue Dienste, wie beispielsweise der Kurznachrichtendienst von GSM [13], wurden aber ebenfalls höchst erfolgreich eingeführt. Das typische Aufkommen eines deutschen GSM900-Betreibers liegt bei monatlich bis zu 100 Millionen Kurznachrichten. Die verbindungsorientierten Datendienste mit einer Kapazität von bis zu 9.6 kbit/s werden allerdings nur in geringem Umfang nachgefragt. Es wird allgemein erwartet, daß sich diese Situation innerhalb der nächsten Jahre grundlegend ändern wird, vor allem wegen des Einflusses eines weiteren Megatrends der letzten Jahre, des Internets. Den Anschlußzahlen im Internet wird ein weiterhin ähnlich starkes Wachstum wie im Mobilfunk prognostiziert, so daß der mobile Zugriff auf Informationsdienste und persönliche Daten im Internet von weit größerer Bedeutung sein wird (Abb. 1.3). Im Jahr 2004 soll jeder dritte Mobilteilnehmer auch

seine bekannten Internetdienste mobil nutzen. Darüber hinaus sollen, beispielsweise basierend auf dem Wireless Application Protocol WAP [215], neue mobile Internetdienste entstehen.

Zukünftige Mobilfunksysteme haben damit folgende wesentliche Anforderungen zu erfüllen:

- flexible Trägerdienste mit Datenraten vergleichbar dem Festnetz
- paketorientierter Datentransport für effizienten Zugang zum Internet
- entsprechend höhere Kapazität zur Bewältigung des Teilnehmerzuwachses

Diesen Trends und ihren Anforderungen soll mit der Entwicklung einer weiteren Generation von Mobilfunksystemen Rechnung getragen werden. Sie werden neue, weltweit standardisierte Frequenzbänder erschließen und so neben höheren Datenraten von bis zu 384 kbit/s (Spitzendatenrate bis 2 Mbit/s) auch vor allem zusätzliche Kapazität liefern. Unter dem Namen Universal Mobile Telecommunication System UMTS wird diese dritte Generation derzeit bei der ETSI standardisiert und bei der ITU-T zur weltweiten Koordinierung des International Mobile Telecommunication System IMT-2000 eingebracht (Abb. 1.2, [13]). Allgemein spricht man von 3G-Systemen.

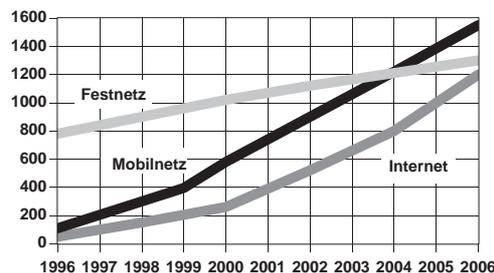


Abb. 1.3: Telefon und Internet – Millionen Teilnehmer weltweit [13]

Gleichzeitig wird auch intensiv an der Evolution der implementierten GSM-Basis gearbeitet. Hauptarbeitspunkte sind dabei neue Technologien wie das Modulationsverfahren Enhanced Data Rates for GSM Evolution EDGE oder die erweiterten Datendienste General Packet Radio Service GPRS und High Speed Circuit Switched Data HSCSD (Abb. 1.2, [14][92]). Diese Weiterentwicklungen machen GSM-Netze der Phase 2+ zum direkten Vorläufer von Systemen der dritten Generation [13]. Darüber hinaus wird damit für die existierenden GSM-Netze auch ein Evolutionspfad eröffnet, der es erlaubt, ähnliche oder sogar die gleichen Dienste wie mit der schnelleren UMTS-Luftschnittstelle anzubieten. Die schrittweise Einführung von 3G-Zugangstechnologien ist damit genauso möglich wie die Sicherung von Investitionen in neue Dienste in bestehenden GSM-Netzen. UMTS/IMT-2000 wird etablierte GSM-Netze zunächst nicht verdrängen oder ersetzen, sondern ergänzen.

Parallel werden “klassische” Internettechnologien um drahtlose und mobile Komponenten ergänzt (Mobile IP, Wireless LAN, Abb. 1.2). Dazu werden für kleine und kleinste Sendereichweiten neue funkbasierte Zugangstechnologien geschaffen, die um eine Größenordnung höhere Datenraten anbieten. Drahtlose lokale Netze (Wireless Local Area Network WLAN) nach dem Standard IEEE 802.11 bieten bereits 2 Mbit/s bzw. in Weiterentwicklungen bis zu 11 Mbit/s Übertragungskapazität an. Weitere WLAN-Systeme wie das europäische HIPERLAN befinden sich gerade in der Standardisierung und werden Daten mit bis zu 25 Mbit/s übertragen können [81][82]. Beide Systeme bilden pikozellulare Netze, die eingeschränkt Mobilität unterstützen. Insbesondere HIPERLAN wird als eine gute Ergänzung der UMTS-Zugangstechnologien gesehen, um in einzelnen Bereichen wie öffentlichen Plätzen, Flughäfen oder Bürogebäuden besonders leistungsfähigen Zugriff auf die Dienste des UMTS-Netzes bieten zu können. Ebenso wird eine drahtlose Erweiterung der Breitbandvermittlungstechnik ATM zunächst in lokalen Netzen mit geringer Mobilität hohe Datenraten für die drahtlose Nutzung verbindungsorientierter Breitbandtelekommunikationsdienste anbieten. Durch die Einführung von Mobilvermittlungstechniken in ATM (Mobile ATM) wird in Weiterentwicklungen auch die Unterstützung von Weitverkehrsmobilität möglich sein. Drahtlose/mobile ATM-Systeme sind entsprechend zunächst als drahtlose Breitbandinseln ein weiteres zukünftiges Zugangnetz zum UMTS-Kernnetz, während daraus durch Entwicklung entsprechender Luftschnittstellen und Vermittlungstechniken das mobile Breitbandnetz und damit das Mobilfunksystem der vierten Generation entstehen kann.

1.2 Breitbandnetze

1.2.1 Hintergrund, Entwicklung und Technologie

Der Begriff Breitbandnetz entstammt dem klassischen Festnetzbereich. Er wird in der Literatur in mehrfacher Hinsicht verwendet, etwa für das breitbandige diensteintegrierende Digitalnetz oder für das Breitbandkabelnetz für Hörfunk und Fernsehen. Aber auch im Bereich der lokalen Datennetze spricht man von Breitbandnetzen, beispielsweise bei der Ethernet-Familie mit ihren 10bT oder 100bT Lösungen, die in jüngster Vergangenheit mit dem Gigabit-Ethernet weiteren Zuwachs erhalten hat. Die klassische Definition in der Telekommunikation ist das diensteintegrierende Breitbandnetz, welches “die Übermittlung von Nachrichten in Kanälen mit beliebigen Bitraten erlaubt. Es verwendet nach internationaler Empfehlung vorzugsweise den Asynchronen Transfermodus ATM” [69]. Diese Sicht ist die eines integrierten Netzes mit einheitlichen, Ende-zu-Ende-Transport- und Vermittlungsverfahren. Um den jüngsten Entwicklungen Rechnung zu tragen, wird der Begriff Breitbandnetz allerdings vermehrt losgelöst vom Vermittlungsverfahren verwendet. Dies ist sinnvoll, weil moderne Netze meist aus einem Hochleistungs-transportnetz und einer Vielzahl von Zugangsetzwerken mit unter-

schiedlicher Technologie zusammengesetzt sind. Mit Breitbandnetz werden entsprechend der Definition in der ITU-T Empfehlung I.113 [112] im folgenden Netze bezeichnet, die dem Teilnehmer eine minimale Übertragungsleistung von etwa 2 Mbit/s zur Verfügung stellen und in diesem Rahmen Kanäle mit frei wählbaren Datenraten anbieten. Die Nachrichtenübermittlung kann sowohl verbindungsorientiert als auch verbindungslos erfolgen. Die Leitungs- bzw. Durchschaltvermittlung verliert an Bedeutung und es wird paketvermittelt übertragen.

Dies gilt insbesondere für den Asynchronen Transfermodus ATM, der momentan im wesentlichen als Transporttechnologie im Kernnetz zur Anwendung kommt. Ein Transfermodus umfaßt die Aspekte Übertragung, Multiplexen und Vermittlung in einem Telekommunikationsnetz. Der Asynchrone Transfermodus ATM ist ein Transfermodus, bei welchem der Nutzdatenstrom in kleine Pakete fester Länge, sogenannte Zellen, segmentiert wird. Er ist asynchron in dem Sinne, daß die Zellen mit Informationen eines Nutzers nicht notwendigerweise periodisch auftreten [112].

Ursprünglich war ATM geplant als durchgängiges Vermittlungsverfahren eines breitbandigen, diensteintegrierenden digitalen Netzes B-ISDN, das klassische Telekommunikationsdienste und Datendienste in einem Netz transportieren und die Dienstgüte flexibel abstimmen können sollte (z.B. Datenrate, Verzögerung, Volatilität der Datenrate etc.). Aus dem Bereich der Zugangsnetze wurde ATM teilweise verdrängt, weil insbesondere für Datenanwendungen basierend auf dem Internet Protokoll IP Weiterentwicklungen des Ethernets mit Datenraten von 100 Mbit/s sowie die entsprechend leistungsfähigen Vermittlungseinrichtungen (Switches, Router) sehr preisgünstig verfügbar wurden. Im Kernnetz wird aber ATM auf breiter Basis eingeführt.

Im Bereich der Zugangsnetze erfährt ATM in jüngster Zeit wieder zunehmende Bedeutung. Auf den bekannten Zweidraht-Kupferanschlußleitungen, die bisher auch für das diensteintegrierende digitale Netz ISDN verwendet werden, sind neue Technologien verfügbar. Diese Technologien gehören zur xDSL-Familie (Digital Subscriber Line DSL), wobei xDSL für mehrere verschiedene Varianten steht [47]. Am bekanntesten ist das Verfahren Asymmetric Digital Subscriber Line ADSL, das derzeit in Deutschland flächendeckend eingeführt wird. Damit sind in der ersten Ausbaustufe Datenraten bis 768 kbit/s möglich. Wesentlich höhere Datenraten von je nach Leitungslänge 26 Mbit/s bis 52 Mbit/s sind mit der VDSL-Technik (Very-High-Speed Digital Subscriber Line) vorgesehen [56]. Die xDSL-Familie ist als sogenannte Last-Mile-Zugangstechnologie vor allem als Anschlußtechnik für breitbandigen Internetzugang basierend auf der IP-Plattform prädestiniert. Verfügbare Realisierungen bieten am Netzabschluß entsprechend teilnehmerseitig eine Ethernet-Schnittstelle für die breitban-

dige lokale Vernetzung. Netzseitig ist eine ATM-basierte Schnittstelle standardisiert. Die Nutzdaten werden in einer ATM-Verbindung zum nächsten Router übertragen und dort als IP-Pakete weitervermittelt.

1.2.2 Asynchroner Transfermodus ATM

Die Nachrichtenübertragung erfolgt beim Asynchronen Transfermodus ATM mit verbindungsorientierter Paketvermittlung auf Basis von virtuellen Verbindungen [182]. ATM definiert dazu ein sehr kurzes Datenpaket fester Länge (53 Byte). Dieses Datenpaket wird Zelle genannt. Seine Kürze erlaubt eine geringe Übertragungsverzögerung und kleine Transferzeiten in den Vermittlungseinheiten. Die feste Länge des Paketes war ursprünglich festgeschrieben worden, um hardwareimplementierte Vermittlung ohne Analyse des Paketinhaltes realisieren zu können. Dieser Vorsprung der ATM-Technologie ist mittlerweile durch Fortschritte in der Verarbeitungsleistung kompensiert – schnelle Router für die Vermittlung des IP-Protokolls erreichen mittlerweile ähnlich hohen Systemdurchsatz wie ATM-Vermittlungen.

Der Paketkopf enthält wegen des Einsatzes virtueller Verbindungen nur eine Verbindungsreferenz statt vollständiger Endsystemadressen und läßt 48 Byte für den Nutzdatentransport verfügbar. Virtuelle Verbindungen in ATM sind zweistufig organisiert. Dazu sind Virtuelle Pfade (Virtual Path VP) und Virtuelle Kanäle (Virtual Channel VC) definiert. Virtuelle Pfade werden mit 8 bit adressiert, Virtuelle Kanäle mit 16 bit.

Virtuelle Kanäle sind die Ende-zu-Ende-Verbindungen, in denen Nutzdaten transportiert werden. Mit Hilfe des Konzeptes der Virtuellen Pfade lassen sich VC zu Bündeln zusammenfassen. Die Verbindungen eines Bündels können dann in einem Schritt vermittelt werden. Im Kernnetz ist die Vermittlung Virtueller Pfade häufig als Crossconnect-Vermittlung ausgeführt, entsprechend werden diese VP-Vermittlungsknoten auch VP-Crossconnect genannt. Die zweite Vermittlungsebene der ATM-Schicht ist folgerichtig die VC-Vermittlungsebene, auf der einzelne Ende-zu-Ende-Verbindungen entweder permanent durch Einstellungen über das Netzmanagement (VC-Crossconnect) oder auf Anforderung über Signalisierungsinformation (VC-Switch) zeitweise oder permanent geschaltet werden können. Bildlich gesprochen bieten VP-Verbindungen in ATM-Netzen virtuelle Röhren, durch welche die VC-Verbindungen geleitet werden. Ein mögliches Anwendungsbeispiel wäre die Vernetzung mehrerer Firmenstandorte, bei der ein logisches Netz auf VP-Basis zwischen den einzelnen Standorten aufgebaut wird und einzelne Verbindungen oder Paketflüsse in VC-Verbindungen auf den VP-Trassen geroutet werden können, ohne Verbindungssteuerungsfunktionen im Netz zu benötigen.

Die Übertragung der ATM-Zellen in den virtuellen Verbindungen erfolgt asynchron mit frei wählbarer Zellenrate. Die Bitrate einer Verbindung kann also beliebig eingestellt werden und innerhalb bestimmter Grenzen während der Verbindungsdauer schwanken. Diese asynchrone

Übertragung der ATM-Zellen erlaubt außerdem das statistische Multiplexen mehrerer virtueller Verbindungen auf einer physikalischen Übertragungsstrecke. Dazu wird beim Verbindungsaufbau ein Satz von Qualitätsmerkmalen angegeben, basierend auf dem die Verbindungsqualität verhandelt und die Verbindung angenommen wird (Call Admission Control CAC). Um diese eleganten Leistungsmerkmale zu realisieren, ist ein standardisiertes Management der ATM-Verkehrsströme notwendig [34][35]. Dieses Verkehrsmanagement (ATM traffic management) definiert sechs Dienstkategorien oder Verkehrsklassen (Tabelle 1.1) sowie Parameter zur Beschreibung von deren Verkehrscharakteristik (traffic parameters) und der gewünschten Dienstgüte (QoS parameters):

- Constant Bit Rate CBR – für Verbindungen, die einen statischen Bandbreitenbedarf über die gesamte Verbindungsdauer hinweg haben. Dieser Bedarf wird durch die Spitzenzellenrate (Peak Cell Rate PCR) beschrieben. Die CBR-Dienstklasse ist hauptsächlich vorgesehen für Echtzeitanwendungen, aber nicht auf diese beschränkt. Die maximale (Ende-zu-Ende-)Übertragungsverzögerung (maximum Cell Transfer Delay maxCTD) und ihre Schwankungsbreite (Cell Delay Variation CDV) sind die Dienstgüteparameter, welche die Echtzeitbedingungen der Verbindung definieren.
- Real-Time Variable Bit Rate rt-VBR – für Applikationen mit variabler Datenrate und Echtzeitanforderungen, d.h. eng begrenzten Toleranzen hinsichtlich der Übertragungsverzögerung und deren Schwankungen. Zusätzlich zur Spitzenzellenrate wird diese Dienstkategorie beschrieben durch die langfristige-durchschnittliche Dauerzellenrate (Sustainable Cell Rate SCR) und die maximale Burstlänge (Maximum Burst Size MBS).
- Non-Real-Time Variable Bit Rate nrt-VBR – für Anwendungen mit bursthaftem Verkehrsaufkommen ohne Echtzeitanforderungen. Genauso wie bei rt-VBR wird die Verkehrscharakteristik des Zellenstroms mit PCR, SCR und MBS beschrieben. Allerdings benötigt die Dienstkategorie nrt-VBR keine Grenzen für die Übertragungsverzögerung und die entsprechenden Dienstgüteparameter bleiben unspezifiziert.
- Unspecified Bit Rate UBR – ist der Dienst, der keinerlei Anforderungen an die Übertragungsqualität stellt und eine Art Best-Effort-Dienst realisiert. Entsprechend werden Verkehrsparameter auch nur als Richtwert verstanden und deren Einhaltung nicht garantiert. Typische Applikationen, welche diese Dienstkategorie nutzen, findet man im klassischen Bereich der Rechnerkommunikation, wie zum Beispiel e-mail oder Dateitransfer.
- Available Bit Rate ABR – ist ebenfalls nicht für Echtzeitdienste gedacht und erlaubt die Regelung des Zellenflusses abhängig von den momentan verfügbaren Ressourcen im Netz. Dafür sind Mechanismen vorgesehen, die basierend auf in-slot-Signalisierung Regelschleifen im Zellenstrom definieren und so die Flußkontrolle realisieren. Der

ABR-Verkehrsfluß wird mit einer Spitzenzellenrate PCR und einer Minimumzellenrate (Minimum Cell Rate MCR) charakterisiert. Die Übertragungsverzögerung wird nicht spezifiziert.

- **Guaranteed Frame Rate GFR** – ist ein Dienst, der verfügbare Ressourcen dynamisch einer Anwendung zuteilen kann, aber im Gegensatz zu ABR ohne Flußkontrolle arbeitet. In Überlastsituationen werden in der GFR-Dienstkategorie ganze Protokolldateinheiten (Protocol Data Unit PDU) statt einzelner ATM-Zellen verworfen. Zusätzlich zu den bereits oben vorgestellten Verkehrsparametern PCR, MCR und MBS wird dazu noch eine maximale Rahmenlänge (Maximum Frame Size MFS) definiert. Das Netz garantiert bei GFR nur die Einhaltung der Minimumdatenrate MCR. Steigt die Zellenrate im Datenstrom, wird sie nur basierend auf den noch vorhandenen Ressourcen bedient.

Für alle Dienstkategorien gemeinsam ist zur Beschreibung der Verkehrscharakteristik ein Verklumpungsfaktor oder auch Zellverzögerungstoleranz (Cell Delay Variation Tolerance CDVT) definiert, über den angegeben werden kann, um wieviel der durch die Zellenraten PCR und SCR definierte Sendezeitpunkt einzelner ATM-Zellen verschoben werden kann. Solche Verzögerungen entstehen beispielsweise beim Zusammenführen zweier ATM-Zellenströme. Die Zellen einer Verbindung folgen dadurch dichter aufeinander und es kommt zu Verklumpungen im Zellenstrom [35].

Tabelle 1.1: ATM-Verkehrsklassen und QoS-Parameter

Parameter		ATM Dienstkategorien					
		CBR	rt-VBR	nrt-VBR	UBR	ABR	GFR
Verkehr	CDVT	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	PCR	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	SCR	n/a	✓	✓	n/a	n/a	n/a
	MCR	n/a	n/a	n/a	n/a	✓	✓
	MBS	n/a	✓	✓	n/a	n/a	✓
	MFS	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	✓
QoS	CDV	✓	✓	○	○	○	○
	maxCTD	✓	✓	○	○	○	○
	CLR	✓	✓	✓	○	○	○

✓ Spezifiziert ○ Nicht Spezifiziert n/a Nicht Anwendbar

Neben den oben genannten Dienstgüteparametern maxCTD und CDV kann in allen Dienstkategorien noch die Zellverlusthäufigkeit (Cell Loss Ration CLR) angegeben werden, die vom Netz einzuhalten ist. Darüber hinaus sind noch QoS-Parameter vorgesehen, deren Wert beim

Verbindungsaufbau allerdings nicht verhandelbar ist: Zellfehlerhäufigkeit (Cell Error Ratio CER), Zellblockfehlerhäufigkeit (Severely Errored Cell Block Ratio SECBR), Zellfehlervermittlungsrates (Cell Misinsertion Rate CMR) [35].

In diesen flexiblen Dienstkategorien mit ihren fein abstimmbaren Parametern liegt ein großer Leistungsvorteil von ATM. Die Verkehrscharakteristik und die Qualität der Verbindung, die Dienstgüte (Quality of Service QoS), sind verhandelbar und werden nach der Annahme der Verbindung durch das Netz garantiert. Nach der Annahme der Verbindung wird die Einhaltung der Verkehrsparameter vom Netz überwacht (Usage Parameter Control UPC), da nur so die zugesicherte Dienstgüte eingehalten werden kann. Gleichzeitig wird auch bei schwankender Datenrate immer nur die momentan benötigte Bandbreite belegt, so daß mit Hilfe des statischen Multiplexens mehrerer Verbindungen eine hohe Bandbreiteneffizienz erreicht werden kann. Damit ist der Asynchrone Transfermodus sehr gut geeignet zum Transport der verschiedensten Dienste, insbesondere von Multimediasdiensten, auf einem gemeinsamen physikalischen Medium. Netze, die den Asynchronen Transfermodus einsetzen, besitzen ein universelles Vermittlungsverfahren, das flexibel und leistungsfähig genug ist, die Anforderungen einer Vielzahl von Applikationen zu erfüllen. Damit entsteht basierend auf ATM ein diensteintegrierendes Breitbandnetz, das auch beliebigen zukünftigen Anwendungen die benötigten Transportfunktionen zur Verfügung stellen kann.

1.2.3 Märkte und Bedeutung von Breitbandnetzen

Die breitbandigen Zugangs- und Transportnetztechnologien werden in den nächsten Jahren stark wachsende Nachfrage erleben. Die zunehmende Konvergenz der klassischen TIME-Märkte (Telekommunikation, Information/IT, Medien, Entertainment) sorgt mit neuen Inhalten und Anwendungen für einen gegenüber heute vielfach höheren Bedarf an Bandbreite.

Beispiel 1

Für den Konsum von online angebotener Musik im MP3-Format (MPEG Layer 3 [105][155][156]) etwa sind die heute verfügbaren Netze vollkommen unzureichend und die Ladezeiten übersteigen die Spieldauer um ein Mehrfaches [209]. Es wird eine gegenüber heute verbreiteten Technologien um zwei Größenordnungen höhere Datenrate benötigt, um die Ladezeit in den Sekundenbereich drücken zu können. Der MP3-Audiostrom benötigt in Echtzeit ca. 112 bis 128 kbit/s für CD-Qualität. Für durchschnittliche Musiktitel von ca. 3 Minuten Länge ergeben sich Dateigrößen von 2 bis 3 Megabyte. Um eine kleine Sammlung von 10 Titeln innerhalb von fünf Minuten aus dem Internet auf ein tragbares MP3-Abspielgerät zu übertragen ist bereits eine Übertragungsrate von etwa 700 kbit/s notwendig. Noch weitaus höhere Anforderungen stellen Videoapplikationen. Digitales Video (MPEG 2) kann in Echtzeit mit 2 bis 8 Mbit/s empfangen werden – die Ladezeit des kompletten Films entspricht bei diesen Datenraten allerdings noch der Spieldauer. Damit sind maximal Pay-per-View-An-

wendungen realisierbar, bei denen der Film in Echtzeit während der Übertragung konsumiert wird. Um beispielsweise Filme über das Netz kaufen und lokal speichern zu können, sind weitaus höhere Datenraten notwendig, wenn die Ladezeiten maximal im Minutenbereich liegen sollen.

Beispiel 2

Neue Paradigmen der Softwarelizenzierung entstehen rund um das Internet. Programme für Standardlösungen werden nicht mehr als Lizenz gekauft und lokal installiert, vielmehr werden in modernen Geschäftsmodellen benötigte Module bei einem Application Service Provider ASP gemietet und entsprechend der Nutzungsdauer abgerechnet [144]. Die Software kann dabei für die Dauer der Nutzung auf dem Server des Anbieters laufen, aber auch als Gesamtpaket oder in einzelnen Modulen auf den Rechner des Klienten geladen werden. Die Hauptanwendungsgebiete für ASP-Lösungen sind kaufmännische Standardlösungen oder Software zur Managementunterstützung wie Enterprise Resource Planning ERP. Andererseits werden für spezielle, anbieterspezifische Anwendungen häufig proprietäre Zugriffs-/Datenschnittstellen und Algorithmen verwendet, beispielsweise bei besonders sicheren Transaktions- und Verschlüsselungsalgorithmen für Bankdienstleistungen. Auch dies kann wirkungsvoll durch das temporäre Herunterladen von ausführbarem Code, bei dem kein separater Installationsvorgang notwendig ist, unterstützt werden. Technologien, die dafür in Frage kommen, sind häufig auf Java basierend. Einzelne Module können bei diesen Szenarien leicht mehrere 100 kbyte groß werden. Um effizientes Arbeiten zu erlauben, müssen diese Applikationen bzw. deren Module schnell und möglichst latenzfrei zur Verfügung gestellt werden. Auch dafür sind breitbandige Zugangsnetze unverzichtbar.

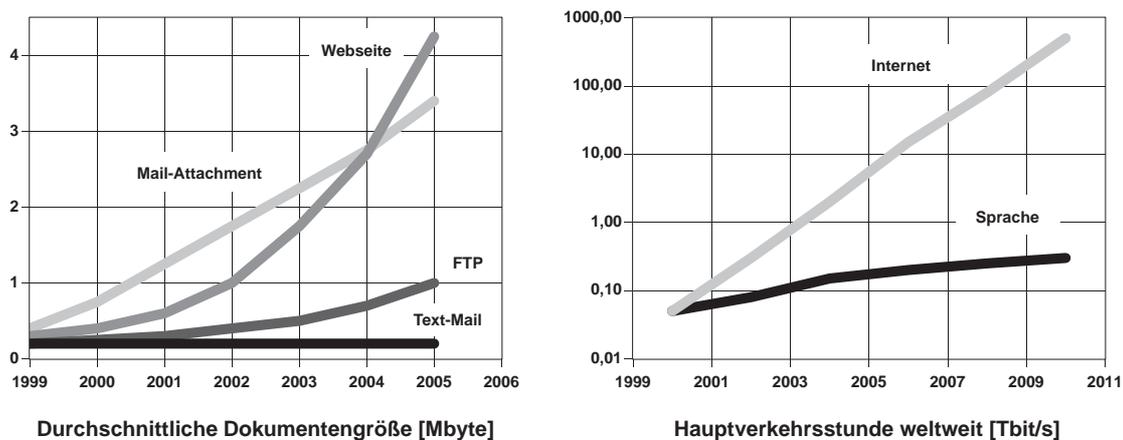


Abb. 1.4: Zukünftiger Bandbreitenbedarf

Konkrete Anwendungen, die breitbandige Transporttechnologien benötigen, existieren also bereits heute und geben einen Eindruck vom Bandbreitenbedarf zukünftiger Applikationen.

Selbst Fortschritte in der Codierungstechnologie (MPEG 4 Audiocodierung beispielsweise benötigt für CD-Qualität nur noch etwa 96 kbit/s) werden an den Größenordnungen des zukünftigen Bandbreitenbedarfs wenig ändern, da mit zunehmender Verbreitung auch die Nutzungsdichte ansteigen wird [178]. Insgesamt ist zu beobachten, daß ähnlich wie die wachsende Komplexität der Software und die zunehmende Leistungsfähigkeit der Prozessoren auch das Volumen der übertragenen Inhalte und die verfügbare Übertragungskapazität einander wechselweise vorantreiben.

Dies läßt sich sehr gut an der Entwicklung der heute bereits bekannten Internet-Dienste ablesen. In Studien werden regelmäßig die Dokumentengröße und das Übertragungsvolumen gemessen, analysiert und auf die Zukunft projiziert. Die Ergebnisse einer solchen Prognose sind in Abb. 1.4 zusammengefaßt: für die durchschnittliche Dokumentengröße von e-mail mit Dateiangebe (attachment) und von Webseiten wird in den nächsten fünf Jahren eine Steigerung um eine Größenordnung erwartet. Das weltweit in der Hauptverkehrsstunde übertragene Datenvolumen wird voraussichtlich bereits im Jahr 2000 das Sprachvolumen übersteigen. Für die Jahre danach wird etwa alle zwei Jahre eine Verzehnfachung prognostiziert [169][192].

1.3 Anforderungen an mobile Breitbandsysteme

Vergleicht man die drahtgebundenen und drahtlosen Teilnehmeranschlußtechniken, wird deutlich: wenn die Entwicklungen für die öffentlichen zellularen Mobilfunknetze der dritten Generation auch technologisch große Herausforderungen annehmen, so wird deren Leistungsfähigkeit dennoch sowohl hinter der des Festnetzes und der drahtlosen lokalen Netze als auch hinter den damit wachsenden Anforderungen zurück bleiben. Bedingt durch die höhere Leistungsfähigkeit der Zugangnetze wird die Nutzung und Akzeptanz von Multimedia-diensten einen starken Zuwachs erleben. Der Transport von Multimediainhalten über das Internet – ob als Echtzeitdienst oder als Dateitransfer – wird eine wesentlich höhere Durchdringung des Massenmarktes erreichen. Konsequentermaßen werden diese Dienste auch in Mobilfunknetzen nachgefragt werden. Dafür wird die Qualität der momentan avisierten UMTS-Systeme nicht mehr ausreichen. Das gilt sowohl hinsichtlich der erreichbaren Datenraten als auch für die Unterstützung von Multimediaidiensten mit verhandelbarer und garantierbarer Dienstgüte. UMTS wird Spitzendatenraten von 2 Mbit/s nur in sehr begrenzten Versorgungsgebieten und bei entsprechend optimalen Ausbreitungsbedingungen anbieten und keine hochauflösenden Multimediaidienste anbieten können [181]. Breitbandiger Mobilfunk bietet Datenraten jenseits der geplanten UMTS-Luftschnittstelle (UMTS Terrestrial Radio Access Network UTRAN), weshalb das UMTS Kernnetz für Breitbandanwendungen evolutionär um entsprechende Zugangnetze ergänzt werden muß [181].

Deshalb wird bereits jetzt weltweit an den Mobilfunksystemen der vierten Generation gearbeitet, die zum einen in öffentlichen Mobilfunknetzen deutlich höhere Datenraten im Bereich bis zu 155 Mbit/s anbieten werden. Zum anderen soll eine effiziente Unterstützung von Multi-Mediadiensten möglich sein. Dafür wird die Erweiterung der Vermittlungstechnik des Asynchronen Transfermodus ATM auch für drahtlose Zugangsnetze in Betracht gezogen. Im ATM-Forum, der Industrievereinigung zur Koordination von Standardisierungsaktivitäten und zur Bündelung von Marketingmaßnahmen für die ATM-Breitbandvermittlungstechnik, wird entsprechend bereits an einer Spezifikation für Wireless ATM WATM gearbeitet [36][63][98].

Für Wireless ATM gibt es grundsätzlich zwei Realisierungsalternativen. Einerseits kann mit einer nicht ATM-fähigen drahtlosen Übertragungstechnik ein breitbandiger Zugang zu einem mobilitätsunterstützenden ATM-Netz realisiert werden. Die zweite Variante ist, die ATM-Verbindung Ende-zu-Ende auch über die drahtlose Übertragungstrecke hinweg zu führen. Die Funkübertragungstechnik muß dann in der Lage sein, ATM-Zellen direkt zu transportieren. Generell werden unabhängig von der realisierten Variante an den drahtlosen Zugang zum ATM-Netz höchste Anforderungen gestellt: erstens hinsichtlich der Bitrate und Fehlerhäufigkeit und zweitens hinsichtlich der Fähigkeit, Dienstgüteklassen mit verhandelbaren Parametern anbieten zu können.

Direkte Konsequenz aus einem solchen drahtlosen Zugang zum ATM-Netz ist, daß die ATM-Teilnehmer mobil werden und dabei gleichzeitig alle bisher bekannten Dienste und Leistungsmerkmale des ATM nutzen möchten. Der ATM-Vermittlungstechnik stellen sich damit einige entscheidende neue Aufgaben, die in den bisherigen Entwürfen, Konzepten und Standards nicht berücksichtigt sind. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die in 1.1 bereits diskutierten Grundfunktionen eines Mobilfunknetzes. Der Asynchrone Transfermodus ATM, so wie er von ITU-T standardisiert und ATM-Forum propagiert wird, ist mit fest angeschlossenen Teilnehmern im Blickfeld entworfen worden [34][111][114][116]. Die momentanen ATM-Standards bieten deshalb keinerlei Lokalisierung der Teilnehmer und auch keine Funktionen für Handover und Rerouting von Verbindungen.

Die Trennung von Teilnehmer und Endgerät existiert in ATM noch nicht. Verbindungen erreichen Endsysteme mit ihrer ATM-Adresse entsprechend einem Numerierungsplan an festen, nicht veränderlichen Netzzugangspunkten. Diese unveränderliche Endsystem-Adresse kann bei mobilen Teilnehmern nur verwendet werden, um die jeweilige Datenbank zu finden, welche Hinweise auf den momentanen Aufenthaltsort gibt. Lokalisierungs-Datenbanken und die dazu gehörenden Abfrage-/Rufbearbeitungsmechanismen müssen für WATM-Systeme definiert werden. In Verbindung mit den Sicherheits-Algorithmen bilden sie die Basis für ein weltweites Roaming der Teilnehmer in ATM-Netzen. Da WATM als ein weiteres drahtloses

Zugangnetz für 3G-Mobilfunknetze betrachtet werden kann, werden diese Signalisierungsfunktionen sinnvollerweise an die des UMTS/IMT-2000 angelehnt und mit diesen harmonisiert.

Eine weitere Voraussetzung für Mobilität in ATM-Netzen ist die Unterstützung des Handovers von Verbindungen. Dazu gehört einerseits die Übergabe der Funkverbindung an eine neue Basisstation und andererseits die Verbindungsnachführung (Rerouting) im Netz. ATM-Netze sehen diese Form der abschnittswisen Wegeneuwahl für eine bereits aufgebaute Verbindung nicht vor. Entsprechende Signalisierungsprotokolle für die Verbindungssteuerung und die dynamische Wegesuche sind für mobile Teilnehmer neu zu definieren. Das Umschalten vom alten Verbindungsabschnitt auf den neuen bedingt außerdem zusätzliche Funktionen in den Vermittlungseinheiten. Besonderes Augenmerk muß dabei auf die Dienstgüteanforderungen der jeweiligen ATM-Verbindung gelegt werden. Je nach vereinbarter Qualität muß eine bestimmte Zellverlusthäufigkeit oder Durchlaufverzögerung eingehalten werden. Im Gegensatz zu bisher bekannten Handoververfahren in Mobilfunknetzen sind also in WATM-Systemen auch Mechanismen zur Verbindungsannahme auf der neuen Teilroute und zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen während des Umschaltvorgangs notwendig. Dazu zählt insbesondere auch, die Handoversteuerung so zu gestalten, daß ein Umschalten der Verbindungsabschnitte ohne Verlust von ATM-Zellen erfolgt, wenn es die Dienstgüte der Verbindung erfordert.

Am aufwendigsten sind in WATM die Funktionen für die Verbindungssteuerung und den Handover zu realisieren. Sie ziehen weitreichende Veränderungen in der Transportnetzarchitektur und im Aufbau der Vermittlungseinheiten nach sich. Die übrige Funktionalität kann durch Erweiterungen in der Signalisierungsarchitektur erreicht werden.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Vermeidung von Zellverlusten beim Handover von ATM-Verbindungen vorgestellt. Dieses Verfahren ist flexibel und adaptiv. Es ist in der Lage, sich an verschiedene Qualitätsanforderungen der Verbindung sowie an physikalische Bedingungen und Handovermechanismen anzupassen. Für das Rerouting der Verbindung während des Handovers wird ein ankerbasiertes Verfahren unter Ausnutzung des VP-Konzeptes in ATM definiert.

1.4 Überblick dieser Arbeit

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Kapitel 2 gibt einen Überblick des Standes der Forschung bei mobilen Breitbandsystemen und gibt eine Einführung in die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Modelle und Konzepte. Anwendungsszenarien für mobile Breitbanddienste werden beschrieben und die wichtigsten Forschungs- und Standardisierungsprojekte werden mit ihren Ergebnissen vorgestellt. Die relevanten Funkkanäle werden mit ihren we-

sentlichen Eigenschaften beschrieben und typische Funkszenarios erläutert. Die der weiteren Arbeit zugrunde liegende Netzarchitektur wird eingeführt und ein Mobilitätsmodell zur Beschreibung und Abschätzung des Handover- und Signalisierungsverkehrs in pikozellularen Systemen definiert. Kapitel 3 diskutiert das Problem der Verbindungsnachführung in ATM-Netzen mit mobilen Teilnehmern. Nach einer Übersicht der Anforderungen an Verfahren der Verbindungsnachführung wird ein neues Verfahren basierend auf Virtuellen Pfaden vorgestellt. Das Konzept der Handoverhysterese wird eingeführt. Eine Analyse und ein Vergleich mit anderen Verfahren aus der Literatur schließen dieses Kapitel ab. Neben der Verbindungsnachführung ist beim WATM die Steuerung des Handovers auf Zellenebene unter Berücksichtigung der Dienstgüteparameter einer Verbindung von entscheidender Bedeutung. Insbesondere Methoden, die Zellverluste während des Handovers vermeiden, stehen im Mittelpunkt von Kapitel 4. Nach einer Analyse der Handoversituation auf ATM-Zellenebene und einer Diskussion der Anforderungen an entsprechende Steuerungsverfahren wird ein neues verlustfreies Handoververfahren vorgestellt. Es unterstützt flexibel sowohl harte als auch weiche Handover und berücksichtigt alle Handoversituationen. Eine Analyse des Verfahrens und ein Vergleich mit anderen Handoververfahren insbesondere unter dem Aspekt der Robustheit bei kritischen Funkbedingungen schließen sich an. In Kapitel 5 werden die wesentlichen Punkte dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere mögliche Arbeiten gegeben.

1.5 Beiträge dieser Arbeit

Nachfolgend werden die wesentlichen Beiträge dieser Arbeit kurz zusammengefasst. Neben einem systematischen Überblick über die weltweite Forschung und Entwicklung im Bereich WATM und der Diskussion verschiedener Applikationsszenarien für mobile Breitbandsysteme sind die wesentlichen Beiträge dieser Arbeit folgende:

- Definition und Analyse von Funkkanalszenarios zur Ableitung von Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der WATM-Mobilvermittlungsverfahren.
- Klassifikation der Verfahren zur Verbindungsnachführung und Einordnung des Schrifttums, wo vereinzelt in Teilaspekten bereits erste Klassifikationen vorgenommen worden waren.
- Vorschlag eines neuen, semiproaktiven, VP-basierten Reroutingverfahrens, das mit vertretbarem Ressourcenaufwand die Handoverlatenz reduziert.
- Einführung und Analyse des neuen Konzepts der Handoverhysterese.
- Analyse und systematische Diskussion der Situationen, die beim Handover zu Zellverlusten, Zellduplikationen und Vertauschungen der Zellreihenfolge führen.
- Vorschlag und Analyse eines neuen Handoververfahrens für verlustfreien Backward und Forward Handover sowie verlustbegrenzten Echtzeit-Handover.

2 Mobile ATM Netzarchitektur

2.1 Mobile Breitbandssysteme

2.1.1 Anwendungsszenarien für mobile Breitbanddienste

Eine Reihe von Autoren geht davon aus, daß breitbandige Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Datenübertragungskapazität und die Multimediafähigkeit eines Systems nur von Teilnehmern geringer Mobilität nachgefragt werden. Ihre Schlußfolgerung ist, daß nur ein kleiner Teil der Anwendungen Mobilität benötigen wird [126]. Diese Sichtweise wird nicht von allen geteilt [181]. Im Gegenteil sind eine ganze Reihe von Applikationsszenarien denkbar, in denen Multimediaanwendungen breitbandige Transportdienste bei gleichzeitiger Mobilität benötigen. Gestützt und getrieben werden diese Visionen von der gegenwärtigen rasanten Entwicklung der Teilnehmerzahlen im Internet und den Mobilfunknetzen sowie der Installation breitbandiger Zugangsnetze und dem verstärkten Angebot an multimedialen Inhalten (siehe Kapitel 1.1.3 und 1.2.3). Diese Trends laufen nicht parallel nebeneinander her, sondern es ist eine klare Konvergenz erkennbar. Aus dienstspezifischen Netzen werden Plattformen für den Datentransport [102], Dienste werden netzunabhängig nachgefragt werden. Aus dem Satz an persönlichen Telekommunikationsdiensten, der heute bereits Realität ist, wird in Zukunft eine Vielzahl von persönlichen Multimediadiensten, die unabhängig von Zeit, Ort oder Zugangsnetz in der gewünschten Qualität bereitgestellt werden müssen.

So ist zum Beispiel durchaus die Vorstellung realistisch, daß Pendler auf dem Heimweg ihre persönlich zusammengestellte interaktive Zeitung mit den neuesten Nachrichten des Tages wünschen, aus der bei Bedarf auf Hintergrundberichte, aktuelle Videoclips aus Nachrichtensendungen und auf Webseiten für weiterführende Informationen zugegriffen werden kann; daß Notfallärzte bereits am Unfallort und auf dem Weg zur Klinik uneingeschränkten Zugriff auf Patientendaten und Röntgenbilder erhalten sowie zur Vorbereitung und Abstimmung weiterführender Behandlungsmaßnahmen eine Videokonferenz mit dem OP-Team schalten können, das dazu in Echtzeit eine vollständige Übersicht der von den medizinischen Bordgeräten gelieferten Lebensdaten des Patienten präsentiert bekommt; daß der Lenker eines Fahrzeugs ein Telefongespräch in exzellenter Sprachqualität führen kann, während gleichzeitig sein Navigationssystem den aktualisierten Straßenplan der angesteuerten Stadt samt neuestem Verkehrslagebericht zur intelligenten Routenfindung lädt, sein Autoradio mit den neuesten Musikclips aus einem Abonnementservice bestückt wird und seine Familie im Fonds des Wagens per virtueller Tour der Online-Touristeninformation be-

reits die Stadtbesichtigung und den Museumsbesuch vorbereitet; daß ein Wissenschaftler auf Konferenzreise im Zug sitzend seine Präsentation überarbeitet und mit den neuesten Ergebnissen vom Server seines Instituts ergänzt, während er die aktuellsten Veröffentlichungen seiner Gesprächspartner und den neuen Science-Fiction-Film 'Star Trek X' lädt, mit denen er den Abend im Hotel gestalten will und dazwischen ein Bewerbungsvideo samt Antragsschrift für ein Projekt geschickt bekommt, für das er als Gutachter fungiert und zu dem er sich daraufhin noch die Liste der anderen Gutachter samt ihrer bisherigen Exposé von seinem Arbeitsplatzrechner zuhause anfordert.

Den Zugriff auf Informationen und Dienste, wann immer, wo immer gewünscht und in der notwendigen Qualität bieten zu können wird die bestimmende Anforderung an zukünftige Telekommunikationsnetze sein. Die Netze müssen entsprechende dienstunabhängige Plattformen realisieren [102]. Dienste werden netz- und technologieagnostisch von ihrer Oberfläche, dem 'look and feel', bestimmt sein, d.h. unabhängig von der Technologie des momentan verfügbaren Netzes sollen Dienste in der gewohnten Qualität und mit der gewohnten Benutzerschnittstelle nutzbar sein. Diese Dienste werden verschiedenste Medien und Informationsangebote interaktiv verknüpfen und entsprechend hohe Anforderungen an die Netze stellen.

Mobile Breitbandssysteme auf Basis der ATM-Vermittlungstechnik werden für diese Szenarien die notwendigen Datentransportfunktionen zur Verfügung stellen.

2.1.2 Aktuelle Entwicklungen

Am drahtlosen Zugang zu den Diensten der Breitbandnetze wird derzeit intensiv gearbeitet. Dafür existieren zwei grundsätzliche Varianten: für feste Endsysteme und für mobile Teilnehmer. Lösungen für feste Endsysteme werden beispielsweise auf Basis des Punkt-zu-Mehrpunkt-Richtfunks (Local Multipoint Distribution/Communication System LMDS/LMCS) realisiert [99]. LMDS-Systeme arbeiten in Deutschland in den Frequenzbereichen um 3,5 GHz und 26 GHz [187][188]. Sie benötigen eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger und erzielen entsprechend hohe Übertragungsraten. Mobilitätsunterstützende Funktionen sind dafür nicht vorgesehen. LMDS/LMCS und ähnliche Systeme werden im folgenden nicht weiter betrachtet.

Wesentlich aufwendiger sind Systeme mit mobilen Teilnehmern zu realisieren. Auch hier können nochmals zwei Kategorien unterschieden werden: die unidirektionalen digitalen Rundfunksysteme und die bidirektionalen breitbandigen Mobilfunknetze. Mit Digital Audio Broadcast DAB und Digital Video Broadcast DVB stehen neben den Rundfunk- und TV-Programmen auch Kanäle für die breitbandige unidirektionale Ausstrahlung von Datendiensten zur Verfügung [77][79][80]. Sie sind einerseits sehr gut geeignet für die gleichzeitige Aussendung von Inhalten an viele Teilnehmer. Andererseits können sie auch mit anderen Mobilfunk-

systemen zu Transportarchitekturen für neuartige Dienste verknüpft werden [16][17][78]. Auch diese Systeme werden im folgenden nicht berücksichtigt. Im Fokus dieser Arbeit liegen die bidirektionalen Breitbandssysteme mit mobilen Teilnehmern.

Schwankende Ausbreitungsbedingungen für das Funksignal, Akkubetrieb mit notwendigerweise niedrigen Sendeleistungen, Interferenzen, Dopplereffekte und die für hohe Datenraten notwendigen breiten Frequenzbänder und spektrale Effizienz stellen in diesen Systemen sehr hohe Anforderungen an die Funkübertragungstechnik. Hinzu kommen die Funktionen für Mobilitätsmanagement und Handover, die umfangreiche Erweiterungen der festen Infrastruktur bedingen.

Funkübertragungs- und Vermittlungsverfahren für mobile Breitbandkommunikation werden seit mehreren Jahren in einer Reihe von Forschungs- und Standardisierungsprojekten weltweit entwickelt. Dazu zählen einerseits die Projekte zur Erschließung neuer Frequenzbereiche (z.B. 5 GHz, 17 GHz, 40 GHz, 60 GHz) für hochbitratige Übertragung [181]. Andererseits gehören dazu zahlreiche Systementwürfe und Vorschläge zur Weiterentwicklung oder Erweiterung bestehender Systeme. Diese beinhalten neben drahtlosen lokalen Netzen vor allem die drahtlose/mobile Erweiterung der ATM-Vermittlungsverfahren. Die wichtigsten Großprojekte/Gruppen sind in Tabelle 2.1 zusammengefaßt.

Tabelle 2.1: Forschung und Standardisierung für Mobile ATM

Bereich	Gruppe	Projekt
Standardisierung	ETSI	BRAN/HIPERLAN 2
	IEEE	802.11
	ATM Forum	WATM Working Group
Nationale/öffentlich geförderte Forschung	Deutschland (BMFT)	ATM mobil
	Japan	MMAC
Internationale Forschung	ACTS	AWACS, Magic WAND, MEDIAN, SAMBA
	RACE II	MBS
Industrie	Olivetti	RATM
	NEC	WATMnet, SEBRA
	AT&T	BAHAMA, SWAN

In Europa wurden mobile Breitbandssysteme im Rahmen von RACE II und ACTS erforscht. Schlüsselthemen wurden in folgenden Projekten bearbeitet:

- Mobile Broadband System MBS [86][213]
- ATM Wireless Access Communication System AWACS [201][202]
- Wireless Broadband CPN/LAN for Professional and Residential Multimedia MEDIAN [57][58]

- Wireless ATM Network Demonstrator WAND [44][60][83][95][101][103][122][123][140][151][153][154][27][89][97][88][148][149]
- System for Advanced Mobile Broadband Applications SAMBA [65][76][174][175][176]

Nationale, öffentlich geförderte Forschungsprojekte gibt es in Deutschland und in Japan:

- ATM mobil [41][61][67][68][96][126][129][203][214]
- Multimedia Mobile Access Communication MMAC [91][181][196][218]

Auch Hochschulinstitute und Industrie haben eine Reihe von Projekten gestartet:

- Olivetti mit RATM [37][161][179][180]
- NEC mit WATMnet und SEBRA [21][185][186][189][222]
- AT&T mit BAHAMA und SWAN [23][66][73][74][120][121][183][207]

Diese Projekte können grob in drei Gruppen unterteilt werden: Systeme mit ortsfesten Endgeräten, drahtlose lokale Netze für gering mobile Endgeräte und zellulare Systeme für mobile Teilnehmer. Die Mehrzahl der Projekte fokussiert auf ATM-basierte drahtlose LANs.

Dazu wurden insbesondere im Programm ACTS der EU neue Frequenzbereiche untersucht und geeignete Modulations-, Codierungs- und Medienzugriffsverfahren entworfen.

Im Projekt MEDIAN wurde ein breitbandiges, drahtloses LAN implementiert und untersucht. Multimediaanwendungen in einer Büroumgebung wurden demonstriert. MEDIAN ist eine drahtlose Erweiterung des ATM-Netzes und implementiert basierend auf einem adaptiven Mehrträgermodulationsverfahren eine 155 Mbit/s-Luftschnittstelle im Bereich 60 GHz. Die Endgeräte können bewegt werden, es sind allerdings keine Handovermechanismen vorgesehen.

Bei AWACS lag die Zielsetzung ähnlich, wobei dort auch intelligente Antennensysteme für räumliche Filterung eingesetzt wurden. Auch im Rahmen von AWACS wurde ein lokales System für drahtlose Bürokommunikation entworfen und in Feldversuchen ausgewertet. Dafür wurde der Frequenzbereich bei 19 GHz genutzt und eine Datenübertragungsrate von 34 Mbit/s realisiert. Die Reichweite der Basisstation liegt im Bereich von 50 bis 100 m. Die Ergebnisse des Projektes AWACS flossen bei ETSI RES10/BRAN in die Standardisierung von HIPERLAN mit ein.

Ebenfalls ein lokales System ist das im Projekt Magic WAND betrachtete. Bei WAND wurden die Frequenzbereiche 5 GHz und 17 GHz untersucht. Das System besteht aus einer ATM-Vermittlungseinheit und zwei Basisstationen. Es läßt einen geringen Grad an Mobilität zu und bietet die Möglichkeit, eine einfache Form des Handover zu studieren. ATM-Zellen werden bei WAND auf der 5 GHz-Luftschnittstelle mit 25 Mbit/s und auf der 17 GHz-Luftschnittstelle mit bis zu 50 Mbit/s übertragen. Applikationsszenarien umfaßten Multimediakonferenzen in Büroumgebungen oder medizinische Anwendungen im Klinikumfeld.

Im europäischen Programm RACE II war mit dem Mobile Broadband System MBS bereits Anfang der 90er Jahre die Idee eines breitbandigen Mobilfunknetzes geboren worden. Neben den entsprechend hohen Datenraten sah das MBS-Konzept vor allem auch uneingeschränkte Mobilität vor. In Fortführung des MBS-Vorschlages haben die genannten ACTS-Projekte unterschiedliche Technologien für die Realisierung der breitbandigen Luftschnittstelle vorgeschlagen und untersucht. Im ACTS-Projekt SAMBA kommt zusätzlich zur Untersuchung des Frequenzbereiches um 40 GHz nun auch noch die in MBS bereits geforderte Mobilitätsunterstützung hinzu. Ziel von SAMBA ist es, Übertragungstechnologien für das 40 GHz Band zu entwickeln und damit ein zellulares Breitbandsystem mit transparenten ATM-Verbindungen über die Luftschnittstelle zu demonstrieren. In diesem zellularen System sind mobile Endsysteme mit einer Geschwindigkeit bis zu 50 km/h bei Datenraten bis 34 Mbit/s möglich und Handover der ATM-Verbindung von einer Basisstation zur nächsten wird unterstützt.

Die gesamte in ACTS entstandene Familie von WATM-Demonstratoren wird im Projekt ATMmobil des deutschen Bundesministeriums für Forschung und Technologie vertiefend weiterentwickelt. Vier Konsortien mit Vertretern aus Hochschulinstituten, Forschungszentren und der Industrie bearbeiten jeweils ein Teilprojekt. Die Teilprojekte beschäftigen sich mit Wireless LAN, breitbandigem Punkt-zu-Mehrpunkt-Richtfunk und einem zellularen WATM-System. In einem vierten Projekt wird der Einsatz von intelligenten Antennensystemen für die adaptive Abstimmung zwischen Datenrate und Mobilität untersucht, um einen weiten Bereich an breitbandigen Diensten flexibel in einem System anbieten zu können. Das zellulare WATM-System des ATMmobil-Projektes verwendet für die Luftschnittstelle das Frequenzband bei 5 GHz und liefert etwa 20 Mbit/s Datenübertragungskapazität. Bei einer maximalen Spitzensendeleistung von 1 W werden Zellen von ca. 50 m Durchmesser realisiert. Die erlaubten Geschwindigkeiten der Mobilstationen sind entsprechend niedrig im Bereich von wenigen Metern pro Sekunde.

Eines der am weitesten fortgeschrittenen industriellen WATM-Entwicklungsprojekte hat die NEC in USA aufgelegt. Das WATMnet-System der NEC wurde bereits im Sommer 1999 in Kooperation mit dem schwedischen Betreiber Telia in einem Feldversuch getestet. Dieses Projekt Semi-mobile Broadband Radio Access SEBRA bot 25 Mbit/s Datenübertragungsrate bei eingeschränkter Mobilität für Anwendungen in Bürogebäuden, Fabrik- und Hochschulgebäuden und öffentlichen Plätzen mit hoher Nutzerdichte ("traffic hot spots").

Ähnlich detailliert angelegt ist das Projekt SWAN der AT&T, das eine vollständige Architektur eines öffentlichen drahtlosen ATM-Netzes untersucht. Alle Aspekte vom Entwurf der Verfahren zur Mobilitätsunterstützung (Handover, Wegewahl, Lokalisierung) über die Technologien der Luftschnittstelle (Codierung, Medienzugriff, Signalverarbeitung) bis hin zu Implementierungsfragen und Fragen der Gestaltung von Endsystemen wurden adressiert.

Das SWAN-Projekt realisierte einen Prototypen zur drahtlosen Vernetzung eines Bürogebäudes. Die typische Zellengröße betrug wenige Meter (typischerweise einzelne Büros) und die verfügbare Datenrate lag im Bereich von einigen Hundert Kilobit pro Sekunde. Dagegen ist das BAHAMA-Konzept der AT&T ausschließlich als ATM-basiertes LAN mit Mobilitätsunterstützung ausgelegt.

Der Großteil der oben beschriebenen Projekte befasst sich also mit der drahtlosen Erweiterung des Asynchronen Transfermodus ATM. Ihre Ergebnisse fließen direkt in Produkte und Standards ein. Die bedeutendsten Standardisierungsgruppen sind dabei ATM Forum, ETSI und IEEE.

Im lokalen Bereich existiert bereits eine in Produkten verfügbare breitbandige Lösung für das drahtlose Ethernet. Sie basiert auf dem Standard 802.11 des IEEE und arbeitet im unlizenziierten Band bei 2,4 GHz. Systeme nach 802.11 bieten 2 Mbit/s Übertragungskapazität, eine zunächst nur proprietär verfügbare Weiterentwicklung realisiert 11 Mbit/s und wurde vor kurzem ebenfalls standardisiert [106][108]. Außerdem werden bei IEEE 802.11 Technologien zur Nutzung des Frequenzbandes im Bereich 5,2 GHz entwickelt und standardisiert, womit dann Datenraten bis zu 54 Mbit/s realisiert werden sollen [107].

Zwei weitere momentan laufende Standardisierungsprojekte sind das High Performance Radio LAN HIPERLAN im Rahmen des Forum Broadband Radio Access Network BRAN des ETSI und Wireless ATM WATM des ATM Forum [36][81][82][98][165]. Insbesondere in der engen Zusammenarbeit zwischen ETSI (Radio Access) und ATM Forum (Systemdefinition und Handover-/Vermittlungsverfahren) entsteht derzeit ein System, das hochbitratigen Funkzugriff mit allen Merkmalen der ATM-Vermittlung kombiniert und den Wireless ATM Standard der ersten Generation (WATM Capability Set 1) definiert. Die Ergebnisse der meisten übrigen Projekte werden dort als Beiträge im Standardisierungsprozeß berücksichtigt.

HIPERLAN ist eine breitbandige Technologie für das lokale Zugangnetz und existiert in vier Varianten: Type 1, Type 2, Type 3 oder HIPERACCESS und Type 4 oder HIPERLINK. HIPERLAN Type 1 ist ähnlich IEEE 802.11 ein Standard für drahtloses Ethernet, der allerdings im Gegensatz zu 802.11 noch nicht in Produkten verfügbar ist. HIPERLINK ist für drahtlose Punkt-zu-Punkt ATM-Übertragung vorgesehen und HIPERACCESS bietet einen Punkt-zu-Mehrpunkt-Netzzugang für ortsfeste Stationen. Die Systeme nach HIPERLAN Type 2 sind spezifisch für die drahtlose Übertragung von ATM-Verbindungen entworfen. Sie arbeiten in einem 23,5 MHz breiten Teil des Spektrums im Bereich 5,2 GHz. Bei einer Bitfehlerhäufigkeit von $BER=10^{-4}$ wird die physikalische Nettodatenrate, die dem Nutzer zur Verfügung steht, im Bereich 20 – 25 Mbit/s liegen. Für eine weitere Verbesserung der Bitfehlerperformance wird ein Protokoll der Sicherungsschicht mit einem ARQ-Verfahren zur Wiederübertragung fehlerhafter Protokolldateneinheiten sorgen. Die effektive abgestrahlte Sendeleistung

soll bei HIPERLAN in der Größenordnung von 100 mW liegen und damit Funkzellen mit einer Größen von einigen 10 (Indoorbereich) bis wenigen 100 (Outdoorbereich) Metern möglich machen. Bei einem HIPERLAN-System wird entsprechend von einem Pikozellennetz gesprochen. Solch ein System kann in einer begrenzten Umgebung für öffentliche oder private Netze eine geschlossene Funkversorgung anbieten.

Die Arbeitsgruppe WATM des ATM Forums wurde Mitte 1996 gegründet. Eine erste Version der Spezifikation, das WATM Capability Set 1, wurde 1999 fertiggestellt und befindet sich in der ersten Abstimmungsrunde [36]. Für WATM wurden zwei Arbeitsbereiche definiert: einerseits die Entwicklung der Technologie zur Funkübertragung von ATM-Zellen und andererseits die Mobilitätsunterstützung im ATM Festnetz [63]. Entsprechend ist die Arbeit der WATM-Gruppe des ATM Forums in zwei Schwerpunkten organisiert:

- Funkzugang (Physik, Medienzugriff, Sicherungsschicht und Ressourcenmanagement)
- Mobile ATM (Lokalisierung, Wegesuche, Handover, Verkehrssteuerung, Netzmanagement)

Das ATM Forum hat dazu eine enge Zusammenarbeit mit dem ETSI etabliert. Die WATM Arbeitsgruppe kooperiert mit der BRAN-Gruppe, deren HIPERLAN Type 2 als physikalisches Medium für WATM vorgesehen ist. Die Aufgaben des Schwerpunktes Funkzugang im Rahmen der WATM-Standardisierung sind entsprechend der ETSI übertragen. Im ATM Forum selbst werden alle Funktionen des WATM-Festnetzes definiert. Dazu gehören die notwendigen Signalisierungs-, Steuerungs- und Vermittlungsfunktionen ebenso wie die Netzarchitektur und Algorithmen etwa für die Authentifizierung und die Verschlüsselung.

Hauptaugenmerk des WATM Capability Set 1 ist also eine lokale Umgebung mit wenigen Zellen und relativ geringer Mobilität. Mögliche Einsatzbereiche sind öffentliche Plätze und Firmengelände oder Bürogebäude mit einem entsprechend hoch konzentrierten Verkehrsaufkommen (traffic hot spots). Ein zelluläres System mit Handover von virtuellen ATM-Verbindungen ist allerdings vorgesehen, um auch (gering) mobile Teilnehmer unterstützen zu können.

Doch nicht nur Forschungsprojekte wie z.B. das oben erwähnte ACTS-Projekt SAMBA, sondern auch das ATM Forum denken noch einen Schritt weiter. Die uneingeschränkte Mobilität der Teilnehmer bei gleichzeitiger Nutzung breitbandiger Dienste ist die Vision für zukünftige Mobilfunksysteme, deren Leistungsumfang damit deutlich über das Niveau der 3G-Systeme hinausgeht. Sie werden entsprechend auch als Systeme der vierten Generation oder 4G-Systeme bezeichnet. Diese Hochleistungsversion von WATM wird breitbandige Transportdienste für Multimediaanwendungen auch für hochbewegliche Endsysteme bereitstellen.

Eine der größten Herausforderungen dabei ist, genügend leistungsfähige Verfahren für den Handover der ATM-Verbindung von einer Basisstation zur nächsten und für die Verbindungs-

nachführung im Netz zu implementieren [23]. Wegen der geringen Sendereichweite der WATM-Basisstationen und der entsprechend kleinen Funkzellen ist eine hohe Handoverrate zu erwarten. Das bedeutet zum einen hohen Handover-Signalisierungsverkehr in den Vermittlungseinrichtungen des ATM-Festnetzes und zum anderen eine hohe Quote von Handoverereignissen je Verbindung. Darüber hinaus muß ein WATM-Handoververfahren in der Lage sein, flexibel die Qualitätsanforderungen der jeweiligen ATM-Verbindung zu erfüllen. Dazu sind Echtzeitbedingungen und Grenzen für die Zellverlusthäufigkeit einzuhalten. Das Verfahren sollte möglichst frühzeitig eine Handoversituation erkennen und dann ohne Verzögerung auch die Übergabe der Verbindung einleiten, da häufig am Rand einer Funkzelle bei den in Frage kommenden Frequenzbereichen (5 GHz, 17 GHz, 19 GHz, 40 GHz, 60 GHz etc.) sehr schwierige Ausbreitungsbedingungen herrschen. Diese werden im folgenden näher erläutert.

2.2 Funk subsystem und Zonenkonzept

Die Funkschnittstelle von WATM-Systemen besitzt einige Eigenschaften, die auf den Entwurf von Vermittlungsprotokollen großen Einfluß ausüben. Der Stand der Forschung bezüglich dieser Eigenschaften wird im folgenden zusammengefasst. Insbesondere in europäischen Projekten wurden Funkkanäle im Bereich 5 GHz, 17 GHz, 19 GHz, 40 GHz und 60 GHz vermessen [181]. Im Projekt Magic WAND wurden darüber hinaus auch Modelle aus den Messungen abgeleitet. Diese Modelle umfassen sowohl stochastische Modellierungen der Kanalimpulsantwort [89][97] als auch auf Markov-Ketten basierende Zustandsmodellierungen und davon abgeleitete direkt für Simulationen auf ATM Zellenebene verwendbare Fehlermodelle [148].

In Kapitel 2.2.1 werden die Ergebnisse von Kanalmessungen und die wesentlichen Eigenschaften der Ansätze für WATM-Funkübertragungstechnik vorgestellt. Ein konkretes Modell für den WATM-Funkkanal wird dann in Kapitel 2.2.2 beschrieben und zur Formulierung einzelner Szenarien genutzt.

2.2.1 Funkschnittstelle

Für die Entwicklung von mobilen Breitbandssystemen ist es notwendig, neue Frequenzbereiche zu erschließen, in denen einerseits genügend große freie Bänder reserviert und andererseits internationale Harmonisierung erreicht werden kann. Um die hohen angestrebten Datenraten realisieren zu können, sind abhängig vom Modulations- und Zugriffsverfahren einige 10 bis mehrere 100 MHz breite Frequenzbänder notwendig [212]. Die drahtlosen Breitbandnetze sind also auch breitbandig sendende Systeme. Diese breiten Bänder stehen nur in bisher weitgehend ungenutzten Bereichen des elektromagnetischen Spektrums zur Verfügung.

Mit der Entwicklung der digitalen Mobilfunksysteme wurden auch umfangreiche Programme zur Vermessung der Mobilfunkkanäle aufgelegt. Diese lieferten zunächst vor allem die

Grundlage für die Entwicklung von GSM und UMTS [88]. Über die Frequenzen bis 2 MHz hinaus wurden dann auch die Bereiche der Millimeterwellen untersucht. Im Rahmen von unter anderem COST 231, MBS, ACTS und HIPERLAN wurden für die Frequenzbereiche von 5 GHz bis 60 GHz umfangreiches statistisches Material gesammelt und Modellierungen erarbeitet.

Ein zentrales Ergebnis der Messkampagnen ist, daß grundsätzlich die aus den Frequenzbereichen 900 MHz bzw. 1800 MHz bekannten Ausbreitungsmechanismen auch für diese Frequenzbereiche gelten und die Pfadverlustmodelle unverändert beibehalten werden können [88]. Wesentliche Eigenschaft der Kanäle im Millimeterwellenbereich ist aber eine höhere Freiraumdämpfung und eine um das zwei- bis zehnfach höhere Dämpfung in Wänden und Decken. Diese hohe Materialdämpfung führt zu entsprechend großen langsamen Schwankungen (langsame Fading). Solche Schwankungen entstehen bei Abschattungen etwa durch Personen oder Möbel, welche die direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger blockieren. Aufgrund der geringen Wellenlänge im Millimeterbereich führt die Mehrwegeausbreitung darüber hinaus auch zu sehr schnellen Kurzzeitschwankungen, dem schnellen Fading.

