





# Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme

Christian Plenge

# **AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION**

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke

Plenge, Christian:

Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme

1. Auflage Aachen:

Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997

(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 10)

ISBN 3-86073-389-3

© 1997 Christian Plenge

Verlag der Augustinus Buchhandlung

Pontstraße 66/68

52062 Aachen

Druck: Druckerei Paletti, Aachen

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

"D 82 (Diss. RWTH Aachen)"

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Das DECT-System (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) ist seit 1991 als ETSI<sup>1</sup> Standard-Entwurf für ein digitales Schnurlossystem bekannt. Seit 1994 werden DECT-Systeme für PCS<sup>2</sup>- und RLL<sup>3</sup>-Anwendungen standardisiert. Versuche zur Erprobung von DECT-Systemen laufen seit 1995. Im Unterschied zum zellularen GSM<sup>4</sup> ist es aufgrund der maximal zulässigen Sendeleistung von 250 mW auf Kleinzellen beschränkt. Durch die dynamische, dezentrale Vergabe der Frequenz- und Zeitmultiplexkanäle (ohne Zellplanung) und den mobilstationsgesteuerten Kanalwechsel (Handover) sind DECT-Systeme sehr flexibel für unterschiedliche Anwendungen einsetzbar. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Anwendung des DECT-Systems als öffentliches Zugangsnetz. Es werden durch analytische Berechnung und stochastische Simulation Dienstgüte und Kapazität öffentlicher DECT-Netze in verschiedensten Szenarien mit und ohne mobile DECT-Teilnehmer bestimmt.

Ein wesentlicher Beitrag der Arbeit besteht in der Entwicklung eines stochastischen Simulators zur Leistungsbewertung von DECT-Systemen. Dieser beinhaltet in einmaliger Kombination alle funk- und systemtechnischen Elemente, die das Verhalten von DECT-Systemen bestimmen. Der *funktechnische* Teil umfaßt Modelle zur Bestimmung der Funkausleuchtung in detaillierten Szenarien in Gebäuden und im Freien (im Zugangsnetz). Zur Bestimmung der Empfangssituation ortsfester und mobiler Terminals werden dabei die Wechselwirkungen verschiedener, auch nicht synchroner DECT-Systeme innen und außen berücksichtigt. Es wurden für klein- und großflächige Szenarien Strahlverfolgungsmethoden und neueste empirische Ausbreitungsmodelle implementiert, um deterministische und stochastische Funkausbreitungsverfahren nebeneinander benutzen zu können. Für den *systemtechnischen* Teil des Simulators wurden Modelle für das Verhalten aller Elemente von DECT-Systemen entwickelt. Das beinhaltet die genaue Umsetzung der

---

<sup>1</sup>European Telecommunications Standards Institute

<sup>2</sup>Personal Communications System (mikrozellulARES Mobilfunksystem)

<sup>3</sup>Radio in the Local Loop (drahtloses Zugangsnetz für ortsfeste Telekommunikationsteilnehmer)

<sup>4</sup>Global System for Mobile communication

DECT-Protokolle für die Funk- und Zeitkanalnutzung, für den Aufbau und Betrieb von Verbindungen und den Handover.

Die Simulation von DECT-Systemen wurde zur Bestimmung von verkehrstheoretischen Leistungskenngrößen für alle untersuchungsbedürftigen Anordnungen von DECT-Systemen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Teilen durch mathematische Analyse von Wartemodellen validiert. Die dabei entwickelten originellen Modellierungsansätze und Berechnungsverfahren bilden einen zweiten wichtigen Beitrag. Vorveröffentlichte Teilergebnisse dieser bisher beispiellosen Arbeit sind mit großem Interesse aufgenommen worden und haben die Regulierungsentscheidung in Europa zugunsten der Lizenzierung von DECT-Systemen für öffentliche Zugangsnetze entscheidend beeinflusst.

## ABSTRACT

---

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) was standardized as an ETSI<sup>1</sup> standard for digital cordless phones and systems in 1992. Since 1994 DECT standards for PCS<sup>2</sup> and RLL<sup>3</sup> applications are under investigations and since 1995 such systems are used in tests and trials. In contrast to GSM<sup>4</sup> the transmission power of DECT systems is limited to 250 mW so that only small cell-sizes are possible. By the application of dynamic (de-central) channel selection and mobile controlled handover, DECT systems are very flexible for being used in a variety of applications without a need for frequency and cell planning.

This thesis concentrates on public DECT applications (PCS and RLL). The grade of service and the capacity of DECT systems are determined in all relevant scenarios using analytical models and stochastic simulations.

The development of a powerful DECT system simulator for performance evaluation is an important contribution of this thesis. It includes all aspects of radio propagation and of the DECT system itself, that have impact on the system behaviour. For the determination of reception conditions of fixed and mobile terminals, models for the coverage prediction in buildings and in the local loop were implemented. They consider the influences of asynchronous DECT systems indoor and outdoor. Raytracing as well as newest empirical propagation models were realized to enable the use of deterministic and stochastic methods simultaneously. Within the system simulator models for all relevant system elements were developed and implemented according to standardized protocols of the DECT air interface e.g. for channel selection and handover.

System simulations were used for the performance evaluation of public DECT systems in all necessary scenarios. The results were validated by new analytical models using queueing systems. These models are the essential scientific contribution of this thesis. Some pre-published results from this thesis had a strong influence on the regulatory decision for public DECT systems in Europe.

---

<sup>1</sup>European Telecommunications Standards Institute

<sup>2</sup>Personal Communications System

<sup>3</sup>Radio in the Local Loop

<sup>4</sup>Global System for Mobile Communication



# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Kurzfassung und <i>Abstract</i></b>	<b>i</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	2
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Realisierung funkbasierter Zugangsnetze</b>	<b>5</b>
2.1 Eigenschaften der technischen Systeme . . . . .	5
2.2 Konfigurationen öffentlicher DECT-Systeme . . . . .	8
<b>3 Das DECT - Referenzsystem</b>	<b>15</b>
3.1 Logische Gruppierung des DECT-Systems . . . . .	15
3.1.1 Globales Netz . . . . .	15
3.1.2 Lokales Netz . . . . .	16
3.1.3 Elemente des DECT-Netzes . . . . .	17
3.2 Physikalische Gruppierung des DECT-Systems . . . . .	18
3.2.1 DECT Fixed Part . . . . .	18
3.2.2 DECT Portable Part . . . . .	19
3.3 Spezifische DECT-Konfigurationen . . . . .	19
3.3.1 PSTN/ISDN Referenzkonfiguration . . . . .	19
3.3.2 GSM Referenzkonfiguration . . . . .	21
3.4 Multicell-Protokollsystem . . . . .	22
<b>4 DECT - Protokollarchitektur</b>	<b>23</b>
4.1 DECT-Protokollschichten im Überblick . . . . .	23
4.1.1 Vergleich von DECT- und ISO/OSI-Referenzmodell . . . . .	23
4.1.2 Physical Layer . . . . .	25
4.1.3 Medium Access Control Layer . . . . .	26
4.1.4 Data Link Control Layer . . . . .	26
4.1.5 Network Layer . . . . .	27

4.1.6	Lower Layer Management Entity . . . . .	27
4.2	Physikalische Schicht in DECT . . . . .	28
4.2.1	FDMA-Verfahren und Modulationsverfahren . . . . .	29
4.2.2	TDMA-Verfahren . . . . .	29
4.2.3	Physikalische Pakete und Kanäle . . . . .	31
4.3	DECT Vielfachzugriff - Medium Access Control Layer . . . . .	34
4.3.1	Zell- und Cluster-Funktionen . . . . .	34
4.3.2	Dienstzugangspunkte des MAC Layers . . . . .	36
4.3.3	MAC – Multiplex-Funktionen . . . . .	40
4.3.4	Zustände der Mobilstation . . . . .	45
4.3.5	Zustände der Feststation . . . . .	46
4.3.6	Bearertypen . . . . .	47
4.3.7	Verbindungsarten/MAC-Connection . . . . .	48
4.4	Verbindungsaufbau . . . . .	50
4.4.1	Connection Setup . . . . .	50
4.4.2	Bearer Setup . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Radio Resource Management</b>	<b>53</b>
5.1	Handover . . . . .	53
5.1.1	Handover im DECT-System . . . . .	53
5.1.2	Handoverkriterien . . . . .	54
5.2	Dynamische Kanalwahl . . . . .	57
5.2.1	DCA- vs. FCA-Systeme . . . . .	58
5.2.2	Die Wahl der stärksten Feststation durch die Mobil- station . . . . .	59
5.2.3	Die Wahl des ruhigsten Kanals . . . . .	60
5.2.4	Blind Slots . . . . .	62
5.2.5	Kanalverdrängung und “Nah-/Fern-Effekt” . . . . .	63
<b>6</b>	<b>DECT - Relais</b>	<b>66</b>
6.1	Einsatzmöglichkeiten von Relais . . . . .	66
6.2	Aufbau einer Relaisstation . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Methoden zur Funkprädiktion</b>	<b>72</b>
7.1	Deterministische Verfahren . . . . .	72
7.2	Die empirischen Modelle . . . . .	74
7.2.1	Funkprädiktion im Freien . . . . .	75
7.2.2	Das COST Multi-Slope-Modell . . . . .	76

7.2.3	Funkprädiktion in Gebäuden . . . . .	80
7.2.4	Eindringen von Funkwellen in Gebäude . . . . .	82
7.2.5	Vergleich der Methoden zur Funkprädiktion . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Simulationstool DESI</b>	<b>88</b>
8.1	Das Kanalmodell des Simulators . . . . .	89
8.1.1	Das Bitfehlermodell . . . . .	90
8.2	Algorithmen von Kanalwahl und Handover . . . . .	91
8.3	Das Modell der Lastgeneration . . . . .	92
8.4	Die Szenariobibliothek . . . . .	95
8.4.1	Klassen- und Datenstruktur . . . . .	96
8.5	Modellierung der Mobilität . . . . .	97
8.6	Struktur des Simulators . . . . .	98
8.7	Parameter der Leistungsbewertung . . . . .	99
<b>9</b>	<b>Wechselwirkung konkurrierender DECT-Systeme</b>	<b>101</b>
9.1	Einleitung . . . . .	101
9.2	Sliding Collision Effekte . . . . .	102
9.3	Gegenseitige Beeinflussung asynchroner DECT-Systeme . . . . .	102
9.3.1	Störung von zwei Slots im asynchronen Betrieb . . . . .	103
9.3.2	Aufhebung der Up-/Downlinktrennung . . . . .	103
9.3.3	Einfluß asynchroner Systeme auf die Kapazität . . . . .	104
9.4	Anwendungen mit Einbuße der System-Kapazität . . . . .	106
9.4.1	Indoor-Beispiel . . . . .	106
9.4.2	Outdoor-Beispiel . . . . .	107
9.5	Maßnahmen zur Verbesserung der Kapazität . . . . .	108
9.6	Bestehende Kenntnisse über die Beeinflussung . . . . .	109
9.7	Konkurrierende Betreiber im gleichen Gebiet . . . . .	112
<b>10</b>	<b>Verkehrstheoretische Analyse von DCA-Mobilfunksystemen</b>	<b>116</b>
10.1	Das M/M/N Verlustsystem - Erlang-B Formel . . . . .	116
10.2	Interferenz- und Kapazitätsbegrenzung . . . . .	118
10.2.1	Kapazitätsbegrenzung . . . . .	119
10.2.2	Interferenzbegrenzung . . . . .	120
10.3	Kapazitätsbegrenzung einer isolierten Feststation . . . . .	121
10.4	Kapazitätsbegrenzung bei gemischtem Verkehr . . . . .	122
10.5	Kapazitätsbegrenzung bei überlappenden Zellen . . . . .	126