Tabelle 2.2: Kennzahlen von WATM-Kanälen im 5 GHz-Band [118][119]

Parameter	Bereich	Typ. Wert	Max. Wert
Reichweite	Indoor, NLOS	10 m - 60 m	
	Outdoor, LOS	200 m - 600 m	
	Outdoor, NLOS	30 m - 150 m	
Pfadverlust	alle	40 dB/Dekade	100 dB/Dekade
Pegeldifferenz LOS-NLOS-Übergang	alle	15 dB - 30 dB	50 dB
Steigung LOS-NLOS-Übergang	Indoor	3 dB/m - 10 dB/m	
	Outdoor	1 dB/m - 30 dB/m	

Explizit für Anwendungen in WATM-Systemen wurden im Rahmen des deutschen ATMmobil-Projektes Kanäle im Bereich 5 GHz (HIPERLAN-Band) vermessen [118][119]. Die Messungen betrachteten Szenarien innerhalb und außerhalb von Gebäuden. Die dabei ermittelten wichtigsten Kennziffern sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Die Reichweite und damit die Zellgröße hängt stark vom Vorhandensein einer direkten Sichtverbindung (Line-of-Sight LOS) zur Basisstation ab. Diese Sichtverbindung kann innerhalb von Gebäuden fast nie realisiert werden (Non-Line-of-Sight NLOS). Entsprechend wird dort eine Reichweite von 10 m bis maximal 60 m realisiert. Besteht außerhalb von Gebäuden eine Sichtverbindung, steigt die Reichweite auf 200 m bis maximal 600 m, ansonsten werden Zellradien von 30 m bis 150 m erzielt. Der Pfadverlust ist im Mittel etwa 40 dB pro Dekade, kann aber Werte bis 100 dB pro

Dekade erreichen. Extreme Situationen wurden ermittelt für den Übergang von einer Sichtverbindung zu einer Abschattungssituation, dem Wechsel von einer LOS- zu einer NLOS-Situation. Innerhalb kurzer räumlicher Distanzen sind bei diesem Übergang Pegeldifferenzen von typischerweise 15 dB bis 30 dB (maximal bis zu 50 dB) feststellbar. Diese Pegeldifferenz wird mit einer Steigung von 3 dB/m bis 10 dB/m innerhalb von Gebäuden und 1 dB/m bis 30 dB/m außerhalb von Gebäuden überwunden.

Neben diesen schwierigen Funkbedingungen kommen in WATM-Systemen für die Übertragungs- und Medienzugriffsprotokolle weitere neue Anforderungen hinzu. Die physikalische Übertragung muß neben hohen Datenraten mit möglichst geringer Fehlerhäufigkeit und niedriger Übertragungsverzögerung realisiert werden. Da meist die Fehlerkorrektureigenschaften der Kanalcodierung nicht ausreichen werden, um die Fehlerhäufigkeit genügend niedrig zu halten, ist der Einsatz eines leistungsfähigen Sicherungsprotokolls notwendig. Dieses Sicherungsprotokoll muß in Zusammenarbeit mit dem Medienzugriffsprotokoll in der Lage sein, unter Abbildung von QoS-Anforderungen der ATM-Verkehrsklassen (vgl. Tabelle 1.1) einen transparenten Transport von ATM-Zellen über die Luftschnittstelle zu realisieren [189]. Gleichzeitig ist zur effizienten Nutzung der Frequenzressourcen die Fähigkeit von ATM zum statistischen Multiplexen von ATM-Zellenströmen auf das verteilte System von Mobil- und Basisstationen abzubilden. Das erfordert einen hohen Koordinations- und Schedulingaufwand. Allerdings können nur so die spektralen Ressourcen einer Funkzelle gemeinsam von allen Mobilstationen genutzt und adaptiv dem jeweiligen Übertragungsbedarf entsprechend zugeteilt werden.

Eine ganze Reihe von Vorschlägen existiert bereits für die WATM-Luftschnittstelle [27][60][64][131][147][149][172][174][175]. Aufgrund der angestrebten hohen Datenraten werden wegen deren hohen spektralen Bandbreitenbedarfs keine CDMA-Verfahren eingesetzt. Stattdessen werden häufig dynamische Zeitmultiplex- und Zeitduplexverfahren vorgeschlagen. Diese erlauben eine flexible und anforderungsgesteuerte Vergabe von Ressourcen an die einzelnen Mobilstationen. Die Asymmetrie von Verkehrsbeziehungen kann damit genauso berücksichtigt werden wie der zeitlich schwankende Bedarf an Übertragungskapazität bei Diensten mit variabler Datenrate. Die Übertragung erfolgt in Datenbursts variabler Länge, welche eine oder mehrere ATM-Zellen enthalten können. Sämtliche Codierungs- und Interleavingmaßnahmen sind entsprechend bei diesen Verfahren auf die Grenzen jeweils eines Bursts beschränkt [126]. Zur Vorwärtsfehlerkorrektur werden z.B. leistungsfähige Reed-Solomon- oder Block-Codes eingesetzt, mit denen typischerweise eine Restbitfehlerhäufigkeit im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-6} erzielt wird [126]. Die von diesen Codes nicht korrigierbaren Übertragungsfehler werden meist mit einem ARQ-Protokoll detektiert und behoben. Diese ARQ-Verfahren sind adaptiv und berücksichtigen die QoS-Anforderungen der jeweiligen ATM-Verkehrsklasse. Die insgesamt resultierende Restbitfehlerhäufigkeit, die in den Pilot-

projekten erzielt wird, ist vergleichbar der Übertragungsqualität des ATM-Festnetzes [126]. Als Modulationsverfahren wurden bisher sowohl höherstufige Einträgerverfahren (z.B. Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying OQPSK oder Offset Quadrature Amplitude Modulation OQAM) als auch Mehrträgerverfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplex OFDM) erfolgreich in den WATM-Pilotsystemen implementiert [96][126][181].

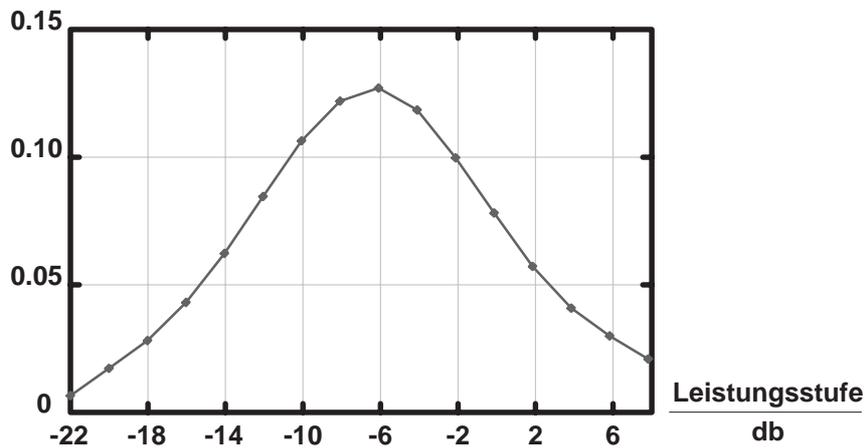
2.2.2 Funkkanalmodellierung

Die Vermessung und Modellierung von Funkkanälen hat meist die Bestimmung elementarer physikalischer Parameter und Profile zum Ziel. Dazu zählen Kanalimpulsantwort, räumliche und zeitliche Dispersion, Pfadverlustmodelle (propagation/path loss modelling), Leistungs-Verzögerungs-Richtungs-Profil (Power Delay-Direction Spectrum PDDS, Field Direction Delay Spread Function FDDSF) sowie Modelle und Statistiken für schnellen und langsamen Schwund [88][89][91][97]. Die aus solchen Messungen ermittelten Modelle dienen dazu, die Ausbreitung des Funksignals vorherzusagen oder Algorithmen und Verfahren der Funkübertragung (Signalverarbeitung, Entzerrung, Modulation, Codierung etc.) zu entwerfen und zu untersuchen. Der Rechenaufwand für solche Modelle und die mit ihnen angestellten Untersuchungen ist erheblich, so daß sie für Systembetrachtungen auf Rufebeine oder für Protokollanalysen nur sehr eingeschränkt einsetzbar sind. Für diese Bereiche werden häufig generative Bit- oder Zellfehlermodelle eingesetzt [1][2][72][90][93][194]. Die aufgrund der physikalischen Kanaleigenschaften sich ergebende Bitfehlerstatistik wird dabei basierend auf Markov-Ketten modelliert. Der stochastische Prozess des Markov-Modells kann dann als Zufallsgenerator für Bit- oder Zellfehler zur performanten System- oder Protokollanalyse in Simulationen verwendet werden.

Auf Messungen basierende Modelle der für WATM in Frage kommenden Funkkanäle bei 5 GHz und bei 17 GHz wurden im ACTS-Projekt Magic WAND erarbeitet [89]. Gleichzeitig wurde dort für Protokolluntersuchungen ein Modell basierend auf einem Semi-Markov-Prozess mit endlicher Zustandszahl entwickelt [148]. Die Werte einer großen Zahl gemessener Kanalimpulsantworten liefern eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der empfangenen Leistungsstufen unter den Funkbedingungen des WATM-Kanals. Der kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsprozess der Empfangsleistung wurde bei WAND in Schritten von 2 dB in 16 Stufen von -22 dB bis +8 dB quantisiert. Die stationäre Verteilung dieses diskreten Prozesses zeigt Abb. 2.1 zusammen mit der Markov-Kette des diskreten Kanalmodells. Das spezifische Modell aus Magic WAND besitzt $m=16$ Zustände. Jeder Zustand i korrespondiert mit einer Leistungsstufe P_i der quantisierten Kanalimpulsantwort. Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten $p_{i,j}$ werden anhand der Überschreitungsraten der Leistungsstufen (level crossing rate) ermittelt. Zustandsübergänge sind unter der Voraussetzung genügend kleiner Abtastin-

tervalle entsprechend dem abschnittsweise monotonen Verlauf des Empfangssignals nur von einem Zustand in den unmittelbar vorhergehenden oder nachfolgenden Zustand erlaubt, d.h. $p_{i,j}=0$ für $|i-j|>1$ und $p_{i,i}=0$ [148].

Rel. Häufigkeit



Semi-Markov Modell

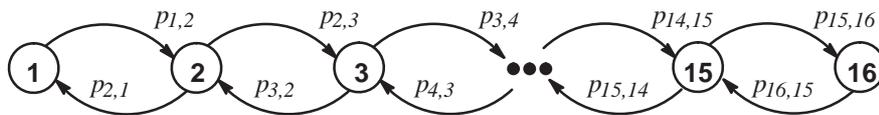


Abb. 2.1: Stationäre Wahrscheinlichkeitsdichte der Leistungsstufen und Zustandsdiagramm des Semi-Markov-Prozesses

Die Zustandsübergangsmatrix \mathbf{P} der eingebetteten Markovkette, die dem Semi-Markov-Prozess zugrunde liegt (embedded markov chain), besitzt folglich eine diagonale Bandstruktur:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & p_{2,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ p_{1,2} & 0 & p_{3,2} & & \dots & \dots & \dots \\ 0 & p_{2,3} & 0 & & 0 & & \\ & 0 & p_{3,4} & & p_{m-2,m-3} & 0 & \\ & & 0 & & 0 & p_{m-1,m-2} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & & p_{m-2,m-1} & 0 & p_{m,m-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p_{m-1,m} & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Da es sich um einen Semi-Markov-Prozess handelt, beschreibt diese Markov-Kette nur die Übergänge zwischen den Zuständen. In einem separaten Zufallsprozess wird die Zeit ermittelt, die in einem Zustand verbracht wird. Diese Zustandshaltedauer (state holding time) ist

für die gemessenen Kanäle nahezu unabhängig vom momentanen Kanalzustand. Eine Erlang-2-Verteilung beschreibt die Verteilung der Zustandshaltedauer τ aller Zustände in Näherung mit ausreichender Genauigkeit [148]:

$$f_n(\tau) = \lambda \frac{(\lambda\tau)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda\tau}, \quad n = 2 \quad (2)$$

Basierend auf der Markovkette aus dem Semi-Markov-Prozess und der Kanalzustandshaltverteilung kann nun der schnelle Schwund des Empfangssignals simuliert werden. Das Modell wurde in einer C++-Klasse implementiert und mit den Parametern aus [148] instantiiert (siehe Anhang A). Einen typischen Verlauf der Schwankungen des Leistungspegels zeigt Abb. 2.2, so wie er von diesem Simulator erzeugt wurde. Die Mobilstation bewegt sich in diesem Szenario mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s und konstantem Abstand von der Basisstation. Man erkennt deutlich die sehr kurzen und tiefen Fadinglöcher sowie die durch Änderungen in der Ausbreitungssituation entstehenden Abschattungen, beispielsweise zwischen $t = 25$ s und $t = 30$ s.

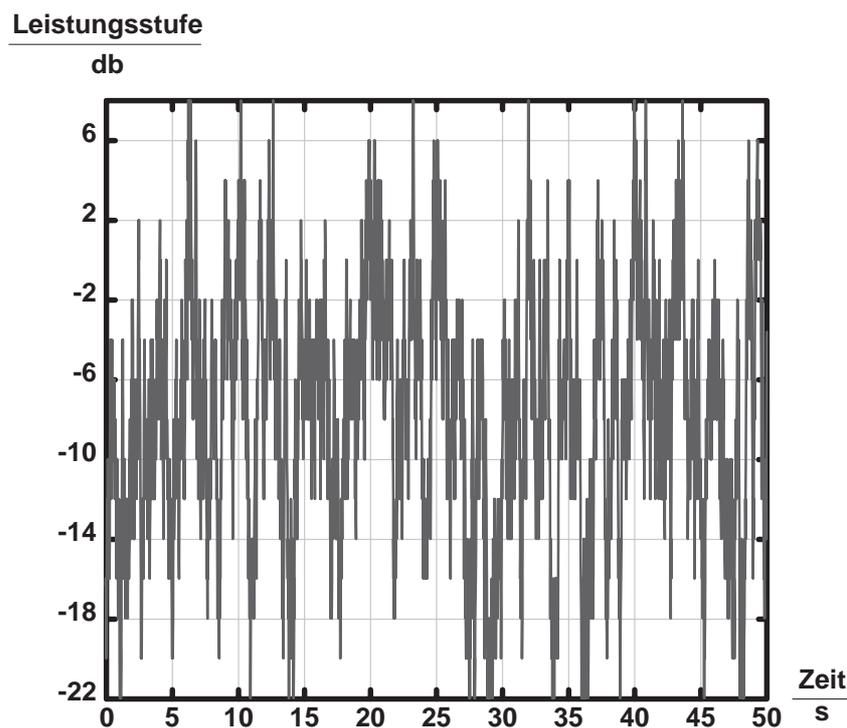


Abb. 2.2: Schneller Fadingprozess

Für Protokolluntersuchungen ist nicht nur die Kenntnis der Eigenschaften des Funkkanals, sondern auch Wissen über das Verhalten der physikalischen Übertragungsverfahren notwendig. Entsprechend muß aus der Schwundstatistik des Funkkanals eine Bit- oder Zellfehlerstatistik abgeleitet werden. Diese gibt die Restfehlerhäufigkeit an, mit der Protokolldateneinheit

ten der betrachteten Protokolle in der jeweiligen Funksituation übertragen werden können. Mit diesen Fehlerstatistiken ist eine realistische Leistungsanalyse der Protokolle unter dem Einfluß des Funkkanals und seiner Eigenschaften direkt möglich.

Grundlegendes Maß für weitere Betrachtungen ist das Signal-Geräusch-Verhältnis SNR, in Abhängigkeit dessen die Fehlerhäufigkeit üblicherweise angegeben wird. Für die Berechnung des momentanen SNR S_i im Zustand i des Kanalmodells können im Fall des WAND-Funkkanals wegen des konstanten Leistungsdichtespektrums des dort eingesetzten OFDM-Verfahrens die momentane Leistungsstufe P_i des Schwundmodells und das momentane mittlere SNR \bar{S} addiert werden [148]:

$$S_i = \bar{S} + P_i \quad (3)$$

In das mittlere SNR fließt der Pfadverlust ein (Abb. 2.3), der mit etwa 40 dB pro Dekade regelmäßig verläuft. Dieses Pfadverlustmodell wurde im Rahmen des ACTS-Projektes Magic WAND durch umfangreiche Messungen und Simulationen bestätigt [97]. Basierend auf der Kombination von Schwundmodell und Pfadverlustmodell ist nun die Bestimmung des momentanen SNR möglich, sofern Interferenzen vernachlässigt werden. Da diese nur den speziellen Fall eines entsprechend Gleichung (3) verringerten SNR darstellen, sind sie gegebenenfalls leicht zu berücksichtigen.

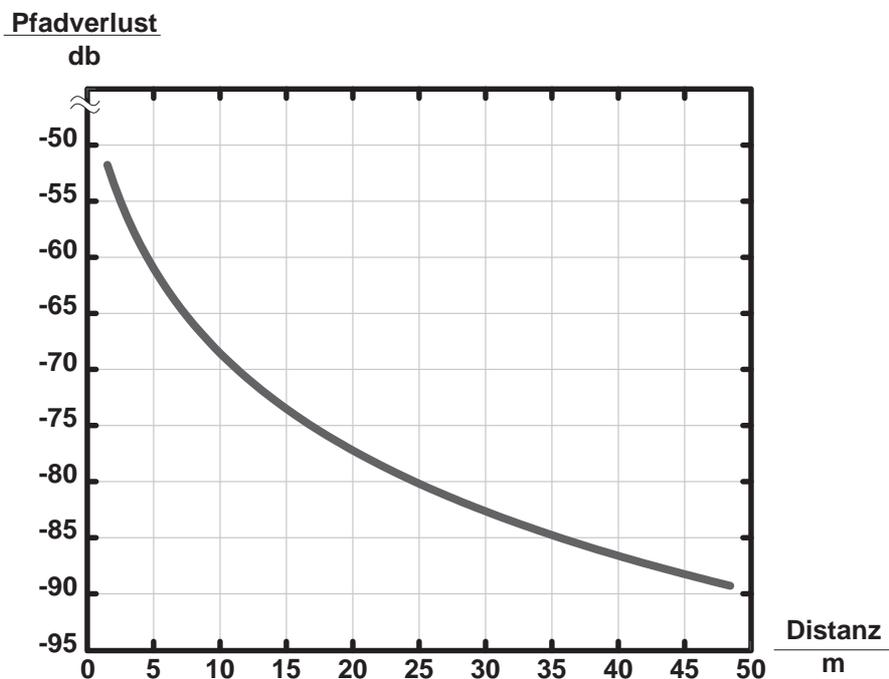


Abb. 2.3: Absoluter Pfadverlust für Indoor-Szenario

Das momentane Signal-Geräusch-Verhältnis S_i kann bei genauer Kenntnis der Eigenschaften der physikalischen Übertragungsverfahren (Modulation, Codierung, Interleaving, Entzer-

rung etc.) direkt in eine Restfehlerhäufigkeit umgerechnet werden. Diese Berechnung sind jedoch mitunter äußerst komplex und gelingen meist nur unter Näherungsannahmen. Ein anderer Weg ist, eine Restfehlerkennlinie des physikalischen Übertragungssystems aufzuzeichnen. Insbesondere für simulative Untersuchungen ist das Kennlinienverfahren eine attraktive Variante, weil es tabellenbasiert besonders effizient und mit sehr geringem Bearbeitungsaufwand implementiert werden kann. Eine entsprechende Fehlerkennlinie wurde für die physikalische Schicht des WAND-Demonstrators aufgenommen [148]. Sie beinhaltet alle Eigenschaften des Modulationsverfahrens und der Fehlerkorrektur. Für den momentanen SNR-Wert kann direkt die momentane Zellfehlerwahrscheinlichkeit abgelesen werden. Bei geschickter Implementierung kann so das generative Kanalzustandsmodell basierend auf dem Semi-Markov-Prozess direkt die Generierung von Zellfehlern im ATM-Zellenstrom der WATM-Luftschnittstelle übernehmen.

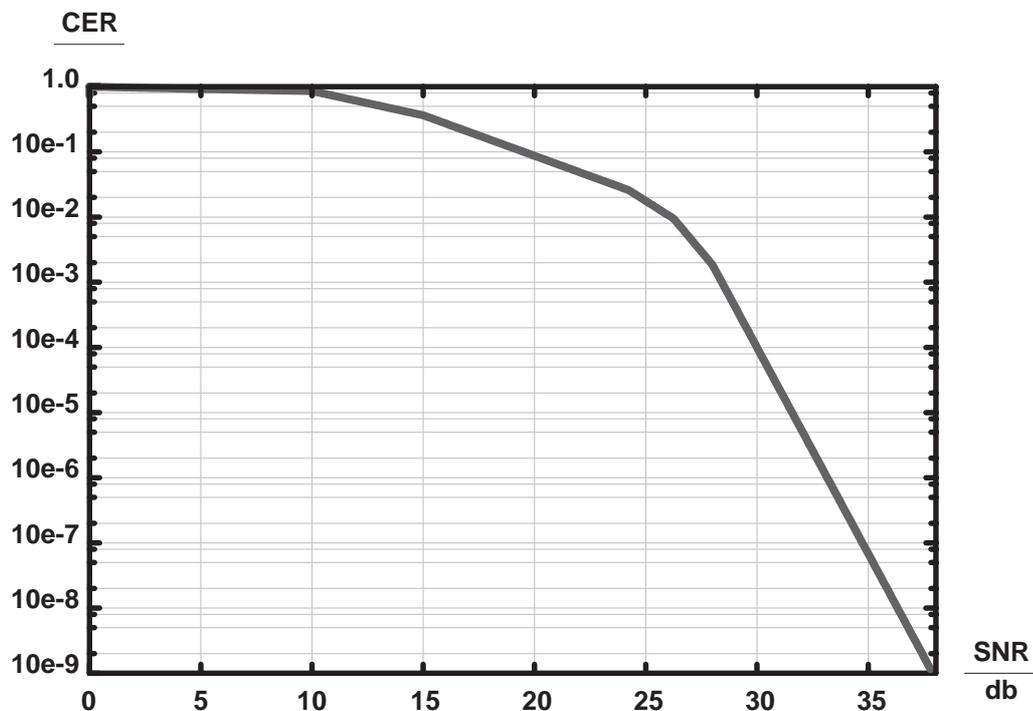


Abb. 2.4: Zellfehlerhäufigkeit in Abhängigkeit vom SNR

2.2.3 Funkkanalszenarios für die Protokollbeurteilung

In Kapitel 2.2.2 wurden die statistischen Eigenschaften eines WATM-Funkkanals und ein entsprechendes generatives Kanalfehlermodell beschrieben. Diese Eigenschaften sind bestimmt durch die über langfristige Messungen hinweg ermittelten Parameter des betrachteten Funkkanals. Dazu gehören die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Kanalzuständen, der Ausbreitungsverlust und die resultierende Zellfehlerhäufigkeit. Diese Parameter beschreiben das stationäre statistische Verhalten des Funkkanals.

Darüber hinaus werden häufig besondere Szenarios definiert. Szenarios sind ausgehend von realistischen Annahmen konstruierte hypothetische Situationen oder Abfolgen von Ereignissen, welche die Betrachtung von kausalen Zusammenhängen erlauben. In der Betrachtung von Funkkanälen werden in Szenarios häufig bestimmte Umgebungssituationen erfaßt wie beispielsweise beim Indoor-/Outdoor-Szenario oder beim LOS-/NLOS-Szenario. Diese Betrachtungen wurden auch bei der Vermessung von WATM-Funkkanälen angestellt wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Dabei wurden die wichtigsten physikalischen Parameter wie Reichweite des Sendesignals, Ausbreitungsdämpfung und Pegeldifferenz beim LOS-NLOS-Übergang bestimmt. Für die Beurteilung von Signalisierungs-/Steuerungsprotokollen sind allerdings spezifischere Szenarios notwendig.

Diese Szenarios zur Protokollbeurteilung müssen geeignet sein, einzelne Abläufe des Protokolls zu studieren und dabei das Verhalten des Protokolls meßbar zu machen. Sie stellen Kanalmodell und Umgebungsparameter in typischen Situationen zusammen, die für das jeweilige System charakteristisch sind. Für diese charakteristischen Situationen sind Steuerungsprotokolle entworfen worden und dafür muß deren Funktion, Korrektheit, Stabilität nachgewiesen und ihre Leistungsfähigkeit gemessen werden. In geeigneten Szenarios kann also eine bereits spezifizierte und formal verifizierte Protokolllogik mit Anforderungen und Fehlermustern des physikalischen Kanals in einem integralen Modellsystem untersucht werden. Um diese Szenarios zu definieren, müssen die typischen Situationen identifiziert und die Parameter entsprechend zusammengestellt werden.

Für die Untersuchung von Handoversituationen ist es zunächst notwendig, die Situation einer Mobilstation zwischen zwei Basisstationen zu modellieren. Die momentan aktive oder auch alte Basisstation ist die, über welche mit einer momentan aktiven Funkverbindung die Verbindungen der ATM-Schicht geführt und Nutzdaten transportiert werden. Die neue Basisstation ist diejenige, die aufgrund der momentanen Funkbedingungen für einen Handover in Frage kommt. Auf diese Basisstation werden im Falle eines Handovers die Verbindungen der ATM-Schicht umgeschaltet. Zur Definition eines Handover-Szenarios ist die Beobachtung beider Signalverläufe, der Funkverbindung zur alten und neuen Basisstation, notwendig.

Das hervorstechende Merkmal der WATM-Funkkanäle ist die quasi-optische Ausbreitung des Funksignals. Damit einher gehen harte Übergänge von Line-of-Sight- zu Non-Line-Of-Sight-Situationen. Das Linkbudget einer WATM-Funkzelle wird stets auf die vorhandene oder nicht vorhandene Sichtverbindung abgestimmt sein. In der Praxis werden voraussichtlich nur Funkzellen vorkommen, in denen entweder eine Sichtverbindung zur Basisstation gewährleistet ist oder die Zellengröße entsprechend klein gewählt ist.

Im NLOS-Fall wird die beispielsweise durch Reflexionen und Streuungen verursachte Mehrwegeausbreitung des Funksignals ausgenutzt, um auch ohne Sichtverbindung zur Basisstation eine Funkverbindung herzustellen. Die für WATM-Systeme vorgesehenen Frequenzbereiche schränken dabei die Reichweite deutlich ein (siehe Tabelle 2.2).

Der Verlust der Sichtverbindung mit dem dadurch verursachten drastischen Abfall des Signalpegels bedeutet in jedem Fall eine herausfordernde Handoversituation für die Mobilstation. In diesen Situationen muß das Signalisierungsprotokoll in der Lage sein, auch bei abruptem Verlust der momentanen Funkverbindung die Verbindungen der ATM-Schicht auf eine neue Basisstation umzuleiten, wenn ein Abbruch der Verbindungen vermieden werden soll. Die dazu notwendigen Signalisierungsinformationen werden dann über eine Funkverbindung mit der neuen Basisstation ausgetauscht (forward handover).

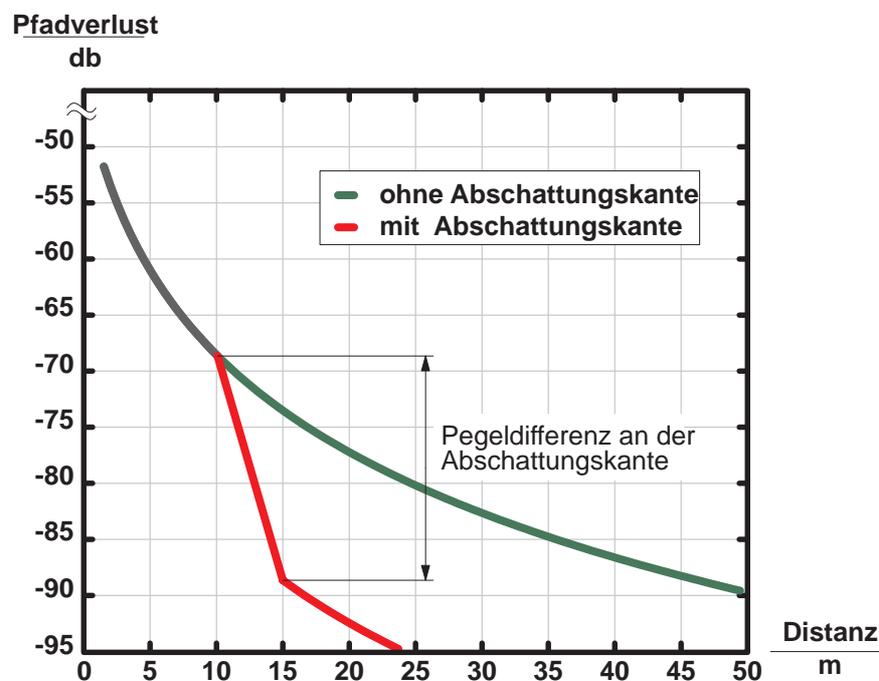


Abb. 2.5: Pfadverlust an der Abschattungskante

Der LOS-NLOS-Übergang ist damit ein wichtiges Szenario für WATM-Systeme. Dieser Übergang wird mit dem Modell einer Abschattungskante beschrieben, die in einer frei wählbaren Entfernung von der Basisstation positioniert sein kann. Bei Überschreiten dieser Abschattungskante wird der Pfadverlust um einen linear mit der Entfernung von der Basisstation steigenden Betrag vergrößert (Abb. 2.5). Die Steigung dieses linearen LOS-NLOS-Übergangs und die maximale Pegeldifferenz an der Abschattungskante sind die Parameter, die diesen zusätzlichen Beitrag zum Pfadverlust beschreiben. Da man sich die Abschattungskante bildhaft als Hausecke vorstellen kann, um die eine Mobilstation herumfährt und durch die

dann keine Sichtverbindung zur Basisstation mehr besteht, wird die Steigung im folgenden als Corner Shadow Factor CSF bezeichnet. Position der Abschattungskante, CSF und Pegeldifferenz sind neben der Position der Basisstationen, dem regulären Pfadverlustmodell und dem Modell für den schnellen Schwund die festzulegenden Komponenten für das Szenario mit Abschattungskante. Eine für dieses Szenario typische Situation ist in Abb. 2.6 dargestellt.

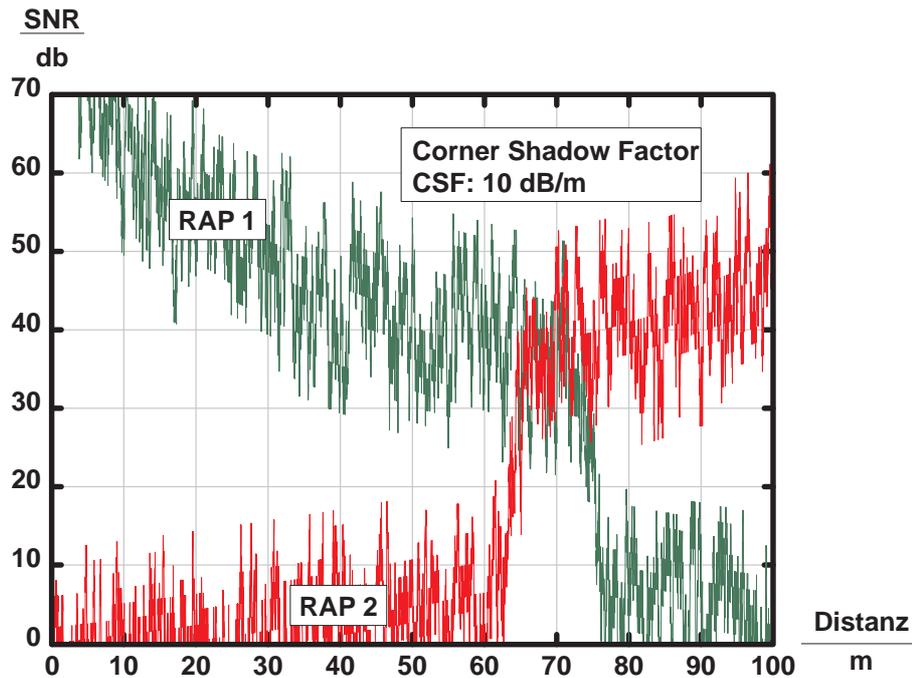


Abb. 2.6: Funksignale mit scharfer Abschattungskante

Die Signalverläufe wurden mit einer Implementierung des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Modells für den 5.2 GHz Kanal erzeugt und zeigen den Empfangspegel einer Mobilstation, die sich auf einer linearen Strecke von einer Basisstation (Radio Access Point RAP) entfernt und einer zweiten nähert. Die Signalqualität wird als Signal-Geräusch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio SNR) über der zurückgelegten Wegstrecke aufgezeichnet. Beide Signale zeigen das übliche schnelle Fading und den entfernungsabhängigen Ausbreitungsverlust, der hier etwa 30 dB pro Dekade beträgt. Im Bereich 60 Meter bis 75 Meter Entfernung von RAP 1 ist eine Abschattungskante vorhanden, die das SNR von RAP 1 schnell sinken und das von RAP 2 schnell ansteigen lässt. Der Faktor CSF ist mit 10 dB/m angenommen, die maximale Pegeldifferenz an dieser Abschattungskante beträgt 30 dB. Innerhalb kürzester Zeit bricht in dieser Situation die bestehende Funkverbindung zu RAP 1 weg, während kurz davor RAP 2 abrupt für die Mobilstation "sichtbar" geworden war. Anhand von Abb. 2.4 können die Auswirkungen dieser Abschattungskante ermittelt werden: wenn die Verbindung zu RAP 1 vor der Abschattungskante eine Zellfehlerhäufigkeit von etwa 10^{-6} aufweist, ist sie danach mit einer

Zellfehlerhäufigkeit von nahezu 1 vollkommen unbrauchbar, während auf einer Funkverbindung zu RAP 2 bereits wieder mit einer Zellfehlerhäufigkeit von 10^{-7} oder besser übertragen werden kann.

Ist der Signalverlauf beim Übergang von einer Funkzelle zur nächsten derart abrupt, muß der Handover über die neue Basisstation abgewickelt werden. Bei weniger abruptem Übergang kann der Handoverprozeß anders gestaltet werden. Dafür existieren grundsätzlich zwei Alternativen:

- die Übergabe der ATM-Verbindungen an die neue Basisstation wird über die momentane, noch existierende Funkverbindung vorbereitet und dann ausgeführt (Backward Handover).
- gleichzeitig zur momentan aktiven Verbindung wird eine parallele Funkverbindung zu der Basisstation aufgebaut, an welche die Verbindungen übergeben werden sollen, so daß für eine kurze Übergangsphase zwei Pfade aktiv sind, zwischen denen qualitätsabhängig dynamisch umgeschaltet werden kann (Soft Handover).

Das Funkkanalszenario bestimmt dann jeweils über Position der Basisstationen sowie Pfadverlust- und Fadingmodell die Handoversituation. Sind beide, die alte und die neue Basisstation, gleichzeitig mit ähnlich gutem Signalpegel empfangbar, besteht die Möglichkeit, den Backward Handover vorzubereiten oder eine zweite Verbindung für einen Soft Handover zu etablieren.

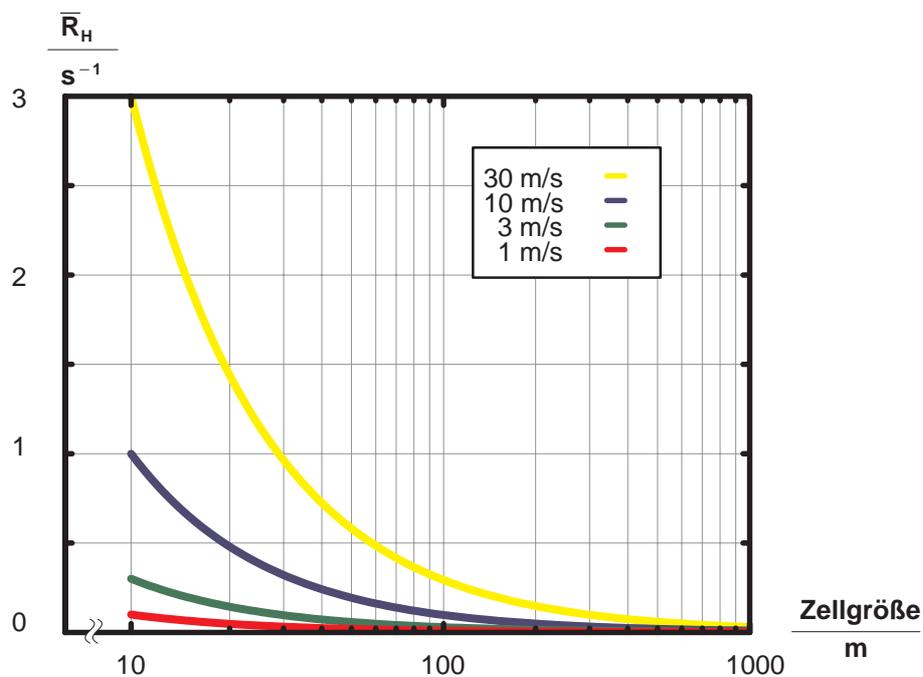


Abb. 2.7: Mittlere Handoverrate je Mobilterminal in Abhängigkeit von der mittleren Zellgröße

Aus dem Funkkanalszenario heraus ergeben sich auch Anforderungen an das Zeitverhalten der Handoverprotokolle. Eine einfache Abschätzung mit der mittleren Zellgröße und der mittleren Geschwindigkeit eines Mobilterminals liefert eine obere Grenze für die mittlere Handoverrate je Mobilterminal (Abb. 2.7). Dabei ist eine lineare Bewegung vorausgesetzt. Mittelwert und Varianz der Handoverrate sind von der Mobilität jedes Mobilterminals abhängig und können beträchtlich schwanken. Eine sehr lokale, brownische Bewegung innerhalb einer Zelle führt zu sehr niedrigen Handoverraten, während dasselbe Mobilitätsverhalten an der Grenze zwischen zwei Zellen zu einer lokal erheblich überhöhten Handoverrate führen kann. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, daß die Interhandoverintervalle in pikozellularen WATM-Systemen sehr niedrig sind und typischerweise in der Größenordnung von einer bis zehn Sekunden liegen.

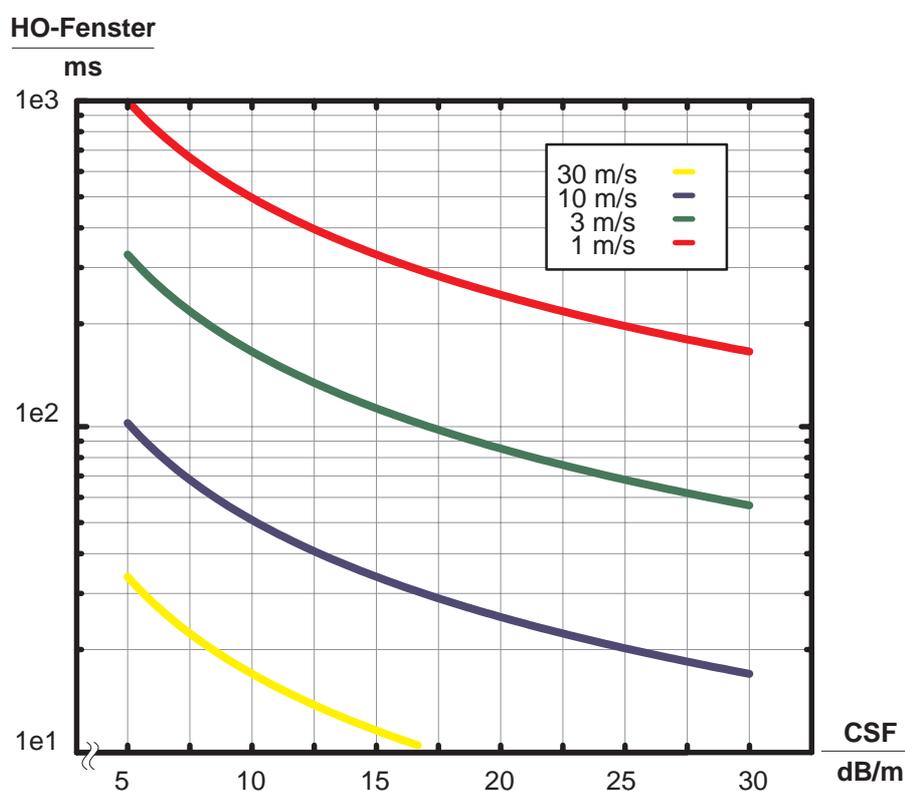


Abb. 2.8: Handoverfenster in Abhängigkeit von CSF und mittlerer Geschwindigkeit

Als weiteren wichtigen Parameter definieren wir das Handoverfenster als Zeitintervall, das vom Unterschreiten der Signalschwelle für die Detektion einer Handoversituation bis zum Erreichen der Signalschwelle vergeht, an welcher der Handover ausgeführt werden muß. Der Abstand zwischen diesen beiden Schwellen wird zu 5 dB angenommen [220]. Mit dem Ausbreitungsverlust und dem CSF kann nun das Handoverfenster berechnet werden. Für einige typische Werte (Ausbreitungsverlust 40 dB/Dekade, Zellgröße 50 m) ist das Handoverfenster

in Abb. 2.8 zusammengestellt. Wenn unmittelbar nach Detektion der Handoversituation eine Abschattungskante zu wirken beginnt, bleiben teilweise nur einige wenige Millisekunden, um den Handover zu beenden.

2.2.4 Zonenkonzept

Das Funknetz eines zellularen WATM-Systems besteht wegen der geringen Reichweite aus sehr kleinen Funkzellen. Man bezeichnet diese sehr kleinen Funkzellen deshalb auch häufig in Fortführung der bisherigen Nomenklatur für Zellularsysteme als Nano- oder Pikozellen. Jede dieser Funkzellen ist eindeutig einer Basisstation zugeordnet. Um gegenüber klassischen (makro-)zellularen Systemen wie GSM zu differenzieren, wird im folgenden im Falle der WATM-Basisstationen von einem Radio Access Point RAP gesprochen. Ein RAP übernimmt die Koordination der Funkressourcen seines Sendegebietes und stellt die Verbindung zur Infrastruktur eines WATM-Netzes her.

Diese Infrastruktur besteht bei WATM-Systemen im wesentlichen aus einem ATM-Festnetz, das um die mobilitätsspezifischen Vermittlungsfunktionen erweitert wurde (siehe Kapitel 1.3). Für diese Mobilitätsunterstützung sind Erweiterungen in der Systemarchitektur und den Signalisierungsprotokollen der ATM-Vermittlungsknoten notwendig. Derartig erweiterte, mobilitätsunterstützende ATM-Vermittlungsknoten werden im folgenden Mobility supporting ATM Switch MAS genannt. Manchmal findet sich in der Literatur auch der Ausdruck End-system Mobility supporting ATM Switch EMAS.

Solche MAS sind mindestens am Rand des ATM-Festnetzes notwendig. Sie stellen den Übergang her vom Funkzugangnetz der RAP in das reguläre, mobilitätsagnostische ATM-Festnetz. Dazu müssen sie Ressourcensteuerung und Verbindungskontrolle mit und zwischen den RAP koordinieren und insbesondere Handover zwischen den angeschlossenen RAP steuern. Ein solcher mobilitätsunterstützender ATM-Vermittlungsknoten MAS mit seinen angeschlossenen Funkzugangspunkten RAP bildet eine elementare Zone eines WATM-Systems. Eine solche Zone kann in einem Privatnetz beispielsweise ein Fabrikgelände oder Bürogebäude vernetzen und mit WATM-Diensten versorgen oder in öffentlichen Netzen ausgesuchte Bereiche wie beispielsweise Flughafenlounges mit besonders hochwertigen Diensten versorgen. Eine solche Zone besitzt jeweils nur einen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten. Ein Beispiel dafür ist der im ACTS-Projekt Magic WAND verfolgte Systemansatz [151].

Mehrere aneinander anschließende Zonen können dann ein flächendeckendes WATM-Netz bilden. Neben der flächendeckenden Funkversorgung ist in diesem Netz aber auch die nahtlose, unterbrechungsfreie Unterstützung von mobilen Verbindungen und Diensten notwendig. Dazu muß auch ein Mechanismus für den Handover von ATM-Verbindungen bei der Überschreitung von MAS-Zonengrenzen bereitgestellt werden. Das bedarf einer entspre-

chend definierten Systemarchitektur sowie einiger mobilspezifischer Vermittlungsfunktionen und Signalisierungsprotokolle im ATM-Festnetz, dem Netzsubsystem. Dieses wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.3 Netzsubsystem

2.3.1 Referenzszenario und Netzarchitektur

Ein typisches WATM Referenzszenario basiert auf einem breitbandigen Funkzugangsnetz, das in einem bestimmten zusammenhängenden Versorgungsgebiet uneingeschränkte Beweglichkeit für die Mobilstationen bei gleichzeitiger unterbrechungsfreier Nutzung der angebotenen Dienste sicherstellt. Der Funkzugang wird mit den nano-/pikozellularen Basisstationen (Radio Access Point RAP) realisiert. Am Rand des ATM-Festnetzes sind als Übergang zum Funkzugangsnetz speziell erweiterte ATM-Vermittlungsknoten MAS mit mobilitätsunterstützenden Funktionen eingeführt (Abb. 2.9).

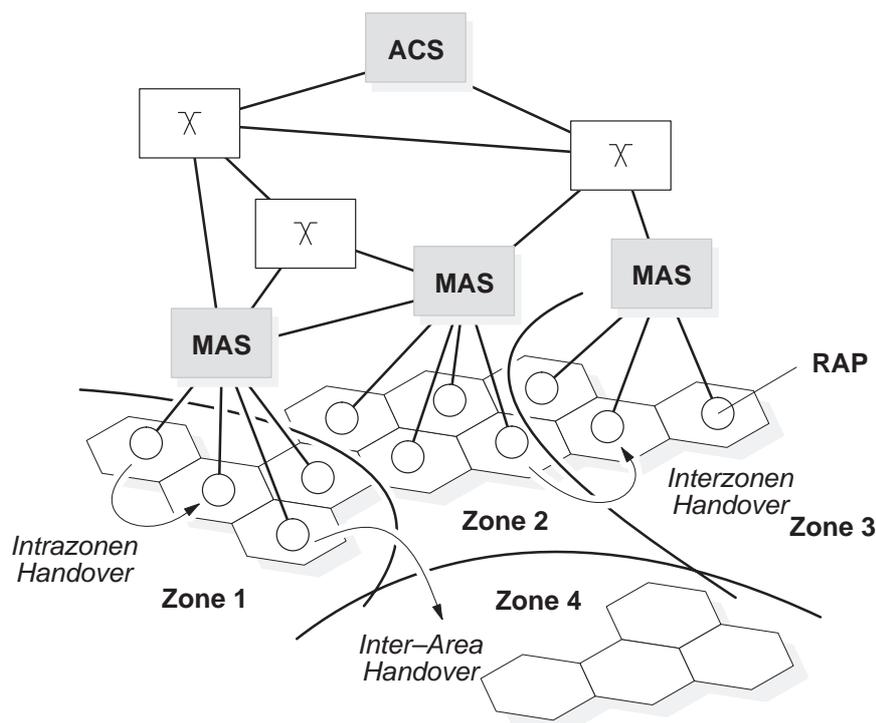


Abb. 2.9: ATM-Netz mit drahtlosem Zugang: physikalische Netztopologie

Innerhalb der von den RAP eines MAS gebildeten elementaren Zone werden alle mobilitätspezifischen Funktionen wie Aktualisierung von Aufenthaltsinformationen, Paging und Handover lokal von diesem MAS erbracht. Handover zwischen Zellen derselben Zone werden Intrazonen Handover genannt. Diese lokalen Handover werden vom jeweils zuständigen

MAS gesteuert. Eine spezielle Form dieses Handover ist der Intrazell Handover, bei dem alter und neuer RAP identisch sind. Dieser Fall tritt ein, wenn der RAP mehrere Transceivereinheiten (radio port, radio terminal, Transmitting/Receiving unit TRX) besitzt, beispielsweise wenn die Luftschnittstelle mehrere Frequenzträger besitzt oder die Zelle in Sektoren aufgeteilt ist. Der Wechsel von einem TRX auf den anderen ist dann ein Handover, der vom RAP autonom abgearbeitet werden kann.

Benachbarte Zonen einzelner MAS können die vollständige Versorgung eines zusammenhängenden Gebietes sicherstellen, in dem sich Mobilstationen frei bewegen können. Dieses Roaming zwischen den einzelnen Zonen muß durch entsprechende mobilitätsunterstützende Funktionen im ATM Festnetz unterstützt werden. Um nicht alle ATM-Vermittlungsknoten mit entsprechenden Erweiterungen ausstatten zu müssen, wird in dieser Arbeit das Konzept eines Area Communications Server ACS eingeführt. Der ACS ist zuständig für die Steuerungsfunktionen, die bei der Überschreitung von Zonengrenzen innerhalb seines Versorgungsgebietes benötigt werden. Insbesondere besitzt er die Kontrolle über und koordiniert die Übergabe von Verbindungen beim Handover zwischen zwei MAS, dem Interzonen-Handover.

Um den Handover zwischen benachbarten Zonen zu gewährleisten, muß auch die ATM-Verbindung im Festnetz nachgeführt und über den neuen MAS geleitet werden. Diese Verbindungsnachführung wird durch Protokollfunktionen in den beteiligten MAS und dem zuständigen ACS realisiert. Der ACS fungiert dabei als ein Anker für die ATM-Verbindungen und als ein Netzübergang vom mobilitätsunterstützenden Subnetz zum restlichen mobilitätsagnostischen ATM-Festnetz. Jenseits des ACS sind keine mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten mehr notwendig

Die Systemarchitektur von Abb. 2.9 erlaubt es, ein ATM-Festnetz schrittweise um mobile Inseln zu erweitern. Dazu werden an den Standorten, an denen WATM-Dienste nachgefragt oder angeboten werden sollen, zunächst singuläre Zonen um einen MAS-Knoten herum eingerichtet. Innerhalb dieser Zonen ist dann bereits die Mobilität der Endgeräte und ein Handover zwischen Funkzellen möglich. Verdichtet sich die Verbreitung der mobilen Breitbandinseln, werden auch deren Dienste immer intensiver genutzt und häufiger nachgefragt. Die zonenüberschreitende Nutzung von WATM-Diensten wird zur Norm statt zur Ausnahme. Durch die Etablierung eines ACS-Knotens kann dann auch bei Überschreiten von Zonengrenzen eine nahtlose Nutzung dieser Dienste gewährleistet werden.

Ähnlich ist damit der breitbandige Zugang zu Diensten zukünftiger UMTS-Netze realisierbar. Die breitbandigen Trägerdienste der WATM-Insel werden in diesem Fall genutzt, um die Tele-

dienste des Mobilfunknetzes in besonderer Qualität anbieten zu können. WATM-fähige Endgeräte können dann an ausgezeichneten Standorten die gewohnten Dienste mit höherer Geschwindigkeit, höherer Auflösung etc. nutzen.

2.3.2 Mobilitätsunterstützende Netzfunktionen

Wesentliche Kernpunkte bei der Entwicklung von Vermittlungsverfahren für WATM sind der Handover und die Verbindungsnachführung für mobile Teilnehmer. Sie haben den größten Einfluß auf Nutzdatenverbindungen und entsprechend hoch sind die Anforderungen an diese Verfahren.

Alle übrigen Aspekte der Mobilität in einem ATM-Netz (Lokalisierung, Aufenthaltsaktualisierung, Paging, Roaming) sind durch entsprechende Signalisierungsmechanismen und -protokolle realisierbar. Diese Protokolle und die entsprechende Infrastruktur (Datenbanken etc.) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Sich frei bewegende WATM-Endgeräte benötigen eine Infrastruktur, die in der Lage ist, virtuelle Verbindungen zu ihrem aktuellen Netzzugangspunkt nachzuführen. Dazu gehören Handoversteuerung an der Luftschnittstelle, die notwendigen Signalisierungsfunktionen und Mechanismen des Verbindungs- und Qualitätsmanagements, die entsprechend den Qualitätsanforderungen der Verbindungen Ressourcen reservieren/belegen und dafür sorgen, daß die Zellreihenfolge beibehalten und die Zellverlusthäufigkeit die beim Verbindungsaufbau verhandelten Grenzen nicht überschreitet (siehe Tabelle 1.1). Außerdem gehört dazu auch gegebenenfalls die Wegeneuwahl (Rerouting) im Festnetz, wenn der bisherige und der zukünftige Netzzugangspunkt eine Wegeführung über verschiedene Vermittlungseinheiten notwendig machen.

Das Rerouting ist bei einem Intra-zonen-Handover nur lokal vom jeweiligen MAS durchzuführen, der durch eine Änderung in seinen Vermittlungstabellen die Verbindungen eines Endgerätes vom Port des alten RAP auf den Port des neuen RAP umleitet. Von diesem lokalen Rerouting-Vorgang ist nur das Segment zwischen Endgerät, RAP und MAS betroffen. Bei einem Interzonen-Handover dagegen muß im ATM-Festnetz ein neuer Weg gefunden und ausgewählt werden, der die Verbindungen auf den neuen MAS umleitet. Die Verbindungen sollen dabei nicht vollständig terminiert und Ende-zu-Ende neu aufgebaut werden müssen, vielmehr ist eine abschnittsweise Neuwahl des Weges ausgehend von einem Kreuzungspunkt bis zum mobilen Endgerät vorzusehen. Dieser Kreuzungspunkt ist der Cross Over Switch COS, in dem dann auch die eigentliche Umschaltung der ATM-Verbindungen zwischen dem alten und neuen Teilweg erfolgt. Die abschnittsweise Neuwahl des Weges für das Verbindungssegment zwischen einem ATM-Endgerät und einem Vermittlungsknoten ist im bisherigen Entwurf und der Standardisierung für ATM-Netze nicht vorgesehen und muß für WATM-Systeme neu entwickelt werden.

Der COS kann in dynamischer Suche zum Handoverzeitpunkt bestimmt werden als derjenige mobilitätsunterstützende ATM-Vermittlungsknoten, ab dem die alte und die neue Route divergieren [199][200]. Dabei können die Routen beispielsweise durch einen Wegewahlalgorithmus der kürzesten Pfade bestimmt werden. Dieses dynamische Verkehrslenkungsschema bedingt aber einerseits, daß im gesamten ATM-Festnetz neue Funktionen und Signalisierungsprotokolle zur dynamischen Suche des COS eingeführt werden. Andererseits muß für diese Variante jeder Vermittlungsknoten im ATM-Festnetz mobilitätsunterstützende Erweiterungen besitzen, um die Umschaltefunktion im Handoverfall wahrzunehmen, da aufgrund der dynamischen Wegewahl jeder Vermittlungsknoten zum COS bestimmt werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn keine weiteren Maßnahmen beispielsweise in der Gestaltung der physikalischen Netztopologie und bei der Parameterisierung der Wegewahlalgorithmen ergriffen werden. Solche Maßnahmen würden letztlich darin resultieren, daß Verbindungen ausschließlich über einzelne ausgesuchte Vermittlungsknoten geführt werden können. Dies würde allerdings weniger Freiheitsgrade für die Wegesuche bedeuten und letztendlich die dynamische Bestimmung des COS überflüssig machen.

Alternativ zur dynamischen Wegewahl kann in konsequenter Fortführung dieses Gedankens der COS auch durch infrastrukturelle Maßnahmen bestimmt werden, indem in der Netzarchitektur einzelne Knoten die Kreuzungs- und Umschaltefunktion zugewiesen bekommen. Sie fungieren dann als ein Anker für die ATM-Verbindungen und das Rerouting findet nur zwischen dem ausgezeichneten Ankerpunkt und den beteiligten MAS statt. Für dieses Verbindungssegment zwischen MAS und COS können allerdings durchaus mehrere Wege zur Auswahl stehen, so daß nicht notwendigerweise ausschließlich ein rein statisches Verkehrslenkungsverfahren in Frage kommt. Diese Variante des statischen COS wurde mit der Einführung des ACS in der Netzarchitektur von Kapitel 2.3.1 gewählt. Der statische COS ist bereits zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus bekannt und ändert sich für die Dauer der Verbindung nicht. Die Suche nach einem geeigneten COS entfällt damit in dieser semistatischen Variante des Verkehrslenkungsverfahrens für mobile Teilnehmer. Eine reduzierte Komplexität des Handovermechanismus ist die Folge, was insgesamt die schnellere Handoverbearbeitung ermöglicht.

Nachdem ein neuer Weg für das betroffene Verbindungssegment gefunden und ausgewählt wurde, erfolgt nun der eigentliche Handover der Verbindung. Dieser Handover beinhaltet das Umschalten des Nutzdatenstroms der virtuellen ATM-Verbindungen auf die neue Route, die Deaktivierung des nicht mehr benötigten Verbindungssegmentes, die Freigabe der Funkressourcen an der alten Basisstation sowie die Etablierung einer Funkverbindung mit der neuen Basisstation und die Aktivierung des umgelenkten Verbindungssegmentes auf der neuen Route. Dazu sind Funktionen für die Verwaltung, Reservierung und Belegung von Funkressourcen an der Luftschnittstelle genauso notwendig wie Signalisierungs- und Steuerungs-

funktionen für die Kontrolle des Handoverablaufs und das QoS-Management im Netz. Unter Umständen muß abhängig von den verfügbaren Ressourcen auch der Qualitätsvektor der betroffenen Verbindungen neu verhandelt werden (QoS-Renegotiation, [189]). Grundsätzlich können die Handoververfahren in Mobilfunknetzen anhand der Anzahl gleichzeitig aktiver Funkverbindungen unterschieden werden in harten und soften Handover (Hard Handover, Soft Handover).

Beim "harten Handover" besteht eine Funkverbindung stets nur mit einer Basisstation. Während des Handovers wird zu einem definierten Zeitpunkt von der Funkverbindung mit der alten Basisstation auf die Funkverbindung mit der neuen Basisstation umgeschaltet. Der Zeitpunkt des Umschaltens führt zu einer weiteren Unterteilung der Kategorie Hard Handover. Wird der Handover über die alte Basisstation initiiert und erfolgt die Steuerung des Handovers bis mindestens zum Abschluß der Wegeneuwahl über diese Basisstation, spricht man von einem Backward Handover. Da beim Backward Handover zunächst der Handover organisiert und der neue Weg im Netz gesucht wird, bevor die Funkverbindung für den Umschaltvorgang auf die neue Basisstation unterbrochen wird, wird dieser auch als make-break-Ansatz bezeichnet. Das Gegenteil, die Unterbrechung der Funkverbindung und das Umschalten auf die neue Basisstation mit nachfolgendem Nachführen der Verbindung im Netz wird entsprechend als break-make-Ansatz oder Forward Handover bezeichnet. Die komplette Steuerung des Handoverablaufs und der Austausch aller dazu notwendigen Signalisierungsnachrichten erfolgt dabei ab der Abmeldung an der alten Basisstation ausschließlich über die neue Basisstation.

Den Nachteil des Hard Handover – die Unterbrechung der Nutzdatenverbindung beim Umschalten der Funkverbindung – versucht der Soft Handover zu vermeiden. Sobald eine mögliche Handoversituation erkannt wird und ein Handoverkandidat (neue Basisstation mit ausreichendem Signalpegel) sichtbar ist, wird parallel zur bisherigen Funkverbindung eine weitere Funkverbindung zur neuen Basisstation etabliert. Diese beiden Funkverbindungen können nun gleichzeitig und ohne Umschaltvorgänge genutzt werden. Werden im COS und im Endgerät nun noch der Nutzdatenstrom dupliziert und die beiden Pfade synchronisiert, kann abhängig vom Kanalzustand dynamisch eine der beiden Funkverbindungen ausgewählt werden, ohne Unterbrechungen im Nutzdatenstrom in Kauf nehmen zu müssen. Diese Konstellation kann solange aufrechterhalten werden, bis sicher ganz auf die neue Basisstation umgeschaltet und der Pfad über die alte Basisstation deaktiviert werden kann.

Der momentan in der WATM-Standardisierung sowie den meisten Forschungsprojekten verfolgte Ansatz ist ein Hard Handover, der vor (break-make, forward) oder nach (make-break, backward) der Umschaltung der Nutzdatenverbindung im Netz erfolgen kann (Abb. 2.10). Soft Handover-Strategien werden in WATM CS 1 nicht unterstützt. Eine Neuverhandlung des

Verkehrskontraktes und der Dienstgüteparameter ist nicht vorgesehen. Die Handovermechanismen sind darüber hinaus nicht darauf ausgelegt, Zellverluste während des Handovers zu vermeiden. Die Unterbrechung der Nutzdatenverbindung bei der Umschaltung der Funkverbindung kann so zum Verlust von ATM-Zellen führen. Die Integrität des Nutzdatenstroms ist bei diesem Ansatz nicht gewährleistet. Erklärtes Ziel des Entwurfs von Verfahren und Systemen für WATM Capability Set 1 ist lediglich die möglichst geringe Beeinträchtigung der Nutzdatenverbindung durch einen Handover. Die Kategorie der verlustfreien Handovermechanismen wurde in der bisherigen Standardisierung noch nicht berücksichtigt.

		Aktuelle Schemata	
		nicht verlustfrei	verlustfrei
hard	backward		
	forward		
soft			

Abb. 2.10: Kategorien von Handoverschemata für WATM CS 1

Dieser Ansatz ist ausreichend für die HIPERLAN-basierten, lokalen Systeme mit geringer Mobilität, für welche der momentane Entwurf des ATM Forums vorgesehen ist. Die zunächst verfügbaren Datenraten werden an den Breitbandbereich gerade heranreichen und Handoverereignisse nicht sehr häufig sein. Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erläutert, werden in den breitbandigen Systemen der vierten Generation die Anforderungen an Handoververfahren höher sein. Die piko-/nanonzellularen Systeme werden auch Endgeräten mit hoher Mobilität breitbandige Dienste zur Verfügung stellen. Daraus resultiert zunächst eine hohe Handoverrate mit der entsprechenden hohen Signalisierungslast für die Vermittlungsknoten. ATM-Endgeräte können mehrere virtuelle Verbindungen gleichzeitig aktiv haben, so daß diese Situation noch verschärft wird. Die breitbandigen Dienste werden die gleichen Qualitätsanforderungen wie im Festnetz haben, d.h. Echtzeiddienste werden eine geringe Variation der Laufzeit tolerieren, während andere Dienste eine sehr geringe Zellverlust- oder Zellfehlerhäufigkeit benötigen werden. Berücksichtigt man noch die anspruchsvollen Funkkanalszenarios mit scharfen Abschattungskanten, ergibt dies insgesamt ein hohes Anforderungsprofil für Handoververfahren in zukünftigen WATM-Breitbandmobilfunknetzen.

Zusammengefasst sind die primären Entwurfskriterien für WATM-Handoverprotokolle:

- geringe Latenzzeiten und schnelle Ausführung
- flexible Unterstützung verschiedener QoS-Klassen

- Zuverlässigkeit und schnelle Reaktion auf kurzfristige Änderungen der Funksituation
- Robustheit bei unerwartetem Verlust des Funksignals

Diese Kriterien werden sowohl vom gewählten Handoververfahren als auch vom Mechanismus für die Wegeneuwahl und deren Interaktion beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien werden in den folgenden Kapiteln 3 und 4 neue Handoververfahren für WATM-Mobilfunknetze entworfen.

2.3.3 Handoverprotokolle des Standardentwurfs für WATM CS 1

Wesentliche Voraussetzung für einen Handover sind die Signalisierungsprotokolle, welche die Handoversteuerungsmechanismen in den beteiligten Netzkomponenten (MT, RAP, MAS) koordinieren. Das ATM Forum definiert für die vier Handoverfälle (Intrazonen und Interzonen Handover, Backward und Forward Handover) ein Protokoll der ATM-Schicht, dessen Nachrichten für die beteiligten RAP transparent sind [36]. Genauso wird die Signalisierung der Luftschnittstelle nicht näher spezifiziert oder Anforderungen daran gestellt, um möglichst beliebige Technologien, Medienzugriffsverfahren und Protokolle für den Funkzugang einsetzen zu können. Die WATM-Handoversignalisierung erfolgt also nur zwischen den beteiligten ATM-Instanzen des Mobilens Terminals MT, der MAS und dem Kreuzungspunkt ACS/COS. Die Nachrichten dieses Signalisierungsprotokolls werden gesichert mit dem Service Specific Connection-Oriented Protocol SSCOP der ATM-Signalisierungsarchitektur übertragen [36]. Handover werden in WATM CS 1 vom Mobilterminal initiiert (mobile initiated handover). Ein neuer Handover kann erst nach Abschluß des vorhergehenden begonnen werden; überlappende Handovertransaktionen sind in WATM CS 1 unzulässig.

Das Handoverprotokoll der ATM-Schicht muß Funktionen zur Steuerung der RAP anstoßen und Ereignismeldungen dieser Steuerung erhalten können. Abhängig von der Realisierung der Schnittstelle zwischen RAP und MAS ist diese Steuerung unterschiedlich ausgelegt. Sind RAP und MAS in getrennten Hardwareeinheiten mit einer definierten Schnittstelle dazwischen realisiert (modularer Ansatz), sieht WATM CS 1 zur Steuerung an dieser Schnittstelle unterhalb der ATM-Schicht ein weiteres Signalisierungsprotokoll vor, das Access Point Control Protocol APCP. Im Handoverfall erfolgt die Steuerung auf ATM-Ebene und an der Luftschnittstelle also in zwei separaten physikalischen Netzkomponenten, dem RAP und dem MAS. Eine Realisierung von RAP und MAS in einer physikalischen Einheit (integrierter Ansatz) ist die Alternative. Dabei wird der MAS um drahtlose Ports erweitert, die spezifischen Funktionen der Luftschnittstelle werden vom MAS gesteuert und die Schnittstelle zwischen RAP und MAS wird zu einer (virtuellen) internen Schnittstelle des MAS. Die separate physikalische Einheit des RAP verschwindet beim integrierten Ansatz und wird als Erweiterung des MAS implementiert. Die Handoversteuerungen der ATM-Schicht und der Luftschnittstelle sind dann in einer physikalischen Netzkomponente implementiert und machen das

APCP überflüssig [36]. In den folgenden Nachrichtenflußdiagrammen (Abb. 2.11 bis Abb. 2.14) ist jeweils die Variante für den modularen Ansatz abgebildet. Die Nachrichten zwischen MAS und RAP entfallen für den integrierten Ansatz.