10.6	Blockierwahrscheinlichkeit bei Interferenzbegrenzung . . . . .	130
10.6.1	Blockierwahrscheinlichkeit aus Sicht der RFPs . . . . .	132
10.6.2	Blockierwahrscheinlichkeit aus Sicht der PPs . . . . .	134
10.6.3	Berücksichtigung von Kanalwiederverwendung . . . . .	135
<b>11</b>	<b>Methodik der simulativen Untersuchung</b>	<b>145</b>
<b>12</b>	<b>Simulationsergebnisse für einen DECT-Betreiber</b>	<b>153</b>
12.1	Kalibrierung des Simulators . . . . .	153
12.1.1	Reichweiten von DECT-Systemen für RLL . . . . .	153
12.1.2	Festlegung der Feststationsdichte . . . . .	155
12.1.3	Untersuchung der erforderlichen Szenario-Ausdehnung	155
12.2	Simulationsergebnisse für großflächige DECT-Systeme . . . . .	156
12.2.1	Tragbarer Verkehr mit Standardantennen . . . . .	158
12.2.2	Nutzung der Simulationsergebnisse zur Kapazitätsbe- rechnung für andere RFP-Dichten . . . . .	162
12.2.3	Tragbarer Verkehr mit sektorisierten Antennen . . . . .	164
12.2.4	Tragbarer Verkehr mit gerichteten Antennen am End- gerät . . . . .	170
12.2.5	Tragbarer Verkehr bei anteiligem ISDN-Verkehr . . . . .	173
12.2.6	Auswirkungen verschiedener Empfängermodelle . . . . .	177
12.3	Untersuchungen mit konkreter Morphostruktur . . . . .	181
<b>13</b>	<b>Simulationsergebnisse für mehrere konkurrierende Betrei- ber</b>	<b>186</b>
13.1	Simulationsszenarien . . . . .	186
13.1.1	Szenario mit versetzt positionierten Feststationen . . . . .	187
13.1.2	Szenario mit co-positionierten Feststationen . . . . .	188
13.1.3	Szenario mit unterschiedlichen RFP-Dichten pro Be- treiber . . . . .	188
13.2	Ergebnisse für synchron konkurrierende Systeme . . . . .	190
13.2.1	Tragbarer Verkehr bei einem und zwei Betreibern . . . . .	190
13.2.2	Beschränkung der zulässigen Frequenzen bei konkur- rierendem Betrieb . . . . .	193
13.2.3	Vergleich von co-positionierten und versetzt positio- nierten Feststationen . . . . .	195
13.2.4	Vergleich von verschiedenen Empfängermodellen pro System . . . . .	197

- 13.2.5 Tragbarer Verkehr bei unterschiedlichen RFP-Dichten  
pro System . . . . . 199
- 13.2.6 Unterschiedliche Empfängermodelle bei Systemen mit  
verschiedener Feststationsdichte . . . . . 202
- 13.3 Ergebnisse für asynchron konkurrierende Systeme . . . . . 203
  - 13.3.1 Asynchronität bei versetzter Anordnung der Feststa-  
tionen . . . . . 203
  - 13.3.2 Asynchrone Systeme bei co-positionierten Feststationen 207
- 14 Beeinflussung öffentlicher und privater DECT-Systeme 213**
  - 14.1 Tragbarer Verkehr im öffentlichen System . . . . . 215
  - 14.2 Beeinflussung des öffentlichen Betreibers . . . . . 216
  - 14.3 Beeinflussung der privaten Systeme . . . . . 216
  - 14.4 Asynchrone Systeme innerhalb eines Gebäudes . . . . . 220
  - 14.5 Fazit der Untersuchungen zu konkurrierenden DECT-Systemen 222
- 15 Bewertung eines Relais-Netzes im Freien 223**
- 16 Zusammenfassung und Ausblick 227**
- A Liste der Abkürzungen 230**
- B Feste Parameter der Simulationen 233**
- Nachwort 243**
- Lebenslauf 245**



# Einleitung

Die Telekommunikationsbranche in Deutschland wurde lange Jahre geprägt durch die Deutsche Telekom als monopolistischer Netz- und Diensteanbieter. Die weitsichtige Entscheidung der Europäischen Kommission, durch Liberalisierung von Märkten und den dadurch forcierten Wettbewerb die europäische Wirtschaft auf den Weltmärkten konkurrenzfähig zu machen, hat vor allem in der Telekommunikation, speziell im Mobilfunk, durchschlagenden Erfolg gehabt. Durch einen einheitlichen europäischen Standard konnten Mobilfunksysteme nach dem GSM-Standard (*Global System for Mobile Communication*), ausgehend von einem großen europäischen Markt, weltweit Erfolge verbuchen. Aber nicht nur für die Hersteller, sondern auch für Mobilfunkkunden und neue Betreiber in Europa ist die geschilderte Entwicklung äußerst günstig verlaufen. Die letzten Stufen der Liberalisierung bis 1998 sollen dann in gleicher Weise zu einem verbesserten Angebot an Systemen und Diensten für den normalen Sprach- und Datentelefondienst führen.

Zahlreiche Firmen, vornehmlich in Joint-Ventures zusammengeschlossen, wollen sich ihren Anteil an diesem Milliardenmarkt sichern. Dabei plant man in erster Linie, auf bereits existierenden Netz-Infrastrukturen aufzubauen. Versorgungsunternehmen (z.B. die Viag, das RWE oder die VEBA) verfügen entlang ihrer Stromnetze bereits über viele tausend Kilometer Glasfaserleitungen. Ein weiterer begehrter Kooperationspartner ist die Deutsche Bahn AG. Entlang der Gleise laufende Datenleitungen bzw. die Wegerechte ermöglichen hier einen Zugang zu den besonders begehrten Innenstadtbereichen. Als weitere potentielle Festnetzbetreiber sind vor allem auch die Mobilfunkbetreiber zu nennen, die schon über ein gut ausgebautes Backbone-Netz verfügen.

Während im Fernnetz einige der Telekom-Konkurrenten bereits heute über genügend Know-How und Kapazität verfügen, um auf dem länger schon liberalisierten Markt der Corporate Networks eine Chance zu haben, fehlen konkurrenzfähige Ortsnetzstrukturen vollständig. Alle Betreiber müssen bis

1998 entweder eigene Strukturen aufbauen oder die Ortsnetze der Telekom mieten.

Bei der Deutschen Telekom werden die Endteilnehmer im Ortsnetz über Kupferleitungen an das Fernsprechnetzt angeschlossen. Angesichts des gegenwärtigen Standes der Technik sicherlich eine sehr kostenintensive, langwierige und unflexible Methode. Neue Betreiber sind darauf angewiesen, schnell und kostengünstig Anschlüsse zu schaffen, um gegenüber der Telekom konkurrenzfähig zu werden. Eine Alternative bieten hier nur funkbaasierte Lösungen.

Mit DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunication*)<sup>1</sup> existiert seit 1992 ein europaweit standardisiertes System für drahtlose Telefonie. Der Standard weist eine intelligente, dezentrale und einfache Struktur auf, wodurch DECT-Systeme für unterschiedliche Anwendungen (z.B. drahtlose Nebenstellenanlagen und LANs) eingesetzt werden können und zudem preisgünstig sind. Durch die ständige Evolution des Standards durch die ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) werden DECT-Systeme integrativer Bestandteil von GSM, DCS1800 oder ISDN Netzen. Drahtlose Zugangsnetze (*Radio in the Local Loop - RLL*) mit DECT-Systemen zu realisieren, erscheint somit für zukünftige Betreiber als vielversprechende Alternative. Es stellt sich die Frage, ob DECT-Systeme hierfür geeignet sind.

## 1.1 Zielsetzung der Arbeit

Zur Beantwortung dieser Frage liefert diese Arbeit einen wichtigen Beitrag. Den Schwerpunkt bilden Aussagen zur Kapazität von DECT-Systemen in drahtlosen Zugangsnetzen sowie Antworten auf die Frage, ob mehrere konkurrierende Betreiber nebeneinander existieren können. Die Kapazität wird für Sprachdienste und anteilige ISDN-Dienste bestimmt, um der zu beobachtenden Entwicklung der ISDN Installationen der Telekom Rechnung zu tragen. Es werden Untersuchungen für die unterschiedlichen relevanten Konfigurationen angestellt, die für öffentliche DECT-Netze in Frage kommen. Für die methodische Beantwortung der Fragestellungen wurden spezielle,

---

<sup>1</sup>Seit Beginn 1996 wird die Abkürzung DECT nicht mehr für *Digital European Cordless Telecommunications* verwendet. Diese Namensänderung soll der wachsenden Bedeutung des DECT Standards auch außerhalb Europas Rechnung tragen.

besonders aussagekräftige Szenarien ausgewählt und durch stochastische Simulation und verkehrstheoretische Überlegungen analysiert.

Insbesondere der Einfluß nicht synchronisierter DECT-Systeme auf die erreichbare Dienstgüte öffentlicher Betreiber und der dafür zusätzlich erforderliche Installationsaufwand gibt zu Diskussionen Anlaß. Das ist verständlich, weil bisher im Mobilfunk für öffentlichen Betrieb lizenzierte Frequenzbänder frei von lizenzierten Privatsystemen sind und sich private DECT-Systeme einer stark steigenden Akzeptanz bei Privatkunden erfreuen. Folglich werden in dieser Arbeit die Auswirkungen von Asynchronitäten zwischen DECT-Systemen unterschiedlicher Betreiber in Gebäuden und im Freien untersucht.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Möglichkeiten konkurrierender Betreiber, sich durch technische Maßnahmen vom Regulierer nicht vorhergesehene Vorteile im Wettbewerb gegenüber Mitbewerbern zu verschaffen. Dazu werden systematische Überlegungen angestellt und z.T. entsprechende Experimente durch Simulation ausgeführt.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Die Fragestellungen, die sich aufgrund des Einsatzes von DECT-Systemen in öffentlichen Anwendungen ergeben, sind vielfältig. Zur Einordnung und Abgrenzung der Arbeit wird in Kapitel 2.1 eine Übersicht der Systeme für funkbasierte Zugangnetze sowie der Dienste und technischen Realisierungen im allgemeinen gegeben, und in Kapitel 2.2 Konfigurationen öffentlicher DECT-Systeme aufgezeigt.

Alle quantitativen Aussagen zur Kapazität beruhen auf grundsätzlichen verkehrstheoretischen Analysen und simulativen Untersuchung von DECT-Systemen in allgemein akzeptierten Szenarien, innerhalb und außerhalb von Gebäuden und mit Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und ihrer Umgebung. Die stochastische Simulation ist die einzige für derart umfangreiche Untersuchungen praktikable Möglichkeit, weil eine Untersuchung des Verhaltens eines realisierten Systems durch Messungen aufgrund der Vielfalt verschiedener zu untersuchender Situationen und Bedingungen ausscheidet. Am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen besteht ein in mehrjähriger Arbeit entwickelter Simulator DESI (DEct Simulator), der realistische Modelle der relevanten Systemkomponenten (Radio Resource Management) sowie des Funkkanals und der Benutzermobilität

bei einer Vielzahl verschiedenartiger Szenarien und Lastfälle zu untersuchen erlaubt. Die Implementierung der Protokolle der Funkschnittstelle erfolgte konform zum DECT-Standard, wie er in den Kapiteln 3, 4 und 5 erläutert wird. Da die Ergebnisse der Simulation stark durch die Modellierung der Funkausbreitung beeinflusst werden, enthält Kapitel 7 einen kurzen Überblick und eine Bewertung der verwendeten Ausbreitungsmodelle. In Kapitel 8 wird im Detail erklärt, wie das DECT-System und die Funkausbreitung im Simulator implementiert bzw. berechnet worden sind. Eine Übersicht der möglichen Auswirkungen der Anwendung von DECT in öffentlichen Telekommunikationssystemen wird in Kapitel 9 gegeben, in dem auch der aktuelle Kenntnisstand anderer Autoren zusammengefaßt wird. In Kapitel 10 werden anhand von Modellen verkehrstheoretische Prognosen über die zu erwartende Dienstgüte von DECT-Systemen bei gegebenem Verkehr durchgeführt. Der hierfür entwickelte analytische Ansatz beschreibt die für DECT-Systeme wesentlichen Mechanismen der Kapazitäts- und Interferenzbegrenzung.

Die Beschreibung der durch Simulationen untersuchten Szenarien und die Diskussion der Ergebnisse findet man im Kapitel 11. In den Kapiteln 12 und 13 werden die Ergebnisse der Simulation für einen bzw. zwei konkurrierende Betreiber diskutiert. In Kapitel 14 werden die Simulationsergebnisse zur Beeinflussung öffentlicher und privater DECT-Systeme und in Kapitel 15 die Untersuchungen zu den Auswirkungen des Einsatzes von DECT-Relais dargestellt.