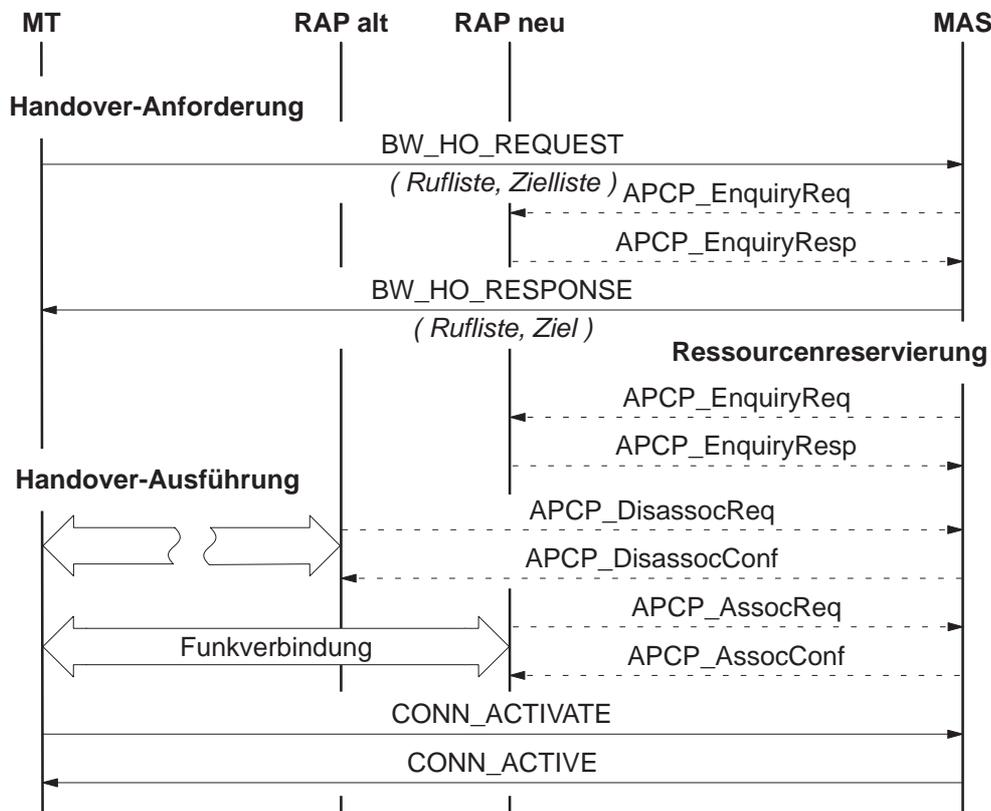


Abb. 2.11: Intra-zonen Backward Handover in WATM CS 1

Der Backward Handover des WATM CS 1 wird vom Mobilterminal MT initiiert (Abb. 2.11). Das MT misst die Baken-signale benachbarter Funkzellen, identifiziert den jeweiligen RAP und stellt eine priorisierte Zielliste der Handoverkandidaten nach seiner Präferenz zusammen. Diese Zielliste sendet das MT zusammen mit einer Liste der im Handover zu berücksichtigenden Rufe (virtuelle Verbindungen) in seiner Handoveranforderung (BW_HO_REQUEST) an die Entscheidungsinstanz des zuständigen MAS. Beide Listen meldet der MAS zusammen mit den Dienstbeschreibungsvektoren (Verkehrs- und QoS-Parameter) der virtuellen Verbindungen an die in Frage kommenden RAP (APCP_ENQUIRYREQ). Der RAP prüft, ob genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, und signalisiert dem MAS dann ob für alle oder ggf. welche Verbindungen ein Handover durchgeführt werden kann. Zu diesem Zeitpunkt sind noch keine Funkressourcen reserviert. Nach Erhalt der Antworten (APCP_ENQUIRYRESP) trifft der MAS die Handoverentscheidung und informiert das MT über das ausgewählte Handoverziel und die Rufe, die übergeben werden können (BW_HO_RESPONSE). Falls nicht für alle gewünschten Rufe ein Handover möglich ist, kann das MT jetzt entsprechend reagieren, beispielsweise durch

Beenden der betroffenen Verbindungen. Gleichzeitig weist der MAS jetzt den ausgewählten RAP an, die gemeldeten Ressourcen zu reservieren. Mit der Bestätigung dieser Reservierung (APCP_ENQUIRYRESP) kann der MAS die Nutzdatenverbindung umschalten. Die Meldung BW_HO_RESPONSE enthält ein Flag, das anzeigt, ob es sich um einen Inter- oder Intrazonen Handover handelt. Im Fall des Intrazonen Handovers muß kein Rerouting der Verbindungen abgewartet werden und das Mobilterminal MT kann den Handover sofort ausführen. Das MT deaktiviert seine alte Funkverbindung und etabliert eine neue mit dem Handoverziel. Das Zustandekommen dieser Funkverbindung wird dem MAS gemeldet (APCP_ASSOCREQ). Nach erfolgreicher Aktivierung der neuen Funkverbindung unterrichtet das MT den MAS, daß es wieder bereit ist, Nutzdaten zu empfangen und zu senden (CONN_ACTIVATE). Die Wiederaufnahme der Nutzdatenübertragung wird vom MAS bestätigt (CONN_ACTIVE) zusammen mit einer endgültigen Liste der übergebenen Rufe und den ihnen zugewiesenen Identifikationsnummern (VCI, VPI).

Auf ähnliche Weise wird der Backward Handover auch eingeleitet, wenn das MT die Zone eines MAS verläßt (Abb. 2.12). Der MAS erkennt, daß die gemeldeten Handoverziele der Zielliste außerhalb seiner Zone liegen und leitet die Handoveranforderung an alle für mögliche Handoverziele zuständigen MAS weiter (HO_REQUEST_QUERY). Um diese MAS finden zu können, ist eine entsprechend strukturierte Adressierung der RAP notwendig, aus denen auf die Zuordnung zwischen RAP und MAS geschlossen werden kann. Die MAS, welche eine Handoveranfrage erhalten haben, ermitteln nun, welche der vom MT benannten RAP Ressourcen zur Verfügung haben und welche Verbindungen übernommen werden können. Die MAS wählen den RAP aus, der alle oder ein Maximum der Verbindungen des MT übernehmen kann. Wenn in den in Frage kommenden Zonen ein RAP zum Handoverkandidaten bestimmt wurde, wird dieser zusammen mit den akzeptierbaren Rufen gemeldet (HO_REQUEST_RESPONSE, BW_HO_RESPONSE). Der alte MAS entscheidet sich für einen Handoverkandidaten – damit auch für eine Zone und den zuständigen MAS – und initiiert das Rerouting der Verbindungen im Netz (HO_COMMAND). Die Kriterien und Entscheidungsalgorithmen für die Auswahl des neuen RAP (sowohl im alten wie auch neuen MAS) können vom Netzbetreiber oder -hersteller frei gewählt werden. Sie sind im Standard nicht näher festgelegt.

Zum nun feststehenden MAS muß nun die Verbindung nachgeführt werden. Für das Rerouting der Verbindung im Netz muß ein neuer Teilweg zwischen neuem MAS und Kreuzungs-/ Umschaltpunkt COS eingerichtet werden. Das Handoverprotokoll läßt offen, auf welche Art und Weise der COS bestimmt wird. Die Nachricht HO_COMMAND kann die Adresse des COS enthalten, sofern dieser bereits bekannt ist. Dies wäre bei der Netzarchitektur von Abb. 2.9

der Fall, wo die Adresse des ACS bereits zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus feststeht. Wenn der COS dynamisch gesucht werden muß, kann das Kommando Start-/Zielknoten der Suche enthalten.

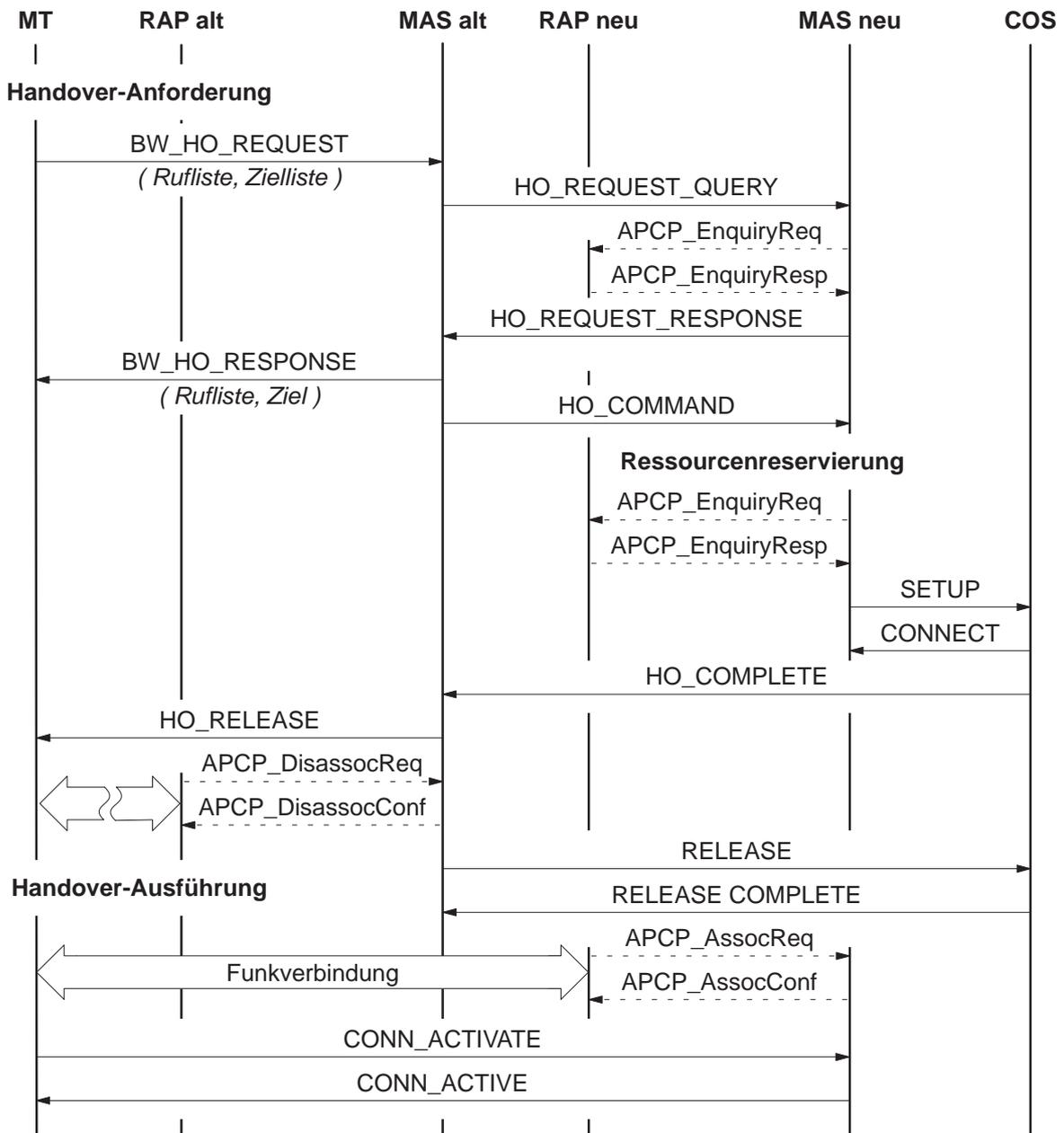


Abb. 2.12: Interzonen Backward Handover in WATM CS 1

Nach der Ressourcenreservierung am neuen RAP werden die neuen Teilverbindungen für den Nutzdatentransport etabliert (SETUP, CONNECT). Der erfolgreiche Aufbau einer Teilverbindung wird dem alten MAS gemeldet (HO_COMPLETE). Diese Transaktion (SETUP, CONNECT, HO_COMPLETE) wird für jede virtuelle Verbindung der Mobilstation wiederholt. Wenn der alte MAS

die das erfolgreiche Rerouting anzeigende Meldung `HO_COMPLETE` für alle virtuellen Verbindungen VCC des MT erhalten hat, gibt er den Handover frei (`HO_RELEASE`). Diese Handoverfreigabe ist allerdings timergesteuert, so daß sie unter Umständen bereits erfolgen kann, bevor das `HO_COMPLETE` für alle Verbindungen eingetroffen ist. Sobald das MT vom Abschluß des Reroutings informiert und die Erlaubnis den Handover auszuführen erteilt wurde (`HO_RELEASE`), kann die alte Funkverbindung deaktiviert werden. Gleichzeitig wird der nicht mehr benötigte Pfad zwischen altem MAS und COS für jede virtuelle Verbindung terminiert (`RELEASE`, `RELEASE COMPLETE`). Zu diesem Zeitpunkt schaltet der COS auch die Nutzdatenverbindung um. Nach dem Aufbau der neuen Funkverbindung wird dann der neue Weg im Netz aktiviert und dem MT die neuen VPI/VCI mitgeteilt (`CONN_ACTIVATE`, `CONN_ACTIVE`). Unter Umständen ist zum Zeitpunkt des Kommandos `CONN_ACTIVATE` vom MT das Rerouting noch nicht für alle Nutzdatenverbindungen abgeschlossen, so daß mehrere Meldungen `CONN_ACTIVE` notwendig sein können.

Der Fall eines abrupten Abbruchs der Funkverbindung, verursacht beispielsweise durch eine Abschattungskante wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, tritt in WATM-Systemen häufig auf. Zum Startzeitpunkt einer Handovertransaktion ist dies nicht immer vorhersehbar. Die umfangreiche Signalisierungstransaktion eines Backward Handover bis zum Umschalten der Funkverbindung kann in diesem Fall nicht mehr zuverlässig über den alten RAP abgewickelt werden. Wurde ein Backward Handover initiiert, muß das MT in diesem Fall die alte Funkverbindung vorzeitig beenden. Geschieht dies bevor die Handoverbestätigung mit dem ausgewählten RAP eintrifft (`BW_HO_RESPONSE`), muß die Handovertransaktion abgebrochen und die Nutzdatenverbindungen terminiert werden. Wenn das Handoverziel dem MT bereits bekannt ist, kann die Funkverbindung mit dem neuen RAP etabliert werden noch bevor die Freigabe eintrifft (`HO_RELEASE`). Das MT muß dann eventuell warten, bis das Rerouting aller Verbindungen abgeschlossen ist. Dies wird durch Eintreffen der letzten Meldung `CONN_ACTIVE` angezeigt. Tritt der abrupte Abbruch der Funkverbindung ein, bevor eine Handoversituation erkannt und eine entsprechende Signalisierungstransaktion eingeleitet wurde, bleibt nur der Abbruch der Verbindungen, wenn ausschließlich die Backward Handover Option zur Verfügung steht. Da dieser Fall in WATM-Systemen jedoch häufig auftreten wird, ist in WATM CS 1 ein weiterer Mechanismus vorgesehen, der Forward Handover (Abb. 2.13 und Abb. 2.14).

Diese Form des Handovers erlaubt es dem MT, seine Verbindung zum neuen RAP zu dirigieren, auch wenn die bestehende Funkverbindung unvorhergesehen beendet werden muß. Dazu wird in diesem Fall dem MT die Entscheidung über das Handoverziel zugestanden. Das MT terminiert seine momentane Funkverbindung, wählt einen Handoverkandidaten aus und baut eine neue Funkverbindung auf. Beide Ereignisse betreffend die Funkverbindungen werden

beim modularen Systemansatz den jeweils zuständigen MAS über das APCP gemeldet. Nachdem die neue Funkverbindung steht, wird der Handover der Verbindungen beim (neuen) MAS angefordert (FW_HO_REQUEST).

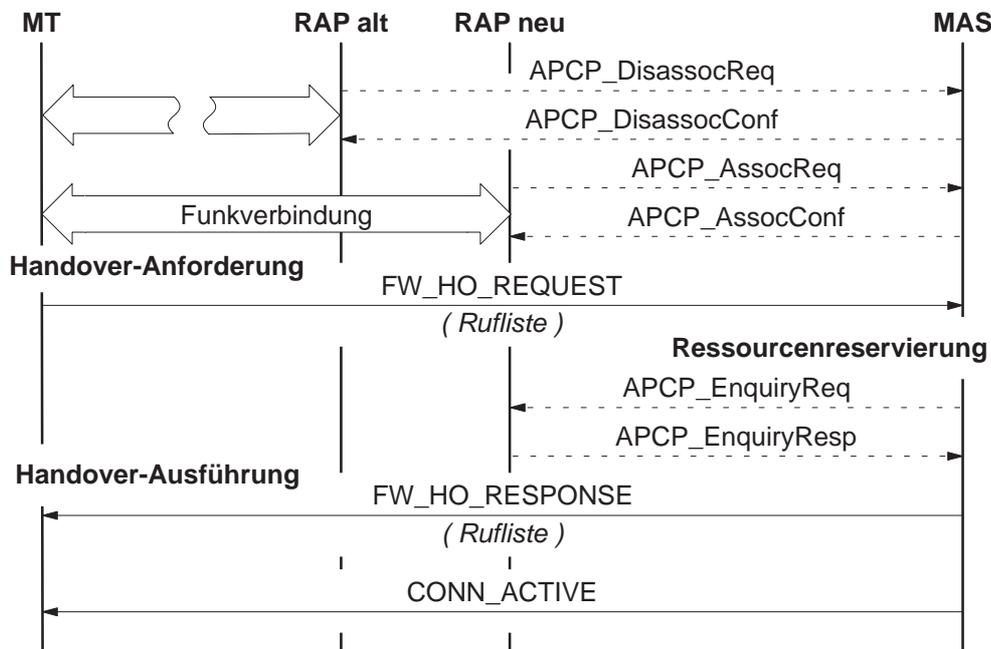


Abb. 2.13: Intrazonen Forward Handover in WATM CS 1

Im Fall des Intrazonen Forward Handovers (Abb. 2.13) werden nach der Ressourcenreservierung am RAP mit der Meldung FW_HO_RESPONSE die übergebenen Verbindungen signalisiert. Eine Meldung CONN_ACTIVE schließlich bestätigt den erfolgreichen Abschluß des Handovers¹.

Im Fall des Interzonen Forward Handovers (Abb. 2.14) muß davor noch das Rerouting der Verbindungen durchgeführt werden. Der neue MAS informiert dazu zunächst den alten MAS von der Handoversituation (HO_NOTIFY). Nach der Ressourcenreservierung am RAP wird dem MT der Handover bestätigt (FW_HO_RESPONSE) und das Rerouting für jede Verbindung einzeln angestoßen (SETUP, CONNECT). Ist das Rerouting erfolgreich, wird das dem MT mitgeteilt (CONN_ACTIVE) und der alte Teilweg terminiert (HO_COMPLETE, RELEASE, RELEASE COMPLETE). Auch dies geschieht für jede Verbindung einzeln. Wie beim Backward Handover ist das Verfahren zur Bestimmung des COS in der Forward Handover Variante offen gelassen.

1. Nachrichtenflußdiagramm/Protokollbeschreibung und Zustandsautomat stimmen in [36] nicht überein. Die in der Spezifikation des Zustandsautomaten enthaltene Meldung CONN_ACTIVE wurde hier ergänzt.

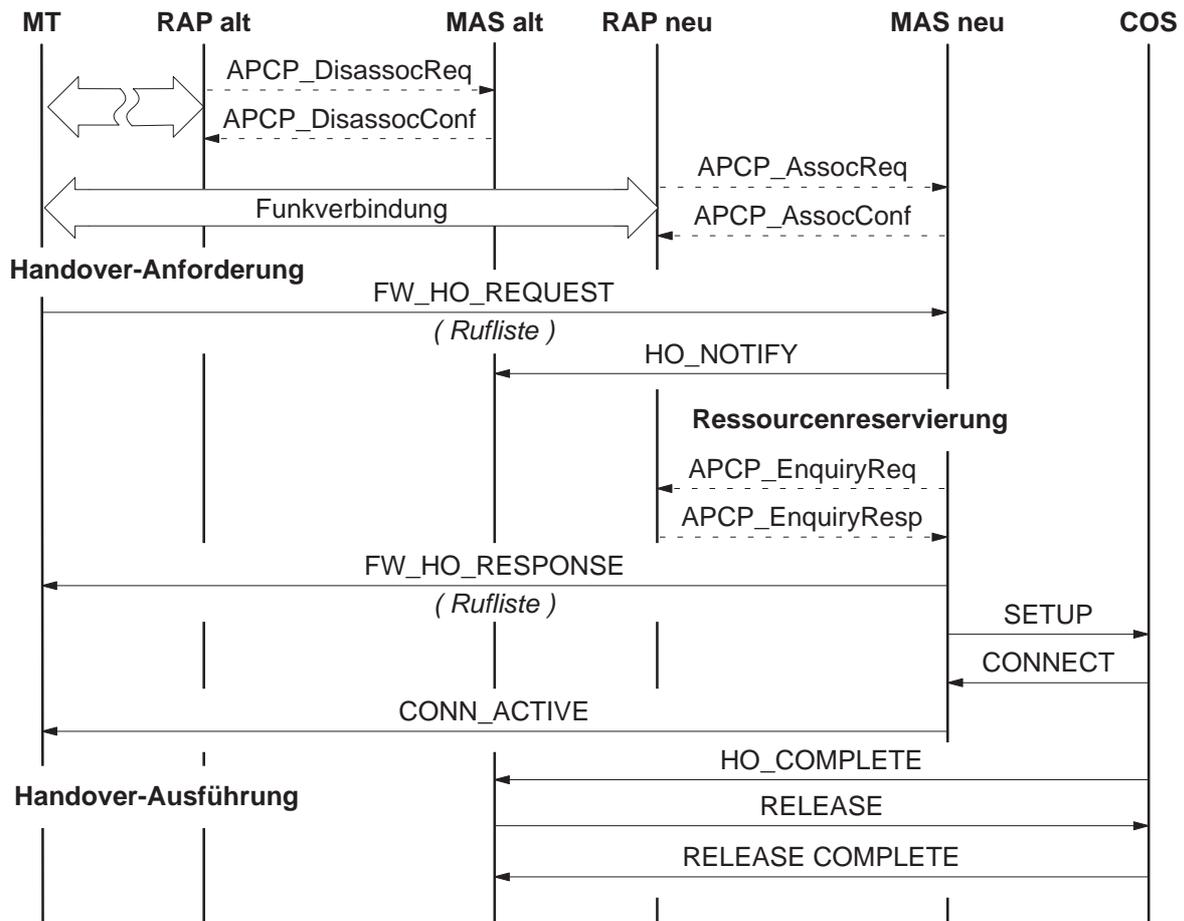


Abb. 2.14: Interzonen Forward Handover in WATM CS 1

2.4 Handoververkehr

2.4.1 Analytisches Modell

Aufgrund der mikro- und pikozellularen Struktur des Funknetzes haben Mobile ATM Systeme eine hohe Signalisierungslast wegen häufiger Zellwechsel zu bewältigen.

Im folgenden wird diese Signalisierungslast abgeschätzt. Die Abschätzung basiert auf einem Fluid Flow Ansatz zur Mobilitätsmodellierung. Der Gesprächsverkehr wird mit einem Poisson-Prozeß beschrieben.

Die Fluid Flow Methode wird in der Literatur eingesetzt, um Transaktionsraten für Datenbanken in mikrozellularen Systemen abzuschätzen [28][138][139][157][177].

Wir betrachten eine Mikrozeile der Fläche F mit einer Grenzlinie (Perimeter) der Länge L , in der sich Mobilstationen homogen verteilt aufhalten und bewegen (Abb. 2.15). Die An-

nahme homogener Bewegung heißt insbesondere, daß die Bewegungsrichtungen in $[0;2\pi[$ gleichverteilt sind. Weiter wird angenommen, daß sich die Mobilstationen mit derselben mittleren Geschwindigkeit v bewegen. Die Dichte der Mobilstationen je Fläche sei ρ .

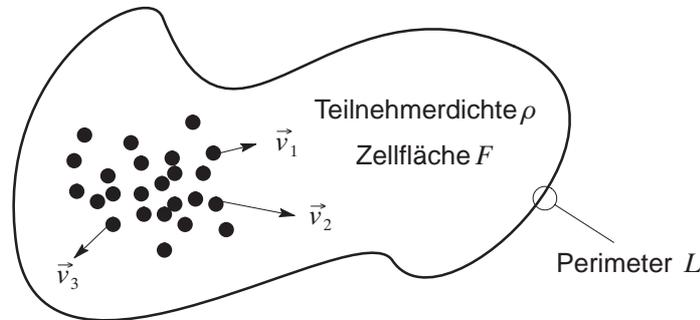


Abb. 2.15: Fluid Flow Modell einer Mikrozele

Für die Rate \bar{R} , mit der Mobilstationen die Grenzlinie überqueren, gilt dann [28]

$$\bar{R} = \frac{L}{\pi} \rho v = \frac{L}{\pi} \rho v(\rho) \quad (4)$$

Üblicherweise sind die Verhältnisse in einer realen Zelle allerdings nicht homogen. Insbesondere die Annahme gleicher Geschwindigkeiten ist schwer nachvollziehbar. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird daher angenommen, daß die Gesamtheit der Teilnehmer in mehrere Klassen unterteilt werden kann. Die Mobilstationen einer Klasse i bewegen sich mit der mittleren Geschwindigkeit v_i und die Dichte der Mobilstationen einer Klasse je Fläche sei ρ_i . Für die Rate R_i , mit der Mobilstationen einer Klasse i die Grenzlinie der Zelle überqueren, gilt dann analog (4)

$$R_i = \frac{L}{\pi} \rho_i v_i \quad (5)$$

Die gesamte Rate, mit der Bewegungen über die Zellgrenze auftreten, ergibt sich zu

$$R = \sum_{\forall i} R_i = \frac{L}{\pi} \sum_{\forall i} \rho_i v_i = \frac{L}{\pi} \sum_{\forall i} \phi_i \quad (6)$$

Die Größe $\phi_i = \phi_i(\rho_i, v_i(\rho_i))$ bezeichnen wir im folgenden als partiellen Fluß der Klasse i und fassen diese im Vektor $\phi = [\phi_1 \phi_2 \dots \phi_M]^T$ zusammen. Die Rate R kann dann mit dem Einheitsvektor \mathbf{e} dargestellt werden als

$$R = \frac{L}{\pi} \mathbf{e} \phi \quad (7)$$

Der partielle Fluß ist nichtlinear abhängig von der Dichte der Mobilstationen. Eine sehr niedrige Dichte von Mobilstationen in einer Zelle führt zu einer entsprechend niedrigen Rate von

Überquerungen der Zellgrenze. Der partielle Fluß steigt zunächst mit zunehmender Dichte an, bis er einen maximalen Wert ϕ_{imax} erreicht. Bei weiter steigender Dichte der Mobilstationen nimmt deren mittlere Geschwindigkeit stetig ab, um schließlich bei der Staudichte ρ_{istau} wieder auf Null zu sinken. Aus der Analyse und Theorie des Straßenverkehrs ist bekannt, daß die Dichte, bei der der Fluß maximal wird, nur etwa 20% der maximalen Staudichte beträgt [141]. Die typische Beziehung von partiellem Fluß und Teilnehmerdichte zeigt Abb. 2.16.

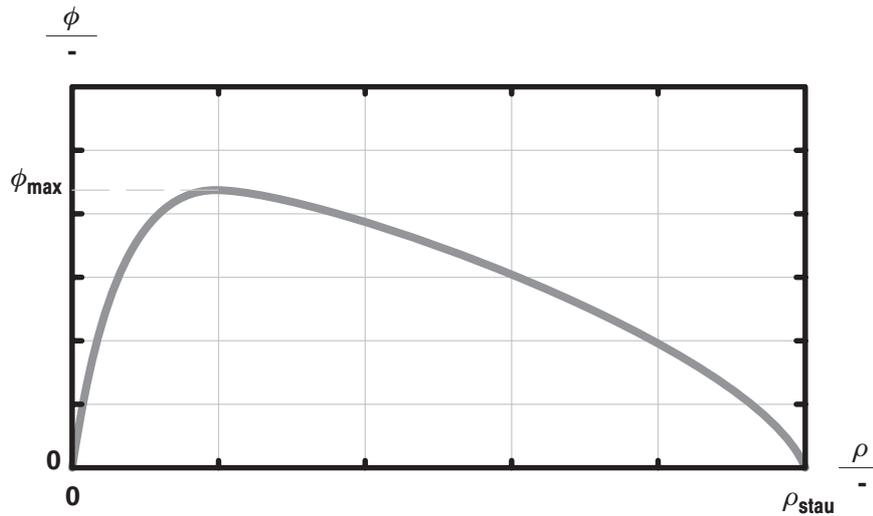


Abb. 2.16: Schematisch-qualitative Darstellung der Beziehung von partiellem Fluß und Teilnehmerdichte [157]

Mit diesem Mobilitätsmodell ist es uns nun zunächst möglich, die Handoverraten zukünftiger Mobilfunksysteme abzuschätzen. Handoversituationen treten ein, wenn Mobilstationen mit aktiver Verbindung Zellgrenzen überschreiten. Unter der Poisson-Annahme für den Rufverkehr ist die Wahrscheinlichkeit a_i , daß eine Mobilstation eine aktive Gesprächsverbindung besitzt

$$a_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \frac{A_i}{N_i} \quad (8)$$

wobei λ_i die mittlere Rufankunftsrate und $1/\mu_i$ die mittlere Rufdauer einer Mobilstation und N_i die Anzahl Mobilstationen der Klasse i ist. Damit gilt für die Handoverrate einer Zelle

$$R_H = \frac{L}{\pi} \Phi^T \mathbf{a} = \frac{L}{\pi} \sum_{\forall i} \frac{\lambda_i}{\mu_i} \phi_i \quad (9)$$

Der Vektor $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]^T$ ist hierbei definiert als der Angebotsvektor des Mobilitätsmodells. Für die numerische Auswertung gibt Tabelle 2.3 in Anlehnung an die Analysen in [141] und die Modellierungsarbeiten für Mikrozellen in [157] einige typische Werte an. Den Model-

lierungsparametern zugrunde gelegt ist die Annahme einer Mobilfunkdurchdringung von 30 Prozent. Sie ist bei den Werten in Tabelle 2.3 bereits berücksichtigt. Wir verwenden $M=3$ Klassen: schnelle und langsame Fahrzeuge sowie Fußgänger.

Tabelle 2.3: Mobilitätsklassen für numerische Studie des Mobilitätsmodells

Klasse	Parameter	Typ. Wert
Schnelle Fahrzeuge (max. Fluß)	Dichte ρ	186,4 km ⁻²
	Geschwindigkeit v	25 km/h
	Angebot a	30 mErl
	Mittlere Datenrate r	1 Mbit/s
Langsame Fahrzeuge (gesättigter Fluß)	Dichte ρ	1011,3 km ⁻²
	Geschwindigkeit v	3 km/h
	Angebot a	60 mErl
	Mittlere Datenrate r	3 Mbit/s
Fußgänger	Dichte ρ	12916,7 km ⁻²
	Geschwindigkeit v	1 km/h
	Angebot a	40 mErl
	Mittlere Datenrate r	1 Mbit/s

Der Anteil an schnellen und langsamen Fahrzeugen wird durch den Anteil ξ der gesättigten Zellfläche beschrieben. Dieser Anteil besitzt eine so hohe Dichte an Mobilstationen, daß eine weitere Erhöhung dieser Dichte zum Stau führen würde. Ein Beispiel für Situationen, in denen Sättigung auftritt, ist der Berufsverkehr. Mobilstationen in gesättigten Gebieten besitzen eine entsprechend niedrige mittlere Geschwindigkeit. Ebenso gibt der Parameter η den Anteil der Zellfläche an, in dem Fußgänger zum Verkehrsaufkommen beitragen. Der partielle Fluß wird entsprechend durch eine Gewichtungsmatrix $\mathbf{w} = \text{diag} [w_1 w_2 \dots w_M]$ modifiziert. In unserem Fall ist $\mathbf{w} = \text{diag} [(1-\xi) \xi \eta]$ und für die Handoverrate ergibt sich

$$\bar{R}_H = \frac{L}{\pi} \mathbf{w} \phi \mathbf{a} \quad (10)$$

Tabelle 2.4: Allgemeine Parameter des Mobilitätsmodells

Parameter	Typ. Wert
Mobilfunkdurchdringung	30 %
Sättigungsgrad ξ	0 – 100 %
Fußgängerdurchdringung η	0 – 100 %
Kapazität C	155 Mbit/s
Blockierung B	1 %

2.4.2 Numerische Studie

Nachfolgend sind zwei numerische Beispiele angegeben, welche die Handoverraten zeigen, die pro mobilitätsunterstützendem teilnehmerseitigem Mobilvermittlungsknoten auftreten.

Im ersten Beispiel (Abb. 2.17) wird die Zellgröße der jeweils herrschenden Verkehrsdichte angepasst, so daß das Angebot mit der maximalen Blockierung bedient werden kann. Mit zunehmender Fußgängerdurchdringung und steigendem Sättigungsgrad sinkt damit die Zellgröße. Dabei wird angenommen, daß der MAS stets ein festes Einzugsgebiet hat. Die Anzahl RAP des MAS steigt also in Abb. 2.17 kontinuierlich an auf etwa 150.

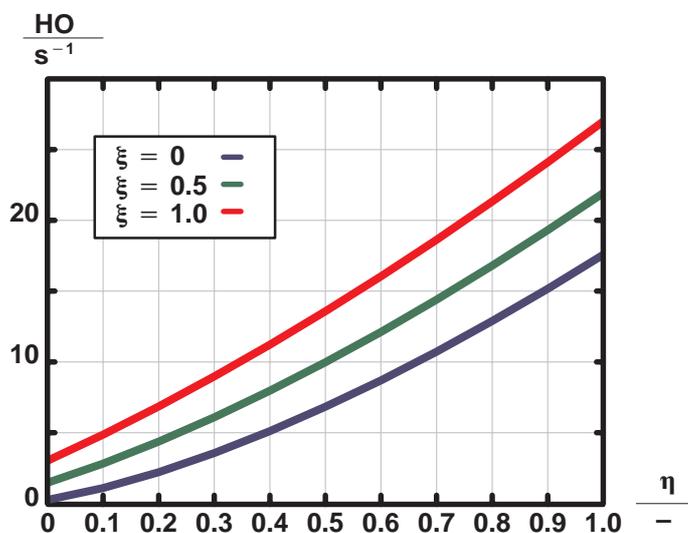


Abb. 2.17: Handoverrate pro MAS in Abhängigkeit von Fußgängerdurchdringung und Sättigungsgrad bei lastadaptiver Zellgröße

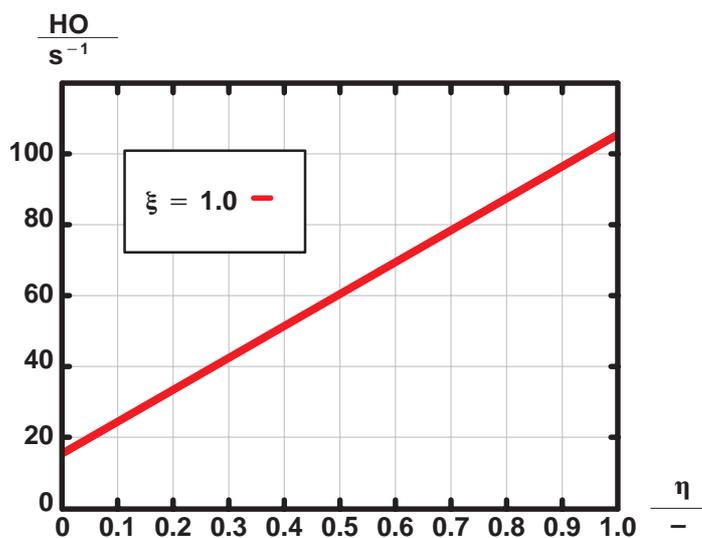


Abb. 2.18: Handoverrate pro MAS in Abhängigkeit von Fußgängerdurchdringung und Sättigungsgrad bei fixer Zellgröße (50 m)

Bei einer fixen Zellgröße von 50 m besitzt der MAS im selben Versorgungsgebiet über 2000 Zellen und muß entsprechend eine wesentlich höhere Handoverrate verarbeiten (Abb. 2.18). Die Handoverrate ist in diesem Fall vom Sättigungsgrad nahezu unabhängig.

3 Verbindungsnachführung in Mobile ATM Netzen

Um Mobilität in ATM-Netzen zu unterstützen, müssen Mechanismen zur Verbindungsnachführung definiert und implementiert werden. Die Verbindungsnachführung sorgt bei einem sich bewegenden Mobilterminal MT dafür, daß dessen Verbindungen stets automatisch zum momentanen Netzzugangspunkt geführt werden. Um die Beeinträchtigung der Nutzdatenverbindungen möglichst gering zu halten, wird nur für einen möglichst kleinen, lokal auf den Einflußbereich der Mobilität des MT begrenzten Teil der Verbindungen ein neuer Weg im Netz gesucht. In jedem Fall soll vermieden werden, daß der ferne Endpunkt der Verbindung in die Wegesuche mit eingebunden oder gar die Verbindung terminiert und neu aufgebaut werden muß. Die Verbindungsnachführung ist im wesentlichen eine partielle Wegeneuwahl (partial rerouting). Synonym für Verbindungsnachführung wird daher im folgenden auch der Begriff Rerouting verwendet.

Die Verbindungsnachführung wird von der Bewegung des Mobilterminals im Netz über Zonengrenzen hinweg (Interzonen Handover, Abb. 2.9) ausgelöst. Sie beinhaltet:

- Wahl eines Umschaltpunktes
- Suche eines neuen Teilweges im ATM-Festnetz zum Zeitpunkt des Handovers
- Etablierung der Transportkapazitäten entlang des neuen Teilweges
- Umschalten der Verbindungen vom alten auf den neuen Teilweg

Der nachzuführende partielle Weg ist bestimmt durch den Teil der Verbindungen im Netz zwischen dem Mobilterminal und einem Umschaltpunkt, dem Cross-Over Switch COS. Dieser Umschaltpunkt ist jene ATM-Vermittlungsstelle, ab der sich der neue und der alte Weg in Richtung Mobilterminal trennen beziehungsweise wo sich der alte und der neue Weg vom Mobilterminal kommend treffen.

3.1 ATM Vermittlungsebenen und Wegesuche

3.1.1 Wegesuche in der ATM-Vermittlungsschicht

Die ATM-Vermittlungsschicht ist in eine VC-Ebene und eine darunter liegende VP-Ebene untergliedert (Abb. 3.1). Eine virtuelle ATM-Verbindung der VC-Ebene (Virtual Channel Connection VCC) wird abschnittsweise in einzelnen VC-Segmenten (Virtual Channel link, VC-link) über die VC-Vermittlungseinheiten eines ATM-Netzes geführt. Die VC-Verbindung terminiert an einem Endpunkt (Endpoint) und besitzt jeweils am Ende eines ihrer VC-Segmente einen Verbindungspunkt (Connecting Point). Ein VC-Link der ATM-Schicht wird über

eine Verbindung der VP-Schicht (Virtual Path Connection VPC) geführt, welche wiederum aus einem oder mehr VP-Segmenten zusammengesetzt ist und die entsprechenden End- und Verbindungspunkte besitzt. In den VC-Vermittlungseinheiten eines ATM-Netzes werden ATM-Verbindungen auf VC-Ebene vermittelt, was auch die Änderung der VC-/VP-Kennziffern (VCI, VPI) beinhalten kann. Physikalisch wird ein einzelnes VP-Segment über einen Pfad der Übertragungsschicht geführt. In der physikalischen Schicht sind für diesen Übertragungspfad weitere Untergliederungsebenen vorgesehen (Abb. 3.1, [113]), die hier allerdings nicht weiter von Bedeutung sind.

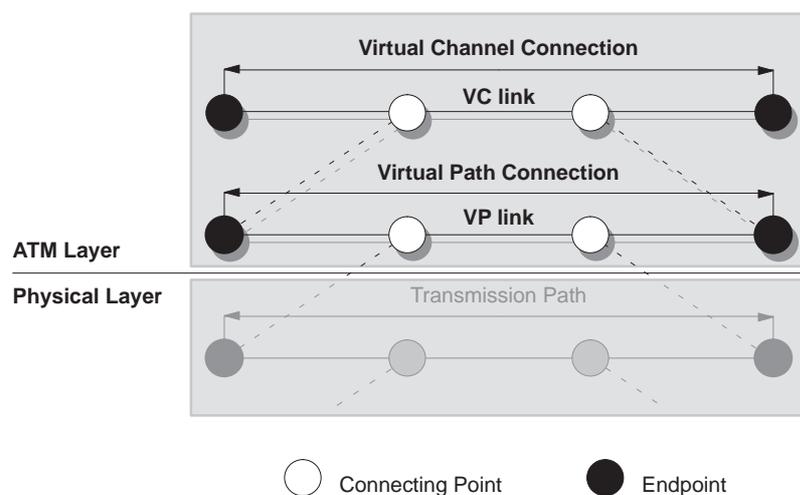


Abb. 3.1: Virtuelle Kanäle und Virtuelle Pfade der ATM-Schicht

Während des Verbindungsaufbaus wird der Weg einer VC-Verbindung VCC durch das Netz gewählt und abschnittsweise etabliert. Für die Wegewahl wird beispielsweise das PNNI-Protokoll verwendet. PNNI besitzt ein mehrstufiges, hierarchisches Routingmodell, das über verschiedene Aggregationsschritte jedem ATM-Knoten des PNNI-Netzes eine abstrakte Sicht der Netztopologie vermittelt. Diese Topologieinformation wird in einem abschnittswisen Source Routing Verfahren genutzt. In der Vermittlungseinrichtung, an deren Benutzerschnittstelle ein Verbindungswunsch eintrifft, wird aufgrund ihrer lokalen Sicht der Netztopologie eine erste Routingentscheidung getroffen und eine Liste der ausgewählten Transitknoten (Designated Transit List DTL) erzeugt.

Diese DTL enthält eine abstrakte Sicht des Netzes und keinesfalls alle physikalischen Netzknoten entlang eines möglichen Weges zum gewünschten Rufziel. Der aktuelle Netzknoten wählt einen in Frage kommenden benachbarten Knoten aus und signalisiert diesem den Verbindungswunsch in einer SETUP-Meldung. Die DTL wird in diese Meldung eingefügt und beim Erhalt der SETUP-Meldung vom Folgeknoten analysiert. Dabei wird die Route durch das Netz durch lokale Informationen über die Netztopologie detailliert und ggf. eine aktualisierte

DTL an dedizierten Knoten erzeugt. Danach wird erneut einer der erreichbaren Nachbarknoten ausgewählt und ihm in einer SETUP-Meldung die aktuelle DTL zum gewünschten Ziel mitgeteilt. So wird der Verbindungswunsch schrittweise über die physikalischen VC-Vermittlungsknoten des Netzes geführt und ein entlang der Route gelegener Nachbarknoten im lokalen Wegewahlschritt ausgewählt, bis das Ziel erreicht ist. Je VC-Segment muß also von den beteiligten VC-Vermittlungsstellen eine Wegewahl- und eine Verbindungsannahmeentscheidung getroffen werden.

3.1.2 Virtuelle Pfade in ATM-Netzen

Wie in Abb. 3.1 dargestellt ist die ATM-Vermittlungsschicht in zwei Ebenen unterteilt, die VC-Ebene und die VP-Ebene. Die VP-Ebene wird häufig im Netzmanagement, zur Verkehrslenkung und zum Verkehrsmanagement eingesetzt [45][191][208]. Beispiele für die Nutzung der VP-Ebene sind:

- Trennung von Dienstklassen für effizientes statistisches Multiplexen
- Logische Netze für lastadaptive Verkehrslenkung und Direktwege über VP-Crossconnect
- Logische Netze für effiziente Restauration im Fehlerfall

Untersuchungen haben gezeigt, daß statistisches Multiplexen von Verbindungen variabler Datenrate dann besonders effizient ist, wenn die gemischten Verkehrsströme ebenfalls von variabler Datenrate sind [135][136][191]. Um besonders ressourceneffiziente Übertragung sicherzustellen, können virtuelle Pfade mit reservierter Bandbreite etabliert werden, auf denen dann der statistische Multiplexverkehr eines homogenen Gemisches einer Verkehrsklasse transportiert wird. Der Verkehr mit konstanter und variabler Datenrate wird dann jeweils auf getrennten Pfaden geführt. Dieses Verkehrsmanagement ist eine sehr häufige Anwendung von virtuellen Pfaden in ATM-Netzen.

Darüber hinaus werden virtuelle Pfade eingesetzt, um auf der physikalischen Netztopologie eine zweite, virtuelle Topologie zu definieren. Dieses logische Netz erlaubt es, den einzelnen VP-Vermittlungsabschnitten variable Bandbreiten zuzuweisen und die Topologie den wechselnden Verkehrsströmen im Netz optimal anzupassen. Neben dem statistischen Multiplexen ist dies eine weitere Ebene des Verkehrsmanagements in ATM-Netzen, für die virtuelle Pfade hervorragend geeignet sind [45][191].

Eine VP-Verbindung im ATM-Netz ist aus Sicht der VC-Vermittlungsebene ein Vermittlungsabschnitt, auf dem ein VC-Segment (VC-link) etabliert wird. Auf dem Weg über diesen Vermittlungsabschnitt durchlaufen die ATM-Zellen einer Verbindung lediglich VP-Vermittlungsstellen (VP-Switch, VP-Crossconnect). Die Verbindungspunkte des VC-Segments sind die Endpunkte der VP-Verbindung. An diesen Endpunkten befinden sich wiederum VC-Vermittlungsstellen. Beim Verbindungsaufbau kann die Anzahl der zu bearbeitenden VC-Seg-

mente und damit die dafür benötigte Zeit durch den Einsatz virtueller Pfade reduziert werden. Die Anzahl der Hops, der Strecken/Vermittlungsabschnitte zwischen VC-Vermittlungsstellen, ist dann geringer und die Anzahl der Rufannahme- und Wegewahlentscheidungen sinkt. Hinzu kommt, daß die Wege der Verbindungen durch das Netz nicht in Echtzeit während des Verbindungsaufbaus berechnet werden müssen. Bei Netzbetriebskonzepten, die auf virtuellen Pfaden basieren, werden die Wege durch Funktionen des Netzmanagements berechnet und virtuelle Pfade entlang dieser Wege etabliert. Damit stehen die Wege zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus bereits fest. Für eine effiziente Ressourcenauslastung können mehrere virtuelle Pfade berechnet werden, so daß Wegewahlalternativen zur Verfügung stehen, die zur Verteilung der Verkehrslast genutzt werden können.

Darüber hinaus definieren die virtuellen Pfade ein logisches Netz über der physikalischen Infrastruktur. Dieses logische Netz kann anders als das physikalische Netz leicht veränderten Situationen angepasst werden. Beispielsweise kann die Verkehrslenkung auf veränderte Gewichte der Verkehrsströme reagieren oder bei geringer Auslastung einer Route deren Kapazität reduzieren.

3.2 Anforderungen an Verfahren für die Verbindungsnachführung

Die in WATM CS 1 standardisierten Signalisierungsprotokolle für den Handover (siehe Kapitel 2.3.3) lassen das Verfahren für die Wegewahl und dessen Eigenschaften offen. Sie sind von keiner spezifischen Ausführungsvariante oder proprietären Lösung abhängig, sondern legen lediglich den Zeitpunkt der Wegeneuwahl fest. Dadurch bestehen für Entwurf und Auslegung der Mechanismen zur Verbindungsnachführung weitgehende Freiheiten. Allerdings bestimmen diese Reroutingverfahren zu einem erheblichen Teil den Einfluß des gesamten Handovervorgangs auf die Nutzdatenverbindung und damit auf die Beeinträchtigung von deren Qualität. Es ergeben sich einige Anforderungen an Verfahren zur Verbindungsnachführung, die im folgenden diskutiert werden.

Neben dem primären Ziel der Verbindungsnachführung, einen neuen Weg durch das Netz zum momentanen Netzzugangspunkt auszuwählen, ist eine weitere Anforderung, die Wege optimal zu bestimmen. Diese Routenoptimalität kann aufgrund verschiedener Kriterien bestimmt werden, die in einem zu minimierenden Kostenvektor zusammengefasst sind. Mögliche Kriterien sind:

- Weglänge (Wahl der kürzesten Wege)
- Verteilung der Verkehrslast im Netz
- Auslastung der Netzkomponenten
- Bandbreitenbedarf im Netz und Bandbreitenmanagement (statistisches Multiplexen)

- Dienstgüte wie beispielsweise Blockierung, absolute Verzögerungszeit, Schwankung der Verzögerungszeit oder Zellverluste

Diese Optimalitätskriterien werden in den Vorgaben des jeweiligen Betreibers für sein Netzmanagement festgeschrieben. Ziel ist es, die Netzbetriebskosten möglichst niedrig und die Auslastung der Netzkomponenten möglichst hoch zu halten, sowie gleichzeitig nach einem Handover die beim Verbindungsaufbau zugesagte Verbindungsqualität und Dienstgüte einzuhalten.

Die Wahl eines optimalen (Teil)weges ist ein im wesentlichen von der reinen Verbindungsnachführung während des Handover entkoppeltes Problem, für die keine neuen Algorithmen und Funktionen notwendig sind. Für den neu gewählten Teilweg können dieselben Verfahren zur Verbindungsannahme und zum Qualitätsmanagement angewandt werden, wie sie für feste Verbindungen in ATM-Netzen ohne mobile Teilnehmer eingesetzt werden. Die optimale Wegesuche wird deshalb im folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Qualitätsanforderungen der virtuellen Verbindungen müssen allerdings nicht nur vom Wegewahlverfahren berücksichtigt werden. Sie stehen auch im direkten Zusammenhang mit dem Handovervorgang und dem Umschaltvorgang bei der Verbindungsnachführung. Durch das Umschalten der VCC auf eine neue Basisstation und eine neue Route im Netz können Beeinträchtigungen des Datenstroms entstehen. Zu diesen Beeinträchtigungen zählen

- Unterbrechungen des Datenstroms
- Verlust von Zellen
- Schwankungen der Übertragungsverzögerung

Je nach Gestaltung des Verfahrens können auch Zellduplikationen hinzukommen. Diese Beeinträchtigungen auf der ATM-Zellenebene werden im Rahmen der Diskussion von Verfahren für verlustfreien Handover in Kapitel 4 weiter erläutert. Wesentlichen Anteil am Aufwand, der für einen verlustfreien Handover notwendig wird, hat allerdings die Dauer der Verbindungsnachführung und die Länge des davon betroffenen Segments einer Verbindung. Ein Verfahren zur Verbindungsnachführung sollte entsprechend schnell zu bearbeiten sein und möglichst nur kurze Abschnitte einer Verbindung umleiten. Diese Anforderungen sind aber antagonistisch zur Forderung einer optimalen Wegeführung mit hoher Ressourcenökonomie. Beide Ziele gleichzeitig sind nur schwer oder gar nicht zu erreichen.

3.3 Klassifizierung der Verfahren zur Verbindungsnachführung

Abhängig von der Gewichtung der Anforderungen und Beurteilungskriterien sowie von Einsatzgebieten und Implementierungsaspekten ergeben sich unterschiedliche Verfahren für die Verbindungsnachführung. Anhand der grundsätzlichen Entwurfsoptionen und Hauptzielsetzungen wird im folgenden eine Klassifikation für die Verfahren zur Verbindungsnachführung erstellt.

3.3.1 Verbindungsnachführung in WATM-Netzen

Durch die Mobilität eines Teilnehmers/eines Mobilterminals ändert sich dessen momentaner Zugangspunkt zum Netz. Seine Verbindungen sollen dabei aufrecht erhalten werden derart, daß höhere Protokollschichten keinerlei Kenntnis von der Mobilität des Gerätes benötigen und eine Dienstgüte ähnlich der eines festen Netzzugangspunktes erfahren. Um das zu erreichen, müssen die Verbindungen über den jeweils aktuellen Netzzugangspunkt geführt werden. Spätestens wenn dabei Zonengrenzen überschritten werden (siehe Abb. 2.9), ändert sich der Weg einer Verbindung durch das Netz und damit auch ein Teil der VC-Vermittlungen, über welche die Verbindung geführt wird. Dieser neue Weg muß ausgewählt und dann entlang dieses Weges in den VC-Vermittlungsknoten jeweils eine Verbindungsannahme- und eine Wegewahlentscheidung getroffen werden. Nachdem so eine partielle Verbindung neu eingerichtet wurde, muß möglichst ohne Beeinträchtigung des Nutzdatenstroms auf den neuen Pfad umgeschaltet werden. Diesen gesamten Vorgang mit Wegesuche, Wegewahl, Pfadetablierung und Pfadumschaltung bezeichnen wir im folgenden als Verbindungsnachführung.

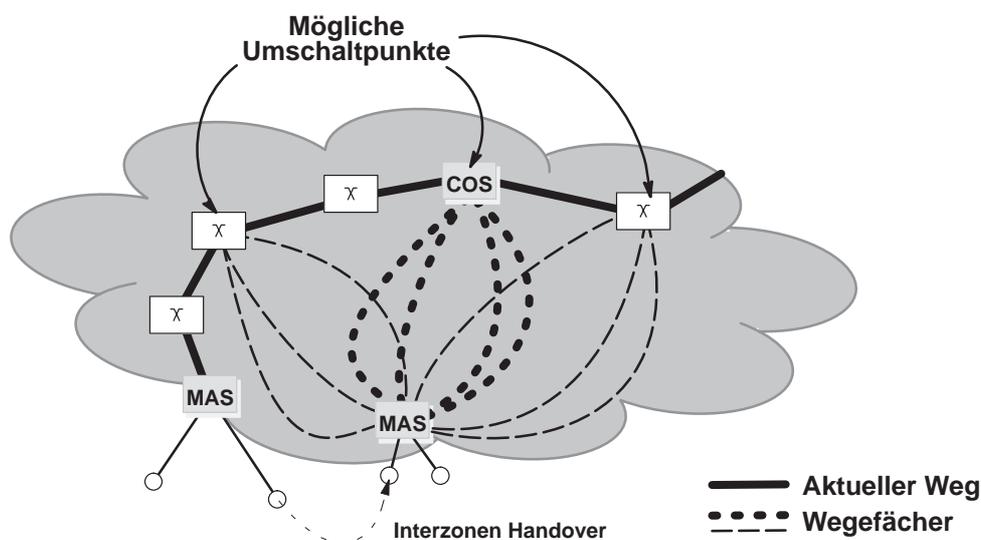


Abb. 3.2: Wegesuche und Auswahl des Umschaltpunktes beim Interzonen Handover

Grundsätzliches Problem der Verbindungsnachführung ist die Wegesuche und -auswahl. Im Handoverfall muß aus einem Fächer möglicher Wege zum neuen MAS ein Weg ausgewählt werden. Dabei wird sich meist eine partielle Übereinstimmung mit dem Pfad zum alten MAS ergeben, wobei sich der Divergenzpunkt der beiden Routen als Umschaltpunkt (Cross-Over Switch COS) eignet. Die Suche nach einem neuen partiellen Pfad gestaltet sich einfach, wenn der Handover im Zuständigkeitsbereich des alten MAS bleibt, der in diesem Fall die COS-Funktion übernimmt (Intrazonen Handover). Aufwendiger wird dieser Schritt beim Interzonen Handover, im Zuge dessen die Grenzen zweier MAS-Gebiete überschritten werden (Abb. 3.2). Mit einer möglichst schnell konvergierenden Suchstrategie muß hier ein kostengünstiger Weg zum neuen MAS ermittelt und der Umschaltpunkt festgelegt werden. Für diese Wegesuche und Wegeneuwahl im Handoverfall einer WATM-Verbindung existieren bereits eine Reihe von Vorschlägen [20][66][73][120][124][142][171][199][200]. Deren Merkmale werden im folgenden systematisiert und in Kategorien gefaßt.

Für die weitere Diskussion der Verfahren zur Verbindungsnachführung definieren wir ein Modell der ATM-Verbindung eines mobilen Teilnehmers (Abb. 3.3). Dieses Modell teilt die virtuelle Verbindung in zwei Segmente jeweils zwischen Umschaltpunkt COS und Mobilterminal beziehungsweise fernem Endpunkt. Entsprechend den Hierarchieebenen der ATM-Schicht (Abb. 3.1) bestehen diese beiden Segmente wiederum aus einzelnen VC-Segmenten (VC-link). Beim Handover werden die VC-Segmente zwischen dem Mobilterminal MT und dem Umschaltpunkt COS neu bestimmt. Sie ändern sich, weil die Verbindungen des Mobilterminals über die neue Basisstation und den dazugehörigen MAS geführt werden. Entsprechend wird dieser Teil der virtuellen Verbindung im folgenden als mobiles Segment bezeichnet. Zwischen dem Umschaltpunkt COS und dem fernen Endpunkt der Verbindungen ändert sich durch die Bewegung des Mobilterminals, das den Handover auslöst, nichts an der Wegeführung. Entsprechend wird dieser Teil einer virtuellen Verbindung im folgenden festes Segment genannt werden (Abb. 3.3).

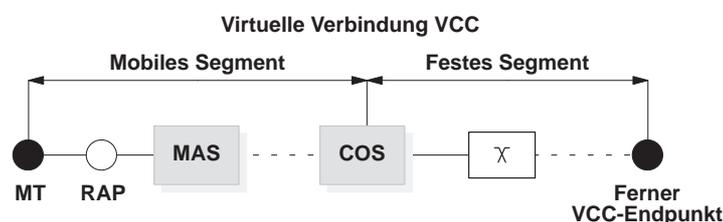


Abb. 3.3: Mobiles und festes Segment einer WATM-Verbindung

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß dieses Modell keinerlei Annahmen über den Charakter des fernen Endpunktes trifft. Es kann sich dabei ohne Einschränkungen der Gültigkeit um eine feste ATM-Station (Endgerät, Server etc.) oder um ein WATM-Mobilterminal

handeln. Im Falle eines Mobilterminals wird der ferne Endpunkt für die Dauer der Handovertransaktion als fest angenommen. Bei einer Implementierung muß der Fall von überlappenden Handovertransaktionen jedoch berücksichtigt und ein entsprechender Abfangmechanismus vorgesehen werden [36].

3.3.2 Wegesuche und Umschaltpunkt

Die Verfahren zur Verbindungsnachführung beziehen sich auf das mobile Segment einer Verbindung. Zur Spezifizierung des mobilen Segments im Handoverfall ist die Wahl eines Umschaltpunktes COS notwendig. Für das so festgelegte mobile Segment der vom Handover betroffenen Verbindung müssen ein neuer Weg durch das ATM-Netz bestimmt, die VC-Segmente etabliert und die entsprechenden Ressourcen in Verbindungsannahmeentscheidungen reserviert werden. Das mobile Segment einer virtuellen Verbindung ist damit bei jedem Handover einer deutlichen Veränderung unterworfen. Die Anzahl und Länge der VC-Segmente im mobilen Segment sowie deren Kennzahlen (VCI, VPI) können sich bei jedem Wechsel einer Funkzelle ändern.

Tabelle 3.1: Methoden zur Wegesuche für das mobile Segment

Verfahren		Definition
Dynamische Wegesuche		Suche und Auswahl eines Weges durch das Netz zum Zeitpunkt des Handovers
Statische Wege	ruforientiert	Asynchrone Berechnung statischer Wege zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus für die Dauer der Verbindung
	permanent	Permanente Einrichtung von vorberechneten Wegen, die zum Handoverzeitpunkt genutzt und aktiviert werden, durch netzplanerische/-verwalterische Maßnahmen

Statische Wege

Die Wegesuche für das mobile Segment kann dynamisch oder statisch erfolgen (Tabelle 3.1). Bei der statischen Variante werden entweder permanent, d.h. durch netzplanerische Schritte und Konfigurationsmaßnahmen, oder ruforientiert, d.h. beim Verbindungsaufbau, Wege durch das Netz vorberechnet und im Handoverfall selektiert und aktiviert. Damit stehen das mobile und das feste Segment einer virtuellen Verbindung bereits vor dem Handover fest, wenn nicht mehrere Alternativwege zur Auswahl stehen.

Auch im Fall vorausberechneter Alternativwege entfällt die Wegesuche im Handoverfall. Stattdessen kann ausgehend von einem oder mehreren bekannten Umschaltpunkten ein Weggefächer zur Auswahl stehen. Damit reduziert sich die Wegesuche auf eine einfache Wegewahl mit nachfolgender oder vorgeschalteter Wahl des Umschaltpunktes.

Dynamische Wegesuche

Bei der dynamischen Variante wird jeweils erst zum Handoverzeitpunkt ein neuer Weg durch das Netz zum aktuellen MAS gesucht. Dies kann durch mehrere Randbedingungen gesteuert und begrenzt werden. Wichtigste Randbedingungen sind Metriken zur Bestimmung der Kosten eines Weges sowie Vorschriften zur Festlegung der Grenze zwischen mobilem und festem Segment (Umschaltpunkt COS). Wegewahl und Wahl des COS sind auch hier eng miteinander verzahnt. Die Wahl des COS reduziert die Anzahl der Freiheitsgrade bei der Bestimmung des Fächers möglicher Routen. Andererseits kann das Verfahren zur Wegewahl bereits zur eindeutigen Festlegung des Umschaltpunktes führen und damit die Freiheitsgrade für die Wahl des COS eliminieren. Diese Zusammenhänge werden deutlich, wenn im folgenden zunächst die Methoden zur dynamischen Wegesuche vorgestellt und danach die Optionen zur Bestimmung des Umschaltpunktes diskutiert werden.

Die einfachste Möglichkeit ist, frei von Randbedingungen Ende-zu-Ende einen neuen Weg zwischen aktuellem MAS und fernem Endpunkt zu berechnen. Dieser Ansatz versucht, eine global möglichst optimale, d.h. kostengünstige Route zu ermitteln. Die VC-Vermittlungseinheit, bis zu der vom fernen Endpunkt kommend beide Wege identisch sind und ab welcher der alte und der neue Weg divergieren, markiert die Grenze zwischen mobilem und festem Segment. Diese Art der Wegesuche verhindert, daß der Einfluß des Handover auf einen lokalen Bereich begrenzt wird. Eine globale Optimierung des Weges während der Verbindungsnachführung führt dazu, daß alle VC-Vermittlungseinheiten entlang des Weges einer Verbindung von der Mobilität des Teilnehmers betroffen sein können.

Alternativ hierzu können die Freiheitsgrade hinsichtlich des Umschaltpunktes bei der Wegesuche eingeschränkt werden. Damit reduziert sich im Netz die Zahl der möglichen Endpunkte für das mobile Segment. Das Wegesuchverfahren berechnet dann einen Wegefächer zwischen dem neuen MAS und den möglichen Umschaltpunkten COS. Mögliche Umschaltpunkte sind die VC-Vermittlungsknoten im aktuellen Weg der Verbindung zum alten MAS, die in der Lage sind, die Umschaltfunktion wahrzunehmen.

Die Wegesuche kann nach verschiedenen "klassischen" Algorithmen durchgeführt werden, wie sie im ATM-Festnetz bereits Anwendung finden [32]. Dort ist das Verkehrslenkungsverfahren im wesentlichen nicht festgelegt und es kann betreiber-/herstellerspezifisch implementiert werden. Für eine Mehrbetreiber-/herstellerumgebung sind natürlich auch dort verbindliche Absprachen notwendig, deren Natur aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter interessieren. Die Verbindungsnachführung im Handoverfall ist so auszulegen, daß hinsichtlich der Wahl des Wegesuch-/Verkehrslenkungsverfahrens keine Einschränkungen bestehen.

Aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen liefert das Wegesuchverfahren einen Fächer möglicher Wege, aus dem dann im Rahmen der Verbindungsnachführung einer ausgewählt wird.

Die Anzahl der Freiheitsgrade bei der Wegesuche richtet sich nach der Reihenfolge, in welcher die Schritte Wegesuche/-wahl und Wahl des Umschaltpunktes COS durchgeführt werden. Eine vorgeschaltete Wahl des COS schränkt die Anzahl möglicher Wege ein, während sie durch die nachgestellte Wahl des Umschaltpunktes erhöht wird. Die vorgeschaltete Wahl des Umschaltpunktes ist eine explizite Auswahl des COS, während die nachgeschaltete Wahl implizit durch die Wegewahl erfolgt als dem Vermittlungsknoten, ab dem der alte und der neue partielle Weg des mobilen Segments sich treffen.

Abhängig vom Wegewahlverfahren bestimmen sich also die Freiheitsgrade für die Wahl des COS und umgekehrt. Im folgenden werden die Alternativen zur Wahl des Umschaltpunktes COS diskutiert. Der Umschaltpunkt COS aus dem Modell von Abb. 3.3 muß, wie bereits erwähnt, für die Dauer einer Verbindung nicht statisch sein. Vielmehr handelt es sich um eine Rolle, die einerseits dynamisch zum Zeitpunkt des Handovers einem ATM-Knoten entlang der Route zugeteilt werden kann. Andererseits kann diese Rolle aber auch beim Verbindungsaufbau fest für die Dauer der Kommunikationsbeziehung einem entsprechend ausgerüsteten ATM-Vermittlungsknoten zugewiesen werden. Darüber hinaus kann der COS in der Netztopologie fest eingerichtet sein (ACS in Abb. 2.9), so daß alle ATM-Verbindungen eines Gebietes einen bereits vor dem Verbindungsaufbau feststehenden gemeinsamen COS besitzen, an dem stets auch alle festen Segmente der Verbindungen enden. Je nach Strategie zur Zuweisung dieser Rolle ergeben sich drei Methoden zur Bestimmung des Umschaltpunktes (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Methoden zur Bestimmung des Umschaltpunktes COS

Verfahren	Definition
Dynamische Suche	Bestimmung des Umschaltpunktes zum Handoverzeitpunkt
Ankerverfahren	ruforientiert Bestimmung des Ankerknotens zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus für die Dauer der Verbindung
	permanent Permanente Einrichtung eines Ankerknotens als in der Netztopologie ausgezeichnete, für alle MT eines Gebietes identischer Knoten zur Steuerung der Verbindungsnachführung

Dynamische Wahl des Umschaltpunktes

Im ersten Fall von Tabelle 3.2 wechselt bei jedem Handover jener Knoten, der die Umschaltung vornimmt. Damit ändert sich nicht nur das mobile Segment, sondern auch das feste Segment. Nach der Wahl des COS ist dieses Verbindungssegment allerdings für die Dauer eines

Handovervorganges konstant, so daß wir auch in diesem Fall weiterhin von einem festen Segment sprechen. Diese Methode zur Bestimmung des Umschaltpunktes wird im folgenden als dynamische Suche bezeichnet [24][25][39][199][200].

Dafür gibt es mehrere Strategien [199]. Zunächst kann unabhängig von der aktuellen Route der Verbindung eine vollständig neue Route durch das ATM-Netz zum fernen Endpunkt ausgehend vom neuen MAS berechnet werden. Der COS ist dann der Vermittlungsknoten im Netz, ab dem die beiden Routen divergieren [124]. Wenn der neue MAS Kenntnis vom aktuellen Weg besitzt, sind weitere Freiheitsgrade möglich. So können alle Knoten entlang des Weges auf ihre Eignung als Umschaltpunkt untersucht werden. Zum COS bestimmt werden kann dann der, welcher einen partiellen Weg zum neuen MAS ermöglicht, der bestimmten Optimalitätskriterien genügt. Als Optimalitätskriterien kommen in Frage:

- Optimale Gesamtlänge der Verbindung – neue Ende-zu-Ende-Verbindung möglichst kürzer als die aktuelle oder gleich lang
- Optimale Synchronbedingungen – partieller Weg zwischen altem/neuem MAS und COS jeweils gleich lang oder mit minimaler Differenz der Übertragungsverzögerung
- Optimierung des mobilen Segmentes – minimale Länge des partiellen Weges zwischen COS und neuem MAS [199]
- Optimierung des festen Segmentes – maximale Länge des partiellen Weges zwischen COS und fernem Endpunkt (maximale Wiederverwendung von VC-Segmenten der Verbindung) [199]

Die Länge einer Verbindung kann in diesem Zusammenhang definiert sein als absolute Wegstrecke/Leitungslänge. Wesentlich häufiger wird sie jedoch gemessen als die Anzahl der VC-Segmente, die sie umfasst. Diese zweite Definition ist hilfreich bei der Ermittlung des Zeitbedarfs für die Rufbearbeitung während der Verbindungsnachführung. Diese Metrik für die Länge der Verbindung kann aber erst nach Abschluß des Wegesuchverfahrens bestimmt werden. Die Auswahl des COS ist daher bei der dynamischen Suche nur in Verbindung mit dem Wegesuch-/Verkehrslenkungsverfahren möglich.

Ankerverfahren (Statische Wahl des Umschaltpunktes)

Im zweiten Fall von Tabelle 3.2 endet das feste Segment der Virtuellen Verbindung über deren gesamte Lebensdauer an dem anfangs bestimmten Knoten. Dieser Knoten bildet einen Anker, von dem aus die Verbindung zum momentanen Netzzugangspunkt weitergeschaltet wird. Weil der Anker erst zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus bestimmt wird, wird diese Kategorie im folgenden als ruforientiertes Ankerverfahren bezeichnet.

Im dritten Fall wird die Rolle des COS fest einem Vermittlungsknoten im Netz zugewiesen, so daß der Umschaltpunkt im Handoverfall bereits vor dem Zeitpunkt eines Verbindungsaufbaus feststeht. Es handelt sich dabei um einen in der Netztopologie ausgezeichneten Knoten,

welcher die Verbindungsnachführung für alle Mobilterminals seines Zuständigkeitsbereiches steuert. Dieses Konzept des fest eingerichteten Umschaltpunktes wird als permanenter Anker bezeichnet. Auch für den Einsatz von permanenten Ankern in WATM-Netzen finden sich Vorschläge in der Literatur [5][8][37][161][171]. Das Konzept findet bereits in Form des Mobile Switching Center MSC Anwendung in den GSM-Mobilfunknetzen der 2. Generation [13].

Die Ankerverfahren zur Bestimmung des Umschaltpunktes erlauben die beliebige Kombination mit statischen oder dynamischen Wegesuchverfahren. Eine implizite, nachgeschaltete Wahl des COS nach der Bestimmung des Wegefächers ist allerdings nicht möglich. Der Umschaltpunkt steht bereits vor der Wegesuche fest und geht dort als Nebenbedingung ein. Eine global optimierte Route kann damit nicht mehr bestimmt werden. Dem gegenüber haben die Ankerverfahren jedoch den Vorteil, die Auswirkungen der Mobilität auf einen klar abgegrenzten Bereich des Netzes zu beschränken. Dieser Bereich wird Ankerdomäne genannt. Jenseits des Ankers, d.h. außerhalb der Ankerdomäne, sind keine mobilitätsunterstützenden Funktionen mehr in den Vermittlungseinheiten notwendig. Wegen des geringeren Suchaufwandes reduzieren die Ankerverfahren außerdem die Handoverlatenz und ermöglichen so eine geringere Beeinträchtigung des Nutzdatenstroms während des Handovers.

3.3.3 Grundtypen der Verbindungsnachführung beim Handover

Durch unterschiedliche Kombination der Verfahren zur Wegesuche/-wahl und COS-Bestimmung werden Grundschemata der Verbindungsnachführung definiert. Die vier grundsätzlichen Kategorien werden im folgenden vorgestellt und erläutert.

In einer frühen Veröffentlichungen, die eine systematische Untersuchung der Reroutingverfahren zum Ziel hatte, wurden zunächst drei Kategorien identifiziert: vollständige Neueta-blierung (full reestablishment), inkrementelle Nachführung (incremental reestablishment) und multicast-basierte Nachführung (multicast-based reestablishment) [124]. Diese Arbeit betrachtet ein System aus Client und Server, die über ein verbindungsorientiertes Netz kommunizieren. Die vollständige Neueta-blierung von [124] sieht einen Abbruch der Verbindung und einen erneuten Verbindungsaufbau Ende-zu-Ende vor. Das inkrementelle Schema versucht, den Weg durch das Netz soweit wie möglich wiederzuverwenden und den COS möglichst nah beim Mobilterminal zu plazieren, während das Multicast-basierte Verfahren zwei gleichzeitig aktive Pfade zwischen COS und MT jeweils über die alte und neue Basisstation vorsieht. Dabei werden das Handover-, das Rerouting- und das Umschaltverfahren vermischt und in allen drei Kategorien integriert betrachtet.

Der Weg zwischen Mobilterminal und fernem Endpunkt über die neue Basisstation wird bei allen drei Varianten für jeden Handover berechnet. Wenn die neue Route feststeht, wird gegebenenfalls (inkrementelles und multicast-basiertes Schema) der Umschaltpunkt COS gesucht. Kennzeichnend ist für die Verfahren aus [124], daß die Routen im Netz bei jedem Hand-

over vollständig neu berechnet und der neue COS bestimmt werden. Hinsichtlich des Wegewahlverfahrens unterscheiden sie sich also im wesentlichen nicht. Die drei Varianten differieren ausschließlich hinsichtlich des Umschaltvorgangs, nachdem der neue Weg feststeht. Diese frühen Arbeiten haben allerdings die Richtung für WATM-Reroutingverfahren vorgezeichnet.

In der Folge entstanden vier Grundtypen von Verfahren zur Verbindungsnachführung für den Handoverfall in WATM-Netzen [142][199][200]. Für drei dieser vier Kategorien wurden die Bezeichnungen aus [124] übernommen, allerdings bezeichnen sie jetzt ausschließlich den Part der Wegeneuwahl. Zu den oben erwähnten drei Grundtypen ergänzte sich noch die Variante der Verbindungsverlängerung (connection extension). Alle vier legen das Verfahren für die Wegesuche im Netz nicht fest. Sie bestimmen aber das mobile und das feste Segment einer WATM-VC-Verbindung und damit auch den Teilpfad, für den ein neuer Weg gesucht werden muß. Darüber hinaus ergeben sich auch Randbedingungen für die Wegesuche und den Zeitpunkt, zu dem sie abläuft. In Tabelle 3.3 sind diese vier Grundtypen zusammengestellt.

Tabelle 3.3: Grundtypen der Verbindungsnachführung

Kategorie		Definition
Vollständige Neuetablierung		Terminieren und erneuter Aufbau der ATM-Verbindungen im Handoverfall
Verbindungsverlängerung/ Verkettung (connection extension/chaining)		Umschaltpunkt COS ist stets der lokale MAS oder die Basisstation RAP; von dort werden die Verbindungen des Mobilterminals zum neuen RAP verlängert
Inkrementelle Nachführung		Der Umschaltpunkt kann frei gewählt werden (siehe Tabelle 3.2); von dort aus wird ein Weg durch das ATM-Netz zum neuen RAP gesucht und dann umgeschaltet.
Multicast-basierte Nachführung	join	Behandlung des Problems der Verbindungsnachführung mit den Methoden des Multicastbaumes (join, detach)
	group	Etablieren eines Multicastbaumes zu allen möglichen Handoverkandidaten (RAP)

Die folgenden Abbildungen (Abb. 3.4, Abb. 3.5, Abb. 3.6) zeigen, wie sich bei den verschiedenen Methoden für das Rerouting die Wegeführung einer Verbindung im Netz jeweils bei zwei Handoverschritten ändert. Es handelt sich dabei einmal um einen Intrazonen Handover und zum anderen um einen Interzonen Handover.

Vollständige Neuetablierung

Der naivste Ansatz für die Wegeneuwahl, der gleichzeitig keinerlei Änderungen in den ATM-Vermittlungseinheiten benötigt, ist die vollständige Neuetablierung der Verbindung (Abb. 3.4). Wenn eine Verbindung über die momentane Basisstation nicht mehr fortgeführt werden kann, wird sie terminiert und über die nächste Basisstation mit ausreichendem Signalpegel wieder neu etabliert [124]. Für die Verbindungssteuerung und die Wegesuche/-neuwahl

können reguläre ATM-Vermittlungs- und Signalisierungsverfahren aus dem Festnetz verwendet werden. Eine spezielle Anpassung auf Mobilterminals ist bei der Wegewahl nicht notwendig, allerdings ist die gesamte Verbindung vom Handover eines Mobilterminals betroffen und die Station am fernen Endpunkt muß die Handoversteuerung unterstützen. Das Schema resultiert in hohem Signalisierungsaufwand und erheblichen Beeinträchtigungen der Dienstgüte. Die Behandlung der Unterbrechung wird höheren Protokollschichten überlassen. Damit sind reguläre ATM-Applikationen in diesem Szenario nicht mehr einsetzbar. Speziell an das mobile Umfeld angepasste Applikationen sind notwendig, die im Handoverfall Ende-zu-Ende Verbindungen terminieren und neu aufbauen können. Dieser Grundtyp von Verbindungsnachführung besitzt damit rein akademischen Wert. Er ist nur der Vollständigkeit halber genannt und wird im folgenden nicht näher betrachtet.

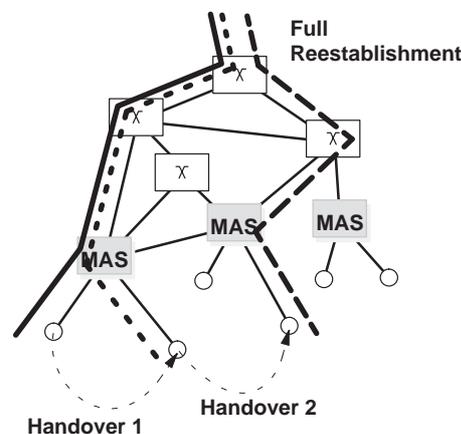


Abb. 3.4: Vollständige Neuetablierung

Verbindungsverlängerung

Mit dem Ziel, den im Handoverfall vom Rerouting betroffenen Teilpfad möglichst kurz und damit die Beeinträchtigung durch das Umschalten möglichst gering zu gestalten, wurde das Verfahren der Verbindungsverlängerung (connection extension) entworfen (Abb. 3.5). Diese Variante wird manchmal auch Verkettung (chaining) genannt [183]. Dabei werden die Verbindungen eines Mobilterminals beim Handover vom aktuellen Netzzugangspunkt aus zum neuen Netzzugangspunkt hin verlängert. Diese Verlängerung kann von der Basisstation RAP aus geschehen (Abb. 3.5, Fall a, [120][124][183]) oder vom lokalen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten MAS (Abb. 3.5, Fall b, [171]). Ersterer Fall setzt voraus, daß die Basisstationen ebenfalls Vermittlungsfunktionen sowie Instanzen der Signalisierungsprotokolle für die Handoversteuerung und ein ATM-Koppelfeld besitzen. Ist diese Komplexität in den Basisstationen unerwünscht, muß die Verbindungsverlängerung im MAS stattfinden. Das Verkettungsschema hat den Vorteil, daß kein Umschaltpunkt im Netz gesucht oder vor bzw. während des Verbindungsaufbaus bestimmt werden muß. Der COS ist automatisch im-

mer der lokale mobilitätsunterstützende ATM-Vermittlungsknoten. Ein Umschalten zwischen zwei disjunkten Teilpfaden findet bei der Variante (a) dieses Verfahrens streng genommen gar nicht statt. Vielmehr wird die Verbindung an der Schnittstelle des Netzes zum Teilnehmer verlängert. Bei dieser Verlängerung des alten auf den neuen Teilpfad im Netz sind die eventuell auftretenden Beeinträchtigungen des Nutzdatenstroms minimal. Lediglich die Laufzeit der ATM-Zellen wird größer. Eine Umschaltung zwischen zwei Teilpfaden im Netz ist allerdings bei der Variante (b) notwendig, wobei diese Teilpfade erheblich voneinander abweichen können (Abb. 3.5).

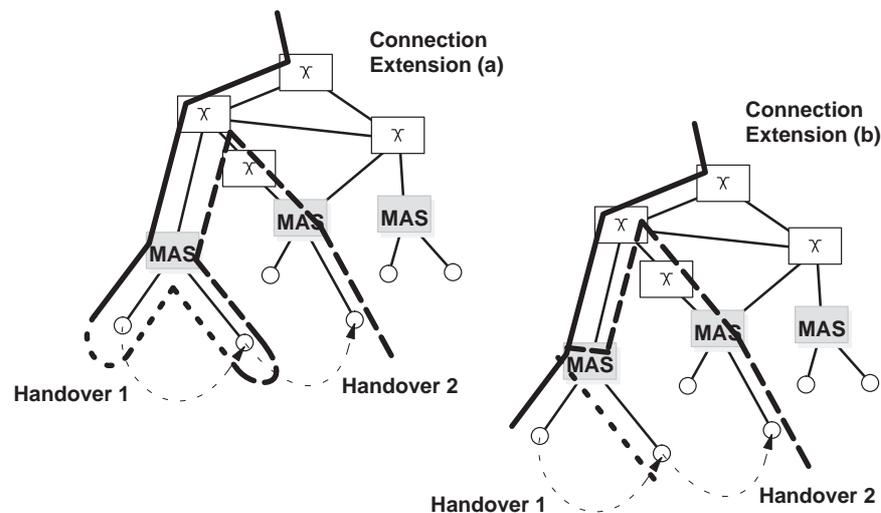


Abb. 3.5: Verbindungsverlängerung (Verkettung)

Nachteil der Verkettung ist, daß sich mit zunehmender Verbindungslaufzeit bzw. zunehmender Zahl der Handover während der Verbindungslaufzeit sehr ineffiziente Routen mit stetig steigender Übertragungsverzögerung ergeben. Zur Beseitigung dieses Nachteils können die Routen nach erfolgtem Handover in einem zweiten Schritt ohne Mitwirkung des Mobilterminals nachoptimiert werden [23][66][171][183]. Darüber hinaus muß durch entsprechende Maßnahmen eine Schleifenbildung verhindert werden [23]. Es entsteht bei der Verkettung also ein zusätzlicher Aufwand zur Koordination von Handover/Verbindungsnachführung und nachgeschalteter Wegeoptimierung. Unter allen Umständen muß vermieden werden, daß sich Wegeoptimierung resultierend aus einem vorausgehenden Handover und aktueller Handover überschneiden oder ein Handover wegen eines laufenden Wegeoptimierungsschrittes nicht ausgeführt werden kann.

Die nachträgliche Routenoptimierung wird vom lokalen MAS initiiert und gesteuert. Dabei wird eine effizientere Route für die Verbindung bestimmt und ein Umschaltpunkt ausgewählt. Das Umschalten zwischen MAS und COS kann durch verlustfreies Ersatzschalten im Netz realisiert werden [70]. Die nachträgliche Routenoptimierung ist somit nicht mit einer Unter-

brechung des Nutzdatentransportes verbunden und entsprechend unkritisch für die Zuverlässigkeit der Verbindung. Die Dienstgüte hinsichtlich der Verzögerungsparameter wird allerdings sowohl beim Handover selbst als auch beim nachfolgenden Wegeoptimierungsschritt beeinflusst. Abhängig von der Netztopologie ergibt sich beim Schema Verkettung ein deutlich erhöhter Ressourcenbedarf (Abb. 3.5). Dieses Grundschema für das Rerouting führt also – zumindest temporär bis zur nachgeschalteten Routenoptimierung – zu einer schlechteren Ressourcennutzung im Festnetz.

Inkrementelle Verbindungsnachführung

Erhöhten Ressourcenbedarf und die damit verbundene Ineffizienz versucht man zu beheben, indem die Routenoptimierung bereits während des Handoverschrittes durchgeführt wird. Damit erhält man ein Verfahren zur Verbindungsnachführung, das inkrementell mit jedem Handover eine möglichst optimale Route zum aktuellen Netzzugangspunkt beizubehalten versucht. Es wird deshalb die inkrementelle Neuetablierung (incremental reestablishment) genannt (Abb. 3.6). Im wesentlichen ist es die konsequente Erweiterung des Verkettungs-Verfahrens (Variante (b), Abb. 3.5) durch eine flexiblere Wahl des Umschaltpunktes im Netz.

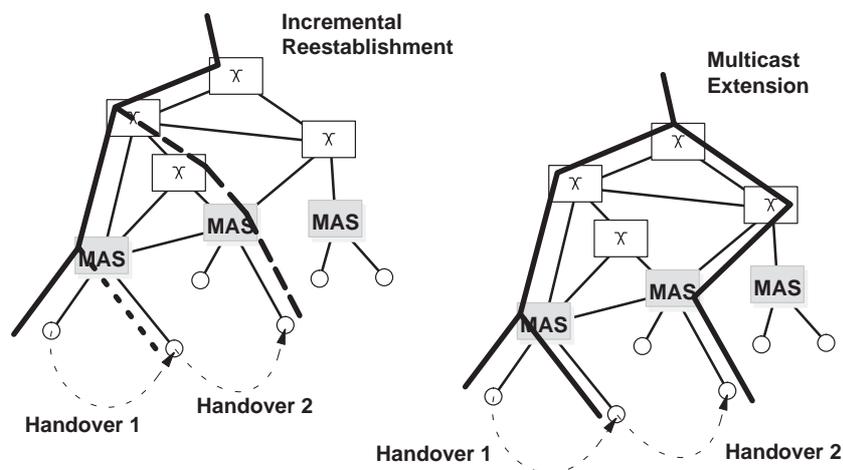


Abb. 3.6: Inkrementelle und multicast-basierte Verbindungsnachführung

Diese Art der Verbindungsnachführung ist sehr vielseitig für unterschiedliche Netztopologien einsetzbar und produziert effiziente und damit kostengünstigere Routen. Eine Wegeneuwahl erfolgt bei jedem Handover, wodurch ein neues mobiles Segment zwischen dem neuen RAP und einem Umschaltknoten im Netz etabliert wird. An diesem Umschaltknoten wird das feste Segment der Verbindung mit dem neuen mobilen Segment verbunden. Der Umschaltknoten wird nach einer der Strategien aus Tabelle 3.2 bestimmt. Die Wegeneuwahl bei der inkrementellen Verbindungsnachführung betrifft nur einen Teil der Verbindung, das mobile Segment. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit unterscheidet sich der optimale Weg der Verbindung zwi-

schen neuem RAP und fernem Endpunkt nur gering vom Weg über den alten RAP. In diesem Fall kann bei der inkrementellen Verbindungsnachführung ein großer Teil des Weges wiederverwendet werden und der Umschaltpunkt liegt nahe beim aktuellen RAP/MAS.

Vorteil der inkrementellen Verbindungsnachführung ist die inhärente Wegeoptimierung, die gleichzeitig mit jedem Handover durchgeführt wird. Schleifenbildungen werden bereits durch die Konstruktion des Verfahrens selbst vermieden. Eine nachträgliche Routenoptimierung entfällt und damit auch der Koordinationsaufwand zwischen Handover-/Nachführverfahren und Wegeoptimierung, wie er im Fall der Verbindungsverlängerung notwendig ist. Gleichzeitig ist die inkrementelle Nachführung eine sehr flexible Variante, welche die unterschiedlichsten Nebenbedingungen wie beispielsweise vorbestimmte Umschaltpunkte berücksichtigen kann. Durch diese Flexibilität ist sie für alle Netztopologien und Verma- schungsgrade gut anpassbar.

Multicast-basierte Verbindungsnachführung

Sehr ressourcenintensiv sind die Verfahren für die Multicast-basierte Verbindungsnachführung [19][20][124][163][199][220][221][222]. Das Prinzip dieser Kategorie basiert auf den Mechanismen zur Verwaltung und Steuerung von Multicastbäumen. Für die Anwendung der Multicasttechnik beim Handover gibt es zwei Varianten [199]: Multicast-Join und Multicast-Group.

Verbindungsnachführung mit Multicast-Join verwendet die Signalisierungsverfahren zur Anmeldung und Abmeldung einer Mobilstation an einer Multicastverbindung [168]. Die mobile ATM-Verbindung wird dabei in Downlink-Richtung als Multicastbaum ohne Verzweigungen betrachtet. Wird eine Handoversituation festgestellt, fordert die Mobilstation mit einer JOIN-Transaktion einen neuen Zweig im Multicastbaum an, der über die neue Basisstation geführt wird. Dieser Zweig wird parallel zum alten Teilpfad etabliert, so daß für die Zeitspanne bis zur Deaktivierung des Zweiges über den alten RAP mit einer LEAVE-Transaktion die ATM-Zellen der Nutzdatenverbindung im COS mit einer Multicastfunktion dupliziert werden. Nach der Abmeldung am alten RAP wird diese Multicastfunktion wieder abgeschaltet. Das Multicast-Join Verfahren ist also im wesentlichen ein inkrementelles Reroutingverfahren, bei dem während des Umschaltens vom alten auf den neuen Teilpfad eine Multicastfunktion aktiviert wird. In der Uplink-Richtung ist bei den publizierten Verfahren stets nur ein Übertragungspfad aktiv [124].

Vorbereitend für einen erwarteten Handover der Verbindungen wird bei der Variante Multicast-Group zu möglichen Handoverzielen (Basisstationen RAP) in Richtung des Downlink ein Multicastbaum etabliert (Abb. 3.6). In der Uplink-Richtung existiert weiterhin nur ein einzelner VC je Verbindung, dessen Weg aber parallel zum Multicastbaum eingerichtet sein kann. Im Handoverfall kann sich eine Mobilstation nun ohne weitere Maßnahmen an der

neuen Basisstation registrieren. Zum Zeitpunkt des Handovers ist keine Verbindungsnachführung mehr notwendig. Vom erhöhten Ressourcenbedarf abgesehen besitzt diese Art des Reroutings also entscheidende Vorteile hinsichtlich der Dienstgüte einer Verbindung. In der Literatur werden verschiedene Verfahren dieser Kategorie vorgeschlagen.

Ein sehr frühes Verfahren ist der Virtual Connection Tree [20]. Beim Virtual Connection Tree VCT wird kein echter Multicastbaum etabliert, sondern eine bidirektionale Baumstruktur virtueller Verbindungen. Dabei werden nur die Wege im voraus reserviert, aber keine Multicastfunktionen aktiviert. Auf diese Weise müssen wie beim Multicastbaum während des Handover mit dem Virtual Connection Tree keine Wege mehr gesucht und ausgewählt werden. Es werden einfach nur die im voraus bereits etablierten VCC und Ressourcen aktiviert. Dadurch ist stets auch nur ein Pfad des Baumes in aktiver Benutzung. Der Handover kann durch die vorausberechneten Routen des VCT mit geringer Latenz initiiert werden, da die Zeitkomponente für die Wegesuche entfällt. Da stets nur ein Pfad des VCT aktiv genutzt wird, ist diese Form des Handovers ebenfalls nicht frei von den Beeinträchtigungen des Nutzdatenstroms. Diese Beeinträchtigungen restlos zu vermeiden versuchen Handovermechanismen, welche auf echtem Multicasting beruhen. In der Downlink-Richtung wird ein Multicastbaum zu den möglichen Handoverzielen etabliert. In Vermittlungsknoten, die auch als Umschaltunkte in Frage kommen, wird für die vom Handover betroffenen Verbindungen die Multicastfunktion aktiviert. Alle Handoverkandidaten erhalten so den Nutzdatenstrom der Halbverbindung des Mobilterminals noch bevor die Erlaubnis zur Ausführung des Handovers erteilt ist. Nach der Freigabe des Handovers kann das Mobilterminal die am besten geeignete Basisstation auswählen und ohne weitere Koordination mit dem verantwortlichen ATM-Knoten umschalten. Nach dem Handover können die nicht weiter benötigten Zweige des Multicastbaums deaktiviert werden, während zumindest in der Downlink-Richtung entsprechende Synchronisationsmechanismen vorausgesetzt die Verbindungen ohne Beeinträchtigung des Nutzdatenstroms weitergeführt werden. Dies erlaubt einen sehr schnellen und verzögerungsarmen Handover, weshalb diese Art der Verbindungsnachführung besonders für Echtzeitdienste gut geeignet ist. Nachteile dieses Verfahrens sind der erhöhte Signalisierungsaufwand für die zusätzliche Verwaltung des Multicastbaumes und der gegenüber der inkrementellen Nachführung deutlich höhere Ressourcenbedarf für die Nutzdatenübertragung im Multicastbaum. Hinzu kommt die ungleiche Behandlung von Uplink und Downlink. Während im Downlink die Nutzdatenübertragung nahezu nahtlos weitergeführt werden kann, ist im Uplink nach wie vor eine Komponente für die Verbindungsnachführung notwendig ähnlich der beim inkrementellen Rerouting. Das erhöht den Signalisierungsaufwand und die Komplexität der Handoversteuerung zusätzlich.

3.3.4 Proaktive und Reaktive Verbindungsnachführung

Die oben beschriebenen Grundtypen der Verfahren zur Verbindungsnachführung sind jeweils eine Kombination von Verfahren zur Wegesuche und zur Wahl des Umschaltpunktes. Darüber hinaus können die Verfahren zur Verbindungsnachführung auch nach dem Zeitpunkt definiert werden, zu dem Wegesuche und Wahl des Umschaltpunktes geschehen. Es können reaktive und proaktive Verfahren unterschieden werden (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Weitere Differenzierung der Verfahren zur Verbindungsnachführung

Kategorie		Definition
Reaktive Nachführung		Rufsteuerungsfunktionen (COS-Wahl, Wegesuche und Wegewahl) werden zum Zeitpunkt des Handovers durchgeführt.
Proaktive Nachführung	ruforientiert	Mögliche Handoverziele werden beim Verbindungsaufbau antizipiert; COS-Wahl, Wegesuche und Wegewahl werden zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus durchgeführt.
	lokal	Nahende Handoversituationen werden antizipiert und mögliche Handoverziele identifiziert; COS-Wahl, Wegesuche und Wegewahl werden für jeden Handover vor dessen Freigabe durchgeführt.

Reaktive Verbindungsnachführung

Die reaktiven Verfahren zur Verbindungsnachführung bestimmen einen neuen partiellen Weg für das mobile Segment jeweils zum Zeitpunkt eines Handovers. Sobald die Notwendigkeit eines Handovers erkannt ist, wird ein Handoverziel identifiziert und die Verbindung wird dorthin nachgeführt. Entsprechend müssen die dazu notwendigen Rufbearbeitungsfunktionen in Echtzeit während des Handovers bearbeitet werden. Dazu gehören die Wegesuche für das mobile Segment, die Wegewahl, die Wahl des Umschaltpunktes und schließlich die Etablierung der Verbindung entlang der partiellen neuen Route. Reaktive Verfahren besitzen also einen wesentlichen Anteil am Zeitbudget des gesamten Handovervorgangs. Insbesondere wird bei der reaktiven Variante die Handoverlatenz zum Großteil durch die Verbindungsnachführung bestimmt. Grundsätzlich eignen sich alle Kombinationen von Verfahren zur Wegesuche und zur COS-Wahl für ein reaktives Verfahren zur Verbindungsnachführung. Lediglich die Multicast-basierten Verfahren machen als reaktive Variante keinen Sinn. Zum Zeitpunkt der Wegewahl steht ein Handoverziel bereits fest und ein Multicast-basiertes Verfahren resultiert in zusätzlichem Ressourcenverbrauch und Signalisierungsaufwand ohne einen Gewinn beispielsweise in Form einer Beschleunigung des Handovervorgangs zu erzielen.

Proaktive Verbindungsnachführung

Proaktive Verfahren der Verbindungsnachführung versuchen, den Beitrag zur Handoverlatenz zu minimieren. Dies geschieht dadurch, daß wesentliche Schritte der Rufbearbeitung

nicht in Echtzeit während des Handovers, sondern vorausschauend und vorbereitend durchgeführt werden. Das gilt insbesondere für die Wegesuche, die Wahl des Umschaltpunktes und die Etablierung der entsprechenden VC-Segmente. Bei den proaktiven Verfahren werden die Handoverkandidaten unter den benachbarten Basisstationen indentifiziert und zu diesen möglichen Zielen eines Handovers Wege und Umschaltpunkte ermittelt, bevor die Handoversituation eintritt. Die Bestimmung des Wegefächers kann dabei ruforientiert zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus für die gesamte Verbindungsdauer erfolgen. Dieses Vorgehen ist jedoch sehr aufwendig und ressourcenintensiv. Es eignet sich nur für kleine, lokale Netze mit wenigen Knoten. Besser skalierend ist die Alternative, ausgehend vom momentanen Standort die möglichen Ziele für den nächsten Handover zu bestimmen und in einem lokal proaktiven Schritt die Verbindungsnachführung vorzubereiten.

Nach der proaktiven Wegewahl erfolgt die Etablierung von VC-Segmenten für die möglichen neuen mobilen Segmente der Verbindung. Dafür stehen zwei Alternativen zur Verfügung:

- Wahrscheinlichste Route

Diese Variante etabliert eine partielle Verbindung für das mobile Segment nur entlang des Weges zum wahrscheinlichsten Handoverkandidaten. Wenn schließlich doch eine andere Basisstation RAP als Handoverziel gewählt wird, muß eine Möglichkeit vorgesehen werden, diese Entscheidung zurückzunehmen und die Verbindung zum endgültigen Handoverziel zu schalten (Crankback).

- Verbindungsbaum

Es können auch VC-Segmente zu allen in Betracht kommenden Handoverzielen etabliert werden, wenn eine besonders performante Handoverbearbeitung notwendig und ein Crankback-Schritt nicht akzeptabel ist. Vom Umschaltpunkt aus wird in diesem Fall ein Baum mit partiellen Verbindungen zu allen möglichen Handoverzielen eingerichtet. Beim Handover wird eine dieser partiellen Verbindungen zum neuen mobilen Segment gewählt und durch Umschalten mit dem festen Segment verbunden.

Bei den proaktiven Verfahren der Verbindungsnachführung wird also ein erhöhter Aufwand (Ressourcenverbrauch) genutzt, um einen besonders latenzfreien Handover realisieren zu können. Dadurch, daß partielle Verbindungen entlang der Wege zu den möglichen Handoverzielen bereits im voraus etabliert werden, existiert das neue mobile Segment einer Verbindung bereits, bevor das alte mobile Segment terminiert wurde. Im Handoverfall muß dann nur noch zwischen den beiden Segmenten umgeschaltet werden, die Funktionen der Rufbearbeitung entfallen während des eigentlichen Handovers, d.h. sie müssen nicht in Echtzeit bearbeitet werden.

Mischformen

Neben den rein proaktiven oder reaktiven Verfahren können auch Mischformen definiert werden, welche das Gewicht zwischen Ressourcenverbrauch und Handoverlatenz etwas verschieben. Der proaktive Anteil besteht in einer geplanten oder vorausschauenden Wegesuche, jedoch werden keine VC-Segmente etabliert. In der reaktiven Komponente werden die endgültige Basisstation gewählt, entlang des vorausberechneten Weges das neue mobile Segment etabliert und umgeschaltet. Zum Zeitpunkt des Handovers braucht nur noch eine abschließende Wegewahl zu erfolgen und die Verbindung entlang des Weges aktiviert zu werden. Besonders geeignet für diese Kategorie sind ankerbasierte Verfahren mit festem Umschaltpunkt und statischer Verkehrslenkung.

3.3.5 Umschalten der Teilwege

Nach Abschluß aller Schritte zur Wegesuche und der Etablierung eines neuen mobilen Segmentes muß dieses mit dem festen Segment verbunden und das alte mobile Segment deaktiviert werden. Dieses Umschalten geschieht im Umschaltpunkt COS und schließt den Vorgang der Verbindungsnachführung ab.

Für das Umschalten ist eine Koordination zwischen COS und MAS notwendig, um beim Handover der Verbindung an der Funkschnittstelle von einer Basisstation zur anderen die Nutzdatenverbindung möglichst ohne Unterbrechungen aufrecht erhalten zu können. Erfolgt das Umschalten der mobilen Segmente zu früh, können ATM-Zellen verloren gehen, die sich noch in Transit entlang des alten Pfades befinden. Erfolgt die Umschaltung zu spät, entstehen unnötige Pausen im ATM-Zellenstrom, welche seine Echtzeit-Eigenschaften verändern.

Im wesentlichen müssen beim Umschalten die Einträge der Routingtabelle des Vermittlungsknotens und damit die Einstellung der Vermittlungsmatrix aktualisiert werden. Das kann in drei Varianten geschehen, abhängig von der Implementierung und der Funktionalität des Knotens [183]:

- Exklusive Umschaltung – es ist nur jeweils ein aktiver Teilweg erlaubt, so daß der alte Tabelleneintrag gelöscht wird, bevor der neue Eintrag erfolgt.
- Schleifende Umschaltung – um eine möglichst kurze Unterbrechung zu realisieren, wird der neue Tabelleneintrag aktiviert, bevor der Eintrag des alten Teilwegs gelöscht wird, so daß kurzfristig beide Teilwege aktiv sind.
- Atomare Umschaltung – unteilbare Vermittlungsoperation, welche den alten Eintrag löscht und den neuen Eintrag vornimmt.

Die einzelnen Varianten für den Umschaltevorgang nehmen unterschiedlichen Einfluß auf ATM-Zellenstrom der Nutzdatenverbindungen. Der alte Teilweg wird bei der exklusiven Umschaltung während des Umschaltvorgangs deaktiviert, die Vermittlungsmatrix des COS neu eingestellt und schließlich der neue Teilweg aktiviert. Dies führt zu einer kurzen Verbin-

dungsunterbrechung. Während dieser Periode können keine Nutzdaten übertragen werden, so daß im Umschaltpunkt eventuell ATM-Zellen verworfen werden müssen. Damit erhöht sich die Zellverlusthäufigkeit einer Verbindung. Die schleifende Umschaltung versucht diese Unterbrechung zu vermeiden, indem zunächst der neue Teilweg aktiviert und dann der alte Teilweg deaktiviert wird. In der kurzen Übergangsperiode sind damit der alte und der neue Pfad gleichzeitig aktiv, was zu unerwünschten Duplikationen von ATM-Zellen führen kann. Am sinnvollsten ist daher eine atomare Umschaltfunktion, die in einer unteilbaren Prozedur die Umschaltung vornimmt. Solange diese Prozedur schnell genug abgearbeitet werden kann, entstehen keine Zellverluste. Auch Zellduplikationen treten nicht auf, weil stets nur ein Pfad aktiv ist. Nachteil allerdings ist, daß diese atomare Umschaltprozedur geeignete ATM-Koppelfelder in den Vermittlungsknoten voraussetzt.

Die Umschaltung vom alten auf das neue mobile Segment ist abhängig von der Architektur und Funktionalität des ATM-Koppelfeldes im COS. Mit heutigen ATM-Vermittlungsknoten sind lediglich die exklusive oder die schleifende Umschaltung möglich. Eine atomare Vermittlungsoperation, die in einem unteilbaren Schritt erfolgt, existiert in heutigen Architekturen noch nicht. Für zukünftige mobilitätsunterstützende Vermittlungsknoten wird sie aber ein wichtiges Leistungsmerkmal sein.

Auf der anderen Seite des mobilen Segments muß das Mobilterminal die alten Teilwege und die zugehörige Funkverbindung deaktivieren, den Handover durchführen und sich an der neuen Basisstation anmelden und schließlich die Verbindungen auf dem neuen Teilweg wieder etablieren. Auch am Mobilterminal entsteht also eine Unterbrechung der Verbindung, während der keine ATM-Zellen übertragen werden können. Die Dauer dieser Unterbrechung wird nur bedingt vom Reroutingmechanismus, im wesentlichen aber von den Eigenschaften der Luftschnittstelle bestimmt.

Während die Hauptbestandteile der Verbindungsnachführung (Wegesuche, Wegewahl, Bestimmung des Umschaltpunktes) im wesentlichen die Handoverlatenz und damit die Gesamtdauer des Handovervorgangs beeinflussen, entstehen durch das Umschalten Beeinträchtigungen des ATM-Zellenstroms (Zellverluste, Zellduplikationen, Veränderungen der Zellreihenfolge, Veränderungen/Schwankungen der Übertragungsverzögerung), welche direkt Einfluß auf die Dienstgüte nehmen. Inhärente Eigenschaften der ATM-Schicht im Festnetz können also in der mobilen Umgebung nicht mehr garantiert werden. Besondere Maßnahmen für einen stoßfreien oder stoßarmen Handover müssen entsprechend vorgesehen werden, wenn dies durch die geforderte Dienstgüte notwendig wird. Diese Maßnahmen auf ATM-Zellenebene sind nicht mehr Bestandteil der Verbindungsnachführung und werden im folgenden Kapitel 4 diskutiert.

3.3.6 Weitere Aspekte der Verbindungsnachführung

Mit ATM kann ein Teilnehmer eine Vielzahl gleichzeitig aktiver Verbindungen besitzen. Im Fall von mobilen Teilnehmern bedeutet dies, beim Handover von einer Basisstation zur nächsten nicht nur eine Verbindung übergeben zu müssen, sondern möglichst alle aktiven Verbindungen eines Mobilterminals unter Beachtung ihrer individuellen Verkehrs- und Qualitätsanforderungen zur neuen Basisstation nachzuführen.

Die Handoverbehandlung für mehrere Verbindungen gleichzeitig wird Gruppenhandover genannt. Ein Verfahren zur Verbindungsnachführung sollte Gruppenhandover unterstützen oder zumindest ermöglichen. Die Handoverprotokolle (Kapitel 2.3.3) sehen diesen Gruppenhandover vor, indem sie nur eine gemeinsame Handovertransaktion für alle Verbindungen eines Mobilterminals zulassen. Die Signalisierung an der Luftschnittstelle findet also nicht VC-individuell statt.

Das Mobilterminal gibt dazu in seiner Handoveranforderung (Abb. 2.11 bis Abb. 2.14) die Liste jener Verbindungen an, die an die neue Basisstation übergeben werden müssen. Das Netz ist dafür verantwortlich, zu jeder Verbindung einen neuen partiellen Weg für das jeweilige mobile Segment zu suchen und die partielle Verbindung unter Reservierung der benötigten Ressourcen zu etablieren. Dies soll möglichst effizient und für alle Verbindungen des Teilnehmers gleichzeitig geschehen, da die Handovertransaktion erst beendet werden kann, wenn der Reroutingvorgang für alle Verbindungen abgeschlossen ist. Ein weiteres wichtiges Kriterium für ein Verfahren zur Verbindungsnachführung ist daher die Skalierbarkeit für mehrere Verbindungen.

Diese Skalierbarkeit ist am besten zu erreichen, wenn genauso wie die Handoversignalisierung auch das Rerouting im Netz nicht VC-individuell stattfindet. Sehr gut geeignet sind Verfahren zur Verbindungsnachführung, die alle Verbindungen eines Mobilterminals auf einem gemeinsamen Weg und über denselben Umschaltpunkt führen. Um den Handover aller Verbindungen eines Mobilterminals zu steuern, ist für die Verbindungsnachführung nur jeweils die Koordination zwischen lokalem MAS und Umschaltpunkt COS notwendig. Aus Gründen des Verkehrsmanagements ist es manchmal notwendig und sinnvoll, verschiedene Dienstklassen auf verschiedenen Wegen zu führen (um beispielsweise das statistische Multiplexen besonders effizient zu nutzen). Sollte aus diesen Gründen eine unterschiedliche Wegführung der Verbindungen eines Mobilterminals notwendig sein, bleibt zumindest die Wahl eines gemeinsamen COS für alle Verbindungen, um die Komplexität des Gruppenhandover zu reduzieren.

Am effizientesten hinsichtlich des Gruppenhandover sind Verfahren zur Verbindungsnachführung, die mit statischen Routen und festen Ankervermittlungsknoten arbeiten. Der VC-individuelle Anteil am Signalisierungsaufwand ist in diesem Fall auf ein Minimum beschränkt.

Lediglich eine partielle Verbindung ist jeweils zu etablieren und der alte partielle Pfad freizugeben. Der Aufwand für Wegesuche und COS-Wahl ist dabei unabhängig von der Anzahl der Verbindungen.

3.4 Ein neues Verfahren zur effizienten Verbindungsnachführung

Aus den vorangegangenen grundsätzlichen Überlegungen zum Entwurf und zu den Einflußfaktoren von Verfahren für die Verbindungsnachführung lassen sich auch Kategorien für deren Effizienz ableiten. Diese Effizienz wird im wesentlichen durch zwei Kennzahlen beschrieben:

- Handoverlatenz
- Kosten der Wegeföhrung

Wie oben bereits diskutiert stehen diese beiden Parameter in teilweise Widerspruch zueinander. Die Berechnung einer optimalen, d.h. kostengünstigen Route ist zeitaufwendig. Ein weniger aufwendiges und daher besser skalierendes oder schnelleres Verfahren resultiert nicht immer in der optimalsten oder kostengünstigsten Route. Um ein möglichst performantes Verfahren zur Verbindungsnachführung zu erhalten, müssen also höhere Kosten in Form eines erhöhten Ressourcenbedarfs in Kauf genommen werden.

Für die folgenden Betrachtungen wird der Begriff der Effizienz eines Verfahrens zur Verbindungsnachführung reduziert auf den Bereich der Handoverlatenz. Je effizienter ein Verfahren arbeitet, desto geringer ist im Kontext der folgenden Betrachtungen die dadurch verursachte Handoverlatenz. Erhöhter Ressourcenverbrauch ist in diesem Zusammenhang akzeptabel, wenn die Beeinträchtigungen des ATM-Nutzdatenstroms dadurch reduziert oder sogar minimiert werden können. Im Gegenzug zur Effizienz des Verfahrens wird folglich dessen Ressourcenökonomie betrachtet.

Das Konzept der Virtuellen Pfade kann für besonders latenzarme Handoversteuerung und auch flexible Verkehrslenkung eingesetzt werden. Es ist aufgrund seiner Fähigkeiten zur Verkehrslenkung auch geeignet zur Steuerung des Handoververkehrs in einem WATM-Netz und damit für die Verbindungsnachführung im Handoverfall. Im folgenden wird ein Konzept vorgestellt, mit dem basierend auf virtuellen Pfaden ein latenzarmer Handover bei gleichzeitig hoher Ressourcenökonomie erreicht werden kann. Durch die Etablierung eines Baumes mit virtuellen Pfaden können die vorteilhaften proaktiven Aspekte der Verbindungsnachführung mit Baumstrukturen genutzt werden. Gleichzeitig steht dieser VP-Baum allen Mobilterminals zur Verfügung, so daß keine mehrfache Kapazitätsreservierung pro einzelner Nutzdatenverbindung notwendig ist. Der gravierende Nachteil der geringen Ressourcenökonomie kann damit vermieden werden.

3.4.1 VC-basierte und VP-basierte Verbindungsnachführung

Mit virtuellen Pfaden können vorberechnete Wege etabliert werden, die eine Verbindungsnachführung basierend auf statischen Wegen ermöglichen. In Kombination mit einem festen Umschaltpunkt entsteht so ein ankerbasiertes Verfahren zur Verbindungsnachführung mit statischen Wegen und permanentem Anker. Bei dieser Kategorie (vgl. Kapitel 3.3.2) sind die in Echtzeit während des Handovers durchzuführenden Funktionen beschränkt auf die Etablierung einer neuen partiellen Verbindung für das mobile Segment jeder Verbindung. Entsprechend gering ist der Beitrag der Verbindungsnachführung zur Handoverlatenz.

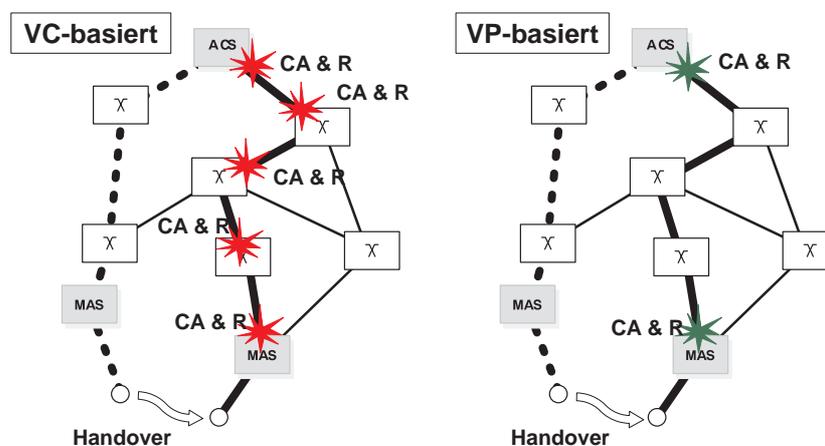


Abb. 3.7: VC-basierte und VP-basierte Verbindungsnachführung

Das Grundprinzip des VP-basierten Rerouting zeigt Abb. 3.7. Ohne virtuelle Pfade arbeiten alle ATM-Knoten des Netzes als VC-Vermittlungsknoten. Bei einem Handover muß für jede Verbindung eines Mobilterminals ein Weg durch das Netz gesucht und dann in jedem Vermittlungsknoten entlang des Weges eine Verbindungsannahmeentscheidung getroffen und schließlich die neue partielle Verbindung für das mobile Segment etabliert werden (call admission und routing table update CA&R). Die Zeit, die zur Ausführung dieser Rufbearbeitungsfunktionen benötigt wird, addiert sich zu einem erheblichen Beitrag zur Handoverlatenz. Dieser Beitrag kann durch Einführung von virtuellen Pfaden deutlich gesenkt werden.

Zwischen einem Ankervermittlungsknoten ACS und den mobilitätsunterstützenden ATM-Knoten MAS seines Zuständigkeitsgebietes (Ankergebiet) werden virtuelle Pfade etabliert. Aus den einzelnen Vermittlungsabschnitten zwischen ACS und MAS wird nun aus Sicht der VC-Ebene der Verbindungen ein einziges VC-Segment. Der Teil zwischen ACS/COS des mobilen Segments der Verbindungen besteht damit nur mehr aus einem einzigen VC-Segment. Im Fall eines Handovers ist folglich die Anzahl der durchzuführenden Rufbearbeitungsfunktionen beim VP-basierten Rerouting geringer als beim VC-basierten Rerouting. Wie hoch der

Gewinn durch den Einsatz virtueller Pfade ausfällt, ist allerdings von der Anzahl der VC-Segmente im mobilen Segment der Verbindung und damit von der Netztopologie abhängig. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 3.8 verdeutlicht. Ein konstanter Aufwand für Rufannahme und Einstellung des Koppelfeldes beim VP-basierten Verfahren steht einem linear mit der Anzahl VC-Segmente je mobilem Segment wachsenden Aufwand beim VC-basierten Verfahren gegenüber. Nicht berücksichtigt sind hier der Aufwand für die Wahl des Umschaltpunktes und die Wegesuche für das neue mobile Segment. Der topologieabhängige Aufwand der VC-basierten Verbindungsnachführung kann während des Handovers umgangen werden, wenn die Reservierung von VC-Kapazität proaktiv, d.h. vorausschauend vor dem Handover erfolgt.

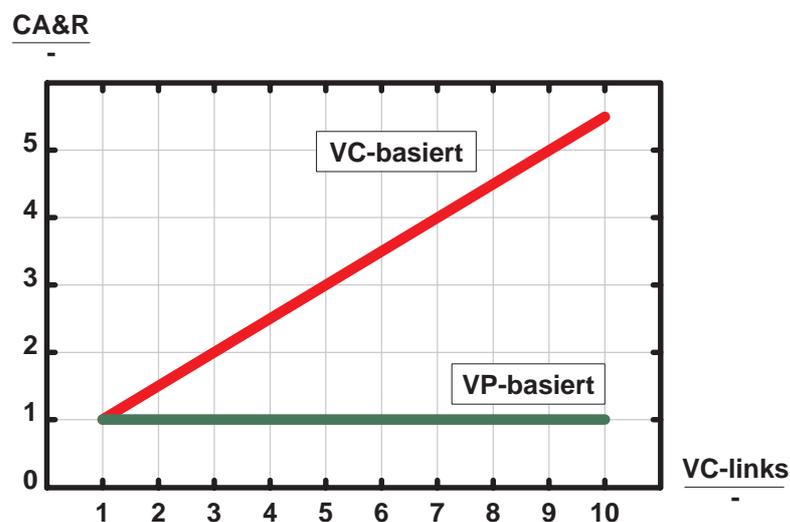


Abb. 3.8: Normierter Rufbearbeitungsaufwand für das mobile Segment

3.4.2 Grundkonzept einer VP-basierten Netzarchitektur für WATM

Im folgenden wird das Grundkonzept einer VP-basierten Verbindungsnachführung beschrieben. Das Ziel ist der Entwurf eines latenzarmen und effizienten Verfahrens für die Verbindungsnachführung in ATM-basierten Weitverkehrsnetzen mit drahtlosem Zugang und mobilen Teilnehmern [8].

Die auf virtuellen Pfaden basierende Verbindungsnachführung gehört zur Kategorie der proaktiv-reaktiven Mischformen (Kapitel 3.3.3 und 3.3.4). Im wesentlichen wird im folgenden mit dem Konzept der virtuellen Pfade ein ankerbasiertes Verfahren zur Verbindungsnachführung definiert. Dieses Verfahren erzeugt sehr niedrige Werte für die Handoverlatenz durch den Einsatz eines VP-basierten logischen Subnetzes in einer Handoverdomäne [8][10]. Es ist darüber hinaus sogar geeignet, die Eigenschaften einer (eventuell zeitvarianten) physikalischen Topologie vor einem Wegesuchalgorithmus zu verbergen und so dessen Komplexität zu reduzieren [4][216].

Als Handoverdomäne bezeichnen wir das zusammenhängende Versorgungsgebiet bzw. einen zusammenhängenden Teil des Versorgungsgebietes eines WATM-Netzes, in dem stets eine hinreichende Funkversorgung besteht und innerhalb dem sich eine Mobilstation ohne Unterbrechung ihrer Verbindungen frei bewegen kann. Innerhalb dieser Handoverdomäne muß deshalb die Verbindungsnachführung zu jeder erreichbaren Basisstation möglich sein. Mobilitätsunterstützende Vermittlungsfunktionen werden innerhalb der Handoverdomäne angeboten, während außerhalb der Domäne mangels Funkabdeckung nur Vermittlungsfunktionen für feste Teilnehmer notwendig sind.

Eine Handoverdomäne kann mehrere Ankerdomänen umfassen. Innerhalb einer Ankerdomäne ist ein netzseitiger mobilitätsunterstützender ATM-Vermittlungsknoten ACS für die Steuerung des Handoververkehrs zwischen den MAS-Zonen (Interzonen Handover) verantwortlich. Bei der Netzkonfiguration werden die MAS und damit die Funkzellen der zugehörigen Basisstationen eindeutig einem ACS und damit einer Ankerdomäne zugeordnet. Die Ankerdomäne besitzt entsprechend ein fest begrenztes Funkversorgungsgebiet. Über diese Infrastruktur ist die Ankerdomäne physikalisch definiert. Über dieser physikalischen Ankerdomäne wird dann mit Hilfe des VP-Subnetzes eine logische Ankerdomäne etabliert.

Das VP-basierte Betriebskonzept für WATM-Netze wird im folgenden als Mobile VP-basierte Netzarchitektur (Mobile Virtual Path network Architecture) MVPA bezeichnet [5][8]. MVPA besitzt eine hierarchische Struktur mit drei Hierarchieebenen, der RAP-Ebene, der MAS-Ebene und der ACS-Ebene. Zur Lenkung des mobilitätsinduzierten Verkehrs wird mit virtuellen Pfaden ein logisches Netz zwischen den nutzerseitigen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten MAS und ausgewählten permanenten Ankervermittlungsknoten definiert (Abb. 3.9).

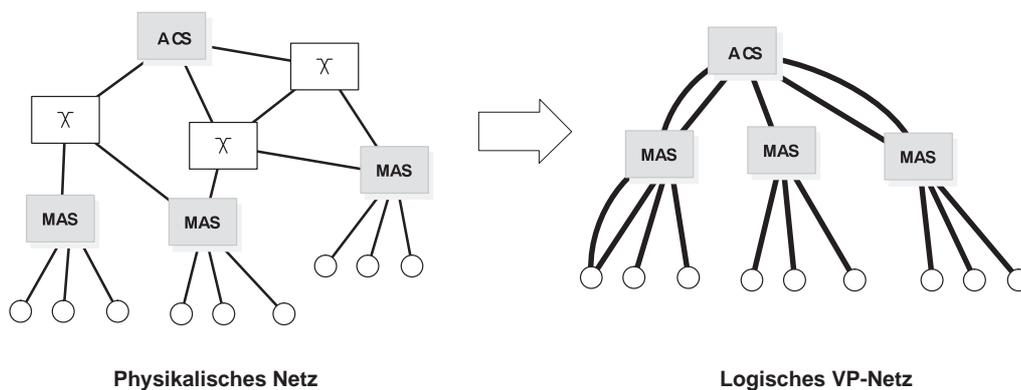


Abb. 3.9: Logisches VP-Netz für Mobilitätsunterstützung in einer Ankerdomäne

Dieses logische Netz besteht aus semi-permanenten VPC-Direktwegen, welche die physikalische Topologie des Netzes (siehe auch Abb. 2.9) verbergen. Mit den VPC-Direktwegen kann

das logische Netz beliebig vermascht werden. Eine Vollvermaschung der MAS und ACS erfolgt nicht, da Handoververkehr zwischen Zonen benachbarter MAS (Interzonen-Handover) stets über den Umschaltpunkt ACS geführt wird. Direktwege zwischen den MAS sind damit nicht erforderlich. Allerdings können einzelne MAS-ACS-Paare mehrfach vermascht werden. Damit stehen einerseits Alternativwege zur Verfügung. Andererseits können diese parallelen Direktwege genutzt werden, um durch Trennung von Verkehrsklassen den statistischen Multiplexgewinn zu steigern. Dieses Prinzip der Verkehrstrennung mit virtuellen Pfaden kann auch auf dem physikalischen Weg zwischen RAP und MAS eingesetzt werden (Abb. 3.9). Da es sich dabei auch physikalisch nur um ein einzelnes VC-Segment handelt, wird durch ein VP-basiertes Rerouting auf dieser Strecke allerdings kein Gewinn erzielt. Ein Beispiel für den Ablauf eines Intra-Zonen Handover und eines Inter-Zonen Handover innerhalb eines logischen VP-Subnetzes einer Ankerdomäne ist in Abb. 3.10 dargestellt [8].

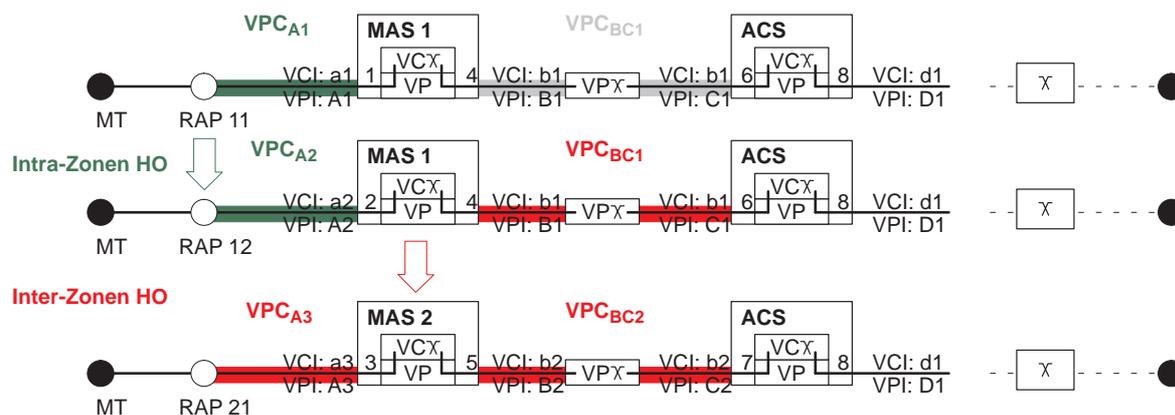


Abb. 3.10: Verbindungsnachführung im logischen Subnetz der MVPA

Die VPC-Direktwege zwischen den MAS und ACS sind semi-permanent, d.h. sie werden als permanente VP-Verbindungen durch Maßnahmen des Netzmanagements ohne Einfluß von Endteilnehmern eingerichtet. Die VP-Verbindungen sind allerdings in ihrer Kapazität und ihrer Wegeführung durch das physikalische Netz anpassbar an langfristig schwankende Lastverteilungen wie sie beispielsweise durch Zonen mit hohem Verkehrsaufkommen, Grenzlinien mit hohem Handoververkehr oder Veränderungen im Verkehrsgemisch temporär verursacht werden können.

Für große Netze sind mehrere Umschaltpunkte notwendig und Handover zwischen Ankerdomänen benachbarter ACS müssen ebenfalls unterstützt werden. Zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus wird ein für die Lebensdauer der Verbindung gültiger Umschaltpunkt ACS festgelegt. Von diesem Anker aus wird die Verbindung bei jedem Handover umgeschaltet. Wird die Grenze zu einer benachbarten Ankerdomäne überschritten, führt der Anker die Verbindung über einen direkten Querweg zum momentan zuständigen ACS. Wird dessen Anker-

domäne wieder verlassen, erfolgt das Umschalten zur nächsten Ankerdomäne wieder am eingangs festgelegten Umschaltpunkt. So ist eine Schleifenbildung ausgeschlossen und die Suche nach einem geeigneten Umschaltpunkt kann auch bei Handovern zwischen Ankerdomänen vermieden werden. Dafür werden in MVPA zwischen den Umschaltpunkten ACS ebenfalls Direktwege auf VP-Basis eingerichtet (Abb. 3.11). Auf dieser Ebene der ACS kann das logische Netz mehrfach vollvermascht sein. Dadurch werden zum einen alle möglichen Umschaltenszenarien nach beliebig vielen Interzonen-Handover berücksichtigt. Zum anderen können zur Verkehrstrennung und zum effizienten statistischen Multiplexen auch hier mehrere Direktwege zwischen ACS-Paaren etabliert werden.

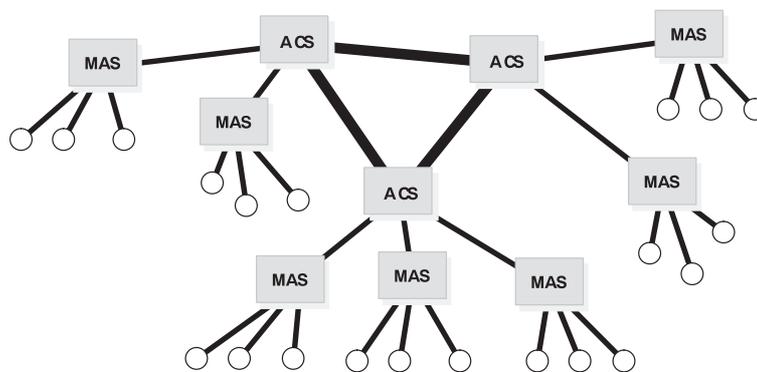


Abb. 3.11: Logisches VP-Netz für Mobilitätsunterstützung zwischen Ankerdomänen

3.4.3 Handoverhysterese in MVPA

Der Fall des Handovers zwischen benachbarten Ankerdomänen erfordert einen höheren Aufwand und benötigt ein weiteres VC-Segment für die Umschaltung vom Anker der Verbindung zum momentanen ACS. Das Netz wird in der Regel so organisiert sein, daß die logischen Grenzen zwischen Ankerdomänen entlang physikalischer Trennlinien laufen, an denen nur relativ selten Handover auftreten. Man wird versuchen, die Handover zwischen benachbarten Ankerdomänen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies wird jedoch nicht immer möglich sein, so daß auch physikalische Grenzlinien zwischen Ankerdomänen mit hohem Handoververkehr auftreten können. Da ein Mobilfunknetz ein höchst dynamisches komplexes System ist, kann sich außerdem die Situation des Handoververkehrs auch kurzfristig ändern. Dann ist ein sprunghafter Anstieg des Handoververkehrs zu beobachten, der bei der Planung des Netzes nicht vorhergesehen worden war. In solchen Fällen eines unvermeidbaren oder ungeplanten hohen Handoververkehrs zwischen benachbarten Ankerdomänen kann das logische Netz der MVPA flexibel angepasst werden, um die hohe Zahl der Inter-Anker-Handover zu reduzieren. Dies wird durch ein VPC-basiertes Dual Homing der MAS an den ACS (Abb. 3.12) erreicht, das bei Bedarf auch zum Multihoming erweitert werden kann. Ein MAS wird dabei per VP-

Verbindung mit zwei bzw. mehreren ACS vermascht und so die Ankerdomänen der betreffenden ACS vergrößert. Die Domänen benachbarter Ankerknoten überlappen sich dadurch und besitzen teilweise identische MAS. Mobilterminals, welche sich entlang der physikalischen Grenzlinie zwischen den beiden Ankerdomänen bewegen und diese immer wieder überschreiten, würden dabei eine Reihe von Handover über die Ankerdomänen hinweg auslösen. Durch die Einführung eines Dual Homing wird ein MAS zwei Ankerpunkten zugeordnet. Beim Verbindungsaufbau wird die Verbindung über jenem Umschaltpunkt ACS geführt, in dessen physikalischer Ankerdomäne sich das Mobilterminal befindet. Bei einem Interzonen-Handover über die physikalische Grenze der Ankerdomäne hinweg bleibt das Mobilterminal aufgrund der logischen Netztopologie innerhalb der Ankerdomäne. Eine inkrementelle Verbindungsnachführung über den neuen ACS in die benachbarte Ankerdomäne ist nicht notwendig.

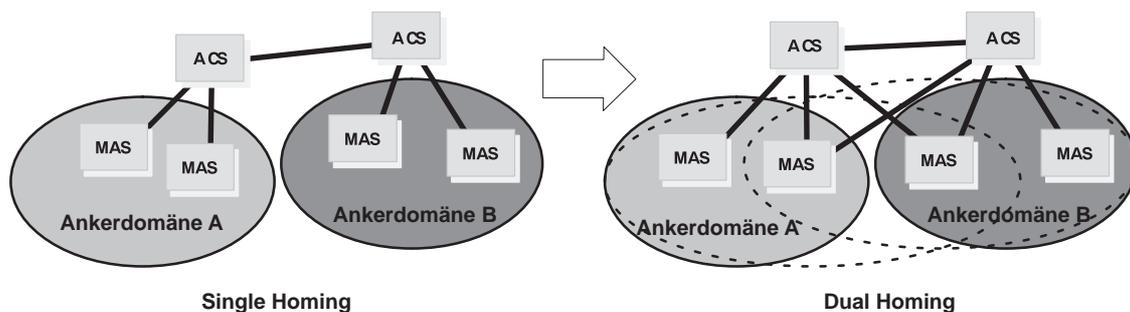


Abb. 3.12: VP-basiertes Dual Homing

Erst wenn sich das Mobilterminal weiter von der physikalischen Grenzlinie entfernt und ein weiterer Interzonen-Handover eintritt, wird ein Weiterschalten der Verbindung über den neuen ACS notwendig. Bewegt sich das Mobilterminal dann wieder in die andere Richtung, kann die Verbindung nach dem gleichen Prinzip in der Domäne des momentanen ACS gehalten werden. Eine Rückschaltung in die Domäne des Ankers der Verbindung wird erst notwendig, wenn ein Interzonen-Handover innerhalb dessen physikalischer Ankerdomäne auftritt. Damit führt das Dual Homing eine Hysterese bei der Verbindungsnachführung ein. Diese verhindert bei kleinen Bewegungsradien einen Handover zwischen den Ankerdomänen. Erst bei größeren Bewegungsradien löst die Netzarchitektur mit Handoverhysterese einen Interanker Handover aus. Die Reduktion der Interanker Handover durch diese Hysterese wird im nachfolgenden Kapitel 3.4.4 diskutiert.

Ähnlich kann bei Bedarf auch mit den RAP aus Zonen benachbarter MAS verfahren werden, wenn sich hoher Handoververkehr bei gleichzeitig begrenztem räumlichem Aktionsradius der Mobilterminals einstellt [8].

3.4.4 Analyse des Hystereseverfahrens

Ein großer Vorteil der in dieser Arbeit vorgeschlagenen VP-basierten Verbindungsnachführung ist, daß innerhalb einer Ankerdomäne der Teil zwischen ACS/COS und MAS des mobilen Segments nur aus einem VC-Segment besteht. Dieser Vorteil geht verloren, wenn beim Handover die Ankerdomäne verlassen wird (Handover Nummer 5 und 6 in Abb. 3.13). Dann wird ein zweites VC-Segment, zwischen den beiden Ankerknoten ACS, notwendig. Um diesen Effekt zu reduzieren, wurde das Konzept der VP-basierten Handoverhysterese eingeführt. Dessen Wirkung wird im folgenden genauer betrachtet.