## Realisierung funkbasierter Zugangsnetze

### 2.1 Eigenschaften der technischen Systeme

Die in Europa beschlossene Liberalisierung der Telekommunikationsmärkte hat zu intensiven Überlegungen und entsprechenden Entwicklungen geführt, um Teilnehmer im Ortsnetz (*Local Loop* - LL) bestehender Telekommunikationsnetze drahtlos mit Netzzugängen (*Point of Presence* - POP) privater Telekommunikationsnetzbetreiber zu verbinden. Am POP befindet sich die Teilnehmervermittlungsstelle (Ortsvermittlungsstelle) mit Anschluß an das Telekommunikationsnetz des privaten Telekommunikationsnetzbetreibers. Die z.Zt. favorisierte Standardlösung sieht vor, Großkunden unter Umgehung des Ortsnetzes der Deutschen Telekom AG über Richtfunknetze mit dem POP zu verbinden und mittlere bzw. kleinere Unternehmen sowie Privatkunden über drahtlose Funknetze (*Radio Local Loop* - RLL) anzuschließen. RLL-Systeme stützen sich auf sog. Feststationen (*Base Station* - BS) zur Funkversorgung eines Teilgebietes des Ortsnetzes, die über eine Steuereinheit (*Controller*) mit der Ortsvermittlungsstelle (*Local Exchange* - LE) mit Zugang zum Festnetz verbunden sind. Die BS benutzt Antennen mit (mäßiger) Richtwirkung, um die einzelnen anzuschliessenden Gebäude bzw. den dort installierten Funkabschluß (*Radio Termination* - RT) funkttechnisch gut zu versorgen. Abbildung 2.1 zeigt das RLL-Referenzmodell für DECT-Systeme, welches eine spezielle Version des in [12] definierten allgemeinen RLL Referenzsystem ist. Die verfügbaren Dienste entsprechen denen des Telefonnetzes (*Public Switched Telephone Network* - PSTN) bzw. des ISDN, je nach Wunsch des Teilnehmers und Art des Funknetzes. Der Teilnehmer kann innerhalb seines privaten Gebäudes entweder klassisch, d.h. wie bisher über drahtgebundene Endgeräte kommunizieren (dann ist sein Ortsnetzanschluß drahtlos, sein hausinterner Anschluß drahtgebunden), oder er benutzt im Gebäude ebenfalls eine drahtlose Anschlußtechnik, die sich von der im drahtlosen Ortsnetz verwendeten unterscheiden kann.

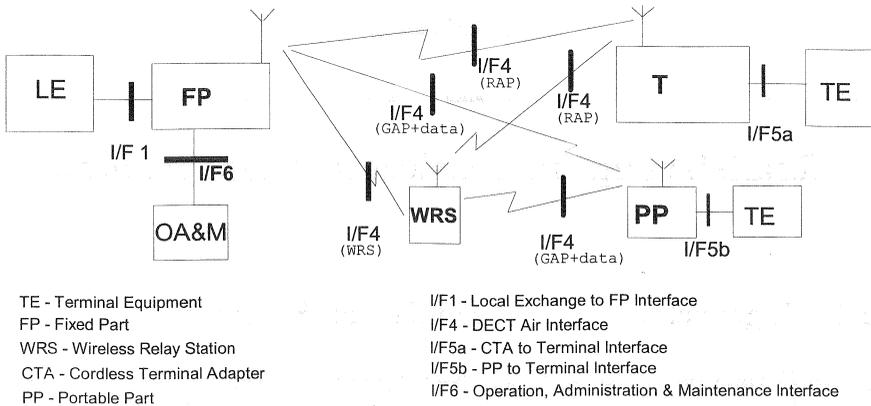


Abbildung 2.1: DECT RLL Referenzsystem

Steht ein RLL-System zur Verfügung, so liegt es nahe, die zugehörigen Teilnehmer nicht nur ortsfest (über ihren Funknetzabschluß RT) zu versorgen, sondern auch mobile Endgeräte (*Mobile Terminal* - MT) für den Gebrauch im versorgten Gebäude und außerhalb zuzulassen und die Funkausleuchtung durch die Basistationen geeignet zu gestalten, um bestimmte Gebiete lückenlos zu versorgen. Das entsprechende Funksystem muß dann über Funktionen der Mobilitätsverwaltung (*Mobility Management* - MM) wie Aufenthaltsverwaltung, Authentifizierung, Handover, usw. verfügen, wie sie bei schnurlosen und zellularen Mobilfunksystemen vorhanden sind. Es entsteht ein lokal oder regional flächendeckendes Netz, das dem Anwender eine umfassend gesicherte mobile Versorgung garantiert. Durch ein solches System kann dem Teilnehmer der *Personal Communication Service* (PCS) angeboten werden. Durch diesen öffentlichen Zugang (*public access*) ist der Mobilteilnehmer im gesamten Szenario erreichbar und kann jede Feststation als Zugang zum Netz verwenden.

Reine RLL-Anwendungen lassen sich in zwei Klassen unterteilen, die das Dienstespektrum des ISDN einschließen:

1. Sprach- und Datenanwendungen kleiner Anwender mit einem Verkehrsaufkommen, das durch einen oder zwei ISDN-Basisanschlüsse abgedeckt werden kann
2. Sprach- und Datenanwendungen mittlerer bis großer Anwender mit

einem Verkehrsaufkommen, das einen ISDN-Primärratenanschluß erfordert.

Für beide Klassen von RLL-Anwendungen werden folgende Systeme diskutiert, die sich bzgl. Spektrumseffizienz, Funkreichweite, Funknetzabschluß (RT), Betrieb in reguliertem bzw. unreguliertem Frequenzband, Schnittstelle zur Ortsvermittlungsstelle, Sicherheit des Funksystems, elektromagnetischer Kompatibilität, Sicherheit gegen Blitzschlag, Eignung für Relaisbetrieb und elektrischer Sicherheit teilweise unterscheiden. Ihre jeweiligen Stärken und Schwächen sind in [12] und [61] beschrieben.

### **DECT**

Das DECT-System ist für den Gebrauch auf privaten Grundstücken allgemein genehmigt und eingeführt. Die erforderliche ETSI-Standardisierung für RLL- und Telepoint-Anwendungen ist weitgehend abgeschlossen. DECT-Systeme sind demnach verfügbar. Es ist vorgesehen, RLL-Systeme und öffentliche Mobilfunksysteme (PCS/Telepoint/RLL) im gleichen Frequenzband (20 MHz ab 1880 MHz) zu betreiben. DECT unterstützt ISDN RLL-Anwendungsklasse 1. Durch die Verwendung der ADPCM Sprachkodierung (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*) mit 32 kbit/s ist die Sprachqualität ähnlich der ISDN-Sprachqualität.

### **CT2 (*Cordless Telecommunications System 2*)**

Das CT2-System ist für den Gebrauch auf privaten Grundstücken allgemein genehmigt und eingeführt. Die Funkschnittstelle für RLL-Anwendungen ist in I-ETS 300 131 Ed.2 beschrieben. Das verfügbare Frequenzband (4 MHz ab 864 MHz) ist nicht ausreichend breit. CT2 ist in England für RLL eingeführt. Von der ETSI werden dagegen eher DECT-Systeme für RLL befürwortet.

### **GSM/DCS1800**

GSM ist ein standardisiertes verfügbares Zellularsystem für die großflächige Versorgung, kann aber mit Kleinzellen die erforderliche Kapazität zur Versorgung von Mobil- und RLL-Anwendungen für Sprach- und niedrigbitratige Datendienste bereitstellen.

### **MPMP-Systeme (*Microwave Point-to-Multipoint*)**

MPMP-Systeme eignen sich für RLL-Anwendungen mit ISDN-Übertragungsrate (RLL-Anwendungsklasse 1 und 2), aber nicht für die gleichzeitige flächendeckende Versorgung mobiler Teilnehmer. Es

handelt sich um nicht standardisierte Spezialsysteme mit deutlich geringerer Spektrumseffizienz als bei DECT oder GSM.

### CDMA-Systeme (*Code Division Multiple Access*)

Es gibt CDMA-Systeme mit eher schmalbandigen Verkehrskanälen, die vor allem für mobile Anwendungen geeignet sind, und breitbandige, reine RLL-Systeme. Diese sind meist ISDN-kompatibel und unterstützen die RLL-Anwendungsklasse 1. Es existiert nur der amerikanische Standard IS95 (*Interims Standard 95*) für CDMA-basierte schmalbandige Mobilfunksysteme, die nicht ISDN-kompatibel sind. IS95 Systeme sind außerhalb Europas als PCS-Systeme ähnlich erfolgreich wie DCS1800. Durch die ähnlich stark begrenzte Übertragungskapazität wie DCS1800 und mangels verfügbarer Frequenzen werden sie für RLL-Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle in Europa spielen. Daneben werden dedizierte CDMA-Systeme für RLL-Systeme angeboten, die mit Codespreizung nach dem *Direct Sequence* (DS) bzw. dem *Frequency Hopping* (FH) Verfahren arbeiten. Beide Typen von sind inzwischen entweder in der Testphase oder bereits vereinzelt in Gebrauch und lassen erwarten, daß sie in Zukunft für RLL-Anwendungen eine wichtige Rolle spielen werden. Dies gilt vor allem wegen der Bereitstellung von ISDN-Kanälen. Ungeklärt ist allerdings die Verfügbarkeit geeigneter Frequenzen für derartige Systeme in Europa.

Die grundsätzliche Eignung von DECT als Mobil- und RLL-System, ISDN-Fähigkeit, gute Sprachqualität und die Verfügbarkeit von Systemen unterschiedlicher Hersteller sprechen für den bevorzugten Einsatz von DECT. Deshalb hat diese Arbeit zum Ziel, die Leistungsfähigkeit öffentlicher DECT-Systeme zu analysieren. Andere Systeme werden nicht betrachtet.

## 2.2 Konfigurationen öffentlicher DECT-Systeme

Entsprechend der Einteilung in RLL- bzw. PCS-System ergeben sich bei der Verwendung von DECT als Zugangssystem im Ortsbereich zwei Konfigurationen.

Der klassische Einsatz von DECT-Systemen dient der Realisierung von PCS-Systemen. Es müssen mobile Teilnehmer flächendeckend unterhalb der Dächer (s. Abb. 2.2) versorgt werden. Hierbei werden die Basisstationen normalerweise auf Pfählen, an Laternen oder an Häuserwänden unterhalb der

Dachkanten befestigt. Die Bebauung begrenzt die Zellen sehr stark, so daß eine sehr kleinzellige Netzstruktur (mit entsprechend hoher Kapazität, s. Kapitel 12.2.1) entsteht. Für eine gleichzeitige RLL-Versorgung innerhalb der Häuser werden in der Regel an den Häuserwänden Empfänger angebracht, um dann innerhalb des Hauses wie an einem normalen Drahtanschluß operieren zu können. Bei genügend dicht installierten Basisstationen kann man auch von innerhalb des Hauses eine Funkverbindung zu einer Basisstation aufbauen.

Diese Art der Versorgung bedeutet erheblichen Verkabelungsaufwand für die zahlreichen Basisstationen. Ein solches System läßt sich nur dort wirtschaftlich installieren und betreiben, wo günstige Konditionen für die Nutzung bestehender Kabel bestehen, etwa bei einer Zusammenarbeit der Betreiber mit Kommunen oder durch die Deutsche Telekom.

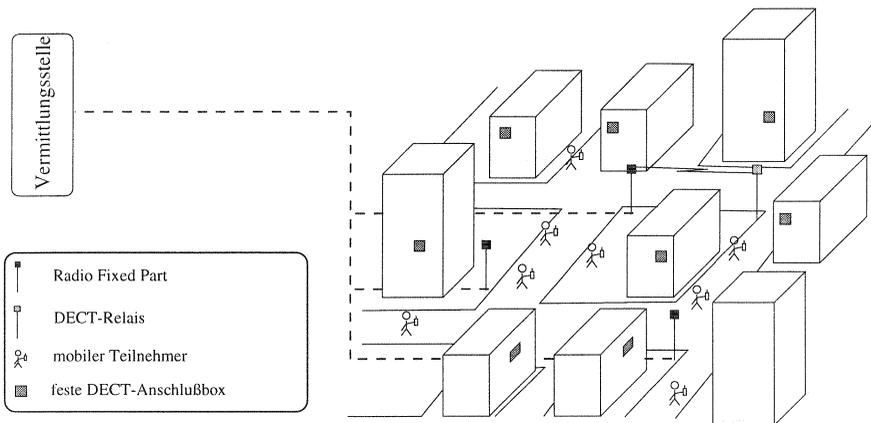


Abbildung 2.2: Versorgung von Teilnehmern unterhalb der Dächer

Unter der Bedingung, daß keine bestehenden Kabel benutzt werden können, etwa als neuer Netzbetreiber, kann ein PCS-System nur mit Hilfe zahlreicher DECT-Relais aufgebaut werden. Wo immer in Szenarien keine Interferenzbegrenzung auftritt, bringt der Einsatz von Relais einen erheblichen verringerten Aufwand und einen Gewinn an Flexibilität. Die Relais müßten dann den Verkehr zu der jeweils nächsten Basisstation weiterleiten. Die zahlreichen abgesetzten PCS-Basisstationen werden aber aus Kostengründen

einfach aufgebaut und so meist nicht für hohe Verkehre geeignet sein. Der Anschluß der Relais mit zentralen Basisstationen auf höheren Häusern, wie im unten beschriebenen RLL-System, erscheint sinnvoller.

Zur Realisierung von RLL-Systemen wurden für DECT ähnliche Konzepte entwickelt, wie sie von Mobilfunksystemen bekannt sind. Im RLL-System werden die Basisstationen auf Dächern hoher Häuser positioniert (s. Abb. 2.3). Diese versorgen dann die umgebenden RLL-Teilnehmer (bzw. deren Anschlußboxen), deren Antennen sich außen montiert befinden. Je nach Güte der Funkversorgung sind diese auf Dach- oder in Geschoßhöhe angebracht, wobei die Montage auf Dachhöhe bei sinnvoller Dichte an Basisstationen häufiger vorzunehmen sein wird. Es herrscht meistens Sichtverbindung zwischen Basisstation und Teilnehmeranschluß, so daß die Zellen wesentlich größer sind als in einem PCS-System. Während für die Basissta-

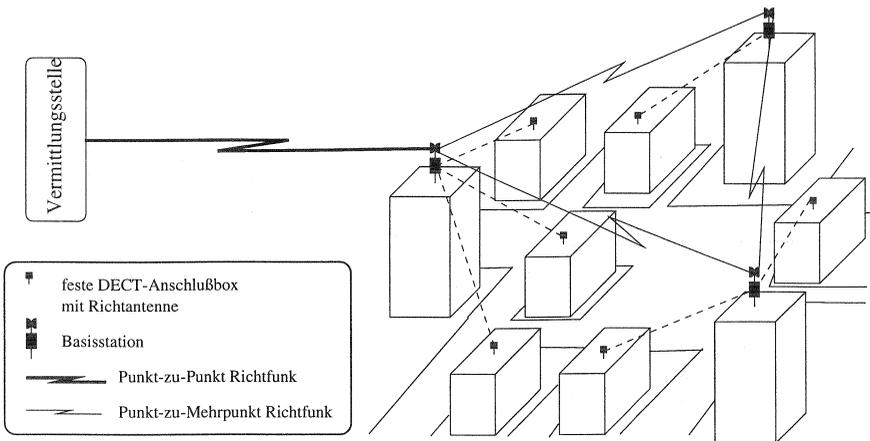


Abbildung 2.3: Versorgung von Teilnehmern über die Dächer

tionen eine keulenförmige und sektorisierte Richtcharakteristik der Antennen verwendet wird, können die Antennen der Teilnehmer entweder mittels einer Richtantenne auf eine bestimmte Basisstation ausgerichtet sein oder über eine isotrope Rundstrahlcharakteristik verfügen, die theoretischen Zugriff auf mehrere Basisstationen erlaubt. Beide Möglichkeiten sind im Laufe dieser Arbeit bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht worden.

In ungünstig gelegenen Funkbereichen, wie z.B. in Abschattungszonen oder am Rand der Funkzellen, kann durch den Einsatz von DECT-Relais die Funkversorgung gesichert werden. Hierdurch kann auch die vermehrte Montage der Teilnehmer-Anschlußboxen unterhalb der Dachkante in Geschosshöhe ermöglicht werden. Bei einem Relais wird der Drahtanschluß der Feststationen durch einen DECT-Funkanschluß abgelöst, wobei die betreffende Feststation zum Relais wird. Durch Kombination von Feststationen und Relais können z.B. in relativ kurzer Zeit ganze Stadtteile an das Telekommunikationsnetz des privaten Netzbetreibers angeschlossen werden. Soll dabei ein flächendeckender Service garantiert werden, so müssen alle vorhandenen Versorgungslücken durch DECT-Relais abgedeckt werden (s. Abb. 2.4).

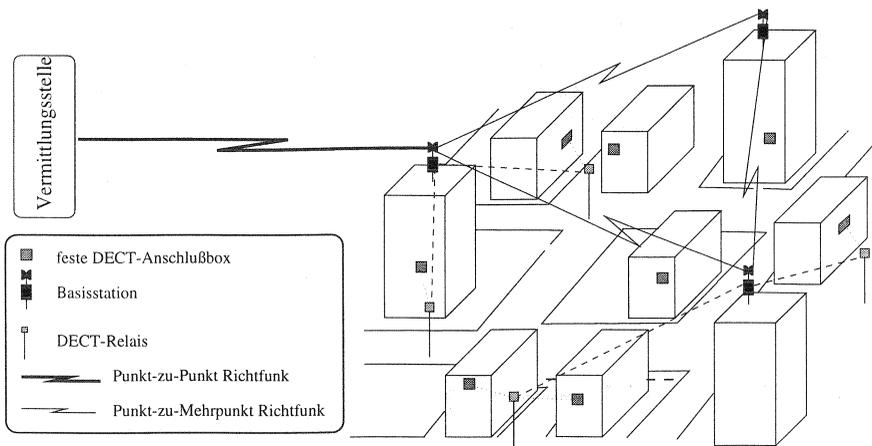


Abbildung 2.4: Versorgung von Funklöchern in einem RLL-System mit DECT-Relais

Um die Basisstationen an die nächste Ortsvermittlung anzuschließen, wird man sie entweder verkabeln oder wie in Abb. 2.3 mittels eines MPMP Systems vernetzen und dann über ein *Microwave Point-to-Point* (MPP) System anschließen. Diese stark gerichteten, hochfrequenten Systeme können hohe Datenraten von  $nx2048$  kbit/sek und mehr unterstützen. In der Ent-

wicklung befindliche Systeme auf ATM-Basis werden noch weit höhere Datenraten tragen können.

Diese RLL-Konfiguration erlaubt eine PCS-Versorgung mobiler Teilnehmer zwischen den Gebäuden nur dort, wo DECT-Relais in den Straßen angebracht sind oder günstige Funkbedingungen zur Basisstation herrschen. Bei steigender RLL-Kundenzahl und vermehrtem Einsatz von DECT-Relais verbessert sich der PCS-Versorgungsgrad automatisch. Es ergibt sich dadurch die gewünschte Evolution des RLL-Zugangsnetzes zu einem PCS-System bei steigender Akzeptanz durch die Kunden. Um in einem RLL-System eine PCS-Versorgung sicherzustellen, müßten zur Ausleuchtung der nicht versorgten Straßen an den Dachkanten und/oder an Kreuzungen DECT-Relais positionieren werden, auch dort wo es für die RLL-Versorgung nicht notwendig wäre (s. Abb. 2.5).

Unter den beschriebenen Voraussetzungen sind sinnvoll erscheinende Strukturen von RLL- und PCS-Funksystemen sehr ähnlich und eine integrierte Installation beider Systeme ist möglich. Es ist anzumerken, daß Relais im Hinblick auf die Gesamtkapazität von DECT-Systemen negative Eigenschaften aufweisen (s. Kapitel 15).

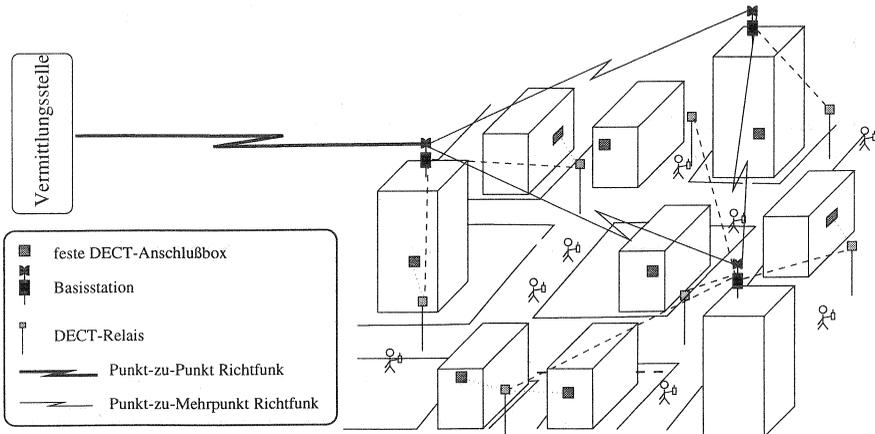


Abbildung 2.5: Integration von RLL- und PCS- Systemen

Aus Sicht zukünftiger Betreiber erscheint bei der funktechnischen Erschließung des Ortnetzes die Kombination von RLL-/PCS-/Telepoint-Systemen vor dem Hintergrund der anzubietenden Dienste äußerst sinnvoll. Für eine integrierte Lösung sprechen, daß

1. sich ein Funkzugangsnetz als Konkurrenz zum drahtgebundenen Ortsnetz snur einführen läßt, wenn die Dienstgüte vergleichbar und die Nutzungskosten geringer sind
2. ein funkbasiertes Ortsnetz erhebliche Schwierigkeiten haben wird, die Dienstgüte eines auf dem Stand der Technik befindlichen drahtgebundenen Ortsnetzes zu erreichen
3. die Unterstützung mobiler Teilnehmer in der Umgebung ihrer festen Ortnetzanschlüsse (außen) als Zugabe zur Erleichterung der Einführung des RLL-Dienstes sehr nützlich wäre. Dies entspricht der Einrichtung eines Mobilfunknetzes mit begrenzter Mobilität.

Mit DECT liegt ein offener europäischer Standard für ein micro-zellulares System vor, das diese Kombination wie kein zweites System ermöglicht. Die Vorteile von DECT liegen in der hohen Flexibilität eines dezentral organisierten Systems. Dies führt aufgrund der Verwendung der dynamischen Kanalwahlalgorithmen in DECT (vgl. Kapitel 5) zu einer im Vergleich zu anderen Systemen (GSM, DCS1800) einfachen Zellplanung. Zudem ist es durch die gleichzeitige Verwendung von mehreren Trägern für eine Verbindung möglich, höhere Datenraten, z.B. für ISDN-Verkehr, zu unterstützen. Die Annahme eines so eingeführten DECT-basierten PCS-Dienstes durch die Teilnehmer als Substitution bestehender zellulärer Mobilfunkdienste erscheint wahrscheinlich, weil RLL-Systeme insbesondere in Ballungsgebieten die für einen wirtschaftlichen PCS-Betrieb erforderliche Basisstationsdichte erreichen könnten und genau dort eine besonders große Nachfrage nach preiswerten Mobilfunkdiensten für Teilnehmer mit geringer Mobilität besteht. Somit entstünde dabei u.U. ein lokales Mobilfunknetz für zusammenhängende RLL-Gebiete - und durch Zusammenschluß vieler lokaler DECT-PCS-Betreiber ein regionales Mobilfunknetz. Durch den Zusammenschluß regionaler Betreiber könnte ein in allen Ballungsgebieten präsenten DECT-PCS-Netz bundesweit entstehen.

Durch das von der ETSI Standardisierungsgruppe RES 3 verabschiedete *Generic Access Profile* (GAP) [21] und *Public Access Profile* (PAP) [17] sowie das entstehende *RLL Access Profile* (RAP) [22] [14] werden in Zukunft DECT-Systeme aller Hersteller eine genormte Zugriffsschnittstelle

aufweisen. Dann ist die Benutzung einer Mobilstation auch in herstellerfremden Systemen möglich. Bei der ETSI wird ausserdem eine Erweiterung des DECT Standards für *Cordless Terminal Mobility* (CTM) erarbeitet (*CTM Access Profile -CAP*), der die zusätzlichen Funktionen eines DECT-Zellularsystems beschreibt, mit Mobilitätsverwaltung, Authentifizierung, Abrechnung usw.

Die für den PCS-Dienst (inkl. Telepoint) erforderliche Funkausleuchtung und der erwartete zugehörige Kommunikationsverkehr werden erwartungsgemäß einen spürbaren Anteil des gesamten, von öffentlichen Betreibern bedienten Verkehrs ausmachen, tragen also zur Verkehrsbelastung an Orten hoher Teilnehmerdichte, sog. *Hot-Spots*, spürbar bei.

Seit langem wird die Kombination von GSM-basierten Mobilfunknetzen und DECT-Systemen als Vorbote der Mobilfunknetze der 3. Generation diskutiert. Werden DECT-basierte RLL/PCS-Installationen in ein GSM System integriert, so entstünde ein flächendeckendes Pico-, Mikro- und Makrozellulares Mobilfunksystem, welches die gesicherte Erreichbarkeit ausserhalb der Ballungszentren über GSM, die kostengünstige Flexibilität der DECT-Systeme und die Ausleuchtung bis in Gebäude böte. Diese Dienstkombination läßt auf ein großes Entwicklungspotential heutiger Mobilfunknetze im Bereich der Privatkunden schließen, die heutige Mobilfunkdienste aus Kostengründen nur zögernd annehmen. Die Nutzung von öffentlichen DECT-Systemen durch Mobilfunkbetreiber wird daher die Zahl konkurrierender DECT-Systeme erhöhen.

# Das DECT - Referenzsystem

Das DECT-Referenzsystem beschreibt sowohl die definierten logischen und physikalischen Komponenten, als auch die Schnittstellen zwischen den einzelnen Einheiten und die Verbindungspunkte zu anderen Netzen. Die globale logische Strukturierung, in welcher das lokale DECT-Netz eingebettet ist, wird im folgenden Abschnitt erläutert. Danach werden verschiedene physikalische Realisierungen eines DECT-Systems vorgestellt.

### 3.1 Logische Gruppierung des DECT-Systems

Die logischen Gruppen des DECT-Netzes werden nach ihrer Funktionalität mit dazwischen liegenden Schnittstellen D1, D2, D3 und D4 eingeteilt, bezeichnen jedoch nicht ihre physikalische Realisierungsformen (s. Abb. 3.1).