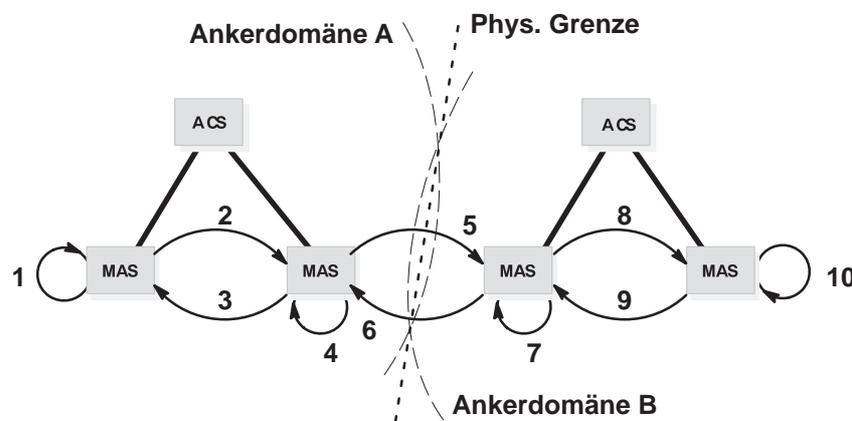


Abb. 3.13: Handover in und zwischen benachbarten Ankerdomänen ohne Hysterese

Zur Analyse stellen wir zunächst ein diskretes Markovmodell für die Situation ohne Handoverhysterese auf (Abb. 3.14). Dieses Markovmodell beschreibt die Abfolge der einzelnen Handovertypen aus Abb. 3.13. Die Zustände 1 bis 4 und 7 bis 10 ordnen die Handover und damit die Verbindungsführung exakt jeweils einem Ankerknoten zu. Zur Vereinfachung wird ohne Einschränkung der allgemeinen Gültigkeit angenommen, daß nachfolgend auf einen Interzonen Handover innerhalb einer Ankerdomäne (Handover Nummer 2, 3, 8 und 9 in Abb. 3.13) nicht direkt ein Interzonen Handover zwischen den beiden Ankerdomänen (Nummer 5 und 6) auftreten kann und umgekehrt.

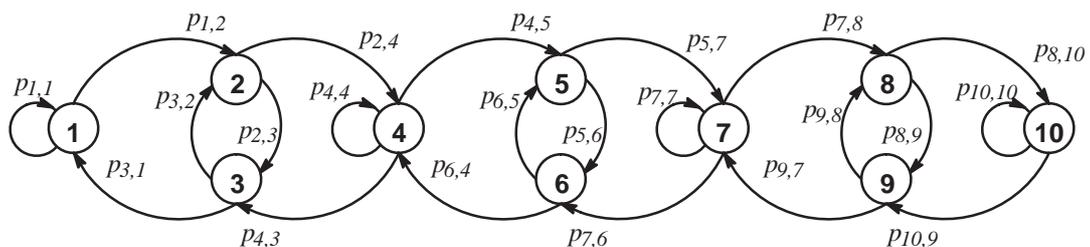


Abb. 3.14: Diskretes Markovmodell der Handoverabfolge ohne Hysterese

Etwas aufwendiger ist die Situation mit Handoverhysterese zu beschreiben. Die Interzonen Handover zwischen den Ankerdomänen sind nun nicht mehr eindeutig an einer Stelle (Handover 5 und 6 in Abb. 3.14), da sich die Domänen überlappen. Als Folge daraus ist die Handoverabfolge abhängig davon, über welchen Ankerknoten die Verbindung geführt ist (Abb. 3.15).

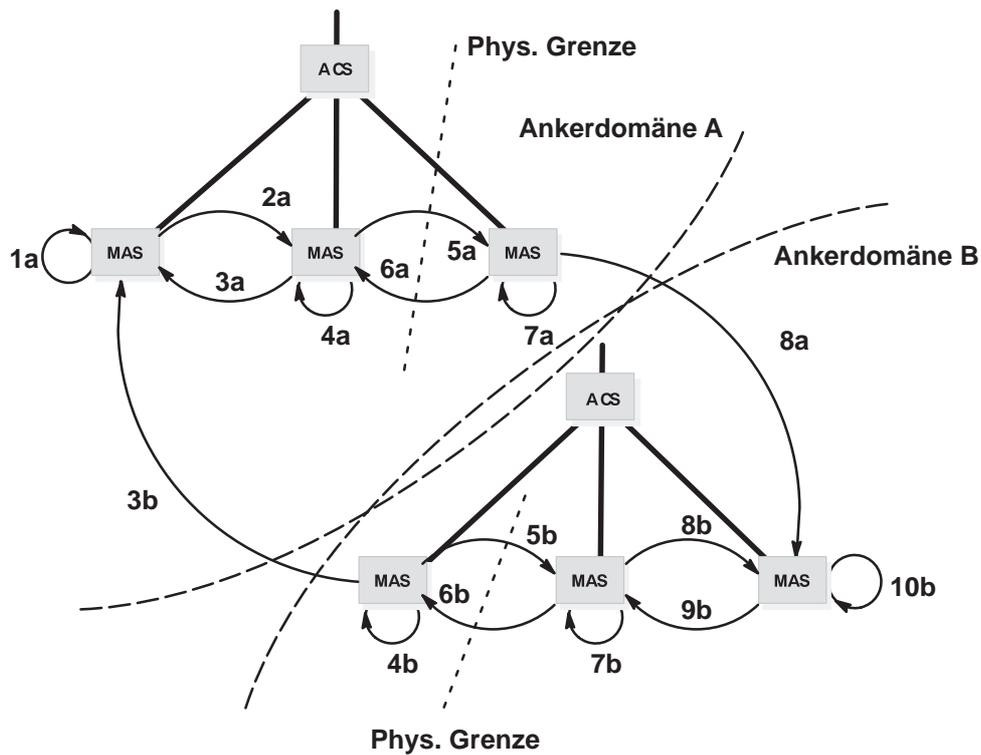


Abb. 3.15: Handover in und zwischen benachbarten Ankerdomänen mit Hysterese

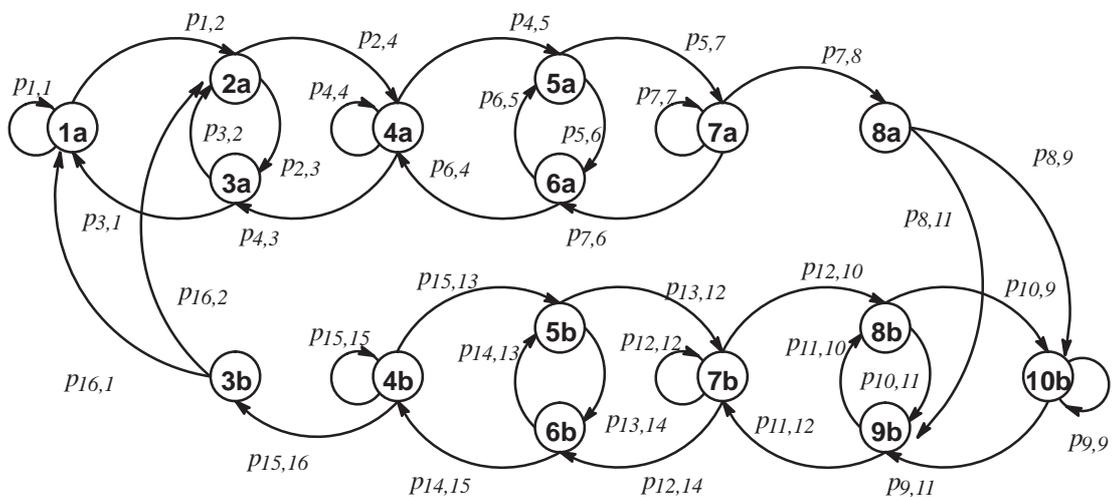


Abb. 3.16: Diskretes Markovmodell der Handoverabfolge mit Hysterese

Wesentlicher Parameter für die Höhe des Hystereseertrags ist die Wahrscheinlichkeit für aufeinanderfolgende Interzonen Handover zwischen den Ankerdomänen (Interanker Handover). Sie beschreibt die Lokalität der Mobilität an der Grenze der beiden Ankerdomänen. Ist sie gleich Null, wird die Ankergränze nur jeweils in eine Richtung überfahren und das Mobilterminal bewegt sich nach diesem Handover in der neuen Ankerdomäne (wobei die Wahrscheinlichkeit einer späteren Rückkehr dadurch natürlich nicht Null wird). Ist die Wahrscheinlichkeit hoch, bewegt sich ein Mobilterminal lokal und wechselt die Ankerdomänen häufig.

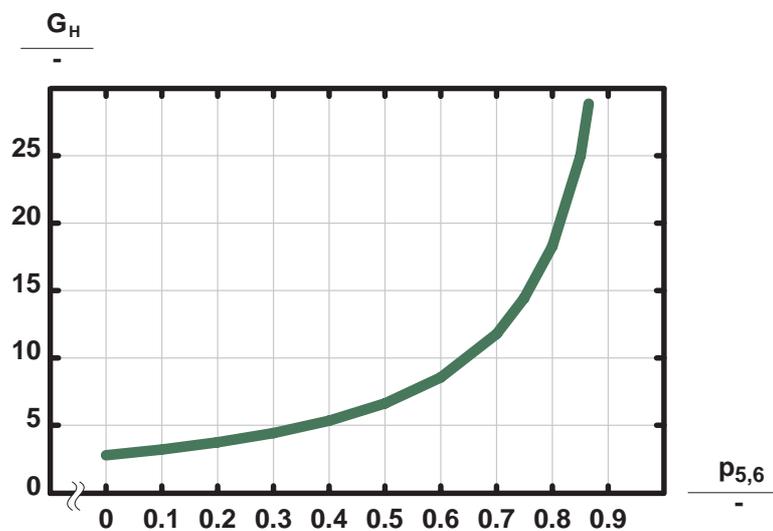


Abb. 3.17: Hystereseertrag in Abhängigkeit von $p_{5,6}$

Ohne Hysterese steigt in diesem Fall die Häufigkeit von Interanker Handovers stark an, während sie durch die Handoverhysterese der MVPA wirkungsvoll reduziert werden kann, so daß ein zunehmender Hystereseertrag entsteht (Abb. 3.17). Selbst bei geringer Lokalität der Bewegung an der physikalischen Grenze der Ankerdomänen ($p_{5,6}=0$) reduziert die Hysterese im Beispiel die Häufigkeit von Interanker Handovers auf nahezu ein Drittel. Dieser Effekt entsteht, weil durch die Hysterese nicht mehr auf jeden Intra-zonen Handover an der physikalischen Grenze der Ankerdomänen (Handover Typ 4 und 7 in Abb. 3.13) unmittelbar ein Interanker Handover folgen kann. Vielmehr gibt es nun Intra-zonen Handover an dieser Grenze, die überhaupt keine Interanker Handover nach sich ziehen können (Handovertypen 4a und 7b in Abb. 3.15).

Von den Parametern aus Tabelle 3.5 ist der Hystereseertrag nur schwach abhängig. Läßt man die übrigen drei Parameter jeweils konstant ($p_{5,6} = 0.4$, übrige Parameter jeweils wie in Tabelle 3.5), ergeben sich die Kurven von Abb. 3.18. Man erkennt deutlich den geringen Einfluß der drei Parameter auf den Hystereseertrag. Dieser wird im wesentlichen von der Handoverhäufigkeit an der physikalischen Grenze unabhängig vom übrigen Mobilitätsverhalten

bestimmt. Das ist letztlich auch unser Wunsch, allein aufgrund von Messungen der Handoverstatistik an der Grenze der beiden Ankerdomänen die Einrichtung einer VP-Verbindung für das Dual-Homing der MAS an der Grenze ableiten zu können. Damit kann die Häufigkeit der Interanker Handover deutlich reduziert werden.

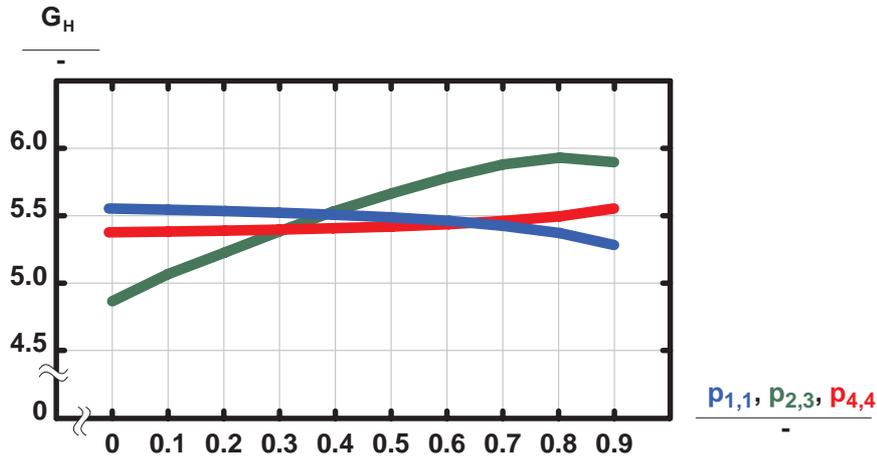


Abb. 3.18: Hysteresegewinn in Abhängigkeit von $p_{2,3}$, $p_{4,4}$ und $p_{1,1}$

3.4.5 Gesamtübersicht und Einsatzbereiche von MVPA

In Abb. 3.19 ist ein mögliches logisches Netz gezeigt, das durch den konsequenten Einsatz virtueller Pfade auf allen drei Ebenen entsteht. Die Baumstruktur der multicast-basierten Verfahren zur Verbindungsnachführung ist auch hier wiederzufinden. Diese Baumstruktur entsteht durch die Einführung von Direktwegen auf VPC-Basis. Die Vorteile des Baums können dadurch genutzt werden, während die Nachteile vermieden werden.

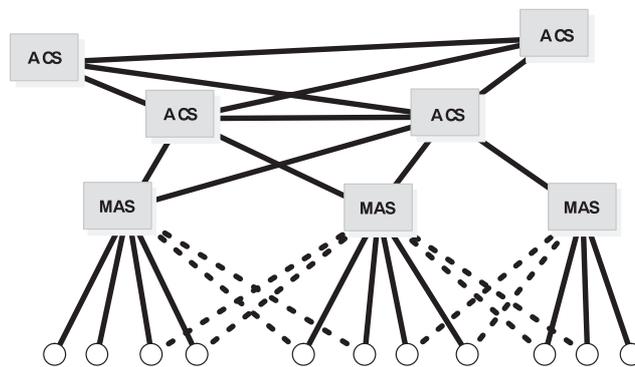


Abb. 3.19: Vollständiges VP-Netz für Mobilitätsunterstützung

Der entscheidende Vorteil des Multicastbaumes ist die proaktive Komponente bei der Verbindungsnachführung. Sie ist implizit mit der VP-basierten logischen Netzarchitektur verbun-

den, indem vorausberechnete Wege zum Zeitpunkt des Handovers bereit gestellt werden. Damit entfallen Wegesuche und Wahl des Umschaltpunktes. Die Wegesuche zwischen Umschaltpunkt und MAS braucht nicht in Echtzeit während des Handovers zu geschehen. Durch die VPC-Direktwege zwischen den ACS und MAS wird außerdem die Zahl der VC-Segmente, für die im Handoverfall Rufbearbeitungsfunktionen durchgeführt werden müssen, minimiert. Im Gegensatz zu VC-basierten proaktiven Verfahren hat das VP-basierte stets den Vorteil, daß entlang des Weges im Handoverfall keine Verbindungsannahmeentscheidung getroffen und keine Einstellungen der Vermittlungstabellen in den Transitknoten mehr vorzunehmen sind. Diese Transitknoten können als reguläre VP-Crossconnect oder VP-Switches betrieben werden. Insgesamt erzielt die VP-basierte Verbindungsnachführung also ähnlich wie die Multicast-Verfahren eine sehr niedrige Handoverlatenz.

Gleichzeitig ist der dazu notwendige Aufwand deutlich geringer. Während bei den multicast-basierten Verfahren für jede Verbindung ein Multicastbaum etabliert und verwaltet werden muß, belegt eine Verbindung beim VP-basierten Verfahren nur einfach die Ressourcen, die ihr bei der Rufannahme zugestanden wurden. Die für die VPC des Baumes reservierte Kapazität kann flexibel allen über diesen VP-Baum geführten Verbindungen zugewiesen werden. Die VP-basierte Verbindungsnachführung ist somit ressourceneffizienter als die Multicastverfahren.

Doch auch die VP-basierte Verbindungsnachführung erzielt eine niedrige Handoverlatenz nur durch den Einsatz von Netzressourcen. Insbesondere gilt dies für die Verbindungsnachführung über Grenzen von MAS-Zonen und Ankerdomänen hinweg. Durch die Einführung permanenter Ankervermittlungsknoten ACS ergibt sich eine hierarchische Netzstruktur. Mobilterminals in benachbarten Regionen (MAS-Zonen, Ankerdomänen) können nur über das jeweils übergeordnete Netzelement erreicht werden. Insbesondere werden Verbindungen zwischen Mobilterminals innerhalb derselben Zone und in benachbarten elementaren Zonen (Abb. 2.9) stets über den verantwortlichen Anker geführt, bzw. die beiden verantwortlichen Anker, wenn die Zonen in verschiedenen Ankerdomänen liegen. Damit weist auch die VP-basierte Verbindungsnachführung den allen Verfahren mit festen Ankern gemeinsamen Nachteil auf, daß sich ineffiziente Wegeführungen ergeben können. Der Grad der Ineffizienz, der bei solchen Mobil-Mobil-Verbindungen durch den festen Anker verursacht wird, ist allerdings stark von der physikalischen Topologie und der Platzierung des Ankerknotens abhängig. Die Ineffizienz kann angegeben werden als der Mehrbedarf an Ressourcen gegenüber der VC-basierten direkten Wegeführung ohne Umweg über den Anker. Bei einem physikalischen Netz mit hohem Vermaschungsgrad und folglich kurzen Wegen zwischen den MAS ist dieser Mehrbedarf entsprechend höher als bei einem hierarchisch organisierten, baumförmigen Netz. Der exakte Mehrbedarf und damit der Grad der Wegeineffizienz kann nur für ein konkretes Netz angegeben werden.

Darüber hinaus ist dieser Mehrbedarf auch stark vom Rufverhalten und der Mobilität der Teilnehmer abhängig. Werden häufig Verbindungen zu Teilnehmern etabliert, welche sich in derselben Zone aufhalten, ist ein auf permanenten Anker und statischen Wegen basierendes Verfahren zur Verbindungsnachführung mit einem höheren Ressourcenverbrauch verbunden. Wenn dagegen Kommunikationsbeziehungen mit fernen Endpunkten außerhalb der Ankerdomäne überwiegen, entsteht durch die VP-basierte Verbindungsnachführung kein Mehrbedarf an Netzkapazität. Der Weg der Verbindung unterscheidet sich dann je nach VPC-Route nur minimal bis gar nicht von der kürzesten Route. Abschätzungen für die Ressourcenökonomie werden in Kapitel 3.6 angegeben.

Die VP-basierte Verbindungsnachführung ist also für verschiedene Netztopologien, Verkehrsbeziehungen und Mobilitätsmodelle unterschiedlich gut geeignet. In lokalen Netzen mit einem hohen Anteil an lokalen Mobil-Mobil-Verkehrsbeziehungen verursacht der Einsatz eines ankerbasierten Verfahrens ineffiziente Ressourcenbelegung. In Weitverkehrsnetzen ist der Anteil des lokalen Mobil-Mobil-Verkehrs geringer und Verkehrsbeziehungen ins Festnetz oder zu anderen Mobilnetzen sind häufiger. Ein typischer Fall ist beispielsweise die Nutzung von Diensten, die über ferne Server angeboten werden. Hinzu kommt, daß Weitverkehrsnetze in der physikalischen Netzstruktur bereits hierarchisch aufgebaut sind. Sie sind üblicherweise unterteilt in ein Zugangsnetz, ein Ortsnetz, ein Stadtnetz, ein Regionalnetz, ein Fernverkehrsnetz, etc. und entsprechen damit der hierarchischen Struktur des logischen VP-Netzes der MVPA. WATM-Weitverkehrsnetze mit hierarchischer Netztopologie sind also primär die Netze, in welchen der Einsatz der MVPA sinnvoll erscheint. Die VP-basierte Verbindungsnachführung ist mit dem Hauptaugenmerk auf die Weitverkehrsmobilität entworfen worden. Diesem Ziel kann sie gerecht werden.

Neben der weitgehend latenzreduzierten und gegenüber Multicastverfahren ressourcenschonenderen Verbindungsnachführung bietet das VP-basierte Subnetz noch weitergehende Vorteile bei der Einführung und dem Betrieb von ATM-Netzen mit drahtloser Erweiterung und mobilen Teilnehmern. Häufig werden breitbandige Funkdienste bei ihrer Einführung zunächst nur lokal begrenzt in besonders zugänglichen und frequentierten Bereichen angeboten werden, beispielsweise als Wireless Access Zones in Flughäfen [167]. Diese Bereiche sind klein genug, um von einigen wenigen Basisstationen und einem dazugehörigen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten versorgt werden zu können. Die Mobilität innerhalb dieser Zonen ist uneingeschränkt aber gering (Fußgänger), während außerhalb der Zone mangels Funkabdeckung keine Mobilität unterstützt zu werden braucht. Entsprechend genügt ein lokaler MAS, um Funktionen für Verbindungsnachführung und Handover bearbeiten zu können. Der Betrieb solcher Zonen ähnelt also mehr einem lokalen Netz, denn einem flächendeckenden Weitverkehrsnetz. Die Zonen werden vereinzelt je nach Bedarf etabliert.

Schrittweise steigt die Nutzungs- und die Teilnehmerdichte, so daß die angebotenen mobilen Breitbanddienste verstärkt nachgefragt werden. Ausgehend von den drahtlosen Breitbandinseln erfolgt nun die stufenweise Einführung von WATM in bestehende ATM-Netze und die Nachfrage nach der Unterstützung von hoher Mobilität (auch im Fahrzeug) zwischen den Zonen entsteht. Mit der VP-basierten Verbindungsnachführung kann dann leicht ein entsprechender Ankervermittlungsknoten im Netz eingeführt und ein logisches Netz etabliert werden. Damit können Handover über die Zonengrenzen hinweg und damit Verbindungsnachführung durch das gesamte Netz unterstützt werden, ohne daß existierende ATM-(Festnetz-)Knoten verändert bzw. erweitert werden müssen. Ihre Funktion beschränkt sich dann auf ein Durchschalten der virtuellen Pfade als VP-Crossconnect oder VP-Switch. Alternativ kann, wenn es sich um wenige Zonen handelt, die Ankerfunktion auch jeweils vom MAS wahrgenommen werden. Die MAS eines Netzes mit durchgehender Funkversorgung werden dann mit VP-Verbindungen (mehrfach) vollvermascht. Ein MAS fungiert dann jeweils als Anker für die in seiner Zone entstehenden Verbindungen. Verbindungen werden vom lokalen MAS aus inkrementell entlang der per VPC vorbestimmten Wege weitergeschaltet. Diese Lösung ist allerdings nur für kleine Netze mit wenigen Zonen geeignet. Der Aufwand für die Vermaschung steigt quadratisch mit der Zahl der beteiligten MAS/ACS an. Das VP-basierte Verfahren zur Verbindungsnachführung mit permanentem Umschaltpunkt und statischen Routen unterstützt insgesamt sehr gut die schrittweise Einführung von WATM in existierende ATM-Netze.

3.5 Andere Konzepte für die Verbindungsnachführung

Für die Verbindungsnachführung existiert mittlerweile eine ganze Reihe von teilweise recht unterschiedlichen Vorschlägen, die mit verschiedenen Zielsetzungen und Anwendungsbereichen vor Augen entwickelt wurden. Deren systematische Klassifizierung wurde in Kapitel 3.3 vorgenommen. Wesentliche Zielsetzungen der Verfahren sind:

- Minimierung der Handoverlatenz
- Optimierung der Wegeführung und des Ressourcenbedarfs

Diese Ziele sind nicht gleichzeitig zu erreichen. Je nach angestrebtem Einsatzgebiet steht eines der Ziele im Vordergrund. Eine geringe Handoverlatenz zum Ziel haben die Verfahren mit einer proaktiven Komponente, insbesondere die Multicast-basierten Verfahren sowie die in Kapitel 3.4 vorgestellte VP-basierte Verbindungsnachführung der MVPA. Gleichzeitig halten diese Verfahren den Steuerungsaufwand je Handover niedrig, so daß eine hohe Handoverrate realisiert werden kann. Andererseits kann in einem Netz die Wegeeizienz und gute Ressourcennutzung im Vordergrund stehen. In diesem Fall eignen sich die Verfahren mit dynamischer Wahl des Umschaltpunktes und nicht-statischer Wegesuche. Sie erfordern aller-

dings entsprechend ausgerüstete mobilitätsunterstützende Vermittlungsknoten im gesamten Netz sowie einen erhöhten Steuerungs- und Koordinationsaufwand, der insgesamt die Handoverlatenz erhöht.

Im folgenden werden stellvertretend für die Vielzahl an Verfahren vier näher beschrieben und mit der MVPA verglichen.

3.5.1 Verbindungsnachführung mit Baumstrukturen

Der Baum virtueller Verbindungen (Virtual Connection Tree VCT, [19]) war eines der ersten Konzepte für schnelle Verbindungsnachführung in ATM Weitverkehrsnetzen mit drahtlosem Zugang und mobilen Teilnehmern. Innerhalb einer Ankerdomäne wird bei diesem Konzept ausgehend vom Ankerknoten ein Baum virtueller Verbindungen aufgebaut. Der Ankerknoten ist gleichzeitig der Übergangsknoten zum festen ATM-Transportnetz. Die Knoten, welche mit dieser Baumwurzel verbunden sind, bilden die Blätter des Baumes. Von der Wurzel aus wird beim Verbindungsaufbau eines Mobilterminals jeweils eine Verbindung zu den Blatt-Knoten geschaltet, so daß eine Punkt-zu-Mehrpunkt-Struktur entsteht. Diese Struktur folgt einem fest etablierten Baum innerhalb der Ankerdomäne, besitzt allerdings keine Multicastfunktionen. Zu jedem Blatt-Knoten wird vom Anker aus exakt eine VC-Verbindung pro Nutzdatenverbindung aufgebaut. Die Verbindungen zu den Blatt-Knoten besitzen eindeutige Identifikationsnummern, die dem Mobilterminal beim Verbindungsaufbau mitgeteilt werden. Das Mobilterminal benutzt allerdings nur jeweils die VC-Verbindung zum aktuellen Knoten. Auf den übrigen Wegen des Baumes ist keine Kapazität reserviert. Auf den VC-Verbindungen zu den übrigen Blatt-Knoten werden keine Nutzdatenzellen übertragen. Bei einem Handover wird einfach auf die neue VC-Verbindung umgeschaltet, wodurch nur ein kleiner Beitrag der Verbindungsnachführung zur Handoverlatenz entsteht (Kapazitätsreservierung). Verläßt das Mobilterminal den Einzugsbereich eines Baumes, muß ein neuer Baum etabliert werden.

Der Ansatz des VCT wurde in weiterführenden Arbeiten verbessert. In [221][220] wird ein dynamisch (re)konfigurierbarer Baum je Verbindung etabliert. Die Wurzel dieses Baumes ist nicht fest und kann sich während der Lebensdauer der Verbindung ändern. Es handelt sich hierbei also um eine Mischform bestehend aus dynamischer COS-Wahl und einer Variante aus der Kategorie der ruforientierten Ankerverfahren. Zu den möglichen Handoverzielen rund um die momentane Funkzelle herum wird ausgehend vom Wurzel-Knoten ein Baum von Verbindungen aufgebaut (Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung). Für diese Verbindungen werden Einträge in den entsprechend Vermittlungstabellen entlang des Weges vorgenommen, aber keine Kapazität reserviert. Auch hier wird wie beim VCT nur jeweils die aktuelle Verbindung genutzt. Ressourcenbelegung für die Route vom Umschaltplatz zur neuen Basisstation erfolgt zum Handoverzeitpunkt. Nach jedem Handover wird gegebenenfalls der Umschaltplatz verschoben und ein neuer Baum aufgebaut.

3.5.2 Dynamic Cross-Over Switch Discovery Rerouting

Sehr flexibel die vorliegende Netztopologie berücksichtigen kann eine Kombination aus dynamischer Wahl eines Umschaltpunktes COS mit dynamischer Wegesuche (Dynamic COS Discovery Rerouting DCOSDR). Ein solches Verfahren wird in [198][199][200] für lokale Netze vorgeschlagen. Zum Zeitpunkt des Handovers wird ein Umschaltpunkt ausgewählt und eine neue Route für das mobile Segment festgelegt. Die Wahl erfolgt nach bestimmten Optimalitätskriterien, die als Nebenbedingungen in die Suchstrategie eingehen (siehe Kapitel 3.3.2). Für die Wahl des Umschaltpunktes wird ein zentraler Steuerungsknoten benötigt, der das Wissen über die vollständige aktuelle Route der Verbindung und mögliche Umschaltpunkte besitzt [198].

3.5.3 Nearest Common Node Rerouting

Auch beim Nearest Common Node Rerouting NCNR [24][26][25] wird der Umschaltpunkt dynamisch festgelegt. Es handelt sich um den ATM-Vermittlungsknoten, ab dem der alte und der neue Weg der Verbindung divergieren. Dieser Knoten wird gefunden, indem zum Vermittlungsknoten des fernen Endpunkts und von dort entlang des aktuellen Weges der Verbindung zum alten RAP eine spezielle Signalisierungsnachricht geschickt wird. Sie enthält Adressen des fernen Endpunktes, der momentanen Basisstation und des Handoverkandidaten und wird von jedem Knoten entlang der Verbindungsrouten analysiert. Der Umschaltpunkt ist gefunden, wenn die drei Adressen von einem Knoten aus auf drei paarweise verschiedenen Ports erreicht werden können. Dieses Vorgehen erfordert einen entsprechend erweiterten ATM-Signalisierungsprotokollstack in allen Netzknoten.

3.5.4 Verbindungsnachführung in WATM CS 1

Im Entwurf der WATM-Spezifikation des ATM Forums (WATM Capability Set 1, [36]) sind mehrere Alternativen für die Verbindungsnachführung vorgesehen. Sie unterscheiden sich im wesentlichen in der Wahl des Umschaltpunktes. In Frage kommen dabei der lokale MAS, ein vom lokalen MAS verschiedener Anker sowie ein beliebiger Vermittlungsknoten im ATM-Netz, der jeweils zum Handoverzeitpunkt bestimmt wird. Damit kommen zwei der in Kapitel 3.3.3 diskutierten vier Grundtypen der Verbindungsnachführung zum Einsatz [36]:

- Verbindungsverlängerung
- Inkrementelle Verbindungsnachführung

Die inkrementelle Verbindungsnachführung geschieht entweder an einem Ankerknoten oder an einem dynamisch bestimmten Umschaltpunkt [36][37][39]. Die ankerbasierte Verbindungsnachführung beruht auf Konzepten aus [161][179][180]. Die dynamische Variante beruht auf den Konzepten des Dynamic Cross Over Switch Discovery Rerouting (siehe auch Kapitel 3.5.2, [198][199][200]).

Multicast-basierte Verfahren der Verbindungsnachführung sind in WATM CS 1 nicht in Erwägung gezogen worden. Im Entwurf für den Standard ist stets nur ein aktiver Nutzdatenpfad je Verbindung vorgesehen. Dies bedeutet, daß stets nur über eine Funkschnittstelle und damit auch stets nur über eine Basisstation die Nutzdatenströme das Mobilterminal erreichen und verlassen.

3.6 Vergleich der Verfahren zur Verbindungsnachführung

Wie bereits erwähnt hängen die Leistungsfähigkeit und die Ressourcenökonomie eines Verfahrens zur Verbindungsnachführung in hohem Maße von der Topologie des physikalischen Netzes sowie von den Verkehrsbeziehungen und der Mobilität der Teilnehmer ab. Das erschwert einen Vergleich der Verfahren erheblich. Grundsätzlich existieren zwei Möglichkeiten: die Verknüpfung der Verfahren mit verschiedenen Netztopologien und Modellen des Teilnehmerverhaltens in einer aufwendigen Simulation einerseits und andererseits die Gegenüberstellung der Verfahren anhand von klar eingegrenzten, vergleichbaren Parametern zur Abschätzung des Aufwandes. Für die folgenden Betrachtungen verwenden wir den zweiten Ansatz. Im Rahmen der Forschung zu dieser Arbeit wurde allerdings auch ein Softwarewerkzeug erstellt, mit welchem die Untersuchung von verschiedenen Reroutingverfahren in beliebigen Netztopologien und nicht-regulären Zellenplänen möglich ist [75]. Wesentliches Ergebnis dort ist die Bestätigung der im folgenden vorgenommenen parameterbasierten Einordnung.

Tabelle 3.6: Kriterien zur Beurteilung von Reroutingverfahren für WATM-Systeme

Parameter	Symbol	Definition
Anzahl VC-Segmente	N_{hop}	Anzahl der zu bearbeitenden VC-Segmente des mobilen Segments zwischen Umschaltplatz und MAS
Signalisierungsaufwand	$N_S, (N_S^R)$	Anzahl der Signalisierungsmeldungen (je Reroutingtransaktion)
Anzahl VCC je Verbindung	N_{VCC}	Anzahl der zur Verbindungsnachführung etablierten VC-Verbindungen je Nutzdatenverbindung
Ressourcenökonomie der Route	ρ_R	Verhältnis der minimalen Ressourcen für die Etablierung der Verbindung zu den tatsächlich genutzten Ressourcen
Erweiterte Netzknoten	N_e, ρ_e	Gesamtzahl/Anteil der Netzknoten, deren Funktionalität zur Mobilitätsunterstützung erweitert werden muß
Gruppenhandover	$Group$	Eignung für gleichzeitige Nachführung mehrerer Verbindungen eines Mobilterminals (Gruppenhandover)
Einsatzbereich	LAN, WAN	Entwurf/Eignung für lokale Netze oder Weitverkehrsnetze
Handoverlatenz	$T_L, (T_L^R)$	(Beitrag des Reroutingverfahrens zur) Zeitdauer zwischen Handoveranforderung (BW_HO_REQUEST) und Handovererlaubnis (BW_HO_RESPONSE, HO_RELEASE)

3.6.1 Kriterien und Parameter zur Beurteilung von Reroutingverfahren

Wie hoch der Aufwand für die Verbindungsnachführung ist, kann anhand einiger weniger Kriterien nachvollzogen werden (Tabelle 3.6):

- Anzahl der zu bearbeitenden VC-Segmente N_{hop}
Grundsätzlich ist der Aufwand für die Verbindungsnachführung abhängig von der Netztopologie. Insbesondere steigt dieser Aufwand mit der Zahl der zu bearbeitenden VC-Segmente N_{hop} entlang des mobilen Segments einer Verbindung. Dieser Wert ist bei den meisten Verfahren durch die konkrete Netztopologie bestimmt, da sie eine VC-basierte Verbindungsnachführung implementieren. Durch den Einsatz von VP-basierten Direktwegen kann dieser Wert gesenkt werden.
- Anzahl der Signalisierungsnachrichten N_S
Von der Anzahl der zu bearbeitenden VC-Segmente hängt auch die Anzahl der zu bearbeitenden Signalisierungsmeldungen N_S ab. Ein Teil der Signalisierungsnachrichten eines Reroutingverfahrens wird nur einmal für alle Verbindungen benötigt, während andere VC-individuell oder sogar pro Segment auftreten. Bei geschicktem Entwurf der Verbindungsnachführung ist der Anteil der allen Verbindungen eines Mobilterminals gemeinsamen Nachrichten hoch, so daß das Verfahren gut für mehrere Verbindungen skaliert. Die Gesamtzahl der Signalisierungsnachrichten je Reroutingtransaktion gibt auch Hinweise auf die Signalisierungsbelastung eines MAS/ACS durch die Verbindungsnachführung und die erzielbare Handoverrate je Domäne.
- Anzahl der VC-Verbindungen N_{VCC} je Nutzdatenverbindung
Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Anzahl der VC-Verbindungen, die bei der Verbindungsnachführung je Nutzdatenverbindung etabliert wird und verwaltet werden muß. Diese Zahl N_{VCC} gibt Aufschluß über den Ressourcenaufwand, der für die Verbindungsnachführung aufgebracht wird. Er ist vor allem wichtig als Metrik für den Overhead, der bei Multicast-basierten Verfahren entsteht.
- Ressourcenökonomie ρ_R
Eine andere Perspektive nimmt der Parameter der Ressourcenökonomie ρ_R des gewählten Weges ein. Hier werden die endgültig belegten Ressourcen mit den minimal zur Etablierung der Verbindung notwendigen Ressourcen verglichen. Dieser Wert ist wiederum topologieabhängig und ein Maß dafür, um wieviel länger eine etablierte Verbindung gegenüber der kürzesten Route ist.
- Anteil mobilitätsunterstützender Knoten ρ_e und die absolute Anzahl N_e
Nahezu ebenso wichtig wie die Ressourcenökonomie ist der Aufwand, der grundsätzlich erbracht werden muß, um die notwendigen mobilitätsunterstützenden Funktionen in einem Netz anbieten zu können. Der Anteil ρ_e bzw. die absolute Anzahl N_e der um

entsprechende Signalisierungsprotokolle und Vermittlungsfunktionen zu erweiternden Netzknoten ist abhängig vom Verfahren für die Verbindungsnachführung. Ist diese Maßzahl klein, kann ein Netz schrittweise um Handoverdomänen mit drahtloser Anschlußtechnik und mobilen Teilnehmern erweitert werden. Müssen alle Knoten eines Netzes entsprechende Funktionen besitzen, ist das Verfahren eher nur geeignet für den Aufbau eigenständiger WATM-Netze. Darüber hinaus gibt es bestimmte Hauptanwendungsbereiche, welche die Entwicklung des Verfahrens jeweils zum Ziel hatte.

- Handoverlatenz T_L^R
 Einen großen Beitrag zur Handoverdauer liefert dieses Kriterium. Die Handoverlatenz ist definiert als die Zeitspanne zwischen der Anforderung des Handovers durch das Mobilterminal MT und der Bestätigung/Erlaubnis des verantwortlichen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknotens MAS, den Handover ausführen zu dürfen. Die Handoverlatenz gibt Auskunft darüber, wie lange nach Erkennen der Handoversituation eine Mobilstation noch eine Funkverbindung zum alten RAP benötigt, welche eine zuverlässige Übertragung der Signalisierungsnachrichten gestattet. Sie ist damit ein gutes Kriterium zur Beurteilung der Backward Handover Verfahren (Abb. 2.11, Abb. 2.12). Die Handoverlatenz wird für diese Arbeit definiert als die Zeitspanne zwischen Versenden der Meldung BW_HO_REQUEST und dem Erhalt der Meldung mit der Erlaubnis zum Handover, d.h. BW_HO_RESPONSE beim Intra-zonen Handover beziehungsweise HO_RELEASE beim Inter-zonen Handover. Im Fall des Backward Handover schließt die Handoverlatenz stets auch den Reroutingvorgang einschließlich Wegesuche mit ein. Die sich daraus ergebende Anforderung an die Funktionen für die Verbindungsnachführung ist, den Beitrag zur Handoverlatenz T_L^R möglichst niedrig zu halten [161].
- Unterstützung von Gruppenhandover und Einsatzbereich
 Neben der Skalierung für mehrere Verbindungen sollte das Verfahren zur Verbindungsnachführung grundsätzlich geeignet sein, effizienten Gruppenhandover zu unterstützen. Eine wesentliche Voraussetzung ist gemeinsame Wegeführung der Verbindungen und ein gemeinsamer Umschaltzeitpunkt. Die VC-individuelle Wahl eines Umschaltzeitpunktes COS zum Handoverzeitpunkt verhindert einen effizienten Gruppenhandover, welcher in diesem Fall nur mit noch höherem Koordinationsaufwand zu leisten wäre.
- Einsatzbereich
 Die Verfahren sind größtenteils für Weitverkehrsnetze entworfen. Sie eignen sich allerdings auch teilweise für den Betrieb in einem lokalen Netz.

Anhand dieser Kriterien werden nun die oben erwähnten Verfahren gegenübergestellt und mit der MVPA verglichen.

3.6.2 Gegenüberstellung der Verfahren zur Verbindungsnachführung

Die Zusammenstellung der Parameter in Tabelle 3.7 gibt einen ersten Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Verbindungsnachführung. Die Werte für NCNR, VCT und DCOSDR sind teilweise aus [26] übernommen. Dabei gilt: N Anzahl der Blattknoten des Verbindungsbaumes, D topologieabhängige Anzahl von VC-Segmenten zwischen Umschalt- punkt und MAS. Die Blatt-Knoten des Baumes entsprechen ganz generell den teilnehmersei- tigen mobilitätsunterstützenden ATM-Knoten, den MAS in einer Ankerdomäne. VC-Segmente können physikalische oder logische VC-Segmente sein (siehe Abb. 3.1).

Tabelle 3.7: Aufwand und Einsatzbereiche von Reroutingverfahren für WATM-Systeme

	MVPA	WATM CS 1 Anker	Mod. VCT	VCT	NCNR direkter Link	sonst	DCOSDR
N_{hop}	1	D	$D, N \cdot D$	$D, N \cdot D$	1	D	D
N_S^R	3	3	$3, 2 \cdot N$	$3, 2 \cdot N$	3	5	7
N_{VCC}	1	1	N	N	1	1	1
LAN/WAN	WAN	WAN	LAN/WAN	LAN/WAN	WAN	WAN	LAN

Entsprechend seinem Grundkonzept muß ein Multicast-basiertes Verfahren für jede Verbin- dung eines Mobilterminals VC-Verbindungen zu allen N Blatt-Knoten unterhalten, während die übrigen Verfahren mit nur einer VC-Verbindung pro vom Handover betroffener Nutzda- tenverbindung arbeiten ($N_{VCC}=1$). Die Zahl der VC-Verbindungen alleine ist jedoch nicht sehr aussagekräftig. Interessant ist auch deren Länge, ausgedrückt in der Anzahl der VC-Seg- mente. Mit der Anzahl der VC-Segmente steigt die Dauer des Gesamtvorgangs der Verbin- dungsnachführung, da für jedes dieser VC-Segmente eine Verbindungsannahme und Res- sourcenbelegung durchgeführt werden muß. Die Anzahl der VC-Segmente N_{hop} des mobilen Segments einer Verbindung ist bei der VP-basierten Verbindungsnachführung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen MVPA bei Intradomänen Handover stets 1, da zwischen Anker und jedem MAS Direktwege etabliert sind. Beim Interdomänen Handover sind es zwei VC-Segmente. Das für WATM CS 1 vorgeschlagene Ankerverfahren ist dagegen ein VC-ba- siertes Verfahren und die Anzahl $D \geq 1$ der VC-Segmente hängt von der Topologie des Netzes sowie der Plazierung des Ankerknotens ab. Im einfachsten Fall sind der MAS und der ACS direkt benachbart und besitzen einen gemeinsamen Link, so daß $D = 1$. Diese optimale Situa- tion existiert auch beim Nearest Common Node Rerouting NCNR, falls zwischen den benach- barten MAS eine direkte Verbindung besteht. Ansonsten muß wie auch beim dynamisch be- stimmten mobilen Segment des DCOSDR eine topologieabhängige Anzahl $D \geq 1$ umgeschaltet werden. Betrachtet man nur das umgeschaltete mobile Segment, so gilt dies

auch für die beiden Verfahren mit Verbindungsbäumen (VCT und modifizierter VCT, siehe Kapitel 3.5.1). Im Handoverfall wird dabei entlang einer voretablierten VC-Verbindung lediglich noch die Ressourcenbelegung vorgenommen. Nach dem Umschalten der Nutzdatenverbindung muß bei diesen Verfahren allerdings noch die Nachführung des kompletten Baumes erfolgen. Dazu sind $N \cdot D$ VC-Segmente zu bearbeiten. Nachdem das modifizierte VCT-Verfahren einen variablen Umschaltpunkt zuläßt, kann die topologieabhängige Anzahl von Segmenten kleiner sein als beim originalen VCT mit festem, zentralem Anker.

Für jede vom Handover betroffene Verbindung müssen mindestens drei Signalisierungsnachrichten gesendet werden, um das dazugehörige neue mobile Segment zu etablieren (SETUP, CONNECT, CONN_ACTIVE, siehe Abb. 2.12 und Abb. 2.14). Diese Zahl erhöht sich bei den Verfahren NCNR und DCOSDR um die Nachrichten für die dynamische Suche des Umschaltpunktes. Dabei ist der zusätzliche Aufwand bei NCNR geringer, weil der Umschaltknoten vom Netzzugangsknoten des fernen Endpunktes aus gesucht wird, während beim DCOSDR zunächst bei einem zentralen Verbindungsserver die momentane Route der Verbindung durch das Netz erfragt wird, bevor die eigentliche Suche nach dem COS beginnen kann. Zu beachten ist, daß diese Meldungen pro nachzuführender Verbindung anfallen und daß die Anzahl der zu bearbeitenden VC-Segmente angibt, wie oft die Meldungen SETUP und CONNECT im Rahmen einer Handovertransaktion bearbeitet werden müssen. Damit ist für alle Verfahren der Aufwand für die Etablierung des neuen mobilen Segments abschätzbar. Hinzu kommen noch Signalisierungsnachrichten für die Deaktivierung des alten mobilen Segments der vom Handover betroffenen Verbindungen. Diese bestimmen zwar die Gesamtdauer des Handover mit, haben allerdings keinen Einfluß auf die Handoverlatenz und werden deshalb hier nicht angegeben.

Bis auf das dynamische DCOSDR-Rerouting, das sich explizit auf lokale Netze beschränkt, wurde jedes der genannten Verfahren für den Einsatz in Weitverkehrsnetzen entwickelt. Aufgrund der schlechten Skalierbarkeit für eine große Anzahl Verbindungen ist das VCT-Konzept dort jedoch nur sehr bedingt einsetzbar. Es eignet sich eher für lokale Netze. Das modifizierte VCT-Verfahren wurde für Weitverkehrsnetze entwickelt und kann flexibel die Größe des Baumes an die Mobilität des Teilnehmers und die Netztopologie anpassen. Es stellt aber aufgrund des hohen Aufwandes für die Verwaltung des Verbindungsbaumes hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Vermittlungseinrichtungen. Da der Baum des modifizierten VCT-Verfahrens laufend nachgeführt und der Umschaltpunkt nach jedem Handover neu bestimmt werden kann, ist es auch für lokale Netze vorgesehen und geeignet.

3.6.3 Beitrag der Reroutingverfahren zur Handoverlatenz

Mit den bisher ermittelten Kennziffern läßt sich nun auch die Handoverlatenz der Verfahren abschätzen. Dazu sind noch einige Parameter notwendig, welche zum einen die Eigenschaften des physikalischen Netzes und zum anderen die Bearbeitungszeit für die Wegesuche und -auswahl beschreiben (Tabelle 3.8).

Tabelle 3.8: Parameter des physikalischen Netzes

Parameter	Typ. Wert	Erläuterung
$t_{\Delta R}$	n.a.	Zeit für die Auswahl eines Weges
$t_{\Delta s}$	3 ms	Zeit für die Bearbeitung einer SETUP-Nachricht je Knoten
$t_{\Delta p}$	1 ms	Zeit für die Bearbeitung aller übrigen Nachrichten je Knoten
$t_{\Delta d}$	0.5 ms	Mittlere Laufzeitverzögerung einer Signalisierungsnachricht je Knoten

Damit läßt sich allgemein für die Handoverlatenz eines Reroutingverfahrens schreiben

$$T_L^R = (N_{hop} + 1)t_{\Delta s} + 2(N_{hop} + 1)t_{\Delta p} + N_S^R t_{\Delta d} + t_{\Delta R} \quad (18)$$

Die Handoverlatenz gliedert sich in den Bearbeitungsaufwand für die Etablierung des mobilen Segments, die Laufzeit aller Signalisierungsnachrichten und einen Anteil für die Wegesuche und Wegewahl (einschließlich Bestimmung des Umschaltpunktes). Der Bearbeitungsaufwand für das mobile Segment ist von der Anzahl der VC-Segmente abhängig und beinhaltet die Zeit für die Bearbeitung der entsprechenden Signalisierungsnachrichten in den beteiligten Vermittlungsknoten. Werden beim VCT die VC-Verbindungen gleich bei der Etablierung des Baumes mit Kapazität reserviert, entfällt dieser Beitrag. Die Laufzeit ist für alle Verfahren von der Netztopologie und damit vom Parameter D abhängig (Tabelle 3.7). Der Aufwand für die Wegesuche und -auswahl schließlich ist vom jeweiligen Verfahren zur Verbindungsnachführung abhängig, in das jeweils auch die Netztopologie einfließt. Dieser Anteil ist für die ankerbasierten Verfahren und den VCT stets Null. Für die dynamisch-proaktive bzw. dynamisch-reaktive Verbindungsnachführung des modifizierten Virtual Connection Tree und des DCOSDR wird jeweils ein konstanter, topologieunabhängiger Beitrag für die Auswahl bzw. Suche angenommen. Lediglich das Nearest Common Node Rerouting besitzt eine topologieabhängige Komponente, und zwar im Fall, daß keine direkte Verbindung zwischen aktuellem Knoten und Umschaltpunkt existiert. Dann muß vom fernen Endpunkt her schrittweise entlang der Verbindung jeder Knoten auf Eignung zum Umschaltpunkt geprüft werden.

Ein numerisches Beispiel mit den Werten aus Tabelle 3.8 ist in Abb. 3.20 zusammengestellt. Zusätzlich zu den bisher betrachteten Verfahren wird noch eine Variante des VCT mitdisku-

tiert. Bei dieser Variante wird nicht nur der Baum durch Einträge in den Vermittlungstabellen proaktiv konfiguriert, sondern auch gleich beim Verbindungsaufbau die notwendige Kapazitätsreservierung vorgenommen (resVCT).

Man sieht, daß nur der VCT mit Kapazitätsreservierung und das NCNR mit direkter Verbindung jeweils einen von der Netztopologie unabhängigen Beitrag zur Handoverlatenz liefern. Beim VCT mit Reservierung (resVCT, Abb. 3.20) entfällt die Rufbearbeitung, so daß dessen Beitrag zur Handoverlatenz konstant Null ist. Dies muß allerdings mit einem extrem niedrigen Wirkungsgrad hinsichtlich der Ressourcennutzung erkauft werden, da von allen N reservierten Verbindungen jeweils nur eine aktiv genutzt werden kann. Beim NCNR mit direkter Verbindung zum Nearest Common Node wird stets dieser direkte Link verwendet ($N_{hop} = 1$).

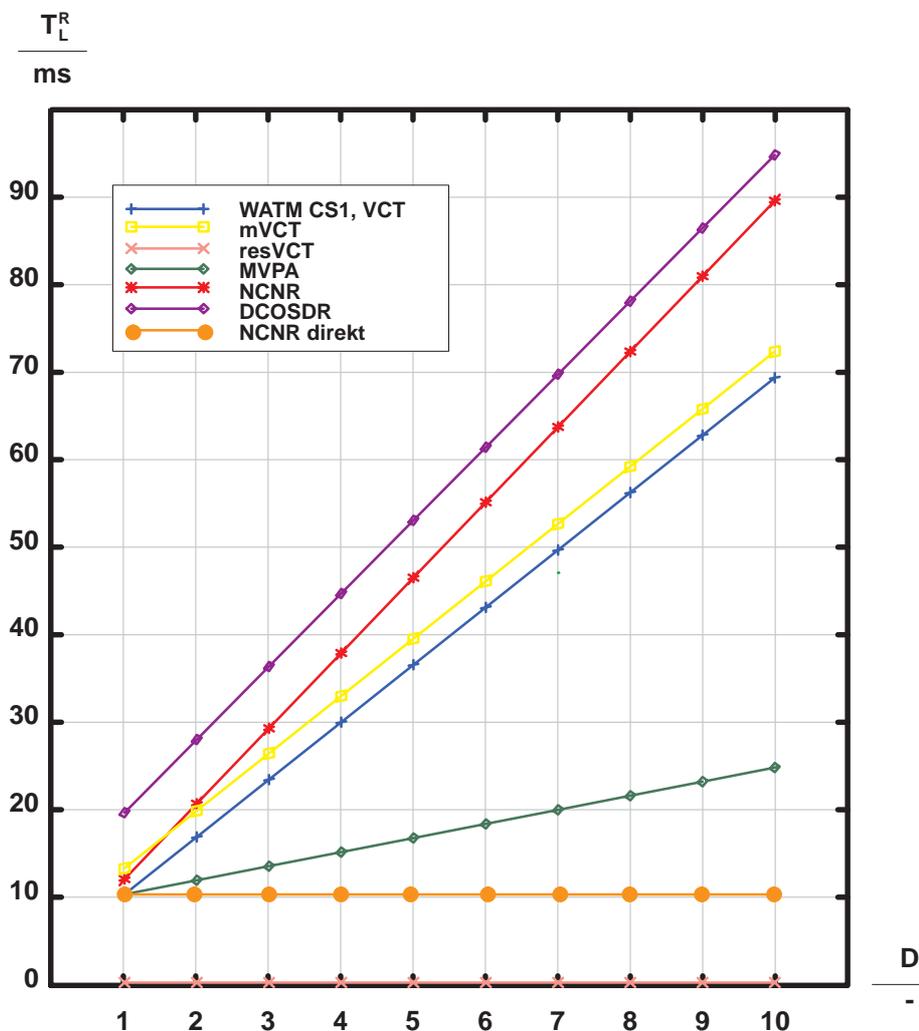


Abb. 3.20: Beitrag der Verbindungsnachführung zur Handoverlatenz – numerisches Beispiel

Das in dieser Arbeit vorgeschlagene VP-basierte Ankerverfahren der MVPA ist nur schwach aufgrund der Signallaufzeiten von der Netztopologie abhängig, es besitzt aber wegen der logischen Direktwege zwischen MAS und COS/ACS ebenfalls keinen topologieabhängigen Bearbeitungsaufwand.

Die Zeiten aller Verfahren werden im wesentlichen durch die Komponenten zur Rufbearbeitung ($t_{\Delta_S}, t_{\Delta_P}$) bestimmt. Die topologieabhängige Laufzeitverzögerung ist um eine Größenordnung niedriger und fällt daher erst bei großen Netzen ins Gewicht. Die von der Anzahl der Netzsegmente D abhängige Dauer der Rufbearbeitung dominiert alle Verfahren. Sie unterscheiden sich nur im Aufwand für die Suche nach einem geeigneten Umschaltpunkt.

Neben den genannten Kriterien ist auch der generelle Aufwand für die Implementierung und Netzeinführung sowie die Ressourcenökonomie der resultierenden Wegeführung relevant. Eine weiterführende Analyse der Verfahren ergibt das in Tabelle 3.9 zusammengestellte Bild.

Tabelle 3.9: Ökonomie von Reroutingverfahren für WATM-Systeme

	MVPA	WATM CS 1 Anker	Mod. VCT	VCT	NCNR	DCOSDR
<i>Group</i>	ja	ja	ja	bedingt	nein	nein
ρ_R	$0 < \rho_R \leq 1$	1	1			
N_e	N+1	N+1	> N+1	N+1	> N+1	> N+1
ρ_e	$\rho_e \ll 1$	$\rho_e \ll 1$	$\rho_e \leq 1$	$\rho_e \ll 1$	1	1

Aus der Sicht des Mobilterminals, aber auch aus Sicht der beteiligten Vermittlungsknoten ist ein wichtiger Aspekt der Ökonomie eines Verfahrens, wie gut es für die Steuerung mehrerer Verbindungen (Gruppenhandover) geeignet ist. Diese Frage ist bei der Verbindungsnachführung mit festem Anker eindeutig positiv zu beantworten. Durch die zentrale Steuerung der Verbindungsnachführung in einem gemeinsamen Umschaltpunkt ist der pro Verbindung anfallende Aufwand auf ein Minimum reduziert (Etablierung des jeweiligen mobilen Segments). Beim VP-basierten Verfahren der in dieser Arbeit vorgeschlagenen MVPA ist dieser Aufwand darüber hinaus besonders gering, da jedes mobile Segment nur aus einem VC-Segment besteht (siehe Kapitel 3.4.1 und 3.4.2). Auch die Baumstrukturen der Multicast-basierenden Verfahren besitzen einen zentralen Knoten, der das gleichzeitige effiziente Rerouting einer Gruppe von Verbindungen erlaubt. Die Wurzel des Baumes ist der Übergang zum festen Segment der Verbindung(en) und für alle Verbindungen einer Domäne (VCT) oder eines Mobilterminals (modifizierter VCT) identisch. Allerdings ist das ursprüngliche VCT-Verfahren nur bedingt für mehrere Verbindungen geeignet. Es erlaubt zwar ein effizientes Umschalten, allerdings müssen dazu für jede Verbindung die Identifikationsnummern des gesamten Baumes im Mobilterminal gespeichert werden. Auch netzseitig müssen entsprechend viele Einträge

in den Vermittlungstabellen der Knoten des Baumes vorgehalten werden. Dies gilt insbesondere für die Wurzel, bei der alle Verbindungen zusammenlaufen. Der Speicherbedarf ist entsprechend sehr groß im Vergleich zum modifizierten VCT und vor allem zu den ankerbasierten Verfahren. Die dynamische Bestimmung des Umschaltpunktes erfolgt bei NCNR und DCOSDR VC-individuell. Damit muß der vollständige Algorithmus für die Verbindungsnachführung pro VC getrennt bearbeitet werden. Ein Gruppenhandover wird durch diese Form der Verbindungsnachführung nicht unterstützt.

Hauptgrund für die Definition dynamischer Suchverfahren für den Umschaltpunkt in der Verbindungsnachführung ist die erzielbare Ressourcenökonomie [39]. Für jede Verkehrsbeziehung kann mit den dynamischen Verfahren stets die beispielsweise kürzeste Route ausgewählt werden. Dies ist besonders sinnvoll bei Mobil-Mobil-Verbindungen innerhalb einer Handoverdomäne. Während ankerbasierte Verfahren den Weg über den Umschaltpunkt vorschreiben, kann mit NCNR und DCOSDR eine effizientere Route gewählt werden. Wie hoch der zusätzliche Aufwand durch den "Umweg" über den Anker ausfällt, ist wiederum stark abhängig von der Netztopologie und den Verkehrsbeziehungen.

Der Ressourcenaufwand, der für eine Verbindung notwendig ist, wird im folgenden beschrieben durch die Kosten C , welche sie im Netz verursacht. Diese Kosten können beispielsweise definiert sein durch die belegte Kapazität und die Anzahl physikalischer Leitungen, über welche die Verbindung geführt wird. Die Kosten steigen mit zunehmender Weglänge an. Seien C_i die Kosten eines Weges i aus der Menge \mathfrak{R} aller möglichen Wege zwischen zwei Endpunkten. Im allgemeinen Fall gilt dann für die Ressourcenökonomie ρ_R^x einer konkreten Wegewahl x

$$\frac{1}{\rho_R^x} = \frac{C_x}{\min_{\forall i \in \mathfrak{R}} (C_i)} \quad (19)$$

Wenn es ein Verfahren zur Verbindungsnachführung erlaubt, stets den Weg mit dem geringsten Ressourcenbedarf, d.h. mit den niedrigsten Kosten, auszuwählen, erreicht dessen Koeffizient für die Ressourcenökonomie den Wert 1. Dies ist für die Verfahren NCNR und DCOSDR der Fall. Sie besitzen keinerlei Restriktionen oder einschränkende Nebenbedingungen für das Wegesuchverfahren. So kann für jede Paarung von Endpunkten ein entsprechend der im jeweiligen Netz geltenden Wegewahlstrategie optimaler bzw. kostengünstigster Weg gefunden werden. Ankerbasierte Verfahren dagegen führen die Nebenbedingung in den Wegesuchalgorithmus ein, daß eine Verbindung stets über den Ankerknoten geführt werden muß. Einen Wert von 1 kann die Ressourcenökonomie dieser Verfahren nur erreichen bei besonderen Fällen günstiger Platzierung des Ankers und für Verbindungen, deren ferner Endpunkt außerhalb der Ankerdomäne liegt.

Ein Aspekt der Ökonomie ganz anderer Art ist der Aufwand, der bei der Einführung von drahtlosem Zugang und mobilen Teilnehmern in ATM-Netzen entsteht. Neben den reinen Infrastrukturkosten für den Aufbau des drahtlosen Anschlußnetzes interessiert hier vor allem, welche und wieviele Netzknoten spezielle mobilitätsunterstützende Funktionen anbieten müssen (ρ_e, N_e). Dieser Wert wird durch das Verfahren zur Verbindungsnachführung bestimmt. Am günstigsten verhalten sich hier wiederum die permanenten Ankerverfahren. An jedem Interzonen Handover sind drei Knoten beteiligt: der alte und der neue MAS sowie der Ankerknoten ACS. Innerhalb einer Handoverdomäne müssen also die N teilnehmerseitigen mobilitätsunterstützenden Knoten MAS sowie einer oder eventuell mehrere ACS mit entsprechenden Funktionen und Signalisierungsprotokollen ausgerüstet sein. Alle übrigen Knoten können kostengünstigere reguläre ATM-Festnetzknoten sein. Dies gilt nicht für das Verfahren des modifizierten VCT. Da die Wurzel des dynamisch nachgeführten Baumes nicht permanent ist, muß eine größere Anzahl Netzknoten in der Lage sein, diese Wurzelfunktion zu erbringen, damit das Verfahren einen Gewinn erzielt. Sollte nur ein Umschaltknoten zur Verfügung stehen, degeneriert das modifizierte VCT-Verfahren zum regulären VCT mit dem einzigen Unterschied, daß der Baum nach jedem Handover angepasst wird. Erst wenn mehrere mögliche COS zur Verfügung stehen, kann der dynamische Baum flexibel genug an die Mobilität des Teilnehmers und die Netztopologie angepasst werden. Der größte Gewinn wird erzielt, wenn alle Knoten zum Umschaltpunkt ausgebaut werden, wie es auch für die rein dynamischen Verfahren der Verbindungsnachführung (NCNR, DCOSDR) notwendig ist.

4 Verlustfreier Mobile ATM Handover

Im vorhergehenden Kapitel 3 wurde die Handoversituation aus der Perspektive der Verbindungsebene betrachtet. Wesentliche Aspekte dort sind die partielle Wegeneuwahl für das mobile Segment einer ATM-Verbindung und das Umschalten vom alten auf das neue mobile Segment. Je nach dem Grad der Reaktivität oder Proaktivität des Verfahrens zur Verbindungsnachführung ergeben sich eine hohe Ressourcenökonomie oder eine niedrige Handoverlatenz. Das Umschalten des mobilen Segments hat darüber hinaus großen Einfluß auf den ATM-Zellenstrom. Es können Zellverluste und Zellduplikationen entstehen. Die Zellreihenfolge muß auch während des Umschaltens gewährleistet sein und die Schwankungen der Zellverzögerung sollte möglichst nicht die vorgegebenen Grenzen überschreiten. Auf der Zellebene existieren also eine Reihe von zusätzlichen Problemen, die durch ein Handoververfahren über die reine Verbindungsnachführung hinaus gelöst werden müssen. Da es sich hier jeweils um einen Verlust an Dienstqualität handelt, der vermieden werden soll, wird entsprechend von verlustfreiem bzw. nicht verlustfreiem Handover gesprochen. Bisher in der Literatur vorgeschlagene Verfahren für den WATM-Handover sind meist nicht verlustfrei oder nur eingeschränkt verlustfrei mit wenig robuster und unflexibler Funktionalität. Im folgenden werden hier die Fehlersituationen analysiert, die Motivation für verlustfreie Handoververfahren erarbeitet und schließlich ein flexibel an Dienstgüteanforderungen und Handovertyp anpassbares verlustfreies WATM-Handoververfahren vorgeschlagen. Dabei werden nur Interzonen Handover betrachtet.

4.1 Umschalten, Synchronisieren, Zellverluste und Zellduplikationen

Die am häufigsten vorgeschlagene Art des Handovers für ein WATM-System ist ein harter Backward Handover [26][142][153][161][179]. Die Notwendigkeit für einen Forward Handover wird zwar in einzelnen Arbeiten negiert, insbesondere wird sie beim Nearest Common Node Rerouting ausgeschlossen [24][25][26], aber aufgrund der Analyse von Funkszenarios (siehe Kapitel 2.2.3) in dieser Arbeit als wichtige Alternative identifiziert. Diese Meinung wird auch von anderen Autoren und der WATM Arbeitsgruppe des ATM Forum geteilt [36][153][171][200]. Im folgenden werden also sowohl die Umschaltsituation für den Backward als auch für den Forward Handover betrachtet.

Sobald die Verbindungsnachführung einen Umschaltpunkt festgelegt, einen Weg zum neuen Netzzugangspunkt ausgewählt und eine VC-Verbindung für das neue mobile Segment etabliert hat, existieren zwei Datenpfade für die Nutzdaten der vom Handover betroffenen Ver-

bindung. Vom alten auf den neuen Datenpfad muß nun umgeschaltet werden. Dieses Umschalten geschieht im COS durch Aktualisierung der Vermittlungstabellen und im Mobilterminal durch Vollzug des physikalischen Handovers an der Funkschnittstelle, d.h. die Registrierung an der neuen Basisstation RAP und die Aktivierung der neuen Funkressourcen. Wegen Signalisierungsverzögerungen und unterschiedlicher Bearbeitungsdauern können diese Vorgänge in COS und MT allerdings nicht synchron ablaufen. Zur genaueren Betrachtung empfiehlt es sich, nach Downlink- und Uplinkrichtung zu trennen. Die prinzipiellen Verhältnisse sind in Abb. 4.1 für den Backward Handover und für den Forward Handover in Abb. 4.2 dargestellt.

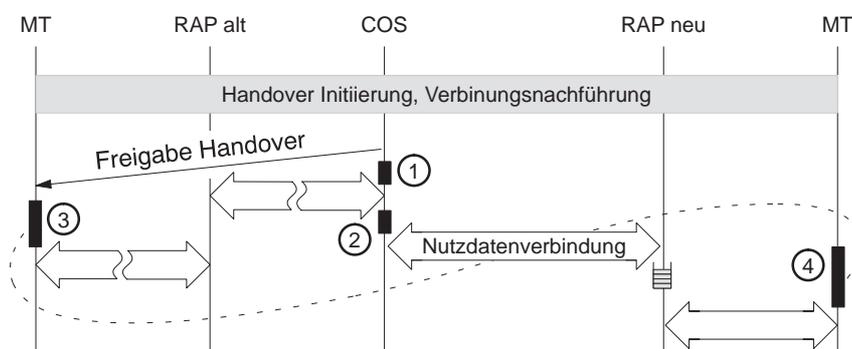


Abb. 4.1: Umschaltvorgänge in COS und MT beim Backward Handover

Nachdem beim Backward Handover das Mobilterminal eine Handoversituation detektiert und einen Handover initiiert hat, erfolgt die Verbindungsnachführung im Netz und schließlich die Handoverfreigabe (HO_RELEASE in Abb. 2.12) vom Umschaltpunkt COS an das Mobilterminal MT. Mit dieser Handoverfreigabe können nun auch die Nutzdatenverbindungen umgeschaltet werden (Abb. 4.1): nach dem Absenden der Handoverfreigabe trennt der COS die alte Nutzdatenverbindung (1) und verbindet das neue mobile Segment der Verbindung mit ihrem festen Segment (2). Nutzdatenzellen können jetzt schon in Richtung des Downlink zum Mobilterminal MT weitergeleitet und in der Basisstation RAPneu gepuffert werden, bis das MT auf dem neuen Pfad empfangsbereit ist. Das MT muß dazu allerdings nach Erhalt der Handoverfreigabe zunächst nach einer kurzen Handoververzögerung die Funkverbindung mit RAPalt auslösen (3) und eine Funkverbindung mit der neuen Basisstation aufbauen (4). Erst nach dieser Handovvertime existiert wieder ein durchgehender physikalischer Transportpfad für das mobile Segment und das Mobilterminal kann Nutzdatenzellen senden und empfangen.