#### 3.1.1 Globales Netz

Diese logische Gruppierung (*Global Network*) unterstützt den Telekommunikationsdienst auf überregionaler Ebene. Von ihr werden Adressumsetzungen, Routing und Relaying zwischen den einzelnen angeschlossenen sog. Lokalen Netzen vorgenommen. Das Globale Netz ist meist ein nationales oder sogar internationales Netz.

Typische angeschlossene Lokale Netze sind:

- PSTN (*Public Switched Telephone Network*)
- ISDN (*Integrated Services Digital Network*)
- X.25/PSPDN (*Packet Switched Public Data Network*)
- GSM/PLMN (*Public Land Mobile Network*)

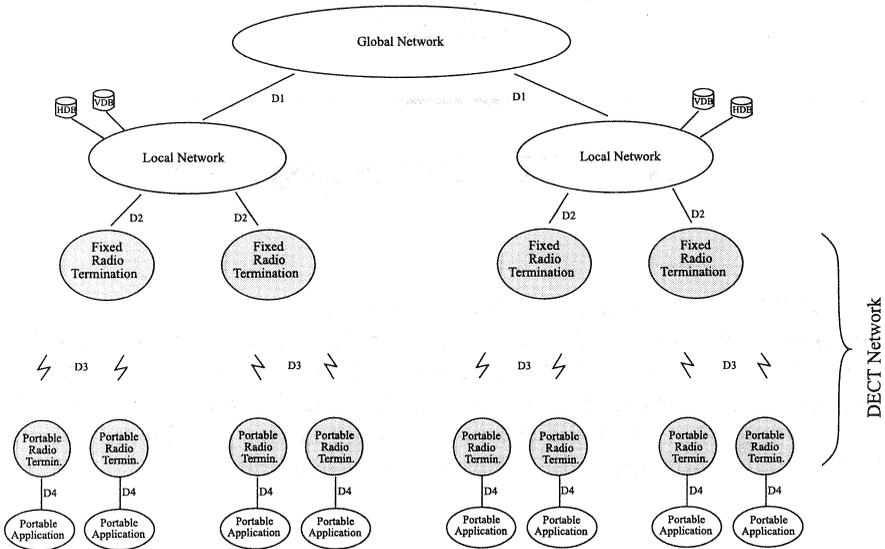


Abbildung 3.1: DECT-Referenzsystem: Logische Gruppierung

### 3.1.2 Lokales Netz

Jedes Lokale Netz (*Local Network*) erbringt einen lokalen Telekommunikationsdienst. Die Charakteristik des Netzes kann, abhängig von ihrer tatsächlichen Implementierung, vom einfachen Multiplexer bis hin zu einem hochentwickelten komplexen Netz variieren. Besitzt die untergeordnete *DECT Fixed Radio Termination* (FT) keine Vermittlungsfunktionen, so muß das Lokale Netz sie wahrnehmen. Dabei ist zu beachten, daß logische Definition und physikalische Realisierung voneinander abweichen können. Beispielsweise können mehrere Netze mit ihren Funktionen in einem Gerät vereinigt sein.

Das Lokale Netz dient unter anderem dazu, die globalen Identifikationsnummern (z.B. ISDN Nummern) auf die DECT-spezifischen IPUI (*International Portable User Identity*) und TPUI (*Temporay Portable User Identity*) umzusetzen. Als lokale Netzstruktur findet man oft folgende Netze:

- analoge und digitale private Nebenstellenanlage (*Private Automatic Branch Exchange - PABX*) (übliche Nebenstellenanlage)

- ISPBX: diensteintegriertes PBX System
- IEEE 802 LANs: nach dem 802 Standard der IEEE arbeitende Local Area Networks

Alle netztypischen Funktionen müssen außerhalb des DECT-Systems angesiedelt sein. Sie sind entweder im Lokalen oder im Globalen Netz untergebracht. Für die Steuerung einer Inter-DECT-Mobilität, der Möglichkeit sich mit der Mobilstation in verschiedenen unabhängigen DECT-Systemen bzw. ihren Versorgungsbereichen aufzuhalten, bedarf es einer wie bei GSM üblichen Nutzung von *Home Data Base* (HDB) und *Visitor Data Base* (VDB). Die ankommenden Rufe werden automatisch an das Teil-System weitergeleitet, in dem sich der Teilnehmer gerade befindet. Beim Wechsel von einem Netz zu einem anderen wird in der HDB ein neuer Eintrag der aktuellen VDB vorgenommen.

### 3.1.3 Elemente des DECT-Netzes

Das DECT-Netz besteht aus Fest- und Mobilstationen und verbindet den Teilnehmer mit dem lokalen Festnetz. Es beinhaltet definitionsgemäß keine Anwendungsprozesse, sondern ist nur Vermittlungseinrichtung. Ein DECT-System hat jeweils nur eine Netzadresse für einen Teilnehmer bzw. die Mobilstation und besitzt (aus logischer Sicht) einen oder mehrere *Fixed Radio Terminations* (FT) und viele ihnen zugeordnete *Portable Radio Terminations* (PT).

#### Fixed Radio Termination

Die FT ist die logische Gruppierung aller Funktionen und Prozeduren auf der Festnetzseite der DECT-Luftschnittstelle. Die FT ist verantwortlich für:

- Schicht 3 Protokoll-Handling in der C-(*Control*) Schicht (außer Mobilität)
- Schicht 2 Protokoll-Handling in der U-(*User*) Schicht
- Schicht 2 Routing und Relaying innerhalb des DECT-Netzes

Das FT beinhaltet außer Handover- und Multi-Zell-Verwaltung keine Vermittlungsfunktionen. Es können zwar viele Rufinstanzen verwaltet werden, aber es ist nicht möglich, eine direkte Verbindung zwischen zwei Teilnehmern aufzubauen. Dies muß außerhalb des logisch abgegrenzten Bereiches der Fixed Radio Termination erfolgen.

## Portable Radio Termination und Portable Application

Diese beiden Teile bilden die logischen Gruppen auf der mobilen Seite des DECT-Netzes. Während das Portable Radio Termination mit all seinen Protokollelementen der OSI Schichten 1, 2, und 3 im Standard fixiert ist, kann die Applikation vom Hersteller der Geräte selbst definiert und implementiert werden. Sie ist somit nicht standardisiert.

## 3.2 Physikalische Gruppierung des DECT-Systems

Während die logische Struktur des DECT-Netzes eindeutig definiert ist, kann die physikalische Gruppierung verschiedene Formen annehmen. Sie ist den jeweiligen Bedürfnissen des Kunden angepaßt und kann somit als einzelne Feststation, an die bis zu 12 gleichzeitig kommunizierende Mobilstationen angeschlossen werden, oder auch als eigenständige Vermittlungsstelle für Bürogebäude konzipiert werden. Dabei sind die logischen Schnittstellen D1...D4 teilweise in eine gemeinsame physikalische Einheit integriert und somit nicht mehr eindeutig aufschlüsselbar (s. Abb. 3.2).

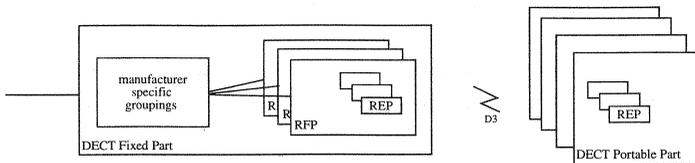


Abbildung 3.2: DECT-Referenzsystem: Physikalische Gruppierung

### 3.2.1 DECT Fixed Part

Physikalisch läßt sich das DECT-System in zwei Teile aufspalten. Der *DECT Fixed Part* (FP) auf der Festseite und der *DECT Portable Part* (PP) auf der mobilen Seite. Der Fixed Part auf der drahtgebundenen Seite kann eine oder mehrere logische Gruppen vom Typ Fixed Radio Termination beinhalten, die von einer gemeinsamen Kontrolleinheit gesteuert werden.

Der FP kann in zwei physikalische Unterguppen aufgeteilt werden:

- *Radio Fixed Part* (RFP):  
Ein Radio Fixed Part ist für jeweils eine Zelle im Netz zuständig.

- *Radio End Point* (REP):  
Ein Radio End Point steht für jeweils eine Transceiver-Einheit innerhalb eines RFP.

### 3.2.2 DECT Portable Part

Die beiden logischen Gruppen *Portable Radio Termination* und *Portable Application* sind physikalisch in einem *Portable Part* (PP) zusammengefaßt. Ein Handgerät bildet zum Beispiel einen solchen Portable Part. Normalerweise schließt ein PP dabei meist nur einen Radio Endpoint ein, wobei jedoch auch mehrere erlaubt wären.

## 3.3 Spezifische DECT-Konfigurationen

In der DECT Systembeschreibung [15] werden mehrere typische DECT-Konfigurationen erläutert. Abhängig von dem übergeordneten Netz:

- PSTN
- ISDN
- X.25
- IEEE 802 LAN
- GSM

sind verschiedene physikalische Realisierungen erforderlich. Einige Installationsmöglichkeiten werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz vorgestellt. Private Haussysteme werden heutzutage schon von mehreren Anbietern kostengünstig vertrieben. Komplexe private Büroinstallationen oder lokale Netze erobern gegenwärtig zunehmend den Markt, da sie flexible und kostengünstige Realisierungen bieten. Daneben werden DECT-Systeme als Radio Local Loop Systeme realisiert und gegenwärtig erprobt.

### 3.3.1 PSTN/ISDN Referenzkonfiguration

#### Private DECT Telefone (*Domestic Telephone*)

Die einfachste DECT-Konfiguration ist das schnurlose Telefon. Dabei wird das Netz an ein PSTN über ein Subscriber-Interface wie ein POT (*Plain Old Telephone*) angeschlossen. Die Funktionsmerkmale ähneln früheren Generationen schnurloser Haustelefone der CT 1 oder CT 2 Generation. Ein lokales Netz ist nicht vorgesehen (s. Abb. 3.3).

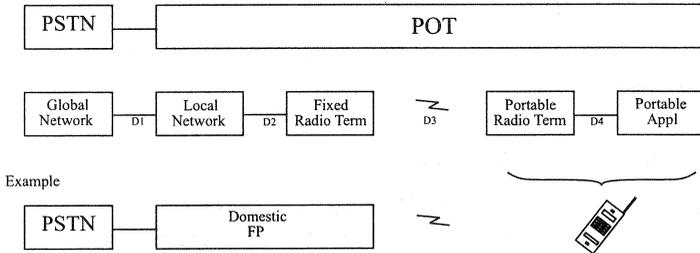


Abbildung 3.3: Domestic Telephone Konfiguration

**PBX**

Bei einer einfachen Realisierungsform der DECT-PBX werden ähnlich wie bei der Domestic Station eigenständige FPs an die Vermittlungseinheit angeschlossen. Der Wechsel zu einer anderen Feststation während des Gesprächs (Handover) wäre in diesem Fall ein Wechsel von einem FP zu einem anderen und somit mit aufwendigen Protokollabläufen verbunden.

In Abb. 3.4 besteht der Fixed Part aus mehreren Radio Fixed Parts, die jeweils eine Zelle bedienen, wodurch das System seinen Zellularcharakter erhält. Die Mobilstation baut zu dem stärksten RFP eine Verbindung auf. Bewegt sich der Teilnehmer in den Bereich einer Nachbarzelle ist der FP nun in der Lage, interne Schicht 2 Handover auszuführen. Gesteuert werden die Protokolle zur Zellsteuerung durch den *Common Control (CC)*, der physikalisch gesehen im FP oder in der PBX integriert sein kann.

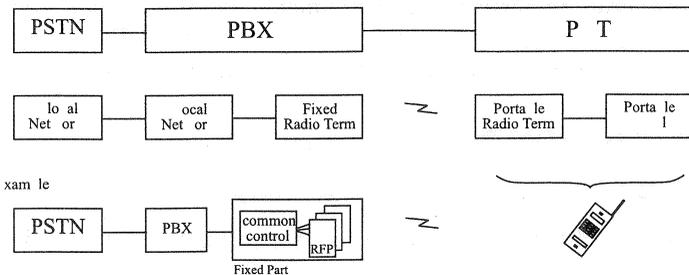


Abbildung 3.4: PBX Konfiguration

### Local Loop

Das DECT-System kann auch als lokales Netz in das PSTN eingebunden sein. Dabei bleibt die Funkverbindung dem Benutzer als solche verborgen. Sein drahtgebundenes Telefon ist mit einem *Cordless Terminal Adapter* (CTA), der die Funkübertragung zum RFP übernimmt, verbunden. Die vergleichbare Konfiguration bei Nutzung des ISDN als Lokalem Festnetz verfügt über eine  $S_0$  Schnittstelle am CTA und eignet sich somit zum Anschluß beliebiger ISDN-fähiger Endgeräte.

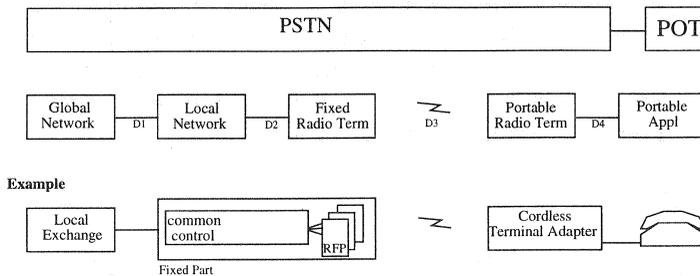


Abbildung 3.5: Local Loop Konfiguration für PSTN

### 3.3.2 GSM Referenzkonfiguration

Neben der hier nicht näher erläuterten X.25 Konfiguration, soll an dieser Stelle noch die Verbindung der beiden Mobilsysteme GSM und DECT betrachtet werden. Diese Entwicklung bietet dem Anwender die Möglichkeit, das eher lokal aufgebaute DECT-System mit dem überregionalen GSM-Mobilfunksystem zu koppeln. Hierzu wird das gesamte DECT-System als eine GSM-Basistation (*Base Station Sub-System* - BSS) mittels der GSM A-Schnittstellen an die GSM-Vermittlungsstelle (*Mobile Switching Center* - MSC) angeschlossen, da auf dieser Schnittstelle keine Informationen über die verwendete Luftschnittstelle ausgetauscht werden. Eine ausführliche Darstellung dieser Integration von DECT und GSM-System findet man [4].

### 3.4 Multicell-Protokollsystem

In einem Viel-Zellen-Netz besitzt ein DECT-Fixed Part fest definierte Untergruppen, die in die Radio Fixed Parts ausgelagert werden können. Dadurch erreicht man, daß sich einige Protokollabläufe auf den RFP beschränken und das Gesamtsystem nicht belasten. Viele der logischen Funktionen müssen jedoch mehr oder weniger zentralisiert in einer Einheit angeordnet werden, die mittels einer Interworking Unit das Gateway zu einem lokalen Netz bilden. Da die meisten Multicell-Netze nur einen DECT-Cluster besitzen, kann die Schicht 2 (MAC-Layer) des DECT-Systems räumlich in zwei Teile gegliedert werden. Die zellorientierten Funktionen (z.B. *Traffic Bearer Control*) werden jedem RFP zugeordnet, während die clusterorientierten MAC-Einheiten (z.B. *Multi Bearer Control*) im zentralen Netzelement bleiben. Die internen Protokolle L1 und L2, wie sie in Abb. 3.6 eingezeichnet sind, können von den Betreibern selbst spezifiziert und auf ihre Anwendung hin konfiguriert werden.

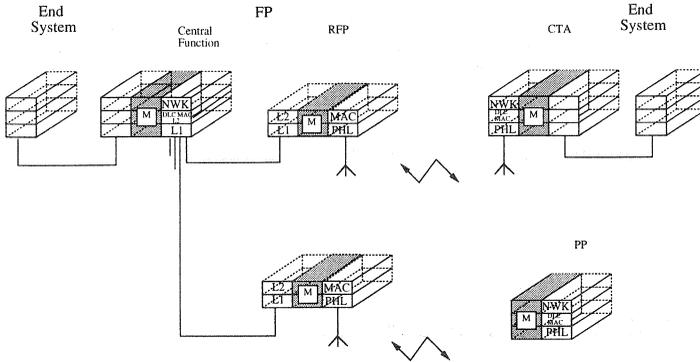


Abbildung 3.6: Protokollarchitektur für Multi-Zell-Systeme

# DECT - Protokollarchitektur

## 4.1 DECT-Protokollschichten im Überblick

### 4.1.1 Vergleich von DECT- und ISO/OSI-Referenzmodell

Die Internationale Standardisierungs Organisation (ISO) hat ein Modell für offene Kommunikationssysteme entwickelt, wodurch die Zusammenarbeit unterschiedlicher Kommunikationssysteme ermöglicht werden soll. Das OSI-Referenzmodell (*Open System Interconnection* - OSI) beschreibt abstrakt alle Funktionen, die für die Übertragung von Information notwendig sind. Es legt fest, wie verteilte Systeme [60] zusammenarbeiten und gemeinsame Aufgaben ausführen. Dabei wird nicht die Realisierung festgelegt, sondern nur die logischen Funktionen der Systeme.

Das OSI-Referenzmodell gliedert die Kommunikationsfunktionen in sieben Schichten, die jeweils bestimmte Aufgabenkomplexe umfassen und somit für verschiedene Dienste verantwortlich sind. Die Schnittstellen zwischen den Schichten bilden sogenannte Dienstzugangspunkte (*Service Access Point* - SAP). Das Referenzmodell ist hierarchisch geordnet mit folgenden Schichten:

- **Schicht 1: Bitübertragungsschicht**

Die Bitübertragungsschicht (*Physical Layer*) verfügt über die mechanischen, elektrischen und funktionellen Einrichtungen, Verbindungen auf dem entsprechenden Übertragungsmedium zu betreiben. Sie ist z.B. für die Bitsynchronisation zuständig und berücksichtigt die Zeitlage von TDM-Kanälen.

- **Schicht 2: Sicherungsschicht**

Die Sicherungsschicht (*Data Link Layer*) garantiert die fehlerfreie Übertragung über eine Teilstrecke zwischen zwei Knoten eines Netzes. Neben der Zugriffssteuerung zum Medium ist sie insbesondere für die Fluß- und Reihenfolgesteuerung der Informationsblöcke verantwortlich.

- **Schicht 3: Netzschicht**

Die Netzschicht (*Network Layer*) enthält die Funktionen für Einrichtung, Betrieb und Auflösung von Verbindungen zwischen offenen Systemen. Sie übernimmt für die darüber liegende Transportschicht alle vermittlungsbezogenen Aufgaben wie Routen, Adreßumsetzung und Ausführen von Relaisfunktionen im gleichen oder über verschiedene Teilnetze hinweg.

- **Schicht 4: Transportschicht**

Die Transportschicht (*Transport Layer*) stellt Ressourcen für die Informationsübertragung mit von den Anwendungsprozessen geforderter Dienstgüte zur Verfügung. Sie koordiniert eine zuverlässige und kostengünstige Übertragung.

- **Schicht 5: Sitzungsschicht**

Die Sitzungsschicht (*Session Layer*) wird auch Kommunikationssteuerungsschicht genannt. Sie organisiert und synchronisiert die Verwaltung des Datenaustausches im Dialog.

- **Schicht 6: Darstellungsschicht**

Die Darstellungsschicht (*Presentation Layer*) ist für die Übersetzung (z.B. Codierung) der zur Übertragung bereitstehenden Information verantwortlich. Das Erscheinungsbild der Daten wird mit dem Empfänger abgestimmt.

- **Schicht 7: Anwendungsschicht**

Die Anwendungsschicht (*Application Layer*) ermöglicht den Zugang zur OSI-Umgebung. Ihre Aufgabe besteht darin, als "Fenster" zwischen korrespondierenden Anwendungsprozessen zu agieren. Dafür stellt sie standardisierte Anwendungsdienste zur Kommunikation zwischen Anwendungsprozessen zur Verfügung.

Die unteren Schichten 1 - 4 beinhalten die transportorientierten Protokolle. Darüber liegen die anwendungsorientierten Protokolle in den Schichten 5 - 7. In Abb. 4.1 sind die Schichten und ihre Einteilung dargestellt. Die Kommunikation erfolgt immer zwischen Partner-Instanzen derselben Schicht. Für Übertragungen über logische Verbindungen zwischen Partnerinstanzen werden Dienste der darunterliegenden Schicht über einen Dienstzugangspunkt in Anspruch genommen. Das DECT-Referenzmodell ist in Anlehnung an das ISO/OSI-Modell entworfen worden. Da das DECT-System nur die Funkschnittstelle zwischen den Kommunikationspartnern bildet, sind

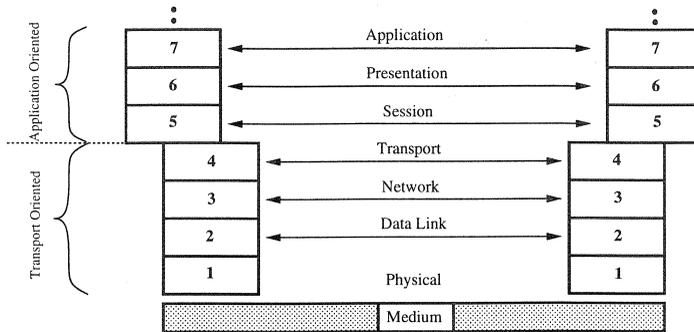


Abbildung 4.1: ISO/OSI-Referenzmodell

bei der Standardisierung von DECT die anwendungsorientierten Schichten nicht betroffen.

Die Schichten des DECT-Systems entsprechen den drei unteren Protokollschichten des OSI-Modells: Physical-, Data Link- und Network Layer. Da sich bei DECT das Übertragungsmedium Funk kontinuierlich in seiner Qualität ändert und der Kanalzugriff eine komplizierte, häufig auszuführende Funktion ist, wurde die Sicherungsschicht in zwei Teilschichten *Logical Link Control* (LLC) und *Medium Access Control* (MAC) unterteilt. Abbildung 4.2 zeigt den Vergleich des DECT-Systems mit den korrespondierenden ISO/OSI-Schichten. Oberhalb des MAC-Layer wird eine Gruppierung der Funktionen der Schichten in zwei Teile vorgenommen. Die *C(control)*-Plane ist für die Signalisierung und die *U(user)*-Plane für die Übertragung von Benutzerdaten vorgesehen. In der Vermittlungsschicht werden nur Steuerfunktionen der C-Plane bearbeitet, während die Daten der U-Plane unbearbeitet weitergegeben werden.

Im folgenden werden die Eigenschaften aller Schichten kurz vorgestellt. Im Anschluß daran werden die zwei untersten Schichten eingehend erläutert.

#### 4.1.2 Physical Layer

Die Bitübertragungsschicht ist für die Belegung des Funkmediums mit Übertragungskanälen verantwortlich. Die von der MAC-Schicht zusammengesetzten Datenpakete müssen mit zusätzlichen Informationen zur Synchronisation versehen, kodiert, moduliert und auf dem vom LLME (s.u.) gewählten

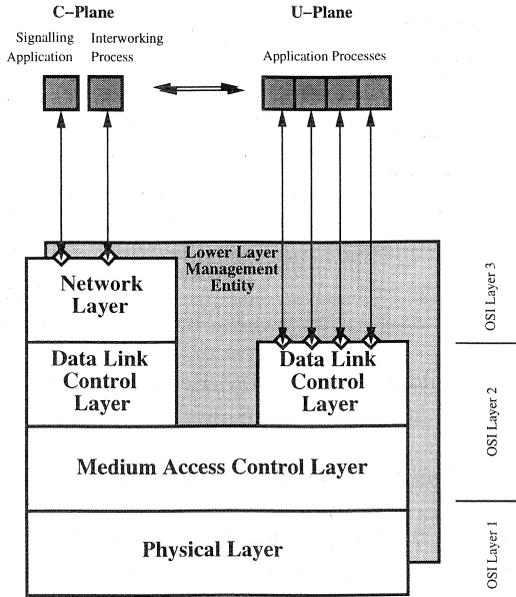


Abbildung 4.2: DECT-Referenzmodell

Kanal übertragen werden. In gleicher Weise müssen empfangende Daten (*Bursts*) der MAC-Schicht zur Verfügung gestellt werden.

#### 4.1.3 Medium Access Control Layer

Die MAC-Schicht (Abb. 4.2) hat die Aufgabe, Verkehrskanäle (*Bearer*) für die höheren Schichten einzurichten, zu betreiben und abzubauen. Die verschiedenen Datenfelder des MAC-Protokolls werden durch zyklische Codes geschützt, die im Empfänger zur Fehlererkennung benutzt werden. Die MAC-Schicht stellt sicher, daß jedem Zeitschlitz dienstspezifische Steuerdaten hinzugefügt werden.

#### 4.1.4 Data Link Control Layer

Oberhalb der MAC-Schicht unterteilt sich der darüber liegende Protokollstapel in zwei parallele Teile. In der C-Plane der Data Link Schicht eine

umfassende Fehlerkontrolle z.B. mit Rückübertragung durchgeführt, die die Zuverlässigkeit der Datenübertragung verbessert. Neben einem Punkt-zu-Punkt Dienst bietet die C-Plane der darüber liegenden Vermittlungsschicht einen Rundsende (*Broadcast*) Dienst an. Die U-Plane übernimmt die Verarbeitung der Benutzerdaten mittels eines Ende-zu-Ende Dienstes. Dabei reicht das Dienste-Spektrum von der Übertragung ungeschützter Daten mit geringer Verzögerung, z.B. Sprache, bis hin zu geschützten Diensten mit variabler Verzögerung für Datenübertragung in lokalen Netzen (LAN). Die geforderte Datenrate einer bestehenden Verbindung kann jederzeit verändert werden.