Beim Forward Handover ist die Reihenfolge von Verbindungsnachführung und Neuestablishen einer Funkverbindung umgekehrt, ansonsten ist die Abfolge ähnlich wie beim Backward Handover (Abb. 4.2). Wegen einer abrupten Degradation des Empfangspegels löst das Mobilterminal die aktuelle Funkverbindung aus (1) und etabliert eine neue mit einer der benachbar-

ten Basisstationen (2). In der Uplink-Richtung können dann im MT oder durch RAPneu Nutzdatenzellen gepuffert werden, bis der Handover initiiert und die Verbindungsnachführung abgeschlossen ist. Sobald die Verbindungsnachführung erfolgreich war, gibt der COS den Handover frei (FW_HO_RESPONSE, CONN_ACTIVE in Abb. 2.14). Mit der Handoverfreigabe wird im Umschaltzentrum auch das feste Segment mit dem neuen mobilen Segment verbunden (3) sowie der alte Datenpfad in Up- und Downlink-Richtung deaktiviert (4). Im Mobilterminal kann sofort nach der Handoverfreigabe der Puffer geleert und mit der regulären Übertragung von Nutzdatenzellen fortgefahren werden.

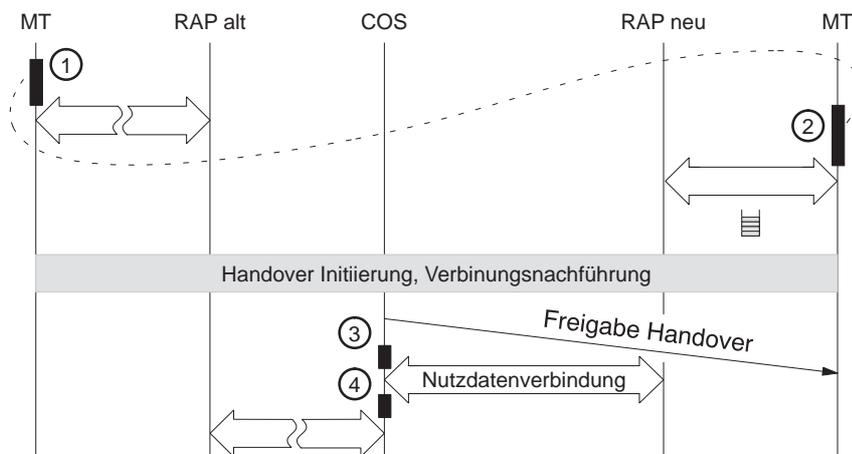


Abb. 4.2: Umschaltvorgänge in COS und MT beim Forward Handover

Durch das unsynchronisierte Umschalten entstehen beim harten backward und forward hand-over Situationen, in denen Zellen verloren gehen können (Abb. 4.3):

- Zellverluste in Downlink-Richtung entstehen, wenn das Mobilterminal die Funkverbindung mit der alten Basisstation deaktiviert, ohne zuvor alle Zellen, die aufgrund der Übertragungsverzögerung und Puffern in den Vermittlungseinrichtungen noch auf dem Weg in Richtung Mobilterminal sind (In-Transit Zellen), empfangen zu haben. Da ATM-Zellen keine zellenindividuelle eindeutige Kennzeichnung tragen, kann dem Mobilterminal auch nicht unmittelbar signalisiert werden, wieviele Zellen noch zu erwarten sind. Die Höhe der Zellverluste wird beim Backward Handover durch die Umschaltverzögerung im COS bestimmt und begrenzt, jener Zeitspanne vom Absenden der Handoverfreigabe bis zum Umschalten der Nutzdatenverbindung auf das neue mobile Segment.
- Zellverluste in Uplink-Richtung werden auf ähnliche Weise durch Umschalten des COS verursacht. In-Transit Zellen der Nutzdatenverbindung können nicht eindeutig erfasst und somit auch nicht ermittelt werden, ob alle vom Mobilterminal im alten Uplink gesendeten Zellen auch weitergeleitet wurden. Entscheidende Größen hierfür sind die

Laufzeitverzögerung, die Umschaltverzögerung im COS sowie die Handoververzögerung im Mobilterminal.

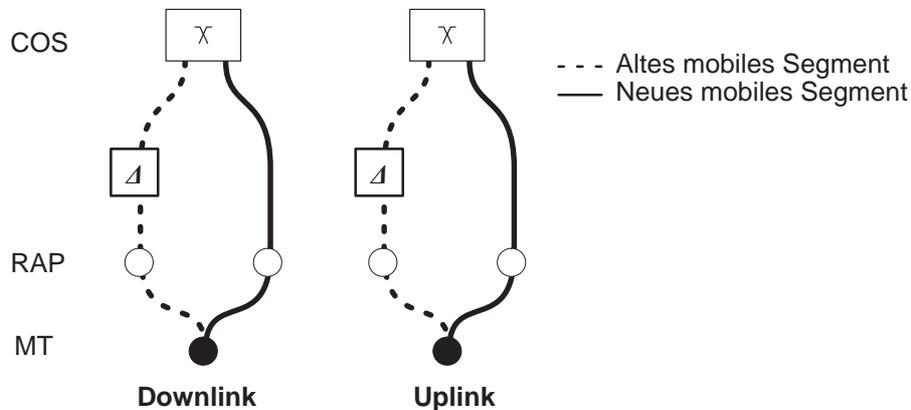


Abb. 4.3: Handoversituation mit Gefahr von Zellverlusten

Für diese Zellverluste ist allein die Laufzeitverzögerung auf dem alten mobilen Segment entscheidend. Hinzu kommen noch zwei Komponenten, die erheblichen Anteil besitzen können:

- Beim Backward Handover entstehen zusätzliche Zellverluste aufgrund der Handoverzeit im Mobilterminal. Wenn ATM-Zellen im Downlink an der neuen Basisstation ankommen, bevor der physikalische Handover abgeschlossen ist, werden sie verworfen, sofern keine Pufferung erfolgt. Die Höhe dieser Zellverluste bestimmen die Laufzeitverzögerung des neuen mobilen Segments, die Umschaltverzögerung im COS sowie die Handoverzeit im Mobilterminal.
- Beim Forward Handover wird die Funkverbindung unterbrochen, bevor die Verbindungsnachführung initiiert wurde. Die Handoverlatenz verursacht damit beim Forward Handover einen Beitrag zu den Zellverlusten, der abhängig vom Verfahren der Verbindungsnachführung und der Netztopologie dominieren kann.

Die Laufzeitdifferenz zwischen altem und neuem mobilen Segment spielt insbesondere beim Backward Handover für die Zellverluste eine unmittelbare Rolle. Sie kann darüber hinaus für einen weiteren Effekt verantwortlich sein. Wenn Zellen auf dem neuen Pfad eine geringere Verzögerung erfahren als auf dem alten Pfad, ist ein Überholen möglich. Zellen kommen dann auf dem neuen Pfad vor früher gesendeten Zellen auf dem alten Pfad an. In solchen Fällen kann die Zellreihenfolge gefährdet sein:

- In Downlink-Richtung wird die Zellreihenfolge eingehalten, da zu jedem Zeitpunkt nur die Funkverbindung zu einem RAP aktiv ist. Die Mobilstation erhält die Nutzdatenzellen daher in exakt der Reihenfolge, wie sie vom COS gesendet wurden. Eventuelle Zellverluste (siehe oben) beeinträchtigen deren Reihenfolge nicht.

- Gleiches gilt prinzipiell für die Zellreihenfolge im Uplink. Wenn ein exklusiver oder atomarer Umschaltmechanismus (siehe Kapitel 3.3.5) verwendet wird, ist stets nur ein Pfad aktiv und die Zellreihenfolge kann garantiert werden. Bei der schleifenden Umschaltung sind allerdings kurzfristig das alte und neue mobile Segment gleichzeitig aktiv, so daß Überholvorgänge theoretisch möglich sind. Meist werden in der Praxis die Dauer der Umschaltphase im COS sowie des physikalischen Handovers an der Funkchnittstelle in etwa gleiche Größenordnung besitzen, so daß Überholvorgänge auch hier nicht eintreten werden.

Die bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, daß zu jedem Zeitpunkt der Handoverphase nur ein einziger Pfad zwischen Mobilterminal und Umschaltpunkt aktiv ist und daß nur ein einziger Handover stattfindet, nach dem das alte mobile Segment terminiert. Häufig verursachen schnell wechselnde Funkbedingungen jedoch mehrfache, direkt aufeinander folgende Handover zwischen zwei Zellen (Ping-Pong Handover). Dann macht es Sinn, den Festnetzanteil des alten und des neuen mobilen Segments gleichzeitig aktiv zu halten, bis die Funkverhältnisse stabil sind. Im Umschaltpunkt wird dafür eine Duplikationsfunktion aktiviert, um ein Dualcasting der Nutzdatenzellen in Downlink-Richtung zu ermöglichen. Das Mobilterminal schaltet zwischen diesen beiden Pfaden hin und her. In Uplink-Richtung werden die Zellströme der beiden Pfade ebenfalls in geeigneter Weise kombiniert. Die Situation für Zellverluste und Zellreihenfolge stellt sich damit etwas anders dar und zusätzlich tritt das Problem von Zellduplikationen auf.

Für die folgende Betrachtung gehen wir davon aus, daß die Basisstation im Fall des Ping-Pong-Handovers keine Pufferung von ATM-Zellen vornimmt, auch nicht, wenn keine aktive Funkverbindung zur Mobilstation besteht. Wir sprechen weiterhin vom alten und neuen mobilen Segment, auch wenn nun zwischen den beiden während der Ping-Pong-Phase umgeschaltet wird. Grundsätzlich müssen zwei Situationen unterschieden werden, je nachdem ob das neue mobile Segment eine kleinere (Abb. 4.4) oder größere (Abb. 4.5) Verzögerung aufweist:

- Zellverluste entstehen im Downlink beim Umschalten auf das neue mobile Segment, wenn es vorseilend ist, d.h. eine kurze Laufzeitverzögerung aufweist als das alte mobile Segment (Fall (1) in Abb. 4.4). Hinzu kommt, daß der physikalische Handover eine endliche, von Null verschiedene Handovertotzeit benötigt. Auch in dieser Phase werden Nutzdatenzellen verworfen. Sollte das neue mobile Segment dagegen nacheilen, so entstehen Zellverluste beim Rückschalten auf das alte Segment (Fall (2) in Abb. 4.5). Die Zellverluste werden nun also nicht mehr durch die absolute Verzögerung eines Pfades bestimmt, sondern durch deren Laufzeitdifferenz und die Handovertotzeit. Im Uplink entstehen keine Zellverluste.

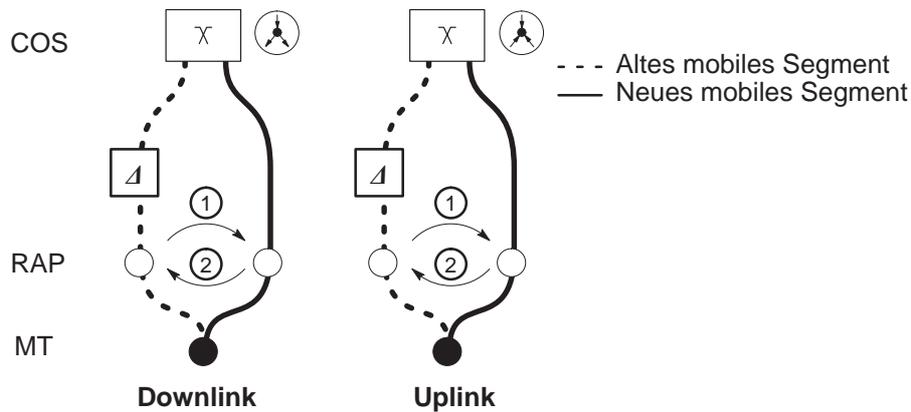


Abb. 4.4: Vorseilendes neues Segment

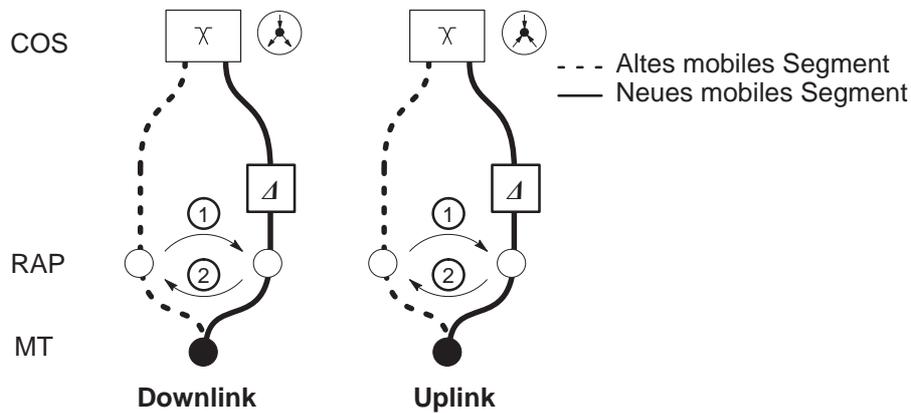


Abb. 4.5: Nacheilendes neues Segment

- In der Uplink-Richtung entstehen vor allem Vertauschungen der Zellreihenfolge, unter der Voraussetzung, daß die vom physikalischen Handover eingeführte Totzeit kleiner ist als die Laufzeitdifferenz. In diesem Fall kann beim Umschaltvorgang Nummer (1) in Abb. 4.4 sowie beim Rückschaltvorgang Nummer (2) in Abb. 4.5 die Zellreihenfolge nicht garantiert werden.
- Genauso können im Downlink Zellduplikationen entstehen wenn vom vorausseilenden auf den jeweils nacheilenden Pfad geschaltet wird (Fall (2) in Abb. 4.4 und Fall (1) in Abb. 4.5). Voraussetzung dafür ist wiederum, daß die Laufzeitdifferenz größer als die Handovertotzeit ist. Im Uplink entstehen keine Zellduplikationen.

Die bisherige Diskussion zeigte die Fehlersituationen bei harten Handoververfahren und eventuell auftretenden Ping-Pong-Situationen. Um diese Nachteile zu vermeiden, sind Soft Handoververfahren ideal geeignet. Sie etablieren zwei Übertragungspfade zwischen Mobilterminal und COS gleichzeitig, d.h. die Mobilstation ist in der Lage, mit zwei Basisstationen

simultan zu kommunizieren. Nutzdateninformationen werden dupliziert und in Uplink als auch Downlink redundant übertragen. Abhängig von der momentanen Funksituation können dann adaptiv das jeweils bessere Signal selektiert oder sogar in Mobilterminal und COS die beiden Pfade gewinnbringend kombiniert werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Technologie der Luftschnittstelle gleichzeitige Kommunikation des Mobilterminals mit beiden Basisstationen erlaubt, sowie daß die Signale synchron übertragen werden oder zumindest in Mobilterminal und COS synchronisierbar sind. Da ATM-Zellen keine Sendefolgennummer oder ähnliche Synchronisationsinformationen tragen, ist ein Soft Handover ohne zusätzliche Maßnahmen in WATM nicht realisierbar. Bisher sind außerdem keine Technologien für Soft Handover bei breitbandigen Luftschnittstellen bekannt.

4.2 Abschätzung der Zellfehlerhäufigkeit bei nicht verlustfreiem Handover

Harte Handover ohne Maßnahmen gegen Zellverluste für öffentliche WATM-Systeme werden derzeit aus Komplexitätsgründen bevorzugt behandelt und auch in der Standardisierung empfohlen [19][36][161][183]. Sie werden aufgrund der Architektur heutiger ATM-Vermittlungsknoten als einzig realisierbare Möglichkeit bezeichnet, während diese noch keinen verlustfreien Handover zuläßt [41][126].

Damit wird beim Handover virtueller ATM-Verbindungen eine Reihe von möglichen Fehlern in Kauf genommen. Aufgrund einiger technologischer Parameter handelt es sich dabei im wesentlichen um den Zellverlust, bei ungünstiger Dimensionierung können auch Zellduplikationen und Vertauschungen der Zellreihenfolge entstehen (siehe Kapitel 4.1). Der Entwurf der Verfahren soll so gestaltet sein, daß diese Fehler minimal werden [36]. Wie wir im folgenden sehen werden, ist dieses Ziel nur bedingt zu erreichen und, wenn überhaupt, nur wechselweise ausschließlich für den Uplink oder den Downlink.

Für diese Diskussion werden im folgenden die Zeitverhältnisse der Umschaltsituation auf Zellebene analysiert und eine Abschätzung für die mittlere Zellverlusthäufigkeit bei nicht verlustfreiem Handover angegeben.

4.2.1 Berechnung der Verletzbarkeitsperiode

Zunächst wird der bestmögliche Fall des Backward Handover betrachtet (Abb. 4.6). Wenn die Funkbedingungen nicht überraschend schnell schlecht werden, kann das Mobilterminal solange wie möglich die momentane Verbindung halten. Sobald die Verbindungsnachführung abgeschlossen ist, gibt der COS den Handover frei (1) und schaltet das mobile Segment um. Nach der Umschaltverzögerung $t_{\Delta COS}$ sendet er die folgenden ATM-Zellen in Richtung des neuen RAP weiter (2). Diese Zellen müssen im neuen RAP verworfen werden, bis ein Funkkanal zum Mobilterminal etabliert ist, falls nicht ein Puffer vorgesehen ist. Zu diesem Zeit-

punkt sendet er spätestens die letzte ATM-Zelle in Richtung des alten RAP (3). Das Mobilterminal erhält die Handoverfreigabe und trennt nach einer kurzen Bearbeitungszeit (Handoververzögerung $t_{\Delta MT}$) den Funkkanal. Alle jetzt noch im alten Downlink gesendeten Zellen müssen vom RAP verworfen werden. Nach einer von Technologie und Protokollen der Luftschnittstelle bestimmten Handovertotzeit $t_{\Delta HO}$ ist es dann an der neuen Basisstation wieder empfangsbereit.

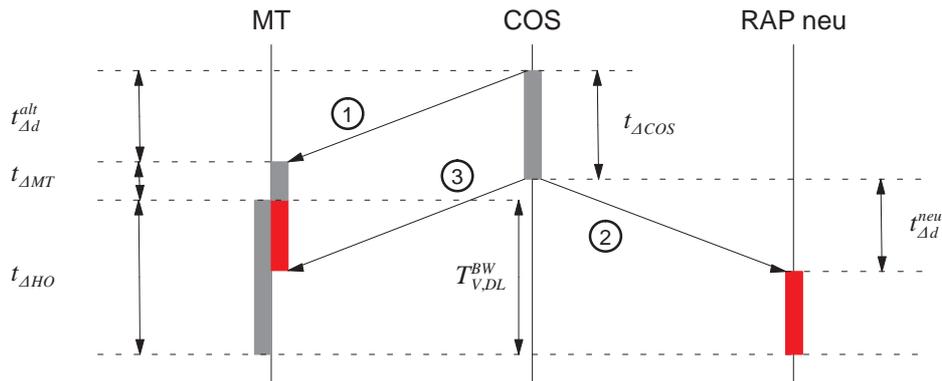


Abb. 4.6: Beiträge zum Zellverlust im Downlink beim Backward Handover

Damit kann nun die Verletzbarkeitsperiode des Backward Handover berechnet werden. Als Verletzbarkeitsperiode definieren wir die Zeitdauer, in der Verlust von Nutzdatenzellen eintreten kann. Multiplikation der Verletzbarkeitsperiode mit der Datenrate der Verbindung ergibt dann den tatsächlichen Zellverlust im Handoverfall.

Sie errechnet sich unter der Annahme, daß Signalisierungsnachrichten der gleichen Laufzeitverzögerung ausgesetzt sind wie Nutzdatenzellen zu

$$T_{V,DL}^{BW} = \max((t_{\Delta COS} - t_{\Delta MT}), 0) + \max((t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} - t_{\Delta COS} - t_{\Delta d}^{neu}), 0) \quad (20)$$

Der zweite Term der Summe entfällt, wenn in der neuen Basisstation ein Puffer eingesetzt wird, um die ankommenden Nutzdatenzellen aufzufangen bis eine gültige Funkverbindung mit dem Mobilterminal etabliert ist. Im günstigsten Fall können bei guter Dimensionierung beim Backward Handover Zellverluste im Downlink vollständig vermieden werden ($t_{\Delta COS}=0$ und Pufferung in RAPneu).

Die Verletzbarkeitsperiode aus Gleichung (20) errechnet sich für den bestmöglichen Fall, daß die Handoverfreigabe vom Mobilterminal noch empfangen werden kann. Aufgrund der Funkkanalszenarios von Kapitel 2.2.3 ist allerdings auch ein schlechtestmöglicher Fall vorstellbar, bei dem ein Backward Handover initiiert wurde, dann aber der Empfangspegel abrupt

wegbricht. Ein robustes Handoverprotokoll sollte dennoch in der Lage sein, diesen Handover noch zu beenden. Er kann frühestens beendet werden, wenn die Verbindungsnachführung bereits erfolgt ist. Andernfalls wäre es notwendig, die laufende Handovertransaktion abubrechen und den Verbindungsabbruch oder einen Forward Handover zu initiieren. Besteht allerdings eine gültige Verbindung vom COS zum neuen RAP, kann das Mobilterminal mit dem neuen MAS das Umschalten der Verbindung verhandeln. Im COS ist zum selben Zeitpunkt die Handoverfreigabe erfolgt und der COS hat den alten Downlink bereits terminiert. Die maximale Anzahl Nutzdatenzellen, die durch abrupten Handover verloren werden kann, ist somit durch das Bandbreite-Verzögerungs-Produkt im Downlink des alten mobilen Segments bestimmt. Im konkreten Fall des Backward Handover von WATM CS 1 (siehe Abb. 2.12) entspricht dies der Situation, daß das Mobilterminal über das Handoverziel informiert wurde (BW_HO_RESPONSE), aber noch keine abschließende Bestätigung der Verbindungsnachführung erhalten hat (HO_RELEASE).

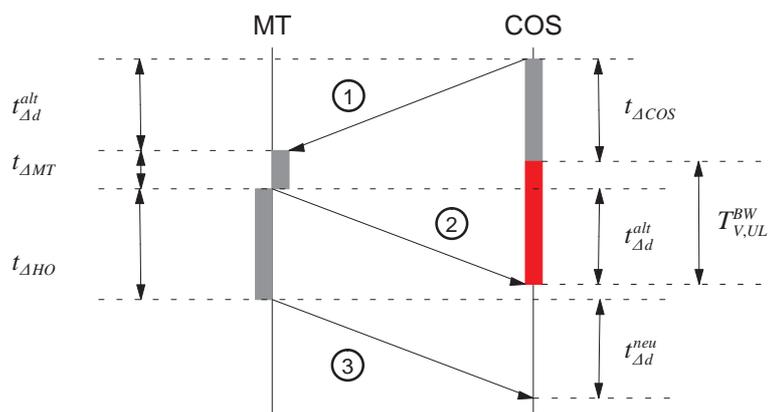


Abb. 4.7: Beiträge zum Zellverlust im Uplink beim Backward Handover

Mit derselben Methode kann beim Backward Handover die Verletzbarkeitsperiode für den Uplink berechnet werden (Abb. 4.7). Nach der Handoverfreigabe (1) schaltet der COS das mobile Segment um. Nachdem das Mobilterminal die Handoverfreigabe erhalten hat, sendet es spätestens nach der Handoververzögerung seine letzte Nutzdatenzelle (2) auf dem alten Pfad, um nach der Handovertotzeit über den neuen RAP weiterzukommunizieren (3). Wie man sofort sieht, ist

$$T_{V,UL}^{BW} = 2 \cdot t_{\Delta Ad}^{alt} + t_{\Delta MT} - t_{\Delta COS} \quad (21)$$

Im Gegensatz zum Downlink ist hier also eine möglichst schnelle Umschaltung im COS nicht wünschenswert, da sie für eine größere Verletzbarkeitsperiode und damit für höhere Zellverluste im Uplink sorgt. Während die Zellverluste im Downlink eliminiert werden können, steigen sie im Uplink auf mehr als das doppelte Bandbreite-Verzögerungs-Produkt an.

Betrachtet man den Fall eines Forward Handover, so sieht man, daß der COS während der Verbindungsnachführung ATM-Zellen auf das alte mobile Segment weiterleitet, an dessen Ende das Mobilterminal keine aktive Funkverbindung mehr unterhält. Signalisierung über die abrupte Abmeldung an der alten Basisstation hat nicht stattgefunden, da der Forward Handover ja explizit für den Fall einer unvermittelt unbrauchbar gewordenen Funkverbindung entworfen wurde. Erst wenn eine Verbindung zwischen COS und neuem RAP etabliert wurde, kann der COS die Handoverfreigabe erteilen und umschalten (Abb. 4.8). Alle bis zum Ende der Umschaltverzögerung im Downlink gesendeten Nutzdatenzellen (1) sind damit verloren.

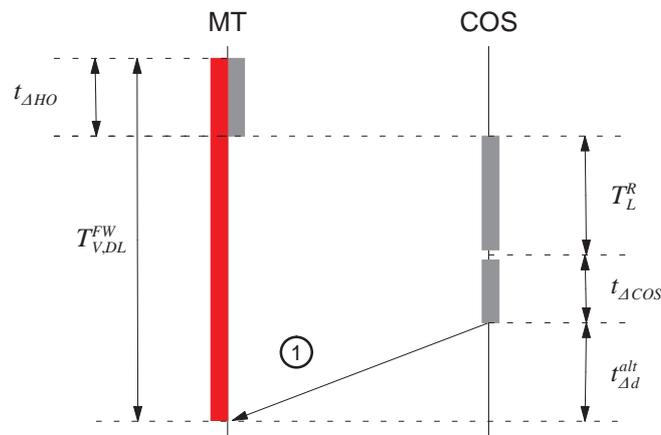


Abb. 4.8: Beiträge zum Zellverlust im Downlink beim Forward Handover

Beim Forward Handover wirkt die Handoverlatenz und somit das Verfahren zur Verbindungsnachführung bestimmend für den Zellverlust des Downlinks. Für die Verletzbarkeitsperiode gilt

$$T_{V,DL}^{FW} = t_{\Delta HO} + T_L^R + t_{\Delta COS} + t_{\Delta d}^{alt} \quad (22)$$

Verbindungsnachführung mit Ankerverfahren kann beim Forward Handover die Zellverluste erheblich mindern. Zum Zeitpunkt des Handovers steht der Umschaltpunkt bereits fest und er kann über den laufenden Handover benachrichtigt werden, um für die Dauer der Verbindungsnachführung einen Puffer zu aktivieren. Im Uplink kann einerseits das Mobilterminal und andererseits die neue Basisstation diese Pufferung vornehmen. Die In-Transit-Zellen auf dem alten mobilen Segment werden vom COS erfolgreich weitergeleitet, da die Summe aus Handovvertime und Handoverlatenz in aller Regel groß gegen die Laufzeitverzögerung ist. Im Uplink entstehen beim Forward Handover also nur Zellverluste, wenn Mobilterminal und RAPneu keinen Staupuffer vorsehen. Die Verletzbarkeitsperiode ist

$$T_{V,UL}^{FW} = T_L^R + t_{\Delta COS} + t_{\Delta d}^{neu} \quad (23)$$

Der Pufferbedarf zur Neutralisierung dieser Verletzbarkeitsperioden kann wegen der unter Umständen hohen Handoverlatenz (Abb. 3.20) erheblich sein. Es ergibt sich eine für Echtzeitsdienste wahrscheinlich nicht mehr tolerierbare Schwankung der Zellverzögerungen, bedingt durch die Zeiten für das Ausspielen der Puffer. Pufferung ist allerdings für Dienste attraktiv, deren Qualitätsanforderungen die Zellverlusthäufigkeit betonen.

Der Vollständigkeit halber folgt nun noch ein Beispiel für die Ping-Pong-Handoversituation. Die Zeitverhältnisse, die zur Zellduplikation im Downlink führen, sind in Abb. 4.10 dargestellt. Damit überhaupt Duplikationen entstehen können, muß vom vorauseilenden auf das nacheilende Segment geschaltet werden. Solange die Laufzeitdifferenz klein genug ist, treten keine Zellduplikationen auf (NO TAG). In diesem Fall wird die letzte Zelle, die vom Mobilterminal über die alte Funkverbindung empfangen wurde (1) am neuen RAP verworfen (2), bevor sie vom Mobilterminal über die neue Funkverbindung empfangen werden kann. Die Bedingung dafür, daß keine Duplikate auftreten, ist

$$t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta HO} > t_{\Delta d}^{neu} \quad (24)$$

Notabene treten allerdings Zellverluste auf, wenn diese Bedingung zutrifft. Wenn sie nicht eingehalten werden kann, treten Zellduplikate auf (Abb. 4.10). In diesem Fall errechnet sich die Verletzbarkeitsperiode zu

$$T_{V,Dup}^{PP} = \max((t_{\Delta d}^{neu} - t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{alt}), 0) \quad (25)$$

Auf ähnliche Weise kann schließlich eine Bedingung für die Vertauschung der Zellreihenfolge angegeben werden:

$$T_{V,Seq}^{PP} = \max((t_{\Delta d}^{alt} - t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{neu}), 0) \quad (26)$$

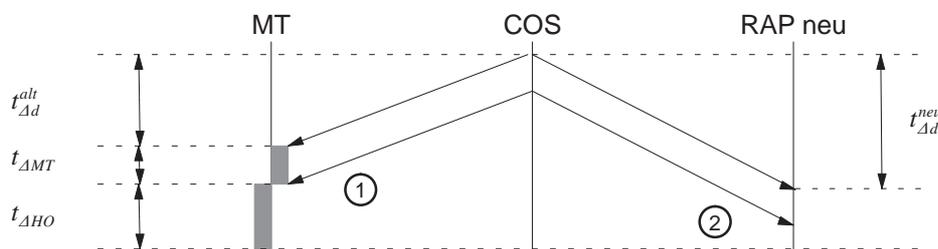


Abb. 4.9: Downlink beim Ping-Pong-Handover

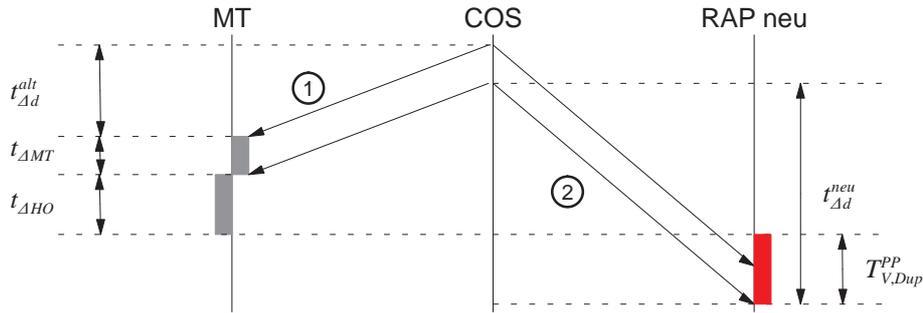


Abb. 4.10: Beispiel für Zellduplikation – Downlink beim Ping-Pong-Handover

4.2.2 Abschätzung der mittleren Zellverlusthäufigkeit

Im folgenden betrachten wir den Downlink einer mobilen Verbindung. Wir nehmen an, daß im Mittel pro Handover ein vollständiges Bandbreite-Verzögerungs-Produkt an Nutzdatenzellen verloren geht, wenn keine zusätzlichen Maßnahmen wie zum Beispiel Pufferung getroffen werden. Für die Abschätzung wird das mobile Segment wie in Abb. 4.11 modelliert.

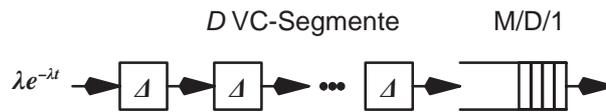


Abb. 4.11: Modell für das mobile Segment

Das mobile Segment einer Verbindung besteht aus einer topologieabhängigen Anzahl D von VC-Segmenten. Diese führen eine Übertragungsverzögerung in den Nutzdatenpfad ein, die sich über die Segmente aufaddiert. Die Luftschnittstelle schließlich wird als M/D/1-Warteschlange modelliert. Auf dieses Modell des mobilen Segments geben wir eine Poisson-Datenquelle.

Für die mittlere Zellfehlerhäufigkeit p_c bezogen auf die gesamte Verbindungsdauer gilt mit der mittleren Handoverrate \bar{R}_H , der mittleren Anzahl \bar{c}_H verlorener Zellen je Handover und der mittleren Zellenrate der Nutzdatenverbindung $\lambda = \bar{R}_c$ allgemein

$$p_c = \frac{\bar{R}_H \cdot \bar{c}_H}{\bar{R}_c} \tag{27}$$

Unter der Annahme, daß im Mittel maximal ein vollständiges Bandbreite-Verzögerungs-Produkt je Handover verloren wird, gilt unter Verwendung der Pollaczek-Khinchin-Formel für den M/D/1-Warteraum

$$c_H^{\max} = D \cdot t_{\Delta d} \cdot \bar{R}_c + \frac{\rho}{1-\rho} (1 + c^2) \tag{28}$$

und damit ($c=0$ für M/D/1-Systeme)

$$p_c^{\max} = \frac{\bar{v}}{d} \left(t_{\Delta d} \cdot D + \frac{1}{R_c} \frac{\rho}{1-\rho} \right) \quad (29)$$

Nachfolgend präsentieren Abb. 4.12, Abb. 4.13 und Abb. 4.14 eine numerische Studie für die Abschätzung der Zellverlusthäufigkeit bei nicht verlustfreiem Handover. Für die Diagramme gelten die Werte aus Tabelle 4.1 als konstant, sofern sie nicht Variablen des jeweiligen Diagramms sind. Wichtigstes Ergebnis ist, daß ein nicht verlustfreies Handoververfahren eine hohe, auf die gesamte Verbindungsdauer berechnete mittlere Zellverlusthäufigkeit einführt. Die Werte sind dabei nur für den Downlink berechnet worden, können mit dem Modell von Abb. 4.11 aber entsprechend auch auf den Uplink transferiert werden.

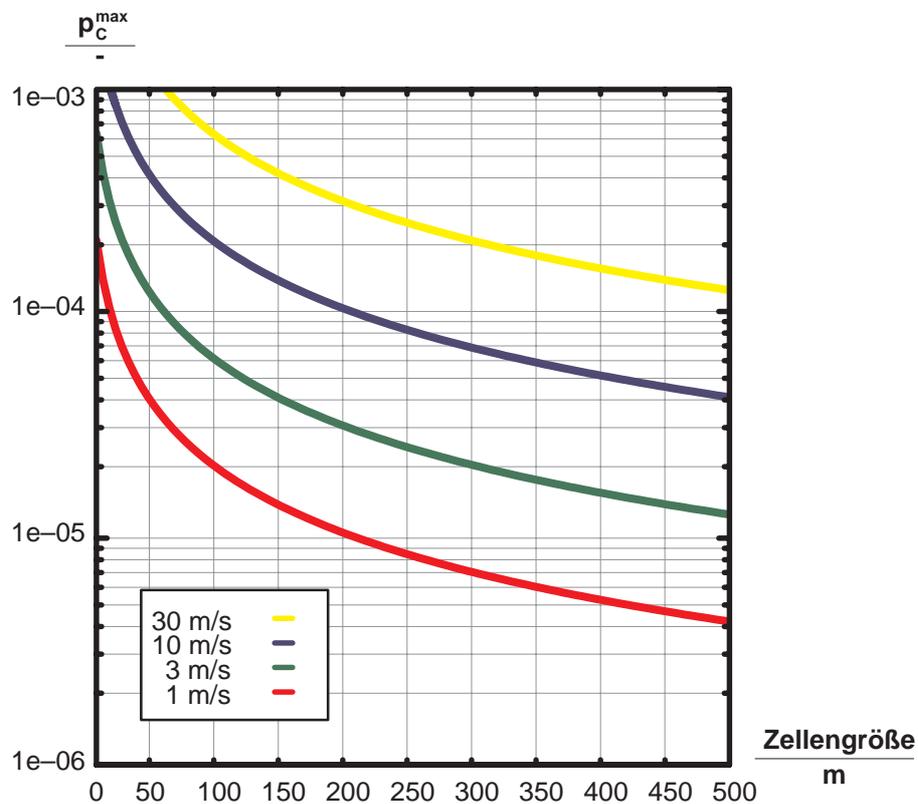
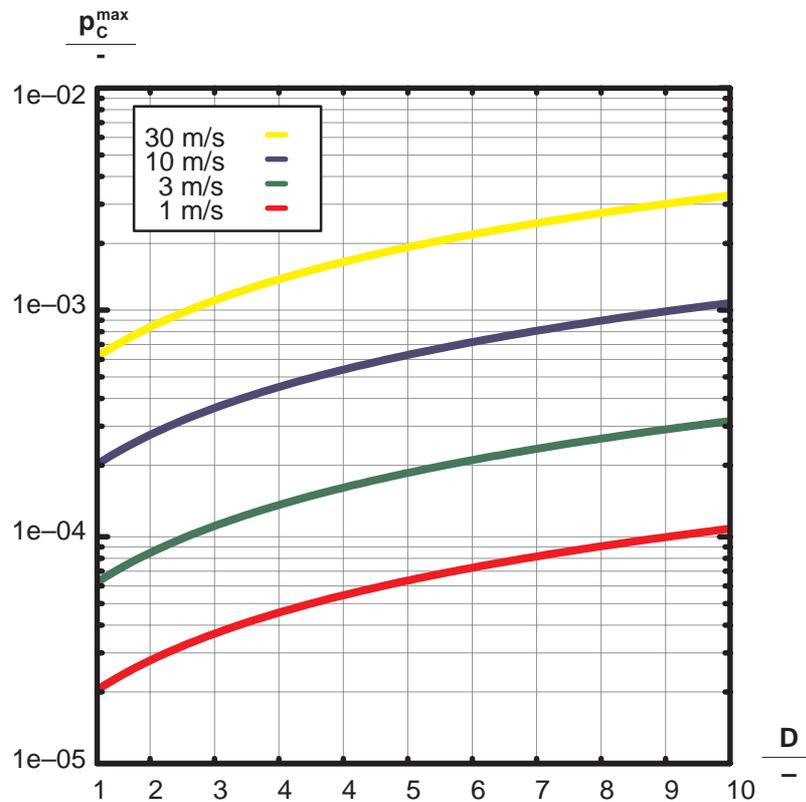


Abb. 4.12: Mittlere Zellverlusthäufigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Zellengröße

Tabelle 4.1: Parameter für numerisches Beispiel zur Zellverlustabschätzung

Parameter	Typ. Wert	Erläuterung
\bar{R}_C	3 Mbit/s	Datenrate
\bar{v}	3 m/s	Mittlere Geschwindigkeit
\bar{d}	50 m	Mittlere Zellengröße
D	3	Anzahl VC-Segmente je mobilem Segment
ρ	0.9	Lastfaktor des M/D/1-Warteraumes
t_{Ad}	0.5 ms	Mittlere Laufzeitverzögerung je VC-Segment

**Abb. 4.13:** Mittlere Zellverlusthäufigkeit in Abhängigkeit von der Länge des mobilen Segments und der Geschwindigkeit

Die Zellverlusthäufigkeiten liegen um mindestens zwei Größenordnungen höher als die für ATM-Festnetze festgelegten Qualitätsziele [182]. Berücksichtigt man, daß die handoverinduzierten Zellverluste nicht gleichmäßig verteilt über die gesamte Lebensdauer der Verbindung auftreten, sondern in Fehlerbündeln zum Zeitpunkt des Handovers, verschlechtert sich das Bild noch weiter. Während der Handoverphasen wird der Nutzzellentransport für kurze Zeit unmöglich und die Dienstgüte einer Verbindung empfindlich beeinträchtigt. Zusätzliche

Maßnahmen wie Pufferung können in einzelnen Situationen die Zellverluste für den Uplink oder den Downlink verringern oder verhindern. Neben den Zellverlusten bleiben aber noch die Probleme der Zellreihenfolge und der Zellduplikation. Weitere Maßnahmen sind also notwendig, wenn die Qualitätsanforderungen des Dienstinutzers eine geringe Zellverlusthäufigkeit sowie Garantien hinsichtlich der Zellreihenfolge und der Zellduplikationen fordern. Die Notwendigkeit eines verlustfreien Handovers wurde demzufolge in der jüngeren Literatur betont [130][142][153][166].

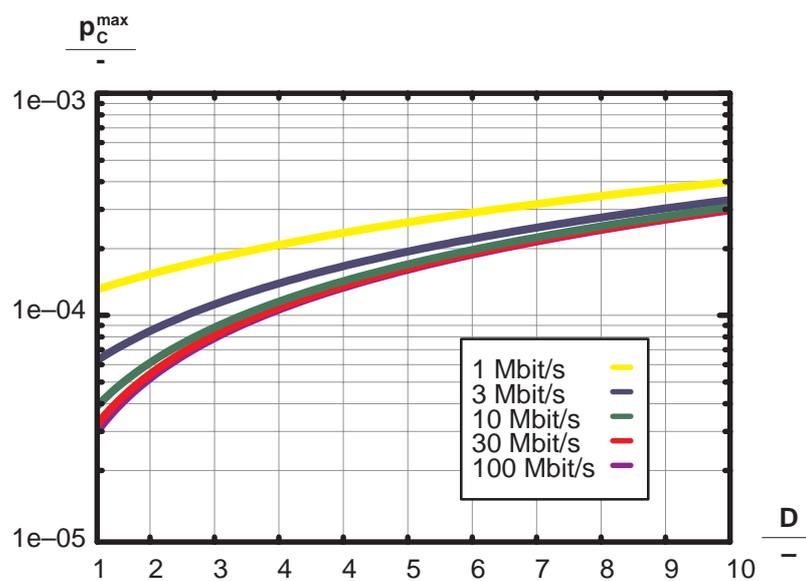


Abb. 4.14: Mittlere Zellverlusthäufigkeit in Abhängigkeit von der Länge des mobilen Segments und der Datenrate

4.3 Verlustfreier Handover

Wie gezeigt, treten beim Umschalten des mobilen Segments Fehler (Zellverluste, Zellduplikationen, Vertauschungen der Zellreihenfolge) auf. Um diese Fehler zu vermeiden, sind Schutzfunktionen notwendig. Handoververfahren, die solche Maßnahmen implementieren, werden im folgenden als verlustfreie Handoververfahren bezeichnet. Sie sind dahingehend verlustfrei, daß sie die Fehler verhindern, die beim Umschalten entstehen können. Damit sind sie aber keineswegs störungsfrei. Durch das Umschalten ändert sich in jedem Fall die Signallaufzeit der ATM-Zellen. Sie ist durch die physikalische Struktur des Netzes gegeben und kann nicht kompensiert werden. Darüber hinaus sind für verlustfreien Handover einige Maßnahmen notwendig, welche die Echtzeiteigenschaften des Nutzdatensignals beeinträchtigen. Dazu gehören der Stau der ATM-Zellen während des Umschaltens und eventuell die Wiederübertragung verlorener Zellen oder das Ausspielen eines Puffers nach dem Umschalten der

Verbindung. Insofern kann ein Handoververfahren zwar verlustfrei sein, Störungsfreiheit wird dagegen nie erzielt werden können. Die Aspekte der Störung können auf Zellenebene oder auf Verbindungsebene betrachtet werden [197]. Während sich die Verbindungsebene mit Aspekten der Rufannahme und des Verkehrs-/QOS-Managements beschäftigt, werden auf Zellenebene die bereits angesprochenen Fehlersituationen behandelt. Die im folgenden diskutierten verlustfreien Handoververfahren gehören ausnahmslos zur Kategorie der Zellenebene.

4.3.1 In-Slot Signalisierung

Für die nachfolgend diskutierten verlustfreien Handoververfahren werden In-Slot Signalisierungsmethoden angewendet. Diese Art der Signalisierung durch Multiplexen von Steuerungsinformationen in den Nutzdatenstrom ist aus dem OAM-Fehlermanagement der ATM-Festnetze bekannt. Das Grundprinzip und die dort definierten Funktionen werden hier kurz zusammengefasst. Ansonsten sei auf die Standards und die umfangreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen [31][51][115][143][152][182].

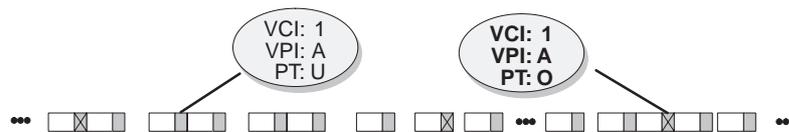


Abb. 4.15: Grundprinzip der OAM-Signalisierung

Neben den Feldern zur Identifikation einer Verbindung (VPC, VCI) sind weitere Felder im Kopf einer ATM-Zelle vorgesehen, welche die weitere Differenzierung ermöglichen. Über den Payload Type PT können insbesondere Nutzdaten (Typ U in Abb. 4.15) und In-Slot Signalisierungszellen (Typ O in Abb. 4.15) unterschieden werden. Durch die so markierten Signalisierungszellen werden sowohl auf der VP- als auch der VC-Ebene der ATM-Vermittlungsschicht OAM-Flüsse definiert (Abb. 4.16). Der OAM-Fluß auf VP-Ebene wird mit F4, auf VC-Ebene mit F5 bezeichnet. Diese Flüsse können segmentweise oder Ende-zu-Ende etabliert sein. Ein OAM-Fluß kann Ende-zu-Ende nur an den Endpunkten (Endpoint) der jeweiligen Ebene ausgelesen werden, während der segmentweise OAM-Fluß nur zwischen Verbindungspunkten (Connecting Point) etabliert werden kann. Entsprechend werden die OAM-Zellen eines Ende-zu-Ende F5-Flusses stets am Endpunkt der VC-Verbindung empfangen [143][182].

Hauptanwendungsgebiete der ATM-OAM-Signalisierung sind Fehlermanagement und Tests der Verbindung auf Konnektivität oder Verzögerung (Abb. 4.17). Wird ein Fehler erkannt, so kann dieser Fehler mit OAM-Signalisierung (Alarm Indication Signal AIS, Remote Defect

Indication RDI) den Endpunkten einer Verbindung mitgeteilt werden. Genauso können segmentweise Meßschleifen etabliert werden, die Auskunft über die Eigenschaften des jeweiligen Übertragungsabschnittes liefern (Loopback Test).

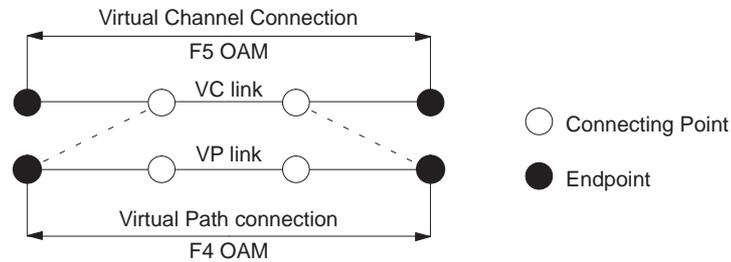


Abb. 4.16: ATM-Schicht und OAM-Flüsse auf der VP- und VC-Ebene

Die Funktionen des OAM werden in Kategorien eingeteilt, die mit 4 Bit im Kopf einer ATM-Zelle (OAM Type) codiert sind. Bisher existieren drei Kategorien [143]:

- Fehlermanagement
- Performance Management
- Aktivierung/Deaktivierung

In jeder dieser Kategorien kann wiederum ein Satz von Funktionen oder Signalen definiert werden. Auch diese wiederum werden mit 4 Bit im Kopf der entsprechenden ATM-Zelle codiert (Function Type). Diese Definitionen lassen Raum für die fortschreitende Entwicklung und Standardisierung, insbesondere für die Definition zukünftiger OAM-Funktionen.

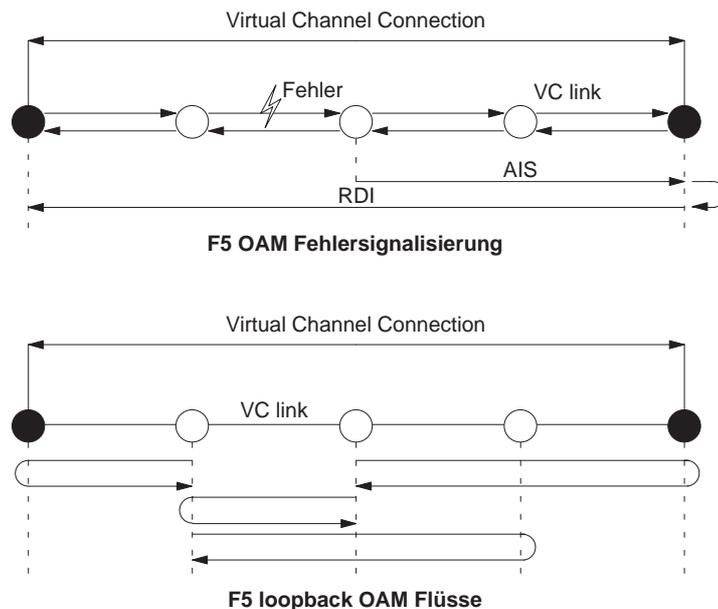


Abb. 4.17: OAM Flüsse für Fehlerlokalisierung und Loopback Test

Gerade wegen ihrer laufenden Weiterentwicklung wird empfohlen, OAM-Funktionen in Software zu implementieren. Entsprechend großzügig sind die Anforderungen an die Performance gestellt. Die maximale Verzögerung, innerhalb der auf ein OAM-Signal reagiert werden muß, ist auf eine Sekunde festgelegt [143].

4.3.2 Verlustfreier Handover mit VC-Flushing

Wie die obige Analyse der Umschaltersituation (Kapitel 4.2.2) gezeigt hat, können In-Transit-Zellen, die wegen fehlender Synchronisationsmechanismen verloren gehen, zu einer erheblichen mittleren Zellverlusthäufigkeit führen. Um diese Beeinträchtigung der Dienstgüte zu reduzieren, wurden in der Literatur bereits erste Verfahren für verlustfreien Handover vorgeschlagen [142][153][154]. Diese Verfahren basieren auf In-Slot-Signalisierung nach dem OAM-Prinzip des ATM. Durch eine abschließende speziell markierte Zelle kann sowohl im Downlink als auch im Uplink das Ende der Übertragung auf einem mobilen Segment signalisiert werden (Abb. 4.18). Der Umschaltspunkt COS beziehungsweise das Mobilterminal MT warten mit dem Umschalten des mobilen Segments jeweils solange, bis sie die markierte Zelle erhalten haben. Damit ist gesichert, daß alle Nutzdatenzellen empfangen wurden und die Umschaltung vom alten auf das neue mobile Segment kann ohne die Gefahr von Zellverlusten, Zellduplikationen oder Vertauschungen der Zellreihenfolge erfolgen. Da die Verbindung als eine Art Puffer betrachtet werden kann, der vor dem Umschalten geleert werden muß, wird diese Methode auch als VC-Flushing bezeichnet [130].

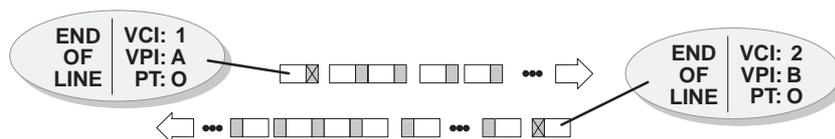


Abb. 4.18: OAM-Signalisierung für VC-Flushing

In Abb. 4.19 ist diese Art des verlustfreien Handover etwas detaillierter dargestellt. Das Mobilterminal initiiert einen Backward Handover und versucht, die alte Verbindung solange wie möglich beizubehalten. Nach Abschluß der Verbindungsnachführung erhält das Mobilterminal die Freigabe für den Handover, sendet eine markierte OAM-Zelle (End-of-Line) im Uplink und aktiviert einen Staupuffer. Der Umschaltspunkt COS hat nach einer kurzen Bearbeitungsverzögerung ebenfalls eine solche markierte Zelle als letzte Zelle des Downlinks auf dem alten Segment geschickt. Dieses Signal wartet das Mobilterminal nun ab, bevor es die alte Funkverbindung auslöst. Nach Erhalt des End-of-Line-Signals im Uplink schaltet der COS auf das neue mobile Segment um.

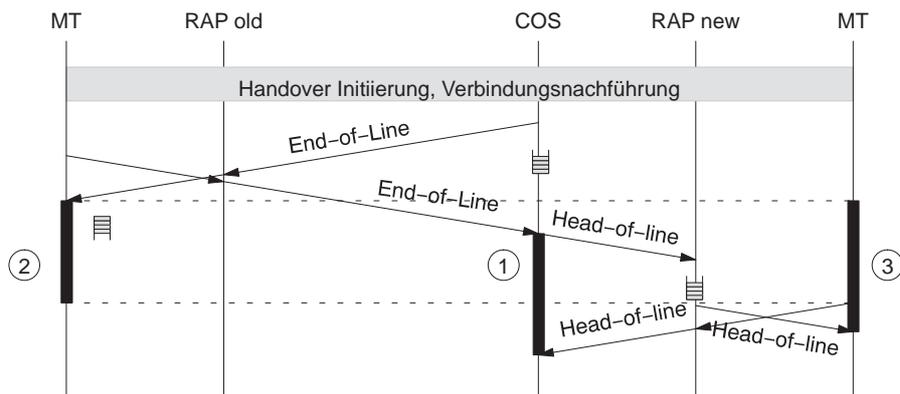


Abb. 4.19: Verlustfreier Handover mit VC-Flushing

Gleichzeitig mit der Aktivierung des neuen Segments beginnt der COS in Downlink-Richtung, ATM-Zellen weiterzuleiten. Dazu gehören zunächst die bis dahin gestauten, vom festen Segment kommenden Nutzdatenzellen. Optional kann den Nutzdatenzellen dabei eine markierte Zelle (Head-of-Line) vorausgehen. Sobald die neue Funkverbindung aktiviert ist, nimmt das Mobilterminal die Übertragung auf dem neuen Uplink wieder auf und erhält im Downlink die zwischenzeitlich eventuell in RAPneu gestauten Nutzdatenzellen.

Es entstehen Unterbrechungen im Downlink und im Uplink, verursacht durch die Laufzeitdifferenz der Pfade und die Handovvertime. Das Mobilterminal kann die End-of-Line-Zelle in Uplink-Richtung zwar zu einem beliebigen Zeitpunkt nach der Handoverfreigabe senden. Am sinnvollsten ist es, dieses Signal erst nach Erhalt der entsprechenden markierten Zelle im Downlink zu senden [142][153]. So kann die Unterbrechung im Uplink (1) auf ein rein von der Summe aus Handovvertime (2) und Laufzeitdifferenz bestimmtes Minimum reduziert werden.

Die minimale Unterbrechung des Nutzdatenstroms (3) im Downlink ist die Handovvertime. Sie kann sich um die Laufzeitdifferenz verlängern, wenn die Laufzeit auf dem neuen Pfad länger ist als die Summe aus Laufzeit des alten Pfades und Handovvertime. Ist die Laufzeit auf dem neuen Pfad kleiner, wird stattdessen der Staupuffer in RAPneu gefüllt.

Um die Staupuffer des Mobilterminals und der neuen Basisstation zu leeren, muß zum Abschluß des Handovers mit einer erhöhten Datenrate gesendet werden. Durch dieses Auslesen der Puffer wird also kurzfristig auch die Charakteristik des Zellenstroms verändert. Entsprechende Verkehrsformungsfunktionen sind notwendig, um die Einhaltung der beim Verbindungsaufbau ausgehandelten Qualität zu garantieren. Diese Verkehrsformungsfunktionen können im COS, sehr sinnvoll aber auch im teilnehmerseitigen MAS oder sogar im RAP angesiedelt sein. Sie werden hier nicht näher betrachtet.

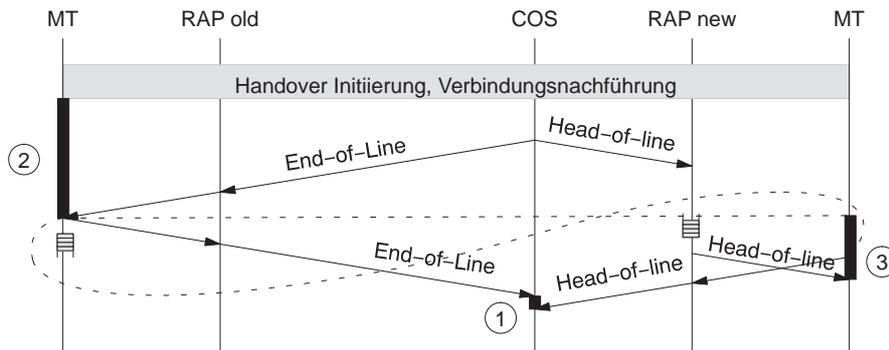


Abb. 4.20: Optimierung des VC-Flushing durch getrenntes Umschalten von Uplink und Downlink

Beide Verfahren für verlustfreien Handover [142][153] verwenden eine optimierte Version des VC-Flushing, bei der Uplink und Downlink der Verbindung getrennt umgeschaltet werden. Voraussetzung dafür ist natürlich, daß die Architektur des ATM-Knotens das getrennte Umschalten der beiden Richtungen eines VC erlaubt. Der COS kann dann bereits das Downlink-Segment umschalten, wenn er sein End-of-Line-Signal gesendet hat (Abb. 4.20). Das hat den Vorteil, daß die Unterbrechungen der Nutzdatenübertragung in Uplink (1) und Downlink (3) auf ein Minimum reduziert werden. Allerdings entsteht auch eine größere VC-Flushing-Verzögerung (2).

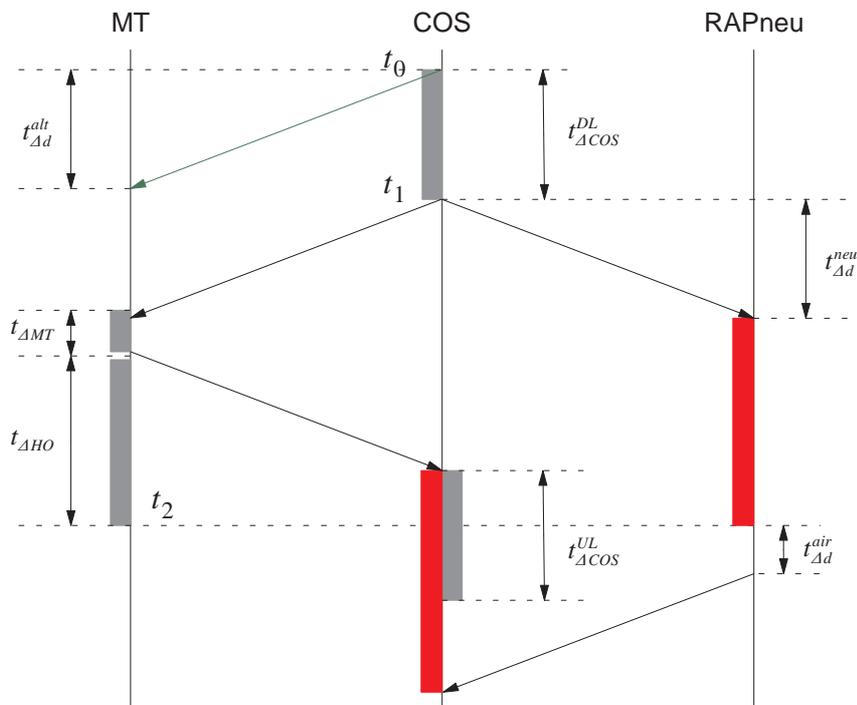


Abb. 4.21: Zeitverhältnisse beim VC-Flushing

Die detaillierten Zeitverhältnisse zeigt Abb. 4.21. Zum Zeitpunkt t_0 sendet der COS seine Handoverfreigabe und startet den Umschaltvorgang. Zum Ende des Umschaltvorgangs sendet der COS auf dem alten Downlink sein VC-Flushing-Signal. Sobald dies beim Mobilterminal eintrifft, sendet es nach einer kurzen Handoververzögerung ebenfalls sein VC-Flushing-Signal und startet den physikalischen Handover. Dieser Handover ist zum Zeitpunkt t_2 beendet:

$$t_2 = t_0 + t_{\Delta COS}^{DL} + t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} \quad (30)$$

Durch das VC-Flushing entsteht im Uplink eine Unterbrechung

$$T_{U,UL}^{FL} = t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta d}^{air} + t_{\Delta d}^{neu} \quad (31)$$

Die Unterbrechung im Downlink entspricht der Handovertotzeit.

4.3.3 Einschränkungen des VC-Flushing

Die Methode VC-Flushing kann mit jedem Verfahren zur Verbindungsnachführung kombiniert werden. Hinsichtlich Proaktivität oder Reaktivität bestehen keine Einschränkungen, da der Flushing-Handshake stets erst dann ausgeführt wird, wenn der COS und das neue mobile Segment feststehen. Allerdings führt das zu einer Verlängerung des gesamten Handovervorganges. Zwischen Handoverfreigabe und der vom physikalischen Handover der Luftschnittstelle bestimmten Handovertotzeit wird die VC-Flushing-Verzögerung eingeführt.

Der gemeinsame gravierende Nachteil der Verfahren nach der Methode VC-Flushing ist, daß sie ausschließlich bzw. hauptsächlich für den Backward Handover entworfen wurden. Die markierten OAM-Zellen (End-of-Line) können frühestens zu Beginn der Handovertransaktion in den Nutzdatenstrom eingefügt werden. Dann allerdings entsteht ein hoher Pufferfüllstand im Mobilterminal. Sinnvoll ist, die VC-Flushing-Signale erst nach Abschluß der Verbindungsnachführung zu senden, um eine minimale Unterbrechung und möglichst geringe Pufferfüllstände zu gewährleisten. Dazu ist es notwendig, den Handover rechtzeitig erkennen, vorbereiten und abwickeln zu können. Das ist nur beim Backward Handover möglich.

Im Fall eines Forward Handover besteht keine Möglichkeit, die Handoversituation entweder rechtzeitig zu erkennen oder den Handover rechtzeitig zu initiieren. Die Funkverbindung wird abrupt unterbrochen und eventuelle In-Transit-Zellen gehen in jedem Fall verloren. Auch die Handoverlatenz der Verbindungsnachführung führt zu Zellverlusten. Um die Fehler beim Forward Handover zu reduzieren, sind drei Varianten denkbar:

- Der Einsatz eines proaktiven Verfahrens zur Verbindungsnachführung in Kombination mit vollständiger Ressourcenreservierung und Multicasting der Nutzdatenzellen zu den Handoverkandidaten erlaubt einen verlustbegrenzten Handover. Abhängig von der

Laufzeitdifferenz entstehen Zellverluste oder Zellduplikationen im Downlink. Im Uplink können Vertauschungen in der Zellreihenfolge entstehen (siehe Ping-Pong-Handover in Kapitel 4.1). Insgesamt sind die Fehler dabei allerdings deutlich geringer als beim Forward Handover mit reaktiver Verbindungsnachführung, da kein Reroutingbeitrag zur Handoverlatenz entsteht.

- Beim Einsatz eines Reroutingverfahrens mit permanentem Anker ist der Umschalt- punkt COS stets bereits zum Zeitpunkt der Handoveranforderung bekannt. In diesem Fall kann die alte Basisstation RAPalt ein Signal über die abgebrochene Funkverbin- dung an den COS senden, um die Zellverluste im Downlink zu begrenzen. Allerdings geht auch in diesem Fall mindestens ein doppeltes Bandbreite-Verzögerungs-Produkt an ATM-Zellen im Downlink verloren.
- Die Basisstation RAPalt wird in das VC-Flushing mit einbezogen [153]. Nutzdatenzel- len in Downlink-Richtung werden dort gepuffert und nach Abschluß der Verbindungs- nachführung an die neue Basisstation weitergeleitet. Im Uplink generiert die alte Basis- station nach Abbruch der Funkverbindung eine End-of-Line-Zelle, so daß auch im COS gesichert umgeschaltet werden kann.

Man erkennt, daß nur mit einem der bisher bekannten Verfahren ein verlustfreier Forward Handover zu realisieren ist [153]. Alle anderen Verfahren schlagen fehl, solange ATM-Zellen keine Sendefolgeinformation tragen. Ein rein akademischer Ansatz wäre, das ATM-Zellfor- mat um eine Sendefolgenummer zu erweitern. Die Änderung des ATM-Zellformats für den Einsatz in drahtloser Umgebung ist jedoch eine praktisch nur schwer realisierbare und damit keine akzeptable Lösung, da sie wiederum einen speziellen Netzübergang zum ATM-Festnetz notwendig macht und den Einsatz von Standard-ATM-Vermittlungstechnik in WATM-Netzen verhindert [5]. Somit bleibt bei VC-Flushing im Fall eines Forward Handover nur die Option, nach Abschluß der Verbindungsnachführung eine Weiterleitungsphase einzuführen, während der die In-Transit-Zellen von der alten an die neue Basisstation gesendet werden. Auch in die- sem Fall entsteht eine zusätzliche VC-Flushing-Verzögerung, welche die Handoverdauer ver- größert. Es erfordert darüber hinaus aufwendigere Basisstationen, die in der Lage sind, die OAM-Signale des Handoverprotokolls zu bearbeiten, Nutzdatenzellen zu puffern und VC- Direktverbindungen zu benachbarten Basisstationen für deren Weiterleitung zu unterhalten. Die exakte Wegführung dieser VC-Direktverbindungen beeinflußt die Dauer der Weiterlei- tungsphase in hohem Maße. Das Verfahren nach [153] wurde für ein lokales System mit nur einem teilnehmerseitigen mobilitätsunterstützenden ATM-Vermittlungsknoten entworfen. Eine Analyse über dessen Skalierbarkeit auf große Netze wurde bisher nicht veröffentlicht. Für kleine lokale Netze können permanente Direktwege zwischen benachbarten Basisstatio- nen leicht eingerichtet werden. Für große Netze mit vielen hundert Basisstationen innerhalb einer Ankerdomäne stellt das jedoch einen erheblichen Verwaltungsaufwand dar. Hinsichtlich

des Netzmanagements ist diese Art des verlustfreien Handover also eine schlecht skalierende Lösung. Das Hauptanwendungsgebiet für ihr Verfahren sehen die Autoren in einem verlustfreien Handover für ABR-Dienste.