#### 4.1.5 Network Layer

Die Vermittlungsschicht richtet Verbindungen zwischen dem Teilnehmer und dem Netz ein, betreibt sie und löst sie aus. Die U-Plane von DECT hat im Network-Layer keine Aufgaben und reicht alle Daten unverarbeitet in vertikaler Richtung weiter. Die C-Plane führt die Signalisierung durch und ist für die Kontrolle des Datenaustausches verantwortlich. Dazu stehen fünf Protokolle zur Verfügung, die auf der *Link Control Entity* aufbauen. Neben *Call* und *Connection* Einheiten steht ein *Mobility Management* zur Verfügung, welches alle Aufgaben übernimmt, die zur Unterstützung der Mobilität der Mobilstationen notwendig sind. Neben den Aufenthaltsort betreffende Informationen werden auch Mitteilungen zur Authentisierung sowie Verschlüsselungsdaten übertragen.

#### 4.1.6 Lower Layer Management Entity

Die *Lower Layer Management Entity* (LLME) (s. Abb. 4.2) beinhaltet Prozeduren, die mehrere Protokollschichten betreffen und somit nicht in das DECT-Schichtenmodell nach ISO/OSI eingeordnet werden können. Aus dieser Einheit heraus werden z.B. die Erzeugung, Aufrechterhaltung und Auslösung von Kanälen initiiert und gesteuert. Außerdem erfolgt die Auswahl eines freien physikalischen Kanals und die Qualitätsbewertung des Empfangssignals innerhalb der LLME.

Frequenzband	1880 – 1900 MHz
Multiplexverfahren	FDMA/TDMA
Zahl der Trägerfrequenzen	10
Trägerabstand	1.728 MHz
Maximale Sendeleistung	250 mW
Basis-Duplexverfahren	TDD
Rahmenlänge	10 ms
Zahl der Zeitschlitze pro Rahmen	24
Modulation	GFSK mit BT=0.5 / GMSK
Modulierte Gesamtbitrate	1152 kbit/s
Netto-Datenrate pro Kanal	32 kbit/s Daten (B-Feld) ungeschützt, 25.6 kbit/s Daten (B-Feld) geschützt, 6.4 kbit/s Signalisierung (A-Feld)

Tabelle 4.1: Physikalische Daten des DECT-Systems

## 4.2 Physikalische Schicht in DECT

Unter physikalischem Kanal versteht man die Bitübertragungstrecke zwischen zwei Funkgeräten. Wegen der Funkübertragung werden hohe Anforderungen an die Hardware der Geräte gestellt, damit ein guter Empfang des Nutzsignals gewährleistet ist. Die nötige Empfänger-Empfindlichkeit richtet sich nach der für guten Sprachempfang durch die ADPCM-Kodierung geforderten Bitfehlerrate (*Bit Error Ratio* - BER) von  $10^{-3}$ . Als Empfindlichkeit des Empfängers wird der Pegel definiert, bei dem diese Bitfehlerrate garantiert nicht überschritten wird. Dieser liegt bei DECT seit der Neuauflage des Standards bei -86 dBm. Für eine normale Telefon-Verbindung in DECT benötigt man auf dem Übertragungsmedium Funk zwei unabhängige Kanäle zwischen den Geräteendpunkten.

### 4.2.1 FDMA-Verfahren und Modulationsverfahren

Das DECT-System arbeitet im Frequenzbereich von 1880 – 1900 MHz. Zur gleichzeitigen Benutzung durch viele Stationen ist das DECT-Frequenzband nach dem Frequenzmultiplexverfahren (*Frequency Division Multiple Access* - FDMA) aufgeteilt (s. Abb. 4.3). Innerhalb des Bandes sind 10 Trägerfrequenzen definiert, deren Mittenfrequenz durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$f_c = f_0 - c \cdot 1728 \text{ kHz} \quad (4.1)$$

$$c = 0, 1, \dots, 9$$

$$f_0 = 1897,344 \text{ MHz}$$

Dabei sollte die Mittenfrequenzabweichung im aktiven Zustand maximal  $\pm 50$  kHz betragen.

Als Modulationsverfahren wird entweder ein *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) mit einem Bandbreite-Zeitprodukt  $B \cdot T = 0.5$  oder ein *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) verwendet.

Wird ein Sendesignal aus zwei orthogonalen Bandpaßsignalen mit unterschiedlicher Mittenfrequenz gebildet, spricht man im allgemeinen von einem Frequenzumtastverfahren (*Frequenzy shift Keying* - FSK). Um das Ausgangsspektrum möglichst schmalbandig zu halten, wird das Signal durch einen als Tiefpaß wirkenden Gaußfilter von hochfrequenten Anteilen befreit (GFSK). Auch bei GMSK kommt dieser Gaußfilter zum Einsatz.

Meist wird bei DECT aus Kostengründen beim Bau der Sende- und Empfangseinrichtung auf die kohärente De-/Modulation verzichtet [59].

Die Übertragung einer binären 1 im DECT-System resultiert aus einer Frequenzerhöhung um  $\Delta f = 288 \text{ kHz}$  auf  $f_c + 288 \text{ kHz}$ . Für die Aussendung einer 0 wird die Frequenz um  $\Delta f$  auf  $f_c - 288 \text{ kHz}$  erniedrigt.

### 4.2.2 TDMA-Verfahren

Neben dem FDMA kommt bei DECT zur Erhöhung der Zahl gleichzeitig nutzbarer Kanäle auch ein Zeitmultiplex-Mechanismus zur Anwendung (*Time Division Multiple Access* - TDMA). Dabei besteht für mehrere Stationen die Möglichkeit, auf einer Frequenz mit einem TDMA-Verfahren ihre Verbindungen einzurichten. Jede Station erhält einen gesicherten, periodisch auftretenden Bruchteil der Gesamtübertragungsrate einer Frequenz. Anhand

Abb. 4.3 wird die Zeitaufteilung des DECT-Systems in der Physikalischen Schicht erläutert.

Auf jeder der 10 Frequenzen wird die Zeitachse in 10 ms lange Rahmen (*Frames*) unterteilt, die jeweils eine Länge entsprechend der Dauer von 11520 bit haben. Daraus resultiert eine Rahmen-Bruttoübertragungsrate von 1152 kbit/s. Ein Rahmen umfaßt 24 Zeitschlitzze (*Slots*), sogenannten Full-Slots, in denen ein normales Datenpaket (*Basic Physical Packet P32*) oder ein kurzer Signalisierungsburst (*Short Physical Packet P00*) übertragen wird. Dieser Full-Slot kann in zwei Half-Slots zur Übertragung von kurzen Datenpaketen (*Low Capacity Physical Packet P08j*) aufgeteilt werden. Zur Bereitstellung von breitbandigeren Datenkanälen (z.B. analoge Modems mit 28.8 kbit/s oder ISDN B-Kanäle mit 64 kbit/s), die aus Kapazitätsgründen nicht durch die normale Kombination von mehreren Full-Slots realisiert werden können, wird ein sogenannter Doppelslot (*Double Slot P80*) aus der Verbindung zweier Full-Slots gebildet.

Die ersten 12 Zeitschlitzze dienen bei der normalerweise eingesetzten *Basic Connection* zur Datenübertragung von der Feststation zur Mobilstation (*downlink*), während der zweite Teil der 24 Slots für die Richtung von der Mobilstation zur Feststation (*uplink*) reserviert ist. Da für eine Duplex-Verbindung je eine Up- und Downlinkverbindung<sup>1</sup> benötigt wird, gebraucht das DECT-System eine sogenannte Zeitlagentrennung (*Time Division Duplexing* - TDD). Belegt die Feststation den Slot  $k$ , um an das mobile Endgerät zu übertragen, ist der Slot  $k + 12$  für die Mobilstation vorgesehen, um ihrerseits Daten an die Feststation zu schicken. Bei der komplexeren *Advanced Connection* wird diese starre Zuordnung aufgegeben und eine freizügige Benutzung von Zeitschlitzzen in jede Richtung gestattet.

Jeder der 24 Zeitschlitzze hat eine Länge von 480 bit ( $416 \mu\text{s}$ ), die entsprechend der Slotart (Basic, Short, Low) genutzt wird. Jedes Physical Packet besitzt ein Synchronisationsfeld  $S$  und einen Datenbereich  $D$ . Das normale Datenpaket ist um eine Schutzzone (*guard period*) von 56 bit<sup>2</sup> Länge ( $52.1 \mu\text{s}$ ) kürzer als ein Zeitschlitz, um das Überlappen der Nachrichten benachbarter Zeitschlitzze zu verhindern.

Die wichtigsten technischen Daten des DECT-Systems sind in Tabelle 4.1 enthalten.

<sup>1</sup>Die Übertragungsstrecke von der Mobilstation zur Feststation heißt Uplink, die umgekehrte Strecke Downlink

<sup>2</sup>Ohne Verwendung eines Z-Feldes (Kopie des X-Feldes) ist die Schutzzone 60 bit lang

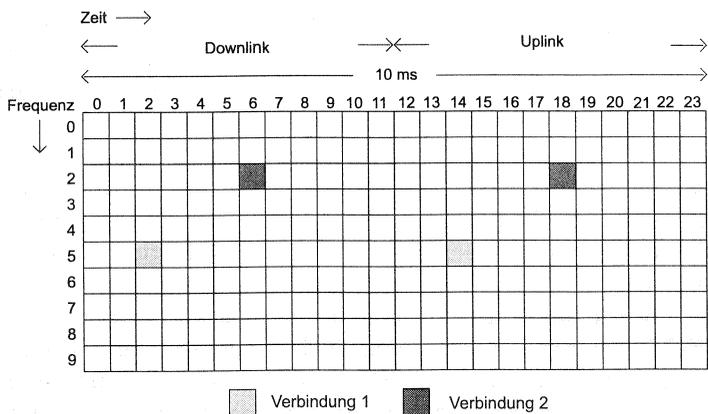


Abbildung 4.3: Zeit- und Frequenzmultiplex des DECT-Systems

### 4.2.3 Physikalische Pakete und Kanäle

Die Daten werden in Form von physikalischen Paketen übermittelt, die in vier Formaten vorkommen und denen jeweils ein Typ von physikalischem Kanal entspricht.

Im DECT-System können folgende Pakettypen (entsprechend auch Kanal-typen) Verwendung finden (s. Abb. 4.4 und 4.5) :

- **P32-Nachricht**

Da bei der Anforderung eines Kanals üblicherweise eine normale Sprachverbindung gewünscht wird, soll an dieser Stelle näher auf die Struktur der Basis-Nachricht P32 eingegangen werden (Abb. 4.4). Die ersten 32 bit bilden, wie bei allen Nachrichten, das Synchronisationsfeld, welches zur Takt- und Paket-Synchronisation im Funknetz verwendet wird. Es besteht aus einer 16 bit langen Präambel, gefolgt von einem 16 bit langen Paketsynchronisationswort. Die Antwort der Mobilstation enthält die Invertierung der von der Feststation gesendeten Bitfolge des Synchronisationsfeldes.

Im Anschluß an das S-Feld folgt das Nutzdatenfeld *D*, das eine Länge von 388 bit hat. Der Inhalt dieses Feldes wird vom MAC Layer ausgewertet und deshalb später noch eingehend erläutert, vgl. Abschnitt

4.3.3. Es enthält das sogenannte A-Feld zur Signalisierung (64 bit) und das B-Feld zur Datenübertragung (324 bit). Es ist so definiert, daß pro Rahmen genau 320 bit Benutzerinformation übertragen werden. Dadurch ergibt sich 32 kbit/s Übertragungskapazität für einen ADPCM-Sprachkanal.

Im Anschluß an das D-Feld besteht die Möglichkeit, ein sog. Z-Feld zu übertragen. Dieses 4 bit lange Wort stellt eine Kopie der letzten 4 bit des Datenfeldes dar, welches auch X-Feld genannt wird. Durch Vergleich dieser beiden Bereiche, kann der Empfänger feststellen, ob die Übertragung durch Fehler in der Synchronisation benachbarter DECT-Systeme gestört worden ist. In einem solchen Fall spricht man von gleitenden Kollisionen (*Sliding Collision*) innerhalb des Systems. Eine Messung dieser Störungen erlaubt eine frühzeitige Erkennung der Interferenzen und kann als Kriterium für eine optimierte Handover-Entscheidung genutzt werden.

- **P00-Nachricht**

Die P00-Nachricht wird für kurze verbindungslose Übertragungen wie Bakenaussendungen oder Kurzinformationen genutzt. Sie umfaßt nur 96 der 480 bit und erlaubt damit eine große Schutzzone. Dies ist besonders wichtig beim Beginn einer Verbindungsphase, da die Mobilstation dann noch nicht völlig netzsynchron sein kann und bei Aussendung eines Full-Slots benachbarte Zeitschlitze stören könnte.