4.3.4 Robustheitsaspekte des VC-Flushing

Neben der Eignung für ein bestimmtes Handoververfahren gibt es weitere Aspekte, die bei der Beurteilung eines verlustfreien Handoververfahrens von Bedeutung sind. Am wichtigsten ist die Robustheit des Verfahrens gegenüber schwierigen Funkbedingungen. Wie das WATM-Szenario aus Kapitel 2.2.3 zeigt, kann die Empfangsfeldstärke innerhalb einer Distanz von wenigen Metern dramatisch sinken. Die Signalreserve für den Handover kann in solchen Fällen innerhalb weniger Millisekunden unterschritten werden. Ein Handoververfahren, das auf der VC-Flushing-Methode basiert, muß für diesen Fall besondere Maßnahmen ergreifen.

Durch das VC-Flushing im Anschluß an die Verbindungsnachführung wird die Handoverdauer verlängert. Das kann insbesondere dann problematisch sein, wenn durch Abschattungen das Signal rasch schwächer wird [5][154]. Das Handoverfenster kann so klein werden, daß der Handover durchgeführt werden muß, bevor die VC-Flushing-Transaktion beendet werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn reaktiv-dynamische Verfahren der Verbindungsnachführung mit entsprechend hohem Beitrag zur Handoverlatenz eingesetzt werden.

Das Verfahren nach [142] schlägt in diesem Fall fehl und muß dagegen mit Timern abgesichert werden. Das Mobilterminal muß am Ende des Handoverfensters einen erzwungenen Handover durchführen, unabhängig davon, ob es das End-of-Line-Signal des COS erhalten hat. Der Verlust der entsprechenden In-Transit-Zellen im Downlink kann dann nicht mehr vermieden werden. Der COS besitzt keine Informationen über die Funkverhältnisse und wartet auf ein End-of-Line-Signal des Mobilterminals, um die Verbindung umschalten zu können. Um ein Scheitern des Handovers in dieser Situation zu verhindern, muß das Umschalten des mobilen Segments im COS also timergesteuert erfolgen. Nach Ablauf des Timers oder bei Erhalt des End-of-Line-Signals wird der COS die Verbindung umschalten. Dabei kann wiederum nicht garantiert werden, daß alle Nutzdatenzellen des Uplinks bereits erhalten wurden.

Das Verfahren nach [153] besitzt andererseits eine inhärente Absicherung gegen diese Situation des erzwungenen Handovers und reagiert robust. Die Bearbeitung der VC-Flushing-Signale erfolgt in der alten Basisstation RPA_{alt}. Wenn das Mobilterminal gezwungen ist, seine Funkverbindung zu beenden, wird das der Basisstation gemeldet. Weitere Downlink-Zellen werden dann nicht mehr gesendet, sondern in einem Puffer aufgefangen und an die neue Basisstation weitergeleitet. Im Uplink wird ein End-of-Line-Signal nach der letzten Nutzdatenzelle eingefügt, so daß auch der Umschaltpunkt COS in der Lage ist, kontrolliert ohne Zellverluste umzuschalten.

4.4 Ein neues Verfahren für verlustfreien Handover

Im folgenden wird ein Verfahren für den verlustfreien Handover vorgeschlagen, das für harte Backward und Forward Handover geeignet ist. Darüber hinaus kann es verwendet werden, um in zukünftigen Systemen mit der entsprechenden Luftschnittstelle den alten und den neuen Pfad zu synchronisieren und so einen Soft Handover zu ermöglichen [5][10][15]. In Verbindung mit echter dual-/multicastbasierter Verbindungsnachführung können auch verlustbegrenzte Echtzeit-Handover realisiert werden.

4.4.1 Grundprinzip des Tag Insertion Hitless Handover TIHH

Im Gegensatz zur VC-Flushing-Methode, bei der ein In-Slot-Signalisierungs-Handshake den Handover abschließt, basiert das im folgenden näher erläuterte Verfahren auf periodisch in den Nutzdatenstrom gemultiplexten Synchroninformationen [5][10]. Diese OAM-Signale besitzen im Nutzdatenteil der jeweiligen Zelle eine eindeutige Kennzeichnung und erlauben so die Sendefolgenumerierung einzelner Zellenstromsegmente der Verbindung.

Das Prinzip ist in Abb. 4.22 dargestellt. Durch die In-Slot-Signalisierungszellen eines F5-Flusses wird der Zellenstrom des Nutzdatensignals in Segmente unterteilt. Die OAM-Signale enthalten Sendefolgeinformationen, sogenannte Tags. Diese Tags können eindeutig identifiziert werden und sind damit Synchronisationspunkte im Zellenstrom. Ihre Position im Zellenstrom bleibt wegen der Garantie der Zellreihenfolge bis zum Auslesen erhalten.

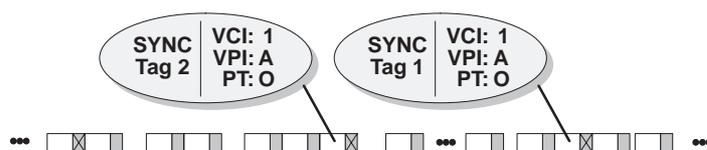


Abb. 4.22: Periodische Synchron-Tags im F5-OAM-Zellenstrom

Mit diesen Synchron-Tags wird im folgenden ein Handoververfahren definiert, das eine kontrollierte Übergabe der Nutzdatenverbindung von einer Basisstation zur nächsten sowie eine Resynchronisierung der Zellenströme an der neuen Basisstation und damit einen Handover ohne Zellverluste ermöglicht. Wegen des periodischen Einfügens von Synchronisationstags wird dieses Verfahren Tag Insertion Hitless Handover TIHH genannt (Abb. 4.23). In seiner Grundstruktur geht es von einer ankerbasierten Verbindungsnachführung aus. Wir werden im folgenden jedoch auch die Möglichkeiten diskutieren, die bei anderen Methoden der Verbindungsnachführung bestehen.

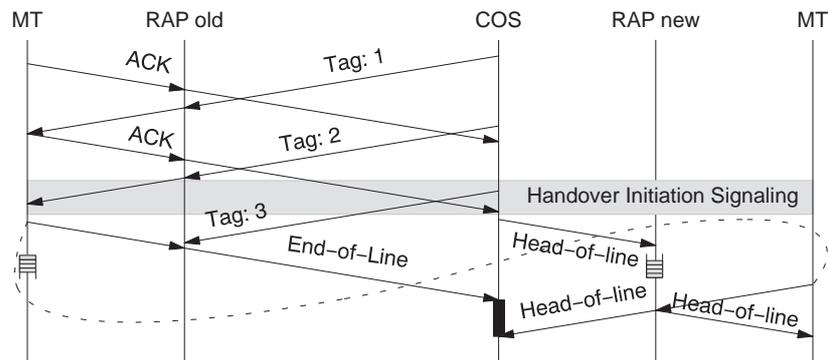


Abb. 4.23: Prinzip des Tag Insertion Hitless Handover

Der Anker einer Verbindung fügt bei TIHH periodisch Synchronisationstags in den Downlink-Nutzdatenstrom ein. Diese Tags enthalten Sendefolgennummern und kennzeichnen damit eindeutig das jeweilige Segment des Zellenstroms. Die Synchronisationssignale werden im Mobilterminal ausgelesen und als Bestätigungssignale in den Uplink-Datenstrom eingeschleift. Sie dienen am Umschaltzeitpunkt COS jeweils als Bestätigung für den vollständigen Empfang des vorangegangenen Zellenstromsegments im Mobilterminal. Jeweils noch nicht bestätigte Zellenstromsegmente werden als Kopie in einem Puffer des COS gehalten und bei Eintreffen des zugehörigen Tags aus diesem Speicher entfernt.

Im Fall eines Handovers kann der COS sofort, nachdem das neue mobile Segment etabliert wurde, Zellen aus dem Puffer an die neue Basisstation weiterleiten (Buffer Retransmission, Tag Insertion Hitless Handover with Buffer Retransmission). Darin sind auch die bereits gesendeten Synchronisationstags enthalten. Gleichzeitig sendet der COS die Handoverfreigabe an das Mobilterminal und vor der Umschaltung auf den neuen Downlink-Pfad auch seine letzte Zelle in der alten Downlink-Richtung. Das MT beendet seine Uplink-Übertragung auf dem alten mobilen Segment der Verbindung mit einem End-of-Line-Signal. Nach der Handoverzeit ist das Mobilterminal bereit, über den neuen Funkkanal zu kommunizieren und beginnt die Übertragung im Uplink mit dem zuletzt erhaltenen Synchronisationstag. Dieses In-Slot-Signal enthält außerdem den Offset im Zellenstrom, welcher die Anzahl der nach diesem Tag noch auf dem alten Downlink empfangenen Zellen angibt. Die Basisstation kann nun den Downlink neu synchronisieren und die Übertragung exakt an der Stelle fortsetzen, an der das MT den alten Funkkanal terminiert hat.

Dieses Handoververfahren wurde so entworfen, daß sowohl Backward als auch Forward Handover flexibel unterstützt werden können. Durch das periodische Einfügen von Synchronisationspunkten wird dem Mobilterminal erlaubt, zu jedem beliebigen Zeitpunkt latenzfrei den

alten Funkkanal zu terminieren und den Handover zur neuen Basisstation zu initiieren. Beide Handovervarianten werden im folgenden nach einer Diskussion des Puffermanagements detaillierter betrachtet.

4.4.2 Puffermanagement, optimaler Tagabstand und maximaler Pufferbedarf

Zentrales Element des TIHH-Verfahrens ist ein Puffer im COS, in dem Kopien aller im Downlink gesendeten Zellen inklusive der eingefügten Synchronisationstags abgelegt werden. Notabene handelt es sich dabei um keinen Staupuffer, in den die Nutzdatenzellen vom festen Segment kommend geschrieben werden. Es wird jeweils nur on-the-fly eine Kopie der Zelle hier abgelegt.

Sobald die In-Slot-Signalisierungsfunktion für eine Verbindung aktiviert wurde, wird ein erstes Synchronisationstag in den Zellenstrom eingefügt und ab dort der Puffer beschickt. Der Puffer füllt sich nun, bis zum Zeitpunkt $2 \cdot t_{\Delta d}^{alt} + \delta_T$ das zweite Synchronisationstag eintrifft, welches das erste Segment des Zellenstroms bestätigt (Abb. 4.24). Dieses Segment plus das zugehörige Tag werden aus dem Puffer entfernt, da sie als vollständig vom Mobilterminal empfangen angenommen werden können.

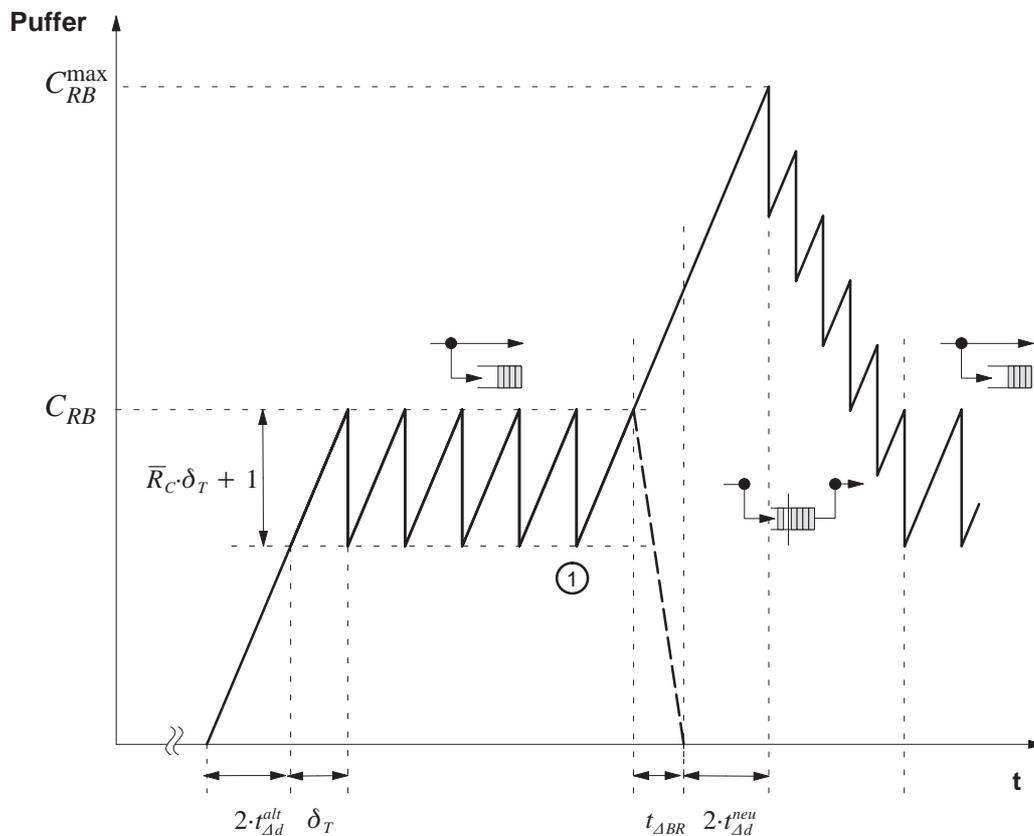


Abb. 4.24: Puffermanagement bei TIHH

Wenn die Synchronisationstags periodisch in den Nutzdatenstrom eingeführt werden, wiederholt sich dieser Vorgang nun mit der Periode δ_T , dem Tagabstand. Es wird ein Segment in den Puffer geschrieben und ein älteres bei Erhalt des entsprechenden Tags aus dem Puffer gelöscht. Im Puffer befindet sich also stets mindestens ein doppeltes Bandbreite-Verzögerungs-Produkt des Downlinks plus die entsprechende Anzahl Tags, die während dieser Zeit generiert wurden. Der höchste Pufferfüllstand in diesem eingeschwungenen Zustand errechnet sich zu

$$C_{RB} = \bar{R}_C (2 \cdot t_{\Delta d}^{alt} + \delta_T) + \frac{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}}{\delta_T} \quad (32)$$

Dies ist gleichzeitig die maximale Anzahl an Nutzdaten zellen, die beim Handover zur neuen Basisstation RAPneu weitergeleitet werden müssen. Der optimale Tagabstand ergibt sich dann aus der Extremwertgleichung

$$\frac{\partial C_{RB}}{\partial \delta_T} = \bar{R}_C - \frac{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}}{(\delta_T)^2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (33)$$

Damit gilt für den optimalen Tagabstand

$$\delta_T^{opt} = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}}{\bar{R}_C}} \quad (34)$$

Während der Wiederübertragung der Zellen des Kopierpuffers (Buffer Retransmission BR) werden die vom festen Segment der Verbindung ankommenden Nutzdaten zellen gestaut, um anschließend segmentweise mit fortlaufender Nummer auf dem neuen mobilen Segment der Verbindung übertragen zu werden. Der Puffer kann selbstverständlich nur mit einer Rate $R_{BR} > \bar{R}_C$ geleert werden. Die Zeit für die Wiederübertragung des Puffers beträgt dann

$$t_{\Delta BR} = \frac{C_{RB}}{R_{BR}} \quad (35)$$

Während dieser Phase der Wiederübertragung füllt sich der Puffer wegen des Staus des festen Segments mit der Rate \bar{R}_C weiter auf, bis im Uplink wieder Tags zu empfangen sind. In Abb. 4.24 ist dabei ein möglicher schlechter Fall dargestellt. Kurz nach dem Empfang des letzten Synchronisationstags im Uplink (1) vollzieht das Mobilterminal den physikalischen Handover – in diesem Fall mit dem Ergebnis, daß alle weitergeleiteten Zellen aus dem Kopierpuffer noch nicht beim Mobilterminal angekommen waren. Sie werden jetzt von RAPneu mit der überhöhten Rate $R_{BR} > \bar{R}_C$ an das Mobilterminal weitergeleitet und dort segmentweise bestätigt. Die zeitliche Dauer eines Zellenstromsegments reduziert sich wegen dessen von den

Synchronisationstags festgelegter Länge entsprechend. Schrittweise kann so der Staupuffer abgebaut werden, bis sich das System schließlich wieder im “normalen” eingeschwungenen Zustand befindet. Der maximale Pufferfüllstand, der sich dabei einstellt, errechnet sich zu

$$C_{RB}^{\max} = C_{RB} \left(1 + \frac{\bar{R}_C}{R_{BR}} \right) + 2 \cdot \bar{R}_C \cdot t_{\Delta d}^{neu} + \frac{2 \cdot t_{\Delta d}^{neu}}{\delta_T} \quad (36)$$

Dieses Verhalten des Pufferfüllstandes wurde auch in Simulationen des Handoverprotokolls verifiziert [159]. Dem Beispiel aus Abb. 4.24 liegt die worst-case-Situation zugrunde, daß alle unbestätigten Zellenstromsegmente auch tatsächlich nicht vom Mobilterminal erhalten wurden. Dieser Fall kann in einer Forward Handover Situation eintreten. Im Gutfall wird das Mobilterminal die neue Basisstation RAPneu veranlassen können, einen großen Teil des Kopierpufferinhalts zu verwerfen. Dies gilt insbesondere für den Backward Handover, wo das Mobilterminal im besten Fall bis zum Erhalt der Handoverfreigabe und damit bis zum Empfang der letzten Downlink-Zelle die Funkverbindung aufrecht erhalten kann.

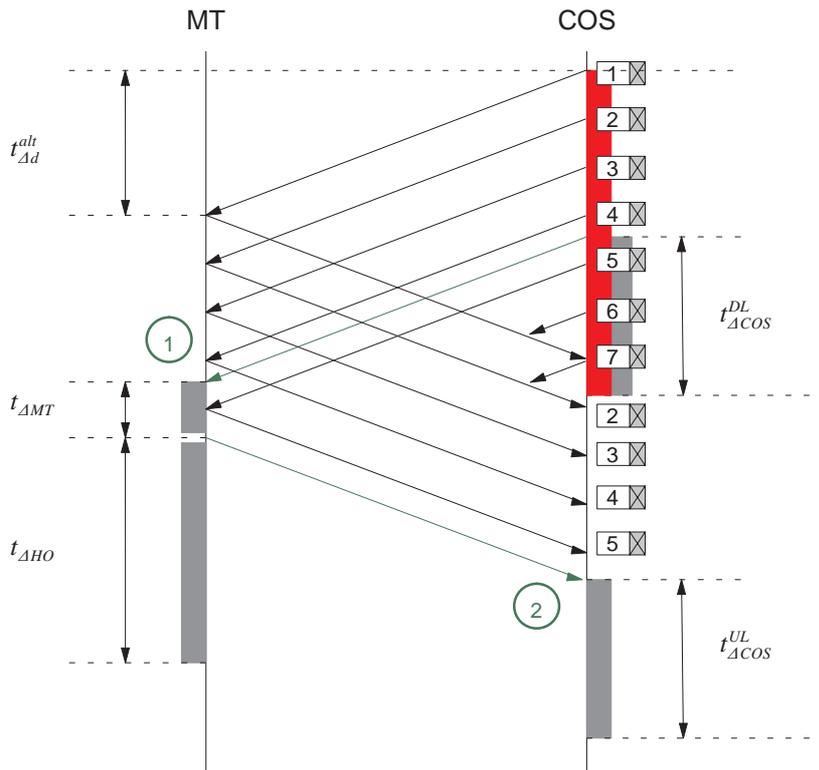


Abb. 4.25: Backward Handover mit TIHH-BR – altes mobiles Segment

4.4.3 Bestmöglicher Backward Handover mit TIHH-BR

Zunächst gehen wir davon aus, daß der Backward Handover in Kombination mit einem permanenten Anker für die Verbindungsnachführung erfolgt. Der Umschaltpunkt COS ist dann bereits zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus bekannt und es werden regelmäßig, d.h. periodisch Synchronisationstags in den Nutzdatenstrom eingefügt (Abb. 4.25).

Aufgrund der Backward Handover Situation ist das Mobilterminal in der Lage, so lange wie möglich die alte Nutzdatenverbindung aufrecht zu erhalten. Erst wenn die Handoverfreigabe erfolgt (1), wird nach der Handoververzögerung im Mobilterminal der physikalische Handover vollzogen, falls die Funkbedingungen es zulassen. Sollten unerwartete Abschattungen das Mobilterminal früher zum physikalischen Handover zwingen, wird die Handoverfreigabe nicht abgewartet. Ein erfolgreicher Backward Handover ist in diesem Fall nach wie vor möglich (siehe Kapitel 4.2.1). Das Mobilterminal meldet sich dabei an der alten Basisstation ab und sendet im Uplink ein End-of-Line-Signal (2), um dem COS das Umschalten des Uplinks zu erlauben.

Im Uplink wird die VC-Flushing-Methode eingesetzt. Als letzte Zelle sendet das Mobilterminal auf dem alten Uplink ein End-of-Line-Signal. Der COS wartet auf dieses Signal, um dann den Uplink umzuschalten. Es entsteht eine kurze Unterbrechung des Nutzdatenstroms, die aufgrund der Laufzeitdifferenz und der Handovvertime systeminhärent und damit nicht veränderbar oder durch zusätzliche Maßnahmen reduzierbar ist. Für die Unterbrechung gilt unter Berücksichtigung der Laufzeitverzögerung der Luftschnittstelle $t_{\Delta d}^{air}$

$$\mathcal{L}T_{U,UL}^{BW} = t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta d}^{air} + t_{\Delta d}^{neu} \quad (37)$$

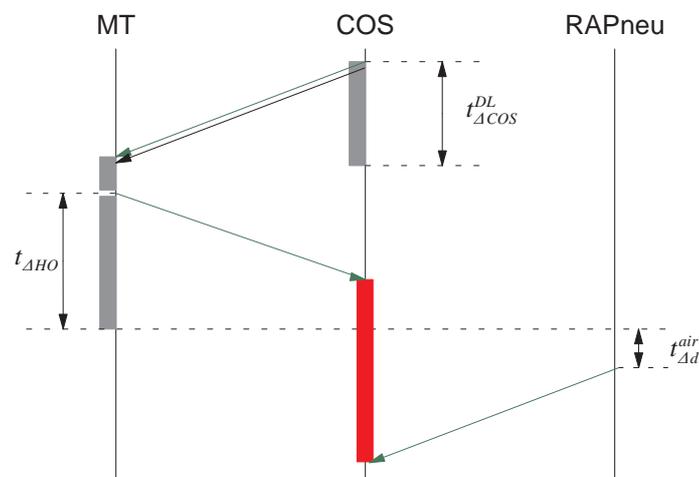


Abb. 4.26: Backward Handover mit TIHH-BR – Uplink

Für vorausseilende Pfade zur neuen Basisstation und sehr kurze Handoverzeiten kann sogar eine Situation entstehen, bei der Vertauschungen der Zellreihenfolge möglich sind:

$$t_{\Delta d}^{alt} \geq t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} + t_{\Delta d}^{neu} \quad (38)$$

In diesen Fällen müssen die Zellen des neuen Uplinks im COS gestaut werden, bis das End-of-Line-Signal vom alten Uplink eintrifft. Der Handover im Uplink kann dann vollkommen unterbrechungsfrei ablaufen.

Den Downlink hat der COS direkt mit der Handoverfreigabe umgeschaltet. Nach der Umschaltverzögerung des Downlinks $t_{\Delta COS}^{DL}$ beginnt der COS mit dem Ausspielen der Zellkopien des TIHH-Puffers. Im Beispiel von Abb. 4.25 sind alle Zellen ab dem Synchronisationstag Nummer 1 unbestätigt. Das Synchronisationstag mit der Nummer 2 trifft erst nach dem Umschalten des Downlinks ein und kann daher nicht mehr verwendet werden. Entsprechend müssen alle Zellen ab dem Tag 1 erneut übertragen werden.

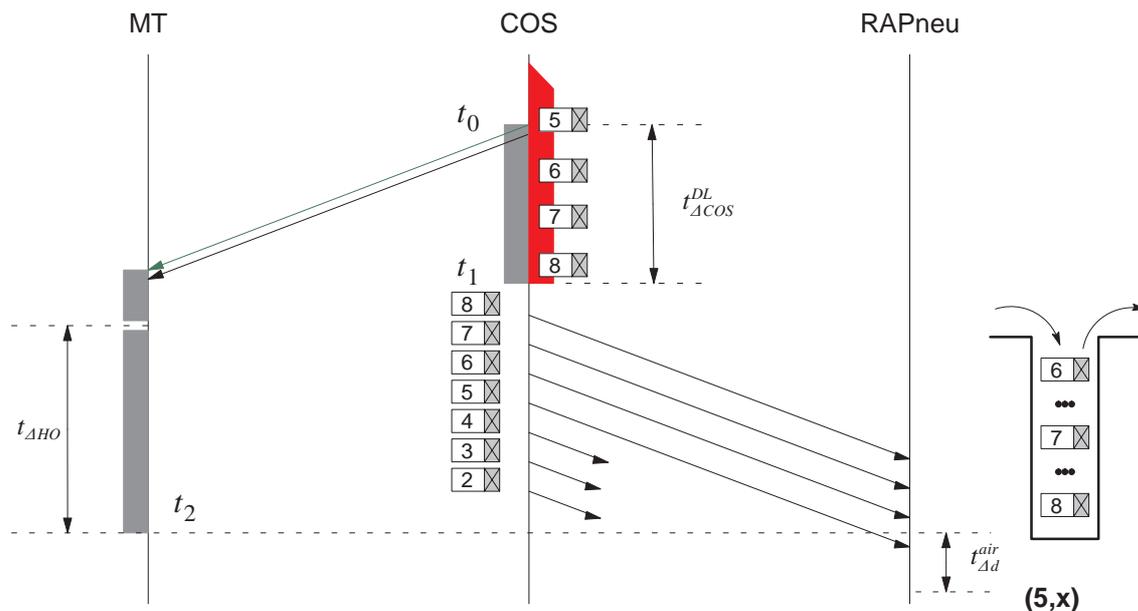


Abb. 4.27: Backward Handover mit TIHH-BR – Downlink

Der naive Ansatz bei der Weiterleitung ist, den Puffer nach dem Alter der Zellen auszuspielen und die Zellen in der Reihenfolge zur neuen Basisstation zu senden, mit der sie in den Puffer eingeschrieben wurden. Das führt jedoch zu unnötigen Zellübertragungen und Verzögerungen. Wenn wie in Abb. 4.25 die Laufzeit annähernd gleich oder größer der Umschaltverzögerung ist, hat das Mobilterminal zum Zeitpunkt der Handoverfreigabe eine große Anzahl Nutzdatenzellen erhalten, ohne daß dafür eine Bestätigung beim COS eingetroffen ist. Diese Zellen würden unnötigerweise weitergeleitet werden und darüber hinaus die Übertragung der noch nicht empfangenen Zellen verzögern.

Sinnvoller ist es in diesem Fall, den Umstand zu nutzen, daß bereits alle unbestätigten Zellen, die weitergeleitet werden müssen, als vollständiger Block zum Zeitpunkt des Umschaltens vorliegen und die neu hinzukommenden Zellen aus dem festen Segment der Verbindung gestaut werden. Damit können die jüngsten Zellen im Kopierpuffer zuerst an die neue Basisstation gesendet werden. Diese Zellen sind gleichzeitig die, welche beim Backward Handover mit der größten Wahrscheinlichkeit noch nicht beim Mobilterminal empfangen wurden. Die neue Basisstation legt die Zellen in einem Kellerspeicher ab. Jede ankommende Zelle wird mit einer Push-Operation auf den Stapel gelegt. Nach Abschluß des physikalischen Handovers können die Zellen dann mit Pop-Operationen in der ursprünglichen Sendereihenfolge ausgelesen werden. Dazu annonciert das Mobilterminal zunächst bei der Anmeldung an RAPneu das zuletzt korrekt empfangene Synchronisationstag und einen Offset, der die Anzahl jener ATM-Zellen angibt, die noch auf dieses Tag gefolgt waren.

Durch die umgekehrte Reihenfolge bei der Weiterleitung kann die Synchronisationsdauer an der neuen Basisstation erheblich verkürzt werden (Abb. 4.27). In obigem Beispiel hat das Mobilterminal noch das Tag Nummer 5 und einige x Zellen danach empfangen, bevor es den physikalischen Handover beginnt. Im Rahmen der Anmeldung teilt es diese Daten der neuen Basisstation mit. Nach Ablauf der Handovvertime befinden sich die Zellenstromsegmente bereits im Kellerspeicher, die durch die Tags Nummer 6, 7 und 8 abgeschlossen werden. Es muß dann nur noch auf das Eintreffen des Synchronisationstags mit der Nummer 5 gewartet werden, um die Nutzdatenübertragung an der Stelle fortzusetzen, an der sie vor dem Handover unterbrochen wurde. Durch den Offset werden außerdem Zellduplikationen vermieden. Darüber hinaus können während der Weiterleitung des Puffers auch bestätigende Tags auf dem alten Uplink eintreffen, da Up- und Downlink ja getrennt umgeschaltet werden. So besteht die Möglichkeit einer Pufferverkürzung, während die Weiterleitung läuft.

Der Handover kann zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb eines Tagabstandes δ_T auftreten. Zu diesem Zeitpunkt hat der COS die Bestätigung für ein $2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}$ vorher gesendetes Synchronisationstag erhalten. Zum Zeitpunkt t_0 sendet der COS die Handoverfreigabe an das Mobilterminal. Die Restlaufzeit des aktuellen Zellenstromsegments beträgt dann $\bar{\delta}_T$ und bestimmt den Wert x des Offset, den das Mobilterminal an die neue Basisstation senden wird:

$$x = \begin{cases} (t_{\Delta MT} + \delta_T - \bar{\delta}_T) \cdot \bar{R}_C & \text{falls } \bar{\delta}_T > t_{\Delta MT} \\ 0 & \text{falls } \bar{\delta}_T = t_{\Delta MT} \\ (t_{\Delta MT} - \bar{\delta}_T) \cdot \bar{R}_C & \text{falls } \bar{\delta}_T < t_{\Delta MT} < \bar{\delta}_T + \delta_T \\ (t_{\Delta MT} - \left\lfloor \frac{t_{\Delta MT}}{\delta_T} \right\rfloor \delta_T - \bar{\delta}_T) \cdot \bar{R}_C & \text{falls } \bar{\delta}_T + \delta_T \leq t_{\Delta MT} \end{cases} \quad (39)$$

Dabei ist $\left\lfloor \frac{t_{\Delta MT}}{\delta_T} \right\rfloor$ die Integerdivision, die nur den ganzzahligen Anteil liefert. Dieser Term verschwindet, wenn $t_{\Delta MT} < \delta_T$.

Den TIHH-Puffer beginnt der COS zum Zeitpunkt $t_1 = t_0 + t_{\Delta COS}^{DL}$ an die neue Basisstation weiterzuleiten. Der Teil des Puffers, der zum Zeitpunkt $t_2 = t_0 + t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO}$ (Ende des physikalischen Handovers) bereits bei der neuen Basisstation vorliegt, wird von der Umschaltverzögerung im COS, der Laufzeitverzögerung auf dem neuen Pfad und der Datenrate, mit welcher der Puffer ausgelesen wird, bestimmt. Es gilt

$$C_{FW} = \max\left(C_{RB}, (t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} - t_{\Delta COS}^{DL} - t_{\Delta d}^{neu}) \cdot R_{BR}\right) \quad (40)$$

Die Datenübertragung im Downlink kann zunächst nahtlos fortgesetzt werden, wenn zum Zeitpunkt t_2 alle Nutzdatenzellen ab dem letzten Tag, das die Mobilstation erhalten hat, bereits an der neuen Basisstation angekommen sind. Danach bestimmen Puffergröße und Weiterleitungsrate $R_{BR} > \bar{R}_C$ die Gesamtverzögerung bis auf die Kopien des TIHH-Puffers wieder "reguläre" Nutzdatenzellen aus dem festen Segment folgen.

Der Worst Case dabei ist, daß ein vollständiger TIHH-Puffer mit maximalem Füllstand zum Zeitpunkt t_1 vorliegt und an den neuen RAP weitergeleitet werden muß. Das Mobilterminal hat im Worst-Case Szenario wegen entsprechend langer Handoververzögerung keine Zelle des Downlinks verloren, so daß spätestens, wenn das Mobilterminal im ersten In-Slot-Signal des Uplinks seine Synchronisationsdaten mitteilt, der gesamte TIHH-Puffer weitergeleitet sein muß. Für die mindestens notwendige Datenrate, mit der die Weiterleitung in diesem Fall erfolgen muß, um die Zeitbedingungen einzuhalten, gilt

$$R'_{BR} = \frac{C_{RB}}{t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} - t_{\Delta COS}^{DL} - t_{\Delta d}^{neu}} \quad (41)$$

Durch Wahl eines optimalen Tagabstandes (Gleichung (34)) ergibt sich die minimale Datenrate, die im Worst Case notwendig wird (untere Grenze der maximalen Datenrate, die mindestens für die Weiterleitung des Puffers benötigt wird)

$$R_{BR}^{min,max} = \frac{2 \cdot \bar{R}_C \cdot t_{\Delta d}^{alt} + \sqrt{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt} \cdot \bar{R}_C} + \sqrt{\frac{\bar{R}_C}{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}}}}{t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} - t_{\Delta COS}^{DL} - t_{\Delta d}^{neu}} \quad (42)$$

Dieser Wert ist in zweierlei Hinsicht der Worst Case. Zum einen können während der Pufferweiterleitung noch Bestätigungen für die ältesten Segmente eintreffen und so zu einer Verkürzung des Puffers führen, da die jüngsten Zellen des Puffers zuerst weitergeleitet werden und

so die ältesten noch zur Quittierung bereitstehen. Zum anderen kann der Handover zu einem beliebigen Zeitpunkt eintreten, so daß der Puffer auch nicht stets seinen vollen Füllstand erreicht haben muß. Dies sind wichtige entspannende Effekte.

Die Anzahl der Zellenstromsegmente, um die der Puffer maximal während der Weiterleitungsphase verkürzt werden kann, ist

$$n_{SV}^{\max} = \left\lfloor \frac{C_{RB}}{\delta_T \bar{R}_C + 1} \frac{\bar{R}_C}{\bar{R}_C + R_{BR}} \right\rfloor \quad (43)$$

Die Anzahl Zellen, die sich zum Zeitpunkt t_1 im Puffer befinden, errechnet sich mit Gleichung (32) zu

$$C_{RB}^1 = C_{RB} - C_{\Delta} \quad (44)$$

Dabei wird C_{Δ} von der Zeitdifferenz zwischen Eintreffen des letzten bestätigenden Tags am COS und t_1 bestimmt:

$$C_{\Delta}^{\max} = \bar{R}_C \cdot \delta_T + 1 \quad (45)$$

Damit kann eine untere Grenze für die minimale Datenrate angegeben werden, die in jedem Fall für die Weiterleitung des Puffers notwendig ist:

$$R_{BR}^{\min, \min} = \frac{2 \cdot \bar{R}_C \cdot t_{\Delta d}^{alt} + \sqrt{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt} \cdot \bar{R}_C} + \sqrt{\frac{\bar{R}_C}{2 \cdot t_{\Delta d}^{alt}}} - C_{\Delta}^{\max} - n_{SV}^{\max} \cdot \delta_T \cdot \bar{R}_C}{t_{\Delta d}^{alt} + t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} - t_{\Delta COS}^{DL} - t_{\Delta d}^{neu}} \quad (46)$$

Voraussetzung dafür ist, daß bei nachteiligem neuem Pfad die Laufzeitdifferenz einen bestimmten Wert nicht überschreitet

$$t_{\Delta d}^{neu} - t_{\Delta d}^{alt} < t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} - t_{\Delta COS}^{DL} \quad (47)$$

Falls die Laufzeitdifferenz kleiner wird, ist in jedem Fall der physikalische Handover abgeschlossen, bevor die erste weitergeleitete Zelle aus dem TIHH-Puffer die neue Basisstation erreicht.

Wird auf die Weiterleitung des TIHH-Puffers in umgekehrter Reihenfolge verzichtet, so entfällt die Möglichkeit, durch nachlaufende Bestätigungen den Puffer zu verkürzen. In diesem Fall ist $n_{SV}^{\max} = 0$ und es muß eine entsprechend höhere Datenrate für die Pufferweiterleitung angesetzt werden.

Solange diese Zeitbedingungen eingehalten werden, kann mit TIHH-BR im Downlink unterbrechungs- und verlustfrei geschaltet werden. Unterbrechungsfreiheit im Downlink bedeutet,

daß durch das Handoververfahren kein zusätzlicher Beitrag zur Unterbrechung entsteht. Selbstverständlich gibt es technologiebedingte Unterbrechungen, die hier mit der Handover-totzeit modelliert werden.

Tabelle 4.2: Parameter für numerisches Beispiel zu TIHH Backward Handover

Parameter	Typ. Wert	Erläuterung
\bar{R}_C	3 Mbit/s	Datenrate
R_{BR}	6 Mbit/s	Datenrate
t_{ACOS}^{DL}	1.0 ms	Umschaltverzögerung Downlink
$t_{\Delta MT}$	0.5 ms	Handoververzögerung
$t_{\Delta HO}$	1.0 ms	Handovertotzeit
$t_{\Delta d}^{air}$	0.5 ms	Laufzeitverzögerung Luftschnittstelle
$t_{\Delta d}^{alt}$	2 ms	Laufzeitverzögerung altes mobiles Segment
$t_{\Delta d}^{neu}$	1.5 ms	Laufzeitverzögerung neues mobiles Segment

Ein numerisches Beispiel verdeutlicht diese Verhältnisse. Es gelten die Werte aus Tabelle 4.2. Es sei weiter angenommen, der Tagabstand sei ein Vielfaches der Laufzeitverzögerung $t_{\Delta d}^{alt}$, so daß der Versand eines Synchronisationstags im Downlink stets auch mit dem Empfang eines Tags im Uplink zusammenfällt und es sei $\bar{\delta}_T = 0$, d.h. die Handoverfreigabe erfolgt direkt vor dem Versand/Empfang eines Synchronisationstags.

Für diesen Fall gilt, daß das letzte Synchronisationstag, das die Mobilstation erhält, unmittelbar mit der Handoverfreigabe eintrifft. Wenn der Tagabstand $\delta_T = 0.4 \cdot t_{\Delta d}^{alt}$ gewählt wird, ergeben sich folgende Zahlenwerte: Der Offset der Zellen, die das Mobilterminal bis zum Ende seiner Handoververzögerung noch empfängt, errechnet sich zu $x = 3$ und es werden im COS nach dem letzten Synchronisationstag noch insgesamt 7 Zellen in Richtung Downlink gesendet. Diese 7 Zellen werden nun zuerst an den Puffer der neuen Basisstation weitergeleitet und liegen dort 2 Millisekunden später (3 Millisekunden nach Handoverfreigabe) vollständig vor, während der Handover erst 3.5 Millisekunden nach der Handoverfreigabe abgeschlossen ist. Die maximale Puffergröße beim Start der Weiterleitungsphase beträgt 43 ATM-Zellen. Innerhalb der Weiterleitungsphase treffen zwei quittierende Tags vom alten Uplink ein, so daß der Kopierpuffer um zwei Zellenstromsegmente verkürzt werden kann und 4.3 Millisekunden nach der Handoverfreigabe vollständig am RAPneu vorliegt. Nach Abschluß des physikalischen Handover teilt das Mobilterminal in einem In-Slot-Signal im Uplink mit, welche Nummer es zuletzt in einem Synchronisationstag beobachtet hat und wieviele Zellen danach noch empfangen wurden. Ohne weitere Verzögerung können damit die noch fehlenden drei Zellen

aus dem Puffer genommen und an die Mobilstation weitergeleitet werden. Die übrigen Zellen des Puffers werden verworfen und die bis dahin gestauten “neuen” Nutzdatenzellen vom festen Segment schließen sich an.

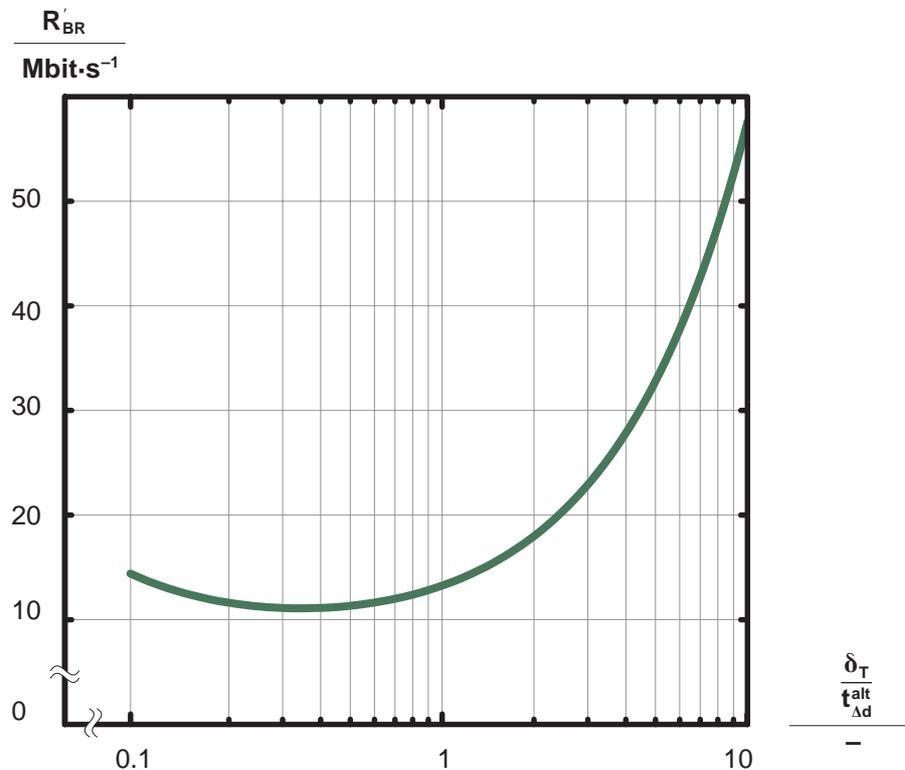


Abb. 4.28: Maximale Datenrate für die Weiterleitung des TIHH-Puffers in Abhängigkeit des Tagabstands

Der optimale Tagabstand ergibt sich in diesem Beispiel zu etwa der 0.35-fachen Laufzeitverzögerung (Abb. 4.28). Die Datenrate, die minimal notwendig wäre, um den vollständigen TIHH-Puffer bis zur ersten Zelle des Mobilterminals im neuen Uplink an RAPneu weiterzuleiten ist etwa 12 Mbit/s. Wegen der Pufferverkürzung durch nachlaufende Bestätigungstags kann im Beispiel die Echtzeitbedingung für unterbrechungsfreies Umschalten mit der Hälfte (6 Mbit/s) bereits nahezu eingehalten werden.

4.4.4 Erzwungener Backward Handover mit TIHH-BR

Wir haben gesehen, daß das Verfahren TIHH-BR beim regulären Backward Handover ein gutes Verhalten zeigt. Wenn gewisse Zeitbedingungen eingehalten werden, kann beim Handover im Downlink nicht nur verlustfrei, sondern sogar unterbrechungsfrei umgeschaltet werden. Der Aufwand der Pufferverwaltung ist allerdings hoch im Vergleich zu der sehr kurzen Verletzbarkeitsperiode. Interessanter ist dagegen die Betrachtung einer Situation mit erzwungenen Handovern (Abb. 4.29). Im Verlauf der Verbindungsnachführung erfährt das Mobiltermi-

nal eine Funksituation, die es unmöglich macht, die alte Funkverbindung weiterhin aufrecht zu erhalten. Entsprechend fügt das Mobilterminal eine VC-flushing Nachricht End-of-Line in seinem Uplink-Zellenstrom ein und führt den physikalischen Handover durch. Dieses Abmelden an der alten Basisstation kann vollständig ohne Interaktion mit Netzknoten und damit entsprechend latenzfrei erfolgen. Es erlaubt die notwendige schnelle Reaktion auf wechselnde Funkbedingungen.

Der erzwungene physikalische Handover kann zu einem beliebigen Zeitpunkt t_0 und damit zu einem beliebigen Punkt innerhalb eines Zellenstromsegments auftreten. Mit der Restlaufzeit des Segments $\bar{\delta}_T$ errechnet sich wie im vorhergehenden Fall der Offset x (Gleichung (39)). Ist $\bar{\delta}_T$ kleiner als die Handoververzögerung $t_{\Delta MT}$, kann das Mobilterminal noch ein Zellenstromsegment bestätigen, bevor es den Funkkanal terminiert. Andernfalls kann der Offset x bis zu einem vollen Tagabstand anwachsen. Nach Ablauf der Handoververzögerung sendet das Mobilterminal eine End-of-Line-Zelle in Uplink-Richtung und führt den erzwungenen Handover durch. Dieser Handover ist zum Zeitpunkt t_2 (Abb. 4.29) beendet.

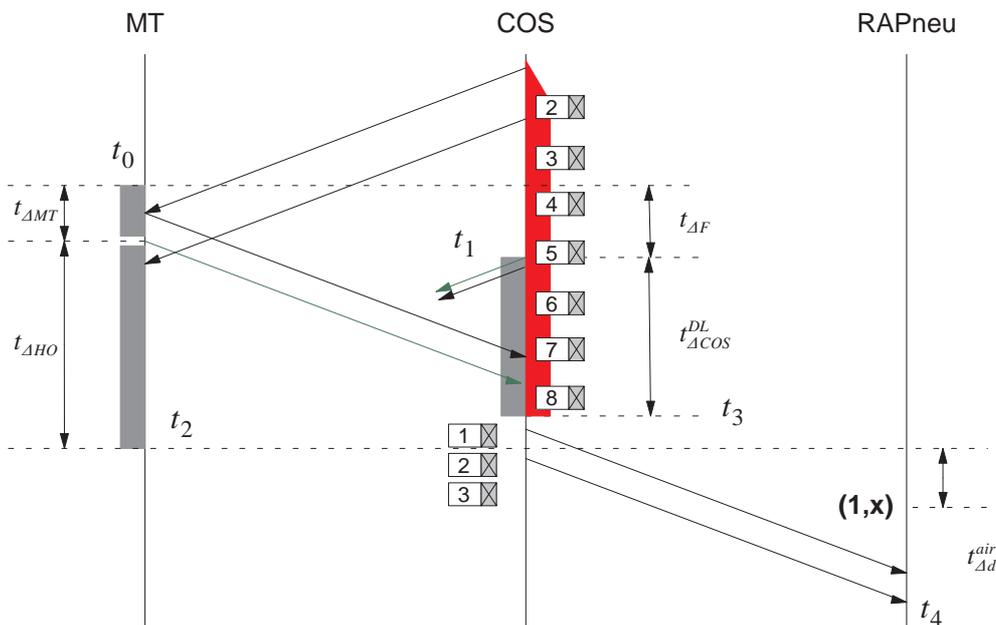


Abb. 4.29: Erzwungener Backward Handover

Im Umschaltzentrum COS wird zum Zeitpunkt t_1 die Verbindungsnachführung beendet und nach der Umschaltverzögerung damit begonnen, im neuen Downlink den TIHH-Puffer in Richtung des Mobilterminals weiterzuleiten. Bestätigungen für das letzte vollständig vom Mobilterminal empfangene Zellenstromsegment sowie das End-of-Line-Signal des Uplinks

können bis zum Ende der Umschaltverzögerung eintreffen, wenn die negative Handoververzögerung $t_{\Delta F}$ groß genug ist. Für $t_{\Delta F} \rightarrow 0$ wird der erzwungene Handover in die Situation des bestmöglichen Backward Handover degenerieren.

Die maximale Anzahl von kopierten Zellen im Puffer des TIHH-BR beim erzwungenen Handover ist zum Zeitpunkt $t_3 = t_1 + t_{\Delta COS}^{DL}$

$$C_{RB}^{F,\max} = \bar{R}_C \cdot \delta_T + (\bar{R}_C + \frac{1}{\delta_T})(2 \cdot t_{\Delta d}^{alt} + \delta_T + t_{\Delta F} + t_{\Delta COS}^{DL}) \quad (48)$$

Dieser Puffer wird nun an die neue Basisstation weitergeleitet. Eine Optimierung durch Vertauschen der Reihenfolge ist hier nicht möglich, da tatsächlich bis auf den Offset x alle Zellen im Puffer noch nicht von der Mobilstation empfangen wurden. Insofern macht es Sinn, mit der Weiterleitung der ältesten Zellen im Puffer zu beginnen, um möglichst nahtlos mit der Downlink-Übertragung fortfahren zu können. Das erste vollständige Segment liegt zum Zeitpunkt $t_4 = t_3 + t_{\Delta d}^{neu} + R_{BR} \cdot \delta_T$ bei RAPneu vor. Hier kann nun mit dem bereits vorliegenden zuletzt empfangenen Synchronisationstag und dem Offset x der Mobilstation der notwendige Abgleich erfolgen, um die Downlink-Nutzdatenübertragung an der Stelle fortsetzen zu können, an der sie die Mobilstation unterbrochen hat. Die Unterbrechung im Downlink ist damit

$$\begin{aligned} T_{U,DL}^F &= t_4 - (t_2 + t_{\Delta d}^{air}) \\ &= t_{\Delta F} + t_{\Delta COS}^{DL} + t_{\Delta d}^{neu} + R_{BR} \cdot \delta_T - t_{\Delta MT} - t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{air} \end{aligned} \quad (49)$$

Im Uplink können frühestens zum Zeitpunkt t_1 wieder Nutzdatenzellen übertragen werden, da dann die Verbindungsnachführung abgeschlossen und ein neues mobiles Segment etabliert ist. Tatsächlich wird das Mobilterminal zum Zeitpunkt t_2 die Nutzdatenübertragung im Uplink wieder aufnehmen. Die Tatsache, daß zu diesem Zeitpunkt im Downlink noch keine Synchronisationstags vorliegen, spielt keine Rolle. Das TIHH-Verfahren reagiert robust auf nicht zum erwarteten Zeitpunkt eintreffende Tags und wartet in diesem Fall auf das nächste Tag, das dann mehrere Zellenstromsegmente auf einmal bestätigt. Für die Unterbrechung im Uplink gilt

$$T_{U,UL}^F = \begin{cases} t_{\Delta d}^{air} + t_{\Delta d}^{neu} + t_{\Delta HO} - t_{\Delta d}^{alt} & \text{falls } t_2 > t_1 \\ t_{\Delta F} + t_{\Delta d}^{air} + t_{\Delta d}^{neu} - t_{\Delta MT} - t_{\Delta d}^{alt} & \text{falls } t_2 \leq t_1 \end{cases} \quad (50)$$

Wenn der erzwungene Handover genügend nahe zum Ende der Verbindungsnachführung stattfindet ($t_2 > t_1$), ist die Handoverunterbrechung beim erzwungenen Handover identisch der beim bestmöglichen Backward Handover (siehe Gleichung (37)). Ansonsten wird die negative Handoververzögerung $t_{\Delta F}$ bestimmend für die Unterbrechung im Uplink, da das Mobilterminal ja bis zur beendeten Verbindungsnachführung warten muß, um die Übertragung wieder aufnehmen zu können.

4.4.5 Forward Handover mit TIHH-BR

Ähnliche Verhältnisse wie beim erzwungenen Backward Handover herrschen beim Forward Handover. Zum Zeitpunkt des physikalischen Handover hat die Verbindungsnachführung noch nicht begonnen. Nach dem Abschluß des physikalischen Handovers zum Zeitpunkt t_2 verzögert sich der Beginn des Umschaltvorgangs also mindestens noch um den Beitrag des Reroutingverfahrens zur Handoverlatenz T_L^R

$$t'_{\Delta F} = t_{\Delta MT} + t_{\Delta HO} + t_{\Delta d}^{air} + T_L^R \quad (51)$$

Damit können analog dem Vorgehen beim erzwungenen Backward Handover Pufferbedarf und Unterbrechungen in Uplink und Downlink für den Forward Handover berechnet werden. An dieser Stelle wird deutlich, daß der Einsatz eines performanten, möglichst latenzfreien Verfahrens zur Verbindungsnachführung große Bedeutung besitzt. Beim Forward Handover bestimmt die Verbindungsnachführung über die Unterbrechung der Nutzdatenübertragung und den Pufferbedarf zur Realisierung eines verlustfreien Handovers. Die Forderung von TIHH-BR zum Einsatz eines ankerbasierten Verfahrens ist damit in diesem Zusammenhang besonders sinnvoll, da die ankerbasierten Verfahren eine relativ latenzarme Verbindungsnachführung realisieren können. In Verbindung mit TIHH-BR ist dann ein verlustfreier Forward Handover möglich.

4.4.6 Robustheitsaspekte bei TIHH-BR

Beim erzwungenen Handover haben wir gesehen, daß das hier vorgeschlagene Verfahren TIHH-BR robust reagiert. Die ausbleibenden Quittungen im Uplink führen zur automatischen Weiterleitung der noch nicht bestätigten Zellen zur neuen Basisstation. Dort kann der Puffer mit dem tatsächlichen Stand des Mobilterminals synchronisiert und die Nutzdatenübertragung an der Stelle fortgesetzt werden, an der sie unterbrochen worden war. Damit ist also stets ein verlustfreier Handover möglich. Gleiches gilt für den Forward Handover mit dem Unterschied, daß hier der Pufferbedarf entsprechend größer ist.

Fehlerhafte Zellen werden in der Handoversituation immer wahrscheinlicher. Falls ein Synchronisationstag verloren geht, kann das Mobilterminal sich dennoch synchronisieren. Das nächste Synchronisationstag des Downlinks quittiert dann bei Weiterleitung an den COS zwei Zellenstromsegmente auf einmal. Wichtig dabei ist, daß fehlerhafte Zellen nach einem Synchronisationstag mit in den Offset x einberechnet werden. Falls das nicht geschieht, kann es zu Zellduplikationen und Vertauschungen der Reihenfolge innerhalb eines Tagabstandes kommen.

4.5 Synchronisieren von Dualcastströmen (TIHH-DC)

Die bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, daß stets nur entweder der alte oder der neue Pfad des mobilen Segments einer Verbindung aktiv sein kann. Die Umschaltung konnte dabei getrennt für Hin- und Rückrichtung (Uplink und Downlink) durchgeführt werden. Dieses Vorgehen ist letztlich motiviert vom Bemühen, möglichst ressourceneffizient zu arbeiten, d.h. möglichst wenig Verbindungen zur Realisierung eines Handovers aufbauen zu müssen. In ATM-Netzen können allerdings Hin- und Rückrichtung einer VC-Verbindung nur gleichzeitig aktiviert und ausgelöst werden. Für die Dauer des Umschaltens sind also ohnehin zwei VC-Verbindungen für eine Nutzdatenverbindung des Mobilterminals vorhanden und es ist Kapazität dafür reserviert.

Diese ohnehin belegte Kapazität kann genutzt werden, um ein verlustfreies Handoververfahren zu definieren, das ohne Kopienpuffer auskommt. Es ist nur für den Backward Handover geeignet, andererseits aber mit beliebigen Verfahren der Verbindungsnachführung kombinierbar, da es keinen festen COS benötigt. Darüber hinaus besitzt diese Variante Eigenschaften, welche sie besonders für Echtzeitdienste interessant machen.

4.5.1 Latenzarmer verlustfreier Handover für Echtzeitdienste

Echtzeitdienste haben enge Anforderungen an die Varianz der Zellverzögerungen. Puffern und Weiterleiten einzelner Zellenstromsegmente wie in TIHH-BR lassen diese Anforderungen häufig nicht zu, insbesondere da für die Weiterleitungsphase auch die Datenrate teilweise drastisch erhöht werden muß. Die bisher diskutierten Verfahren für verlustfreien Handover sind deshalb für diese Echtzeitdienste ungeeignet. Häufig befinden sich in ATM-Zellenströmen mit Echtzeitanforderungen Daten von Applikationen, die zwar keine Verzögerungstoleranz aufweisen, dafür aber ein erhöhtes Maß an Robustheit gegen Zellverluste besitzen [182]. Wie in Kapitel 4.2.2 gezeigt, kann jedoch aufgrund der hohen Handoverraten die Zellverlusthäufigkeit bei nicht verlustfreien Handovern auf ein beachtliches Niveau ansteigen, das auch von diesen Diensten nicht mehr tolerierbar ist. Es ist also wünschenswert, eine möglichst verlustfreie Handovermethode auch für Echtzeitdienste zu besitzen. Im folgenden wird ein Verfahren vorgeschlagen, das diese Eigenschaften aufweist.

Dieses Tag Insertion Hitless Handover für Dualcast TIHH-DC basiert wie das oben vorgestellte TIHH auf dem Prinzip der periodischen In-Slot-Signale mit Sendefolgennummern, die den Zellenstrom der Nutzdatenverbindung in nummerierte Segmente unterteilt (Abb. 4.30). Um verlustfreien Handover realisieren zu können, wird die Handoverschwelle etwas angehoben, so daß das Handoverfenster größer wird. Das Mobilterminal initiiert den Handover stets als Backward Handover und besitzt aufgrund des Handoverfensters nun auch mehr Zeit, um

die Verbindung über die Handoverfreigabe hinaus zu halten. Diese Phase wird genutzt, um gleichzeitig auf dem neuen Downlink ein Duplikat des Nutzdatenstromes zu senden, d.h. es wird eine Multicastingfunktion für die beiden Pfade aktiviert, so daß im COS alle ATM-Zellen gleichzeitig in beide Downlink-Richtungen gesendet werden. Die neue Basisstation verfährt wie gewohnt mit Downlink-Zellen, die noch nicht an die Mobilstation übergeben werden können und legt sie in einem Staupuffer ab.

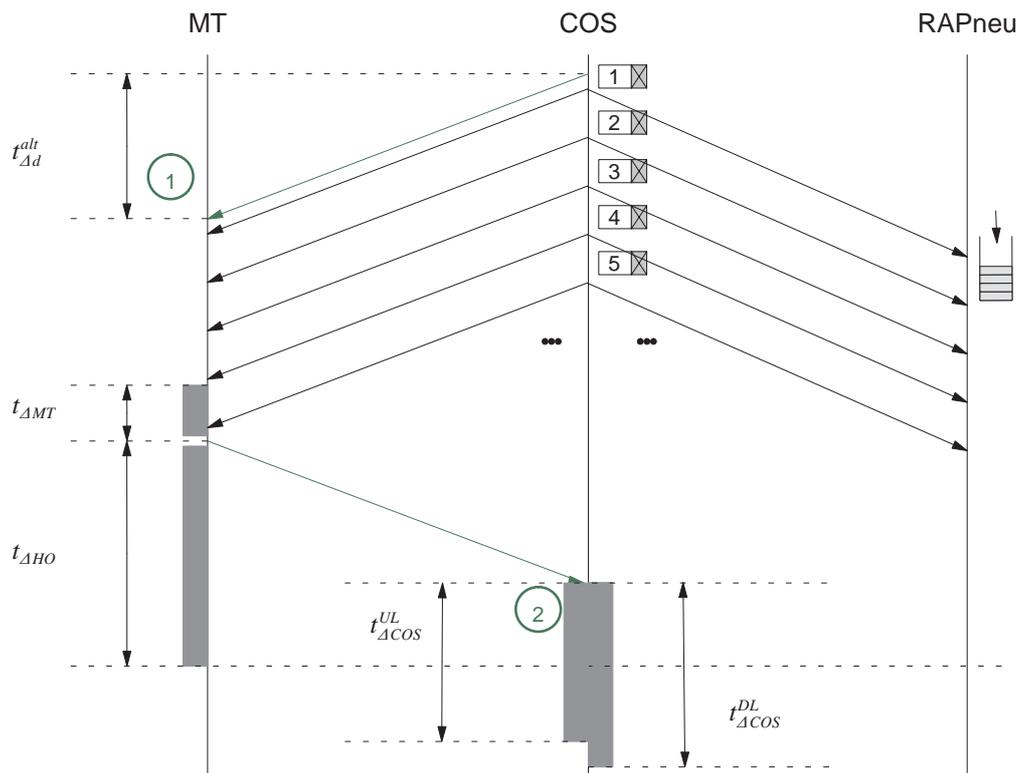


Abb. 4.30: Verlustfreier Echtzeithandover mit TIHH-DC

Während der Multicastphase werden periodisch Synchronisationstags in den Datenstrom eingefügt. Diese dienen jetzt jedoch nicht mehr zum Puffermanagement und es werden weder quittierende Tags im Uplink gesendet, noch ein Puffer im ACS vorgehalten. Die Synchronisationstags dienen der Mobilstation allein dazu, die vollständig empfangenen Zellenstromsegmente zu identifizieren. Wenn die Funksituation schließlich den Handover notwendig macht oder eine timerkontrollierte Zeitspanne seit dem Erhalt der Handoverfreigabe (1) verstrichen ist, signalisiert das Mobilterminal mit einem End-of-Line-Signal im Uplink (2) dem COS den Zeitpunkt zum Umschalten der Nutzdatensegmente. Nach dem physikalischen Handover (Handovertotzeit $t_{\Delta HO}$) wird an der neuen Basisstation wie bei allen bisherigen Handovern verfahren. Das Mobilterminal teilt das zuletzt korrekt empfangene Synchronisationstag plus

einen Offset x der Basisstation mit, die daraufhin den Puffer entsprechend zurücksetzt und an der Stelle mit der Nutzdatenübertragung fortfährt, an der sie auf der alten Funkverbindung unterbrochen wurde.

Die Unterbrechung im Downlink entspricht der Handovertotzeit plus der Verzögerung durch die Synchronisierung des Puffers an der neuen Luftschnittstelle. Die Weiterleitung des Puffers bei TIHH-BR entspricht hier der verteilten Weiterleitung der unbestätigten Segmente über die gesamte Dualcasting-Phase hinweg. Das hat zur Folge, daß im Umschaltunkt COS keine Zellen vom festen Segment kommend gestaut werden müssen. Das Zurückhalten während der Weiterleitungsphase entfällt. Im Downlink wird damit die Phase, während der die Echtzeiteigenschaften des Zellenstromes manipuliert werden, auf ein Minimum reduziert. Lediglich während der Handovertotzeit wird in RAPneu ein kleiner Zellenstau aufgebaut. Da diese Zeitspanne nur wenige 100 Mikrosekunden dauert [161], bleibt die Beeinträchtigung auf eine sehr kurze Phase beschränkt. Während des Handover muß im Datenstrom somit lediglich eine kurzfristige Erhöhung der Zellverzögerung um die Handovertotzeit mit nachfolgender Kompensation durch Verklumpung des Datenstroms in Kauf genommen werden. Wenn die Verklumpung nicht in Kauf genommen werden kann, so muß dieses kurze Segment des Zellenstroms verworfen werden. Entsprechend ist diese Art des Handover verlustbegrenzt und nicht mehr vollständig verlustfrei.

4.5.2 Soft Handover

Alle momentan vorgeschlagenen Handoververfahren für WATM-Systeme verwenden harte Handover. Erste Forderungen nach einer Luftschnittstelle, die Soft Handover anbietet, wurden im ATM Forum bereits erhoben. Momentan beschränkt sich die Diskussion allerdings auf eine "requirement analysis" [38], die eine Methode für eine "intelligente" Kombination der jeweils zwei Datenströme in Up- und Downlinkrichtung voraussetzt. Wie diese Methode auszusehen hat, läßt das ATM Forum noch unklar.

Während eines Soft Handover Soft Handover ist das Mobilterminal in der Lage, gleichzeitig mit den beiden beteiligten Basisstationen zu kommunizieren. Es besitzt also zwei gleichzeitig aktive mobile Segmente, die beide jeweils am Mobilterminal und dem COS enden. Für diese Situation zweier redundanter, disjunkter Pfade existieren in der Literatur bereits aus dem Festnetzbereich Verfahren, um Zellensynchronität herzustellen [70][71][109]. Diese Zellensynchronität ist notwendig, um beim Soft Handover adaptiv und latenzfrei zwischen den beiden Pfaden umzuschalten, um je nach Funksituation einen Gewinn an Übertragungsqualität zu erzielen (Makrodiversität zur Reduktion von Zellverlusten).

Ein mögliches Schema ist die periodische In-Slot-Signalisierung des TIHH-DC, die dazu verwendet werden kann, den vorauseilenden Pfad zu stauen und entsprechend mit dem nacheilenden zu synchronisieren. Dazu kann beispielsweise die Methode des Alignment Servers aus [70][71] eingesetzt werden.

4.6 Definition der OAM-Signale und F5-Flüsse für TIHH

Das hier vorgeschlagene Verfahren TIHH beruht auf den Prinzipien der In-Slot-Signalisierung des Operation And Maintenance OAM in ATM-Netzen. Um das Verfahren in die OAM-Systematik einzupassen, werden im folgenden Definitionen für die OAM-Signale vorgeschlagen (Tabelle 4.3) und die prinzipiellen F5-Ströme beschrieben, die durch diese Signale definiert werden (Abb. 4.31).

Tabelle 4.3: OAM Signale für die Handoversteuerung mit TIHH-BR

Signal	Erläuterung
Handover Complete Indication (HCI)	Erste Zelle, die zur Resynchronisierung nach dem Handover an den RAP gesendet wird
Mobile Detach Indication (MDI)	Letzte Zelle im Uplink vor dem Handover
Synchronization and Acknowledgement Information (SAI)	Periodisches Signal mit dem durchnummerierten Synchronisationstag

Für das Handovermanagement schlagen wir die Einführung einer neuen Funktionskategorie vor. Diese Funktionskategorie Handovermanagement umfasst einige neue OAM-Signale. Wesentliches Grundprinzip des TIHH-Verfahrens ist es, periodische Synchronisationssignale in den ATM-Zellenstrom einzufügen. Diese periodischen Signale nennen wir Synchronisation and Acknowledgement Information SAI. Die SAI-Signale tragen Sendefolgennummern, mit denen sie den ATM-Zellenstrom segmentieren und diese Segmente eindeutig kennzeichnen. Im Mobilterminal werden die SAI-Signale zurückgeschleift und im Uplink wieder dem Umschaltpunkt COS zugeführt. Dieser kann diese Signale auswerten und so feststellen, welches Segment des Zellenstroms gesichert beim Mobilterminal angekommen ist. In der Uplink-Richtung dienen die SAI-Zellen also als Bestätigungssignal und können zur Steuerung eines Puffers für die kontrollierte Wiederübertragung eingesetzt werden.

Wenn das Mobilterminal einen verlustfreien Handover durchführen möchte, fügt es in Uplink-Richtung ein VC-Flushing-Signal ein. Dieses Signal Mobile Detach Indication MDI zeigt dem Umschaltpunkt die letzte vom Mobilterminal gesendete ATM-Zelle und erlaubt ihm so ein verlustfreies Umschalten des Uplinks.

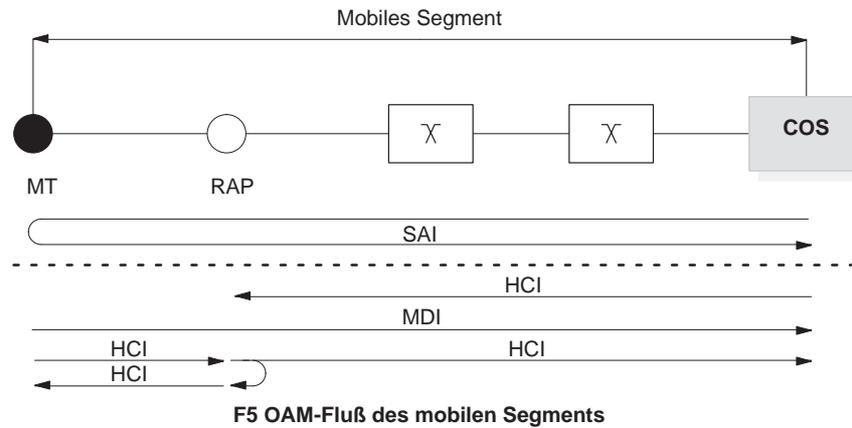


Abb. 4.31: TIHH-BR OAM F5-Flüsse

Nach dem MDI-Signal meldet sich das Mobilterminal an der alten Basisstation ab und registriert sich an der neuen mit einem Signal Handover Complete Indication HCI. Dieses Signal enthält die Sendefolgenummer des zuletzt korrekt empfangenen SAI-Signals in Downlink-Richtung und erlaubt so die Resynchronisation nach dem Handover, der damit verlustfrei und zumindest im Downlink häufig sogar unterbrechungsfrei erfolgen kann. Für einen verlustfreien Handover müssen allerdings zuvor die im COS gepufferten Nutzdatenzellen zur neuen Basisstation weitergeleitet werden. In jedem Fall erlaubt dieses Protokoll dem Mobilterminal, ohne Interaktion mit Netzelementen zu jeder Zeit einen physikalischen Handover durchzuführen und gleichzeitig diesen Handover verlustfrei zu halten.

Zusammenfassend werden die OAM-Methoden der In-Slot-Signalisierung und der Meßschleife mit Loopback-Mechanismus verwendet, um ein neues Protokoll für die Steuerung verlustfreier Handover zu definieren. Die geringe Anzahl benötigter OAM-Signale erlaubt die Kodierung innerhalb der bisherigen Richtlinien für OAM-Zellformate.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde zunächst die Motivation für drahtlose Breitbandsysteme erarbeitet und ein Überblick über die momentan entstehenden Technologien, die aktuellen oder vor kurzem abgeschlossenen Forschungsprojekte sowie die laufenden Standardisierungsprojekte bei ETSI und ATM Forum zusammengestellt. Der Entwurf von Anwendungsszenarien rundet die Motivation ab. Diese Anwendungsszenarien zeigen deutlich den Bedarf an hochbitratiger Multimediakommunikation, der in den nächsten Jahren durch die Konvergenz der sich klassisch getrennt entwickelnden TIME-Märkte (Telekommunikation, Information, Medien, Entertainment) entstehen wird. Treiber dieser Konvergenz sind zum großen Teil das Internet und die technologische Entwicklung der Telekommunikation. Parallel zu diesem Trend verläuft das rasante Wachstum der Mobilfunkmärkte. Auch hier findet eine Konvergenz statt. Jeder dritte Mobilteilnehmer soll im Jahr 2004 nach den aktuellen Prognosen seine Internetdienste auch mobil nutzen. Es wird klar, daß damit auch für mobile Teilnehmer hochbitratige Dienste für die breitbandige Multimediakommunikation zur Verfügung stehen müssen. Entsprechend hoch sind in diesem Bereich weltweit die Aktivitäten in öffentlichen, universitären und industriellen Forschungs- und Pilotentwicklungsprojekten der letzten Jahre.

Eine mögliche Realisierung eines mobilen Breitbandsystems ist die Erweiterung des Asynchronen Transfer Modus ATM für drahtlose Netze mit mobilen Teilnehmern. Dafür müssen eine Reihe von Erweiterungen am ATM-Standard vorgenommen werden, der bisher ausschließlich auf Festnetze mit hervorragender Übertragungsqualität ausgerichtet war. Neben der Entwicklung einer entsprechenden Luftschnittstelle ist die Definition von Mobilvermittlungsverfahren ein zentrales Thema. Mit einem wesentlichen Kernbereich der ATM-Mobilvermittlungsverfahren beschäftigt sich diese Arbeit, nämlich mit den Verfahren der Verbindungsnachführung und dem verlustfreien Handover. Die Verbindungsnachführung sorgt auf Rufebene dafür, daß die Verbindungen eines Mobilterminals stets zu dessen aktuellem Netzzugangspunkt geleitet werden. Dafür wird ein neuer partieller Weg der Verbindungen durch das Netz ermittelt. Verfahren für den verlustfreien Handover verhindern beim Umschalten der partiellen Wege auf ATM-Zellenebene den Verlust und die Duplikation von Zellen und sichern die Einhaltung ihrer Reihenfolge.

Aus dem aktuellen Stand der Forschung wurden in dieser Arbeit zunächst Funkszenarios entworfen und Anforderungen für die Vermittlungsverfahren daraus abgeleitet. Wichtiges Ergebnis ist, daß sowohl Forward als auch Backward Handover unterstützt werden müssen. Wegen der geringen Zellgrößen sind hohe Handoverraten zu erwarten, so daß die Verbindungsnachführung im Netz möglichst effizient gestaltet werden muß. Dazu wurde eine

zweistufige Netzarchitektur definiert. Die lokale Stufe ist ein teilnehmerseitiger mobilitätsunterstützender ATM-Vermittlungsknoten, der alle Handover innerhalb seines Versorgungsreichs bearbeitet. Eine Verbindungsnachführung im Netz wird erst beim Überschreiten dieser elementaren Zone notwendig (Interzonen Handover). In dieser zweiten Stufe ist ein netzseitiger mobilitätsunterstützender ATM-Vermittlungsknoten vorgesehen.

Bei der Verbindungsnachführung (Rerouting) stehen zwei Ziele im Wettstreit: Performanz und Ressourcenökonomie. Hohe Performanz, ausgedrückt in einer niedrigen Handoverlatenz, ist bei den bisherigen Verfahren in der Literatur nur durch proaktive Verbindungsnachführung, d.h. vorausschauende Reservierung von Netzressourcen zu erreichen. Eine hohe Ressourcenökonomie, ausgedrückt in kostenoptimalen Wegen und geringer Vorreservierung, ist nur bei bedarfsgesteuerter reaktiver Verbindungsnachführung mit dynamischer Suche im Handoverfall möglich. Nach Einführung einer Systematik zur Klassifikation von Reroutingverfahren wird ein neues, latenzarmes Verfahren zur Verbindungsnachführung mit permanentem Anker basierend auf einem Baum Virtueller Pfade vorgeschlagen. Dieser Baum ist nicht VC-individuell und die dafür allokierten Ressourcen können flexibel an alle Verbindungen der Ankerdomäne vergeben werden. Durch die vorberechneten Direktwege des VP-Baumes reduziert sich der Aufwand für die Verbindungsnachführung erheblich, so daß nur ein geringer und schwach von der Netztopologie abhängiger Beitrag zur Handoverlatenz entsteht. Diese Mobile VP-basierte Netzarchitektur MVPA bietet also die Vorteile proaktiver Verfahren zur Verbindungsnachführung und vermeidet deren Nachteile bei der Ressourcenökonomie. Bei letzterer muß lediglich durch die Einführung des permanenten Ankers ein Kompromiß eingegangen werden. Die MVPA wird anhand mehrerer Kriterien anderen Verfahren aus der Literatur gegenübergestellt und mit ihnen verglichen.

Durch die Einführung eines logischen VP-Subnetzes in einer Ankerdomäne kann die Verkehrslenkung für die Verbindungsnachführung flexibel an langfristige Schwankungen angepasst werden. Über logische Mehrfachvermaschung kann außerdem eine Ankerdomäne über die Grenzen der physikalischen Netztopologie hinaus erweitert werden. Ankerdomänen können so überlappend gestaltet werden. In dieser Arbeit wird vorgeschlagen, die logische Überlappung der Ankerdomänen für eine Handoverhysterese zu nutzen. Dieses hier eingeführte Konzept der Handoverhysterese ist in der Lage, die Anzahl der aufwendigeren Handover zwischen Ankerdomänen zu reduzieren. Die Analyse dieses Konzepts liefert einen Ausdruck für den Hystereseertrag.

Neben dem Handover auf Verbindungsebene (Rerouting) beschäftigt sich diese Arbeit auch mit dem Handover auf Zellenebene. Die Umschaltssituation zwischen dem alten partiellen Weg der Verbindung und dem in der Verbindungsnachführung berechneten neuen mobilen Segment wird detailliert analysiert. Situationen, in denen Zellverluste, Zellduplikationen

oder Vertauschungen der Zellreihenfolge auftreten können, werden identifiziert. Zellverluste sind der dominierende Fehlerfall. Für den Backward Handover sowie den Forward Handover wird jeweils ein Ausdruck für die Verletzbarkeitsperiode, in der Zellverluste entstehen können, ermittelt. Die mittlere, auf die Gesamtdauer der Verbindung bezogene, Zellverlusthäufigkeit wird abgeschätzt und daraus die Notwendigkeit eines Verfahrens abgeleitet, das verlustfreie Handover garantiert. Bisherige Verfahren in der Literatur für verlustfreien Handover sind für harten Backward Handover entworfen. Sie sind größtenteils nicht für Forward Handover geeignet beziehungsweise können dann keinen verlustfreien Handover garantieren. Soft Handover ist in der Literatur bisher gar nicht berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird durch periodisch eingefügte In-Slot Signalisierungszellen analog den OAM-Verfahren des ATM eine Synchronisierungsmöglichkeit vorgeschlagen, die flexibel zur Steuerung des verlustfreien Handover auf Zellenebene eingesetzt werden kann (Tag Insertion Hitless Handover TIHH). Damit können sowohl Puffer gesteuert werden, welche die Wiederübertragung der verlorenen ATM-Zellen erlauben (TIHH-BR), als auch Dualcast-Verbindungen synchronisiert werden, die einen verlustbegrenzten Handover ermöglichen, der auch für Echtzeit-Dienste geeignet ist (TIHH-DC). Durch das In-Slot-Signalisierungsverfahren ist TIHH-DC auch für Luftschnittstellen vorbereitet, die Soft Handover unterstützen. Dort kann es zur Synchronisierung der beiden Übertragungspfade eingesetzt werden, zwischen denen dann latenzfrei umgeschaltet wird. TIHH-BR leistet den verlustfreien Handover ohne die Notwendigkeit, Direktwege zur Weiterleitung zwischen benachbarten Basisstationen einrichten zu müssen. Hinsichtlich des Aufwandes für das Netzmanagement ist es daher auch gut für große Netze geeignet. Die Weiterleitung von TIHH-BR und damit der verlustfreie Handover arbeitet auch über physikalische Grenzen von Ankerdomänen hinweg, wo ein Direktweg zwischen benachbarten Basisstationen nicht mehr ohne weiteres etabliert werden kann.

Aus dieser Arbeit ergibt sich weiterer Forschungsbedarf in mehrerer Hinsicht. Direkt anknüpfend sind offene Punkte der Handoversteuerung zu bearbeiten. Während die Möglichkeit von Gruppenhandover, d.h. dem möglichst effizienten gleichzeitigen Handover aller Verbindungen eines Mobilterminals, hier nur kurz angesprochen wurde, bleiben eine Reihe von Fragen offen. Die Verbindungsannahme für Verbindungsgruppen beim Handover und Strategien für weich einsetzende Rückstufung der Verbindungsqualität sind zu diskutieren. Darüber hinaus ist das Problem des Handovers von Multicastverbindungen in der gesamten Literatur bisher kaum berücksichtigt. Aus den Überlegungen zum Umschaltvorgang ergeben sich einige Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung von ATM-Vermittlungsarchitekturen. Diese sollten zukünftig in der Lage sein, die Hin- und Rückrichtung (Uplink und Downlink) einer virtuellen Verbindung getrennt umzuschalten und entsprechende Funktionen für den verlustfreien Handover anzubieten. Verlustfreie Handover sind darüber hinaus keine störungsfreien Handover und sie verändern die Verkehrscharakteristik des Nutzdatenstroms. Um beim Handover

die Einhaltung der Dienstgüte garantieren zu können, sind spezielle Verkehrsformungsfunktionen notwendig. Die Studie dieser Verkehrsformung für mobile ATM-Verbindungen ist ein weiteres wichtiges Forschungsgebiet. Die Möglichkeit eines zellensynchronen Soft Handover wurde ebenfalls angesprochen. Hier besteht Forschungsbedarf bei der Integration der Zellenebene mit der physikalischen Ebene zur adaptiven Linkauswahl in zukünftigen Zugangstechnologien.

Ebenfalls ausgeklammert in dieser Arbeit sind Aspekte der Netzplanung für WATM-Netze. Themen wie optimale Topologie, Netzdesign basierend auf pikozellularen Mobilitätsmodellen und mobilitätsadaptive Wegführung sind auch in der Literatur bisher nur in geringem Umfang diskutiert. Speziell für die ankerbasierten Verfahren sind wichtige Aspekte der Netzplanung die Platzierung des Ankerknotens sowie die Wegführung vom Anker zu den teilnehmerseitigen mobilitätsunterstützenden Knoten. Schließlich ist die Ressourcenökonomie der einzelnen Reroutingverfahren ein nicht unbedeutendes Thema. Erste Abschätzungen zur groben Klassifizierung wurden in dieser Arbeit vorgenommen. Darüber hinaus sind die Verfahren systematisch auf Klassen von Netztopologien verknüpft mit entsprechenden Mobilitäts- und Verkehrsmodellen zu untersuchen, um weitere Handhabe für die Entscheidung zu gewinnen, welches Verfahren im konkreten Netz sinnvoll zum Einsatz kommen kann. Wichtiger Aspekt hierbei ist wiederum der Netzentwurf für WATM-Systeme – nur durch eine integrierte Betrachtung von Reroutingverfahren, Topologieentwurf und Netzdimensionierung kann letztlich eine Aussage über das Gesamtsystem getroffen werden.

Literatur

Hinweis: Vorveröffentlichungen zu dieser Arbeit entsprechend §4, Satz (5) der Promotionsordnung der Technischen Universität München sind die Literaturstellen [5][8][10][15].

- [1] Vögel, H.-J.: "Simulative Dienstgüteuntersuchung von ISO TP4 auf digitalen Mobilfunkkanälen", Proceedings 8. Aachener Kolloquium Signaltheorie: Mobile Kommunikationssysteme, RWTH Aachen, 23.-25.3.1994. P. Vary (Hrsg.) – Berlin, Offenbach: vde-Verlag, 1994.
- [2] Johr, H.; Vögel, H.-J.; Grom, A.: "Messung und verbesserte Markov-Modellierung des transparenten GSM-Datendienstes", Konferenzband zur itg-Fachtagung Mobile Kommunikation, 26.-28.9.1995 in Neu-Ulm, itg-Fachbericht 135, S. 279-287. Berlin, Offenbach: vde-Verlag, 1995.
- [3] Eisenschmid, M.; Vögel, H.-J.; Werner, M.: "Handover Signalling in LEO/MEO Satellite Systems", Proceedings ICPMSC'96 International Conference on Personal Mobile and Spread Spectrum Communication, Hong-Kong, 3.-5.12.1996, pp. 117-120. Hong Kong: The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [4] Werner, M.; Delucchi, C.; Vögel, H.-J.; Maral, G.; De Ridder, J.J.: "ATM-based Routing in LEO/MEO Satellite Networks with Intersatellite Links", *IEEE JSAC special issue "Mobile ATM"*, Volume 15, no. 2, January 1997, pp. 69-82
- [5] Vögel, H.-J.: "Handover switching in mobile ATM networks", *Conference Proceedings European Personal Mobile Communications Conference EPMCC'97*, Bonn, 30. Sept. – 2. Okt. 1997. ITG-Fachbericht 145, Berlin, Offenbach: VDE-Verlag, 1997, S. 375-381
- [6] Hammerschmidt, J. S.; Hutter, A. A.; Vögel, H.-J.; Drewes, C.; Hasholzner, R.: "An Integrated Testbed Using Generative Markov Chain Channel Models", Proceedings ACTS Mobile Summit, Aalborg, Oct. 7-10, 1997.
- [7] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: "GSM – Global System for Mobile Communication. Vermittlung, Dienste und Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen". Stuttgart: Teubner, 1997.
- [8] Vögel, H.-J.: "A networking concept for wide area mobility and fast handover in ATM networks", *Proceedings IEEE Globecom'97*, Phoenix, 3.-8. November 1997. IEEE, 1997, S. 1124-1128
- [9] Hartmann, Ch.; Vögel, H.-J.: "Teletraffic Analysis of SDMA Systems with inhomogeneous MS location distribution and mobility", in: *Wireless Personal Communications Magazine*, Baltzer, 1998.
- [10] Vögel, H.-J.: "Virtual Connection Handover in ATM-based cellular networks", in: *Proceedings NOC'98 European Conference on Networks and Optical Communications*, Manchester, England, 23.-25. Juni 1998. Broadband Access and Network Management, D. Faulkner et.al. (ed.), Amsterdam: IOS Press, 1998, pp. 298-395.
- [11] Vögel, H.-J.; Kellerer, W.; Karg, S.; Kober, M.; Beckert, A.; Einfalt, G.: "SDL-based prototyping of ISDN-DECT-PBX switching software", Proceedings SAM98, The 1st workshop of the SDL Forum Society on SDL and MSC, Berlin, Germany, June 29 – July 1, 1998.
- [12] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: "GSM – Global System for Mobile Communication. Switching, Services and Protocols". Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- [13] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: "GSM – Global System for Mobile Communication. Vermittlung, Dienste und Protokolle in digitalen Mobilfunknetzen". 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart: Teubner, 1999.
- [14] Bettstetter, Ch.; Vögel, H.-J.; Eberspächer, J.: "GSM Phase 2+ General Packet Radio Service GPRS – Architecture, Protocols, and Air Interface", *IEEE Communications Surveys*, vol. 2, no. 3, 1999.

- [15] Vögel, H.-J.: "Robust and Soft: handover design for high-tier Mobile ATM systems", *Wireless'99, Conference Proceedings*, Munich, October 6-8, 1999. B. Walke (Hrsg.), ITG-Fachbericht 157, Berlin: VDE-Verlag, 1999, pp. 333-338.
- [16] Kellerer, W; Steinberg, K.-E.; Vögel, H.-J.: "System zur adaptiven Auswahl von Übertragungssystemen für mobile Kommunikation", Erfindung, April 1999. Derzeit in Patentanmeldung befindlich.
- [17] Kellerer, W; Steinberg, K.-E.; Vögel, H.-J.: "Verfahren zur Übertragung von Informationen an einen mobilen Empfänger", Erfindung, April 1999. Derzeit in Patentanmeldung befindlich.
- [18] Vögel, H.-J.; Kellerer, W; Steinberg, K.-E.: "Heterogeneity and Convergence: UMTSplus communication service architecture in an automobile", submitted to WMCSA2000, *3rd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, <http://www.research.ibm.com/wmcsa2000/>
- [19] Acampora, A. S.; Naghshineh, M.: "An Architecture and Methodology for Mobile-Executed Handoff in Cellular ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 8, October 1994.
- [20] Acampora, A. S.; Naghshineh, M.: "Control and Quality-of-Service Provisioning in High-Speed Microcellular Networks", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 1, no. 2, 2nd Quarter 1994.
- [21] Acharya, A.; Rajagopalan, B.; Raychaudhuri, D.: "Mobility Management in Wireless ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 100-109.
- [22] Acharya, A.; Li, J.; Ansari, F.; Raychaudhuri, D.: "Mobility Support for IP over Wireless ATM", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 4, April 1998, pp. 84-88.
- [23] Agrawal, P.; Hyden, E.; Krzyzanowski, P.; Mishra, P.; Srivastava, M. B.; Trotter, J. A.: "SWAN – A mobile multimedia wireless network." *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 18-33, 1996.
- [24] Akyol, B. A.; Cox, D. C.: "Handling Mobility in a Wireless ATM Network", *IEEE Infocom '96, San Francisco, March 24-28, 1996, Conference Proceedings*; IEEE, 1996.
- [25] Akyol, Bora A.; Cox, Donald C.: "Rerouting for Handoff in a Wireless ATM Network", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 3, no. 5, October 1996, pp. 26-33.
- [26] Akyol, Bora A.: "An architecture for a future Wireless ATM network", Dissertation, Stanford University, 1997.
- [27] Aldis, J.; Althoff, M.; Van Nee, R.: "Physical Layer Architecture and Performance in the WAND User Trial System", *Proceedings ACTS Mobile Communications Summit*, November 27-29, 1996, Granada, Spain.
- [28] Alonso, E.; Meier-Hellstern, K. S.; Pollini, G. P.: "Influence of cell geometry on handover and registration rates in cellular and universal personal telecommunication networks", *Proceedings 8th ITC Specialist Seminar on Universal Personal Communication*, Santa Margherita Ligure, Italien, October 12 – 14, 1992, pp. 261-270.
- [29] Anastasi, G.; Lenzini, L.; Mingozzi, E.; Hettich, A.; Krämling, A.: "MAC Protocol for Wideband Wireless Local Access: Evolution Toward Wireless ATM", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 5, no. 5, October 1998, pp. 53-64.
- [30] Andermo, P.-G.; Ewerbring, L.-M.: "A CDMA-Based Radio Access Design for UMTS", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 2, no. 1, February 1995.
- [31] Anderson, J.; Nguyen, M.D.: "ATM-Layer OAM Implementation Issues", *IEEE Communications Magazine*, September 1991, pp. 79-81.
- [32] Ash, G. R.: "Dynamic Routing in Telecommunication Networks". New York: McGraw-Hill, 1997.
- [33] ATM-Forum: "ATM User-Network Interface Specification", *The ATM Forum*, Version 3.1, September 1994.
- [34] ATM-Forum: "ATM User-Network Interface Specification", *The ATM Forum*, Version 4.0, July 1996.
- [35] ATM-Forum: "Traffic Management Specification", *The ATM Forum*, Version 4.1, March 1999.
- [36] ATM-Forum: "Baseline Text for Wireless ATM specification", *The ATM Forum Technical Committee Wireless ATM Working Group*, BTD-WATM-01.09, Oktober 1998.

- [37] ATM-Forum: "Wireless Mobile Terminal/Network Anchor Switch Handover Model", *The ATM Forum Technical Committee Wireless ATM Working Group*, Contribution ATMF 97-0265.
- [38] ATM-Forum: "Requirements for soft handover", *The ATM Forum Technical Committee Wireless ATM Working Group*, Contribution ATMF 97-0696.
- [39] ATM-Forum: "Framework for Dynamic COS Discovery in Wireless ATM", *The ATM Forum Technical Committee Wireless ATM Working Group*, Contribution ATMF 98-0005.
- [40] Awater, G.A.; Kruys, J.: "Wireless ATM – an overview", *MONET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996)*, no. 3, pp. 235-243.
- [41] Bakker, H.; Schödl, W.: "ATM up to the mobile terminal – impact on the design of a cellular broadband system", *proceedings XVI. World Telecommunications Congress ISS'97*, September 21-36, 1997, vol. 2, pp. 379-385.
- [42] Banerjea, A.: "Queueing delays in rate controlled ATM networks", *Proceedings Infocom 93*, San Francisco, March 1993.
- [43] Banerjee, S.; Tipper, D.; Weiss, B. H. M.; Khalil, A.: "Traffic Experiments on the vBNS Wide Area ATM Network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 8, August 1997, pp. 126-133.
- [44] Bauchot, F.; Hansén, H.; van Herreweghen, E.; Immonen, J.; Kassler, A.; Kryus, J.; Loukas, N.; Lunn, A.; Marias, I.; Mikkonen, J.; Mitts, H.; Niemi, M.; Nyman, P.; Passas, N.; Pavlides, I.; Rauhala, K.: "WAND design requirements", *Magic WAND – ACTS Project AC085, WP 1, CEC Deliverable 1D3*, September 30, 1996.
- [45] Bauschert, Th.: "Optimale Dimensionierung von ATM Weitverkehrsnetzen mit mehrstufiger Durchschaltung", Dissertation, Technische Universität München, 1997.
- [46] Berruto, E.; Bräunlund, T.; Gustafsson, J.; Maiwald, D.; Schott, W.; Whitworth, P.: "Radio Protocol Architecture of the CODIT UMTS System", in: *Ch. Günther (Hrsg.) Mobile Communications – Advanced Systems and Components, Proceedings of the 1994 Intern. Zürich Seminar on Digital Communication*, Lecture Notes in Computer Science 783. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1994s, S. 417-427.
- [47] Bhagavat, V. K.: "Emerging High-Speed xDSL Access Services: Architectures, Issues, Insights, and Implications", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 106-114.
- [48] Biswas, S.K.; Hopper, A.: "An Agent Based Signalling Architecture for Supporting Mobility in Radio ATM Networks", *International Journal of Communication Systems*, vol. 10, no. 2, March-April 1997, pp. 87-102.
- [49] Boumerdassi, S.: "A New Channel Reservation and Prediction Concept in Cellular Communication Systems". In: Kühn, P.; Ulrich, R. (Hrsg.): "Broadband Communications – The future of telecommunications", *Proceedings of BC'98 IFIP TC 6 / WG6.2 Fourth International Conference on Broadband Communications, April 1-3 1998, Stuttgart, Germany*. London, Weinheim,...: Chapman&Hall, 1998, S. 157-1168.
- [50] Bush, S. F.; Evans, J. B.; Frost, V.: "Mobile ATM buffer capacity analysis", *Mobile Networks and Applications*, vol. 1, 1996, pp. 67-73.
- [51] Breuer, H.-J.: "ATM-Layer OAM: Principles and Open Issues", *IEEE Communications Magazine*, September 1991, pp. 75-78.
- [52] Chen, T.S.; Liu, S.S.: "Management and Control Functions in ATM Switching Systems", *IEEE Network*, July/August 1994, pp. 27-40.
- [53] Cheng, M.; Rajagopalan, S.; Chang, L. F.; Pollini, G. P.; Barton, M.: "PCS Mobility Support over Fixed ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 82-92.
- [54] Cheng, F.-C.; Holtzman, J. M.: "Wireless Intelligent ATM Network and Protocol Design for Future Personal Communication Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 7, September 1997, pp. 1289-1307.
- [55] Chua, K. C.; Ravi, K. V.; Bensaou, B.; Pek, T. C.: "Wireless Broadband Communications: Some Research Activities in Singapore", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 84-90.
- [56] Cioffi, J. M.; Oksman, V.; Werner, J.-J.; Chow, J. S.; Jacobsen, K. S.: "Very-High-Speed Digital Subscriber Lines", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 4, April 1999, pp. 72-79.

- [57] Ciotti, C.: "ACTS Median: Wireless Broadband CPN/LAN for Professional and Residential Multimedia Applications", *Proceedings W-ATM workshop*, Helsinki, September 1996.
- [58] Ciotti, C.; Borowski, J.: "The AC006 Median Project – Overview and State-of-the-Art", *ACTS Mobile Summit*, Granada, Spain, November 1996.
- [59] Cygan, D.; David, F.; Eul, H.J.; Hofmann, J.; Metzner, N.; Mohr, W.: "RACE-II Advanced TDMA Mobile Access Project – An Approach to UMTS", in: *Ch. Günther (Hrsg.) Mobile Communications – Advanced Systems and Components, Proceedings of the 1994 Intern. Zürich Seminar on Digital Communication*, Lecture Notes in Computer Science 783. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1994s, S. 428-439.
- [60] Decrauzat, S.; Bonnet, C.; Bauchot, F.; Marmigère, G.: "Wireless ATM MAC Dynamic Control within WAND", *Proceedings of the wMATM98 Workshop*, Hangzhou, China, April 1998.
- [61] Degenhard, K.; Litzenburger, M.; Bakker, H.; Schödl, W.: "Design Issues of a Cellular Broadband ATM Access Network", *Conference Proceedings European Personal Mobile Communications Conference EPMCC'97, ITG-Fachbericht 145*, Bonn, 30. Sept. – 2. Okt. 1997. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag GmbH, 1997.
- [62] Dehghan, S.; Steele, R.: "Small Cell City", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 52-59.
- [63] Dellaverson, L.: "Reaching for the new frontier", *53 Bytes – The ATM Forum Newsletter*, vol. 4, no. 3, October 1996.
- [64] Dellaverson, L.; Dellaverson, W.: "Distributed Channel Access on Wireless ATM Links", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 110-113.
- [65] Dinis, M.; Lagarto, V.; Prögler, M.; Zubrzycki, J.: "SAMBA: a Step to Bring MBS to the People", <http://hostria.cet.pt/samba/general/GeneralArchive.htm>, Februar 2000.
- [66] Dommety, G.; Veeraraghavan, M.; Singhal, M.: "A Route Optimization Algorithm and Its Application to Mobile Location Management in ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 6, August 1998, pp. 890-908.
- [67] Drewes, C.; Hasholzner, R.; Hammerschmidt, J.S.: "On the Implementation of Adaptive Equalizers for Wireless ATM with an Extended QR-Decomposition-Based RLS-algorithm", *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'98)*, Seattle, WA, USA, May 12-15, 1998.
- [68] Drewes, C.; Hasholzner, R.; Hammerschmidt, J.S.: "TDMA-based broadband fixed radio access: Performance and implementation issues of adaptive equalizers", *Proc. Int'l Zurich Seminar on Broadband Communications IZS '98*, Zurich, Switzerland, Feb. 1998, pp. 193-200.
- [69] Eberspächer, J.; Fischer, N.; Kühn, P. et. al.: "Systeme der Vermittlungstechnik", ITG-Empfehlung 5.2-02, Teil des Begriffswerks des ITG-Fachausschusses 5.2, erarbeitet durch die ITG-Fachgruppe 5.2.2 "Systemtechnik".
- [70] Edmaier; Fischer; Eberspächer; Klug: "Alignment server for hitless path switching in ATM networks", *Proc. of the International Switching Symposium ISS*, vol. 2, Berlin, 23.-28. April 1995, pp. 403-407.
- [71] Edmaier, B.: "Pfad-Ersatzschaltverfahren mit verteilter Steuerung für ATM-Netze", Dissertation, Technische Universität München, 1996.
- [72] Elliott, E. O.: "Estimates of Error Rates for Codes on Burst Noise Channels", *Bell Syst. Techn. Journal*, vol. 42, 1963, pp. 1977-1997.
- [73] Eng, K.Y.; Karol, M.J.; Veeraraghavan, M.; Ayanoglu, E.; Woodworth, C.B.; Pancha, P.; Valenzuela, R.A.: "A wireless broadband ad-hoc ATM local-area network", *Wireless Networks 1 (1995)*, J.C. Baltzer AG, Science Publishers, 1995, S. 161-174.
- [74] Eng, K.Y.; Karol, M.J.; Veeraraghavan, M.; Ayanoglu, E.; Woodworth, C.B.; Pancha, P.; Valenzuela, R.A.: "BAHAMA: A broadband ad-hoc wireless ATM local-area network", *ICC 95, Conference Proceedings, IEEE*, 1995, S. 1216-1223.
- [75] Esparza Sanz, Antonio: "Leistungsuntersuchung von Routingverfahren in Mobile ATM Netzen", Diplomarbeit, Lehrstuhl f. Kommunikationsnetze, TU München, 1998.
- [76] Esseling, N.; Kadelka, A.; Scheibenbogen, M.: "Signalling for a Wireless Mobile Broadband System Demonstrator", *Proceedings 2nd International Distributed Conference on Network Interoperability Madeira '97*, Funchal, Madeira, Portugal, June 1997.

- [77] ETSI: "Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", ETS 300 401, second edition, May 1997.
- [78] ETSI: "Digital Audio Broadcasting (DAB); Interaction channel through GSM, PSTN, ISDN and DECT", TS 101 737, V1.1.1, Januar 2000.
- [79] ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); A guideline for the use of DVB specifications and standards", TR 101 200, V1.1.1, September 1997.
- [80] ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", EN 300 744 V1.2.1, Juli 1999.
- [81] ETSI: "Broadband Radio Access Networks (BRAN): High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 1; Functional Specification", EN 300 652, V1.2.1 (1998-07).
- [82] ETSI: "Broadband Radio Access Networks (BRAN): High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 2; Requirements and architectures for wireless broadband access", TR 101 031, V2.2.1 (1999-01).
- [83] Fankhauser, G.; Kassler, A.; Köchling, C.; Kortelainen, P.; Kreula, R.; Lupper, A.; Mann Pelz, R.; Mark, T.; Monni, E.; Ranta, R.; Sidler, G.: "Mobile Wideband Terminal Applications", *Magic WAND – ACTS Project AC085, WP 6, CEC Deliverable 1D2, September 30, 1996*.
- [84] Farkouh, S. C.: "Managing ATM-based Broadband Networks", *IEEE Communications Magazine, May 1993*, pp. 83-86.
- [85] Fernandes, L.: "Developing a System Concept and Technologies for Mobile Broadband Communications", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 2, no. 1, February 1995.
- [86] Fernandes, L.: "R2067 – MBS, A System Concept and Technologies for Mobile Broadband Communications", *Proceedings RACE Mobile Communications Summit*, Cascais, Portugal, 22-25. Nov. 1995, pp. 62-72.
- [87] Fernandes, C.; Filipe, M.; Anunciada, L.: "Lens antennas for the SAMBA mobile terminal", *Proceedings of the ACTS Mobile Communications Summit 97*, Aalborg, Denmark, October 7-10, 1997.
- [88] Fleury, B.; Leuthold, P.: "Radiowave propagation in mobile communications: an overview of european research", *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, no. 2, February 1996, pp. 70-81.
- [89] Fleury, B.; Bernhard, U.; Heddergott, R.: "Advanced radio channel model for Magic WAND", *Proceedings ACTS Mobile Communications Summit*, November 27-29, 1996, Granada, Spain, pp. 762-771.
- [90] Fritchman, B. D.: "A Binary Channel Characterization using Partitioned Markov Chains", *IEEE Transactions on Inf. Theory*, vol. IT-13, no. 2, April 1967, pp. 221-227.
- [91] Furuya, N.; Mizukawa, T.; Munakata, K.; Sato, A.; Ohkubo, F.; Takahashi, N.; Watanabe, H.; Wakao, M.; Saito, T.: "Field and laboratory measurement for 25 Mbps multimedia mobile communications in 20 GHz band", *Conference Proceedings European Personal Mobile Communications Conference EPMCC'97, ITG-Fachbericht 145*, Bonn, 30. Sept. – 2. Okt. 1997. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag GmbH, 1997, S. 189-194.
- [92] Furuslär, A.; Näslund, J.; Olofsson, H.: "EDGE – Enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution", *Ericsson Review*, no. 1, 1999.
- [93] Gilbert, E. N.: "Capacity of a Burst Noise Channel", *Bell Syst. Techn. Journal*, vol. 39, 1960, pp. 1253-1266.
- [94] GSM Association, <http://www.gsmworld.com>.
- [95] Hansén, H.; Hadjiefthymiades, S.; Immonen, J.; Kaloxylos, A.: "Description of the handover algorithm for the Wireless ATM Network Demonstrator (WAND)", *Proceedings of the ACTS Mobile Summit '96*, Granada, Spain, November 27-29, 1996, pp. 543-548.
- [96] Hasholzner, R.; Drewes, C.; Hammerschmidt, J.S.: "Frequency Domain Differentially Encoded QPSK for OFDMA Broadband Radio in the Local Loop", *Proc. 6th European Conference on Fixed Radio Systems and Networks (ECRR) 1998*, Bergen, Norway, June 1998, pp. 293 – 298.
- [97] Heddergott, R.; Bernhard, U.; Fleury, B.: "Stochastic radio channel model for advanced indoor mobile communication systems", *Proceedings PIMRC 97*, September 1997, Helsinki, Finland, vol. 1, pp. 140-144.

- [98] Hettich, A.; Keller, R.: "Status of the Wireless ATM Standardization at ETSI and ATM Forum", *Proc. of MTT-S Wireless'98 Symposium*, Amsterdam, Netherlands, October 1998.
- [99] Honcharenko, W.; Kruys, J. P.; Lee, D. Y.; Shah, N. J.: "Broadband Wireless Access", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 1, Januar 1997, pp. 20-26.
- [100] Hu, J.: "Applying IP over wATM Technology to Third-Generation Wireless Communications", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 64-67.
- [101] Hunziker, T.; Bernhard, U.P.: "Evaluation of Coding and Modulation Schemes based on Golay Complementary Sequences for Efficient OFDM Transmission", *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference VTC98*, 1998.
- [102] Hutchison, D.J.; Pacifici, G.; Plattner, B.; Stadler, R.; Sventek, J. (Guest Eds.): "Service enabling platforms for networked multimedia systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 9, September 1999.
- [103] Immonen, J.; Lunn, A.; Lemiläinen, J.; Kühnel, T.: "Performance of the mobility enhanced ATM signalling stack in the WAND demonstrator", *Proceedings of the ACTS summit 98*, Rhodes, Greece, June 8-11, 1998.
- [104] Immonen, J.: "Signaling Stack Design for Wireless ATM Access Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 58-63.
- [105] ISO/IEC 13818-3: Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information – Part 3: Audio.
- [106] ISO/IEC 802-11:1999 (IEEE Standard 802.11, 1999 Edition): Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [107] IEEE 802.11a-1999: Supplement to Information technology--Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer (PHY) in the 5 GHz band.
- [108] IEEE 802.11b-1999: Supplement to Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band.
- [109] Iselt, A.: "Ausfallsicherheit und unterbrechungsfreies Ersatzschalten in Kommunikationsnetzen mit Redundanzdomänen", Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [110] ITU-T Rec. E.164, International public telecommunication numbering plan, Geneva, May 1997.
- [111] ITU-T Rec. E.191, B-ISDN numbering and addressing, Geneva, June 1992.
- [112] ITU-T Rec. I.113, Integrated Services Digital Network, General Structure – Vocabulary of Term for Broadband Aspects of ISDN, Geneva, November 1993.
- [113] ITU-T Rec. I.311, B-ISDN General Network Aspects, Geneva, March 1993.
- [114] ITU-T Rec. I.361, B-ISDN ATM layer specification, Geneva, June 1992.
- [115] ITU-T Rec. I.610, B-ISDN Operations and Maintenance Principles and Functions, Geneva, June 1992.
- [116] ITU-T Rec. Q.2931, ATM Network Signalling Specification, Broadband Integrated Services Digital Network (B-ISDN) – Digital Subscriber Signalling System no. 2 (DSS 2) – User-Network Interface (UNI) – Layer 3 specification for basic call/connection control, Geneva, June 1992.
- [117] Jain, R.; Babic, G.: "Performance Testing Effort at the ATM Forum: An Overview", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 110-116.
- [118] Kadel, G.; Kauschke, U.: "HIPERLAN 2 – a future ETSI standard for broadband wireless local access at 5 GHz", *Proceedings ITG-Workshop Wellenausbreitung bei Funksystemen und Mikrowellensystemen*, DLR, Oberpfaffenhofen, 11.-13. Mai 1998.
- [119] Kadel et.al.: "Messungen im 5 GHz-Band für das ATMmobil-Projekt", private Korrespondenz, Deutsche Telekom AG, Technologiezentrum Darmstadt, Oktober 1999.

- [120] Karol, M.J.; Veeraraghavan, M.; Eng, K.Y.: "Implementation and Analysis of Handoff Procedures in a Wireless ATM LAN", *GLOBECOM'96, Conference Proceedings*, IEEE, 1996, S. 216-223.
- [121] Karol, M.J.; Liu, Zhao; Eng, K.Y.: "Distributed-Queueing Request Update Multiple Access (DQRUMA) for Wireless Packet (ATM) Networks", *ICC 95, Conference Proceedings*, IEEE, 1995, S. 1224-1231.
- [122] Kassler, A.; Lupper, A.; Sun, D.: "A QoS Aware Audio/Video Communication Subsystem for Wireless ATM Networks", *Proceedings of the ACTS Summit 98*, Rhodes, Greece, June 8-11, 1998.
- [123] Kassler, A.; Schulthess, P.: "An End-to-End Quality of Service Management Architecture for Wireless ATM Networks", *Proceedings of the HICCS-32*, Maui, Hawaii, USA, January 1999.
- [124] Keeton, K.; Mah, B. A.; Seshan, S.; Katz, R. H.; Ferrari, D.: "Providing Connection-Oriented Network Services to Mobile Hosts", *Proceedings of the USENIX Symposium on Mobile and Location-independent Computing*, Cambridge, Massachusetts, August 1993.
- [125] Keil, K.; Bakker, H.; Schödl, W.; Litzenburger, M.: "Signalling for Handover in a Broadband Cellular ATM System". In: Kühn, P.; Ulrich, R. (Hrsg.): "Broadband Communications – The future of telecommunications", *Proceedings of BC'98 IFIP TC 6 / WG6.2 Fourth International Conference on Broadband Communications, April 1-3 1998, Stuttgart, Germany*. London, Weinheim,...: Chapman&Hall, 1998, S. 145-156.
- [126] Keller, R.; Walke, B.; Fettweis, G.; Bostelmann, G.; Möhrmann, K. H.; Herrmann, Ch.; Kraemer, R.: "Wireless ATM for Broadband Multimedia Wireless Access: The ATMmobil Project", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 5, October 1999, pp. 66-80.
- [127] Kim, Y. C.; Lee, D. E.; Lee, B. J.; Kim, Y. S.; Mukherjee, B.: "Dynamic Channel Reservation Based on Mobility in Wireless ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 47-51.
- [128] Kourtis, A.; Mantakas, C.; Pallis, V.: "Broadband interactive services and digital television at 42 GHz", *International Journal of Communication Systems*, vol. 12. Wiley, 1999, pp. 11-22.
- [129] Krämling, A.; Scheibenbogen, M.: "Influence of dynamic channel allocation on the transmission delay in wireless ATM networks", *International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'98)*, Florence, Italy, October 1998, pp. 169-173.
- [130] Krieger, U.R.; Savoric, M.: "Performance evaluation of handover protocols for data communication in a wireless ATM network", *Proceedings ITC16*, Edinburgh, June 7-11, 1999.
- [131] Kubbar, O.; Mouftah, H. T.: "Multiple Access Control Protocols for Wireless ATM: Problem Definition and Design Objectives", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 93-99.
- [132] Lagrange, X.: "Multitier Cell Design", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 60-64.
- [133] Levine, D.A.; Akyildiz, I.F.; Naghshineh, M.: "The Shadow Cluster Concept for Resource Allocation and Call Admission in ATM-Based Wireless Networks", *Proceedings, ACM Mobicom 1995*, pp. 142-150, Berkeley, California, November 1995.
- [134] Li, J.; Yuan, R.: "Handoff Control in Wireless ATM Networks: An Experimental Study", *Proceedings of ICUPC'96, 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communication, 29.9. – 3.10. 1996, Cambridge, Massachusetts, USA*.
- [135] Lindberger, K.: "Analytical Methods for the Traffical Problems with Statistical Multiplexing in ATM-Networks", In: Jensen; Iversen (Hrsg.): *Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change, ITC-13*. North-Holland, 1991: Elsevier Science Publishers.
- [136] Lindberger, K.: "Dimensioning and Design Methods for Integrated ATM Networks", In: Labetoulle; Roberts (Hrsg.): *ITC-14*. North-Holland, 1994: Elsevier Science Publishers.
- [137] Liu, T.; Bahl, P.; Chlamtac, I.: "Mobility Modeling, Location Tracking, and Trajectory Prediction in Wireless ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 6, August 1998, pp. 922-936.
- [138] Lo, C. N.; Wolff, R. S.; Bernhardt, R. C.: "An estimate of network database transaction volume to support personal communications services", *Proceedings of IEEE ComSoc 1st International Conference on Universal Personal Communication, ICUPC92*, Dallas, September 29 – October 2, 1992, pp. 236-241.

- [139] Lo, C. N.; Wolff, R. S.; Bernhardt, R. C.: "An estimate of network database transaction volume to support voice and data personal communications services", *Proceedings 8th ITC Specialist Seminar on Universal Personal Communication*, Santa Margherita Ligure, Italien, October 12 – 14, 1992, pp. 293-311.
- [140] Magic WAND – ACTS Project AC085 Annual Project Report, Part A, Section 2, Supporting Information. Document Reference 8NMR035a.doc, 21. Feb. 1996.
- [141] May, A.D.: "Traffic Flow Fundamentals", Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.
- [142] Marsan, M.A.; Chiasserini, C.-F.; Lo Cigno, R.; Munafò, M.: "Local and Global Handovers for Mobility Management in Wireless ATM Networks", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 4, no. 5, October 1997, pp. 16-24.
- [143] McDysan, D. E.; Spohn, D. L.: "ATM – theory and application". New York, San Francisco, Washington, ...: McGraw-Hill, 1994.
- [144] McKie, S.: "Outsourcing with ASPs in the Internet Age", *Business Finance*, November 1999, p. 61.
- [145] McTiffin, M.J.; Hulbert, A.P.; Ketseoglou, T.J.; Heimsch, W.; Crisp, G.: "Mobile Access to an ATM Network Using a CDMA Air Interface", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 5, June 1994.
- [146] Mehlhorn, K.; Näher, S.: "LEDA – a platform for combinatorial and geometric computing". Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [147] Meierhofer, J.; Paskalis, S.; Passas, N.; Vali, D.: "Wireless ATM MAC performance results", ACTS Project AC085 The Magic WAND, Deliverable AC085/UOA/CNL/DS/P/026/b1, December 1997.
- [148] Meierhofer, J.; Bernhard, U.P.; Hunziker, T.: "Finite State Radio Channel Model for Indoor Wireless ATM Networks", *Proceedings of IEEE ICT'98, June 1998, Chalkidiki, Greece*.
- [149] Meierhofer, J.: "Data Link Control for Indoor Wireless ATM Networks", *Proceedings of Wireless 98, July 1998, Calgary, Canada*, pp. 517-525.
- [150] Mikkonen, J.; Corrado, C.; Evci, C.; Prögler, M.: "Emerging Wireless Broadband Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 2, February 1998, pp. 112-117.
- [151] Mikkonen, J.; Aldis, J.; Awater, G.; Lunn, A.; Hutchison, D.: "The Magic WAND – Functional Overview", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 6, August 1998, pp. 953-972.
- [152] Minoli, D.; Golway, T.: "Planning & Managing ATM Networks". Greenwich: Manning, 1996.
- [153] Mitts, H.; Hansén, H.; Immonen, J.; Veikkolainen, S.: "Lossless handover for wireless ATM", *MO-NET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996)*, no. 3, pp. 299-312.
- [154] Mitts, H.; Hansén, H.; Immonen, J.: "Lossless handover for wireless ATM", *Proceedings of Mobicom'96*, New York, U.S., November 1996, pp. 85-96.
- [155] MPEG: <http://www.cselt.it/mpeg>.
- [156] MPEG Layer 3: <http://www.iis.fhg.de/amm>.
- [157] Nanda, S.: "Teletraffic Models for urban and suburban microcells: cell sizes and handoff rates", *Proceedings 8th ITC Specialist Seminar on Universal Personal Communication*, Santa Margherita Ligure, Italien, October 12 – 14, 1992, pp. 251-260.
- [158] Naghshineh, M.; Willebeek-LeMair, M.: "End-to-End QoS Provisioning in Multimedia Wireless/Mobile Networks Using an Adaptive Framework", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 72-81.
- [159] Nagy, Andrea: "Vergleichende Untersuchung und Simulation von verlustfreien Handoververfahren für Mobiles ATM", Diplomarbeit, Lehrstuhl f. Kommunikationsnetze, TU München, 1998.
- [160] Nakamura, H.; Tsuboya, H.; Nakano, M.; Nakajima, A.: "Applying ATM to Mobile Infrastructure Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 1, January 1998, pp. 66-73.
- [161] Naylor, J.; Gilmurray, D.; Porter, J.; Hopper, A.: "Low-Latency Handover in a Wireless ATM LAN", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 6, August 1998, pp. 909-921.
- [162] Nettleton, R. W.; Schloemer, G. R.: "Self Organizing Channel Assignment for Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 46-51.

- [163] Ngoh, L.-H.; Li, H.; Wang, W.: "An Integrated Multicast Connection Management Solution for Wired and Wireless ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 52-59.
- [164] Niehaus, D.; Battou, A.; MacFarland, A.; Decina, B.; Dardy, H.; Sirkay, V.; Edwards, B.: "Performance Benchmarking of Signalling in ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 134-143.
- [165] Niemi, M.; Kruys, J.: "Wireless ATM Standardization", *Proceedings of the ACTS Mobile Summit '96*, Granada, Spain, November 1996, pp. 250-255.
- [166] Nishio, M; Shinagawa, N.; Kobayashi, T.: "A Lossless Handover Method for Video Transmission in Mobile ATM Networks and Its Subjective Quality Assessment", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 38-44.
- [167] Nokia Special: "Von der Infrastruktur bis zur Anwendung", *ntz*, 53. Jahrgang, Heft 5/2000, pp. 36-41.
- [168] Onvural, R.; Cherukuri, R.: "Signaling in ATM Networks". Boston, London: Artech House, 1997.
- [169] Ovum: "The Bandwidth Explosion", August 1999.
- [170] Pahlavi, K.; Zahedi, A.; Krishnamurthy, P.: "Wideband Local Access: Wireless LAN and Wireless ATM", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 34-40.
- [171] Park, S.; Lee, S.; Song, Y.-J.; Cho, D.-H.; Dhong, Y.-B.: "Performance improvements of forward handover based on path rerouting and extension in wireless ATM", *IEICE Transactions on Communications*, Vo. E82-B, No. 9, September 1999, pp. 1485-1495.
- [172] Passas, N.; Paskalis, S.; Vali, D.; Merakos, L.: "Quality-of-Service-Oriented Medium Access Control for Wireless ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 42-50.
- [173] Pavlidis, I.E.; Marias, I.F.; Pronios, N.B.: "Managing a Wireless ATM Network", *ACTS Mobile Communications Summit*, November 27-29, 1996, Granada, Spain.
- [174] Petras, D.; Krämling, A.; Hettich, A.: "Design Principles for a MAC Protocol of an ATM Air Interface", *ACTS Mobile Communications Summit*, November 27-29, 1996, Granada, Spain.
- [175] Petras, D.: "Air Interface of an ATM Radio Access Network". In: Kühn, P.; Ulrich, R. (Hrsg.): "Broadband Communications – The future of telecommunications", *Proceedings of BC'98 IFIP TC 6 / WG6.2 Fourth International Conference on Broadband Communications, April 1-3 1998, Stuttgart, Germany*. London, Weinheim,...: Chapman&Hall, 1998, S. 133-144.
- [176] Plassmann, D.; Kadelka, A.: "Network Handover for Wireless ATM Systems", *ACTS Mobile Communications Summit*, November 27-29, 1996, Granada, Spain.
- [177] Pollini, G. P.; I, Ch.-L.: "A profile-based location strategy and its performance", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 15, no. 8, October 1997, pp. 1415-1424.
- [178] Ponce, B.: "The impact of MP3 and the future of digital entertainment products", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 9, September 1999, pp. 68-70.
- [179] Porter, J.; Hopper, A.: "An ATM based protocol for Wireless LANs", ORL Techn. Report 94.2, Olivetti Research Ltd./University of Cambridge Computer Laboratory, England, April 19, 1994.
- [180] Porter, J.; Hopper, A.; Gilmurray, D.; Mason, O.; Naylor, J.; Jones, A.: "The ORL Radio ATM System, Architecture and Implementation", ORL Techn. Report 96.5, Olivetti and Oracle Research Laboratory/University of Cambridge Computer Laboratory, England, January 16, 1996.
- [181] Prögler, M.; Evci, C.; Umehira, M.: "Air Interface Access Schemes for Broadband Mobile Systems", *IEEE Communications Magazine*, vol 37, no. 9, September 1999, pp. 106-115.
- [182] Prycker, M. de: "Asynchronous Transfer Mode", New York: Prentice Hall, 1993.
- [183] Ramjee, R.; La Porta, T. F.; Kurose, J.; Towsley, D.: "Performance Evaluation of Connection Rerouting Schemes for ATM-Based Wireless Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 3, June 1998, pp. 239-261.
- [184] Ray, S.: "Network Segment Mobility in ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 3, March 1999, pp. 38-45.

- [185] Raychaudhuri, D.: "Wireless ATM Networks: Architecture, System Design and Prototyping", *IEEE Personal Communications Magazine*, August 1996.
- [186] Raychaudhuri, D.; Wilson, N. D.: "ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communication Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 8, October 1994.
- [187] Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation: "Verfahren zur Vergabe von Frequenzen für die Funkanbindung von Teilnehmeranschlüssen als Punkt-zu-Mehrpunkt-Richtfunk (WLL-PMP-Rifu)", *Entscheidung der Präsidentenkammer*, 3. Juni 1998.
- [188] Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation: "Eröffnung der Ausschreibungsverfahren zur Vergabe von Frequenzen im Bereich 3410 MHz bis 3580 MHz und im 26-GHz-Bereich für die Funkanbindung von Teilnehmeranschlüssen als Punkt-zu-Mehrpunkt-Richtfunk (WLL-PMP-Rifu)", *Entscheidung der Präsidentenkammer*, 25. März 1999.
- [189] Reininger, D.; Izmailov, R.; Rajagopalan, B.; Ott, M.; Raychaudhuri, D.: "Soft QoS Control in the WATMnet Broadband Wireless System", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 1, February 1999, pp. 34-43.
- [190] Sfikas, G.; Apostolas, C.; Tafazolli, R.: "The U.K. LINK-PCP Approach to the Wireless ATM System", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 11, November 1997, pp. 60-70.
- [191] Siebenhaar, R.: "Verkehrslenkung und Kapazitätsanpassung in ATM-Netzen mit virtuellen Pfaden", Dissertation, Technische Universität München, 1996.
- [192] Spielvogel, J. A.: "Providing Resilience in Optical Transport Networks", *Keynote speech 2nd International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks DRCN2000*, Munich, Germany, 9.-13.4.2000.
- [193] Steele, R.: "Personal Communication Networks", *Tutorium A, IEEE 1994 International Zurich Seminar on Digital Communications, Mobile Communications – Advanced Services, Systems and Components*, Zürich, 8.-11. März 1994.
- [194] Steffan, R.: "Adaptive Generative Radio Channel Models", *Proceedings IEEE Personal Indoor Mobile Radio Conference PIMRC'94*, Den Haag, September 1994, pp. 268-273.
- [195] Tabbane, S.: "Location Management Methods for Third-Generation Mobile Systems", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 72-84.
- [196] Takabe, Y.; et. al.: "Multimedia Mobile Access Communication (MMAC) study committee summary report", *Proceedings MDMC'96*, July 1996, pp. 720-724.
- [197] Taylor, L.; Titmuss, R.; Lebre, C.: "The Challenges of seamless handover in future mobile multimedia networks", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 2, April 1999, pp. 32-37.
- [198] Toh, C.-K.: "The design and implementation of a hybrid handover protocol for multimedia wireless LANs", *Proceedings MOBICOM'95*, Berkeley, Nov. 13-15, 1995.
- [199] Toh, C.-K.: "Crossover switch discovery for wireless ATM LANs", *MONET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996)*, no. 2, pp. 141-165.
- [200] Toh, C.-K.: "A hybrid handover protocol for local area wireless ATM networks", *MONET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996)*, no. 3, pp. 313-334.
- [201] Tolonen, M.; Araki, M.: "AWACS project field trial platform", *ACTS Mobile Summit '97*, Aalborg, Denmark, October 7-10, 1997, pp. 369-373.
- [202] Tolonen, M.; Araki, M.: "AWACS 19 GHz Wireless ATM field trial results", *ACTS Mobile Summit '98*, Rhodes, Greece, June 8-11, 1998, pp. 536-442.
- [203] Trautwein, U.; Blau, K.; Brückner, D.; Herrmann, F.; Richter, A.; Sommerkorn, G.; Thomä, R.: "Radio Channel Measurement for Realistic Simulation of Adaptive Antenna Arrays". *Proceedings of the 1998 Int'l Zurich Seminar on Broadband Communications*, Zurich, Switzerland, Feb. 1998
- [204] Umehira, M.; Nakura, M.; Sato, H.; Hashimoto, A.: "ATM Wireless Access for Mobile Multimedia: Concept and Architecture", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 3, no. 5, October 1996, pp. 39-48.
- [205] UMTS Task Force Report, Brüssel, 1. März 1996.
- [206] Urie, A.; Streeton, M.; Mourot, C.: "An Advanced TDMA Mobile Access System for UMTS", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 2, no. 1, February 1995.

- [207] Veeraraghavan, M.; La Porta, Th. F.; Ramjee, R.: "A Distributed Control Strategy For Wireless ATM Networks", *ICC 95, Conference Proceedings*, IEEE, 1995, S. 750-755.
- [208] Veitch, P.; Hawker, I.; Smith, G.: "Administration of restorable Virtual Path mesh networks", *IEEE Communications Magazine*, December 1996, pp. 96-101.
- [209] Vögel, H.-J.: "Downloading MP3 from the Internet", personal experience, März 2000.
- [210] Vornefeld, U.; Walke, Ch.; Walke, B.: "SDMA Techniques for Wireless ATM", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 11, November 1999, pp. 52-57.
- [211] Walke, B.: "Traffic Problems in Mobile Radio Networks", *AEÜ*, vol. 47, no. 5/6, 1993, pp. 445-455.
- [212] Walke, B.: "Mobile Radio Networks – Networking and Protocols". Chichester: John Wiley & Sons, 1999.
- [213] Walke, B; Petras, D.; Plassmann, D.: "Wireless ATM: Air Interface and Network Protocols of the Mobile Broadband System", *IEEE Personal Communications Magazine*, August 1996.
- [214] Walke, B.: "Breitbandige Mobilkommunikation für Multimedia auf ATM-Basis", *ntz*, Heft 8/1998. VDE-Verlag, 1998, S. 58-61.
- [215] WAP-Forum: "Official Wireless Application Protocol: The Complete Standard", Chichester: John Wiley & Sons, 1999.
- [216] Werner, M.: "ATM Concepts for Satellite Personal Communication Networks", *Proceedings NOC '96, European Conference on Networks and Optical Communications*, June 25-28, 1996, Heidelberg, Germany.
- [217] Yonggang, D.; Herrmann, Ch.; May, K. P.; Hulyalkar, S. N.; Evans, D.: "Wireless ATM LAN With and Without Infrastructure", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 4, April 1998, pp. 90-95.
- [218] Yoon, C.: "Mobile multimedia communications", *Proceedings MDMC'96*, July 1996, pp. 716-719.
- [219] Younger, E.J.; Bennett, K.H.; Hartley-Davies, R.: "A model for a broadband cellular wireless network for digital communications", *Computer Networks and ISDN Systems 26 (1993)*, pp. 391-402.
- [220] Yu, O.T.W.; Leung, V.C.M.: "Extending B-ISDN to support user terminal mobility over an ATM-based Personal Communication network", *Globecom '95, Conference Proceedings*, IEEE, Singapore, 13-17 November 1995, pp. 2289-2293.
- [221] Yu, Oliver T.W.; Leung, Victor C.M.: "Connection architecture and protocols to support efficient handoffs over an ATM/B-ISDN personal communications network", *MONET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996), no. 2*, pp. 123-139.
- [222] Yuan, R.; Biswas, S.K.; French, L.J.; Raychaudhuri, D.: "A signaling and control architecture for mobility support in wireless ATM networks", *MONET – Mobile Networks and Applications Volume 1 (1996), no. 3*, pp. 287-298.
- [223] Zander, J.: "Radio Resource Management in Future Wireless Networks: Requirements and Limitations", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no.8, August 1997, pp. 30-36.
- [224] Zonoozi, M. M.; Dassanayake, P.: "User Mobility Modeling and Characterization of Mobility Patterns", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol. 15, no. 7, September 1997, pp. 1239-1252.
- [225] Zorzi, M.; Rao, R. R.: "On the impact of burst errors on Wireless ATM", *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 4, August 1999, pp. 65-76.

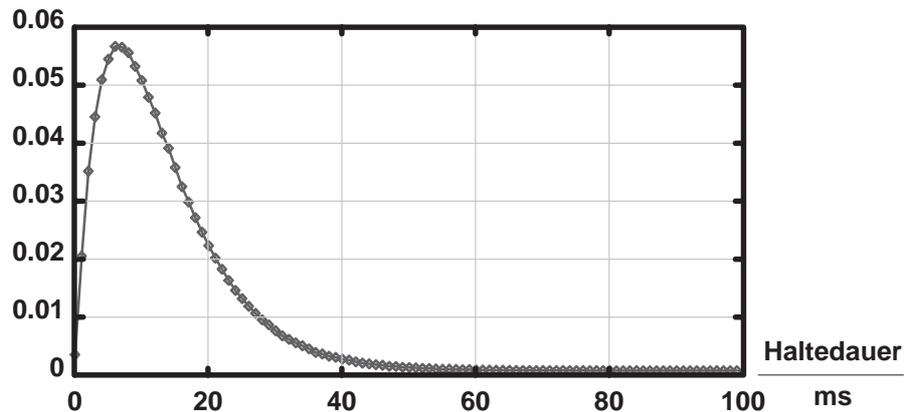
Rel. Häufigkeit

Abb. 5.1: Wahrscheinlichkeitsdichte der Zustandshaltedauer

Diese ergodischen Wahrscheinlichkeiten werden im Vektor $\mathbf{p}^* = [p_1^* \ p_2^* \ \dots \ p_m^*]^T$ notiert, für den gilt:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{P} \mathbf{p}^* \quad (55)$$

Über diese stationären Zustandswahrscheinlichkeiten der eingebetteten Markovkette lassen sich mit den mittleren Zustandshaltedauern $\mathbf{E}[\boldsymbol{\tau}] = [E[\tau_1] \ E[\tau_2] \ \dots \ E[\tau_m]]^T$ der m Zustände nun die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten $\mathbf{p}_s^* = [p_{s1}^* \ p_{s2}^* \ \dots \ p_{sm}^*]^T$ des Semi-Markov-Prozesses und damit des Kanalmodells berechnen:

$$\mathbf{p}_s^* = \frac{1}{\mathbf{E}[\boldsymbol{\tau}]^T \mathbf{p}^*} \mathbf{diag}(E[\tau_i]) \mathbf{p}^* = \frac{1}{\sum_{j=1}^m p_j^* E[\tau_j]} [p_1^* E[\tau_1] \ p_2^* E[\tau_2] \ \dots \ p_m^* E[\tau_m]]^T \quad (56)$$

Da im Modell alle Zustände dieselbe Verteilung der Zustandshaltedauern besitzen (siehe Kapitel 2.2.2), gilt für deren Erwartungswerte:

$$E[\tau_i] = E[\tau] \quad (57)$$

Die ergodischen Wahrscheinlichkeiten der Semi-Markovkette sind damit identisch mit den stationären Zustandswahrscheinlichkeiten der eingebetteten Markovkette:

$$\mathbf{p}_s^* = \mathbf{p}^* \quad (58)$$

Diese stationären Zustandswahrscheinlichkeiten des Semi-Markovprozesses sollten bei einer guten Modellimplementierung übereinstimmen mit den gemessenen Ereigniswahrscheinlichkeiten der Leistungsstufen, mit denen das Schwundsignal diskretisiert wurde. Das Histogramm in Abb. 5.2 zeigt die numerische Auswertung der eingebetteten Markovkette mit Zustandsübergangsmatrix \mathbf{P}' anhand obiger Herleitung. Die zusätzliche Kurve gibt die

Wahrscheinlichkeitsdichte der Leistungsstufen an, wie sie vom implementierten Modell erzeugt werden. Modell und Implementierung zeigen eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Wahrscheinlichkeitsdichte (siehe Abb. 2.1).

Rel. Häufigkeit

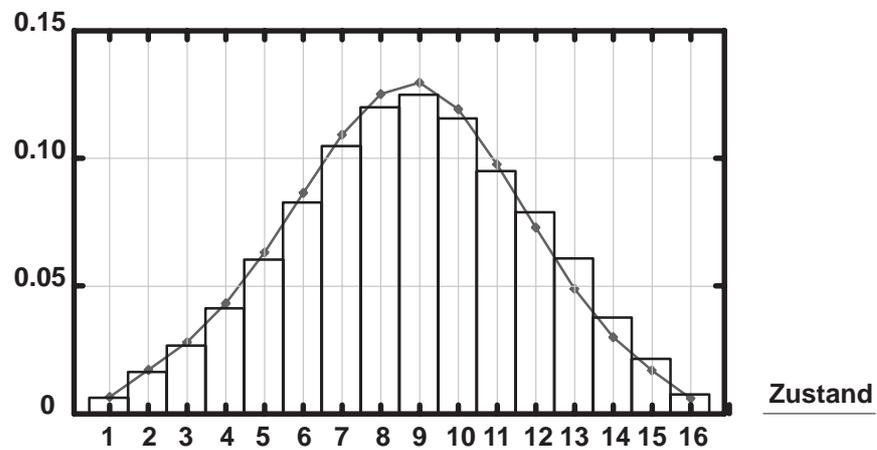


Abb. 5.2: Zustandswahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeitsdichte der Leistungsstufen