- **P08j-Nachricht**

Die P08j-Nachricht benötigt zur Übertragung nur einen halben Zeitschlitz und erreicht somit bei einer Verringerung der Übertragungsrate eine Verdopplung der verfügbaren Kanäle pro Rahmen. Wie bei Paket P32 besteht auch P08 aus einem 32bit Synchronisationsfeld, einem 148 bit langen D-Feld und eventuell einem 4 bit langen Z-Feld.

- **P80-Nachricht**

Die P80-Nachricht wird in einem Double-Slot übertragen und enthält wie die P32-Nachricht ein Synchronisations-, Daten- und ein optionales Z-Feld. Das Datenfeld ist wieder in ein 64 bit A-Feld und ein B-Feld eingeteilt, welches ein 800 bit Datenfeld und das X-Feld enthält. Somit steht ein Übertragungskanal mit 80 kbit/s Datenrate zur Verfügung.

Eine genaue Beschreibung der Dienstzugangspunkte der physikalischen Schicht und der dort angebotenen Dienste wird im DECT Standard [16] und in [57] gegeben.

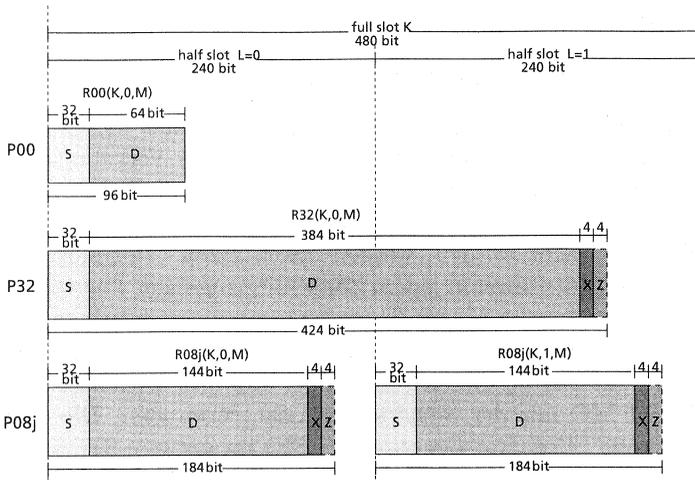


Abbildung 4.4: Physikalische Pakete und Kanäle

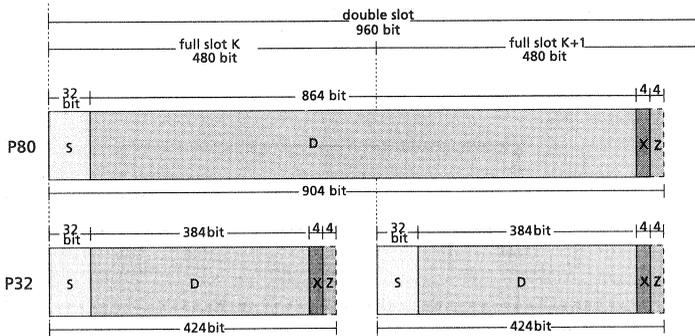


Abbildung 4.5: Realisierung des Double-Slots

### 4.3 DECT Vielfachzugriff - Medium Access Control Layer

#### 4.3.1 Zell- und Cluster-Funktionen

In der Übersicht wurde schon auf die Funktionen der MAC-Schicht eingegangen. Sie dient dazu, von der LLME geforderte Verkehrskanäle (Bearer) einzurichten, aufrecht zu erhalten, und auf Anforderung aufzulösen. Die Steuerinformationen, die durch verschiedene Dienstzugangspunkte in den MAC eingebracht werden, werden durch einen Multiplexalgorithmus den eigentlichen Nutzdaten in jedem Zeitschlitz zugefügt. Die verschiedenen Dienste des MAC-Layers werden in zwei Gruppen unterteilt (s. Abb. 4.6). Die Funktionen zur Kontrolle von Zellverbunden (*Cluster Control Functions* - CCF) im oberen Bereich sind über die drei Dienstzugangspunkte MA, MB und MC mit der Sicherungsschicht verbunden. Die Funktionen zur Zellkontrolle (*Cell Site Functions* - CSF) im unteren Teil koordinieren den Übergang zur physikalischen Schicht. Folgende Einzelfunktionen bieten die zwei Gruppen:

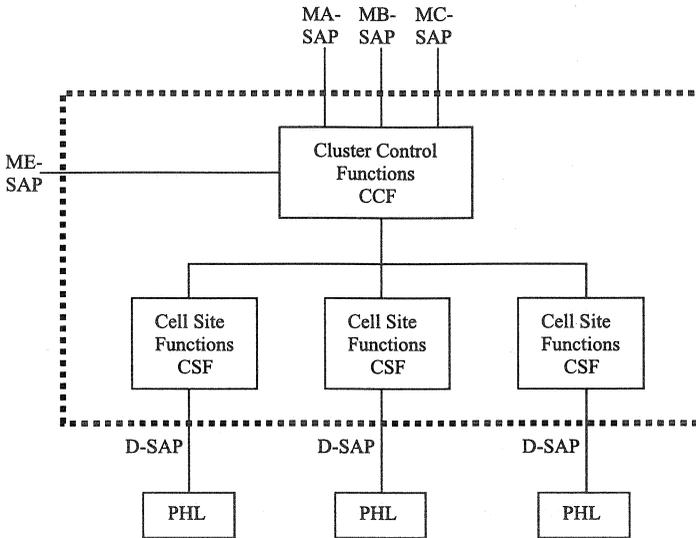


Abbildung 4.6: Einteilung der MAC-Dienste

- **Cluster Control Functions CCF**

Die Funktionen des Cluster Control werden genutzt, um mehr als eine Zelle zu steuern. Dabei beinhaltet jeder logische Verbund von Zellen (Cluster) jeweils nur eine CCF, die die gesamten Zellfunktionen steuert. Innerhalb dieses Verbundes stehen drei verschiedene unabhängige Dienste zur Verfügung:

- *Broadcast Message Control (BMC)*

Diese Funktion existiert nur einmal in jeder CCF und steuert bzw. verteilt die *Cluster-Broadcast* Informationen an die jeweiligen Zellfunktionen. Der BMC unterstützt mehrere verbindungslose Punkt-zu-Mehrpunkt Dienste, die von der Feststation zur Mobilstation gerichtet sind. Der BMC arbeitet mit jeder Art von Verkehrskanälen. Ein wichtiger Dienst ist der Aufruf der Mobilstation (Paging) und die Übertragung der Systemdaten auf dem *Dummy Bearer* (s.u.). Dies ermöglicht dem mobilen Gerät die Identifizierung der Feststation.

- *Connectionless Message Control (CMC)*

Alle Informationen, die einen verbindungslosen Dienst betreffen, werden von meist einem CMC in jeder CCF gesteuert. Dieser bietet neben der Übertragung von Informationen aus der Steuerebene der LLC-Schicht auch die Verarbeitung von Benutzerdaten aus der sogenannten U-Plane. Die Dienste können in beide Richtungen betrieben werden.

- *Multi Bearer Control (MBC)*

Dieser Dienst beinhaltet das Management aller Daten, die direkt zwischen zwei korrespondierenden MAC-Schichten ausgetauscht werden. Für jede verbindungsorientierte Punkt-zu-Punkt Verbindung existiert ein MBC. Die in eine oder beide Richtungen der Verbindung übertragende MBC-Instanz kann mehrere Bearer unterstützen, wobei eine entsprechend höhere Nettodatenrate erzielt wird.

Jeder dieser drei Dienste besitzt zur nächst höheren Schicht einen eigenen unabhängigen Dienstzugangspunkt, der mehrere logische Kanäle zusammenfassen kann.

- **Cell Site Functions (CSF)**

Unterhalb der CCF-Dienste innerhalb der MAC-Schicht sind die Zellfunktionen angesiedelt, die stellvertretend für die jeweilige Zelle stehen. Von jeder CCF werden somit mehrere CSF gesteuert. Folgende

zellorientierten Dienste können unterschieden werden:

- *Connectionless Bearer Control* (CBC)  
Jeder verbindungslose Bearer innerhalb der CSF wird durch einen eigenen CBC gesteuert.
- *Dummy Bearer Control* (DBC)  
In jeder CSF gibt es maximal einen *Dummy Bearer*, der, falls keine Teilnehmerverbindungen in der Zelle existieren, eine Art Bakenfunktion realisiert, an der sich die Mobilstationen synchronisieren können. Gleichzeitig kann das Endgerät, mittels des empfangenen Signals, die aktuelle Kanalqualität bestimmen und auswerten.
- *Traffic Bearer Control* (TBC)  
Für eine Duplexverbindung muß ein MBC zwei TBCs anfordern, die jeweils einen *Traffic Bearer* kontrollieren können. Durch den TBC werden die Daten der *I*-, *C*-, *G*-, und *B<sub>S</sub>*-Kanäle (s. Kapitel 4.3.2 und [57]) durch einen bestimmten Multiplex-Algorithmus in die entsprechenden Felder der Datenpakete eingetragen (s. Abschnitt 4.3.3). Die Komplexität dieser Funktion ist aus Abb. 4.8 zu erkennen.
- *Idle Receiver Control* (IRC)  
Dieser Dienst kontrolliert einen Receiver der Zelle, der zu diesem Zeitpunkt keine Verbindung zu einem Teilnehmer besitzt.

Abbildung 4.7 bietet eine graphische Anschauung der oben beschriebenen Teildienste in der MAC-Schicht mit den zugehörigen Dienstzugangspunkten.

### 4.3.2 Dienstzugangspunkte des MAC Layers

Zu den cluster- und zellorientierten Funktionen existieren mehrere Dienstzugangspunkte, über die die Instanzen des MAC-Layer mit der nächst höheren OSI-Schicht (*Logical Link Control Layer*) und der nächst tieferen OSI-Schicht (*Physical Layer*) kommunizieren können (s. Abb. 4.6). Zwischen den clusterorientierten Einheiten und der LLC-Schicht existieren folgende Dienstzugangspunkte:

- **MA-SAP**

Informationen des Broadcast Message Control Service gelangen über diesen Zugangspunkt zur LLC-Schicht. Neben den Daten des soge-

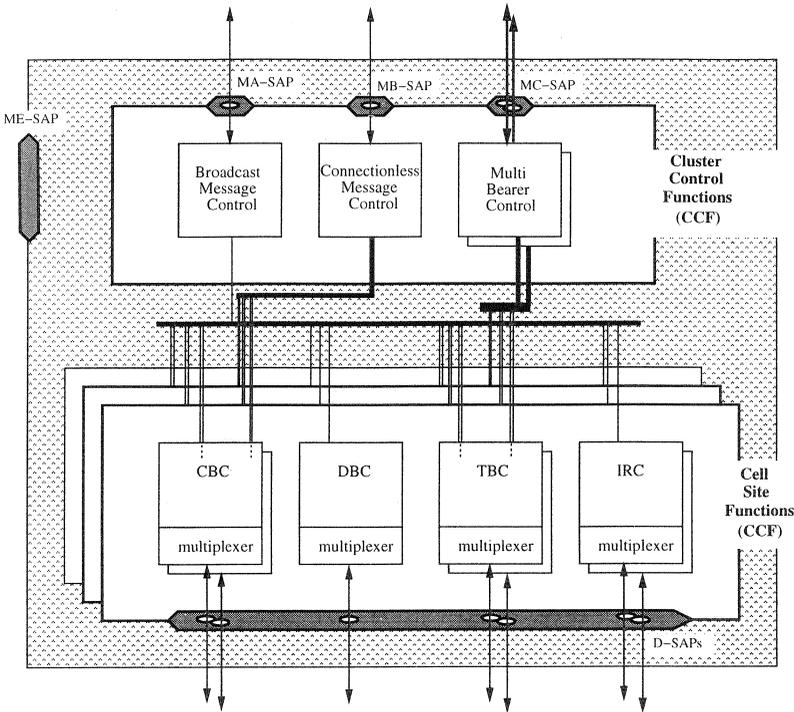


Abbildung 4.7: Übersicht der Dienste in der MAC-Schicht

nannten  $B_S$  Kanals werden zusätzlich Kontrollfunktionen, die den Datenfluß auf dem  $B_S$  Kanal steuern, übermittelt. Dieser logische *Higher Layer Broadcast Channel* unterstützt einen verbindungslosen Simplex (*Broadcast*) Dienst von der Feststation in Richtung der Mobilstation.

• **MB-SAP**

Dieser Zugangspunkt verbindet den Connectionless Message Control mit der LLC-Schicht und beinhaltet drei logische Kanäle:

- $CL_F$
- $CL_S$
- $SI_N$

Die Steuerkanäle (CL...) unterstützen einen verbindungslosen Duplex-Dienst zwischen der Feststation und dem mobilen Endgerät. Dabei be-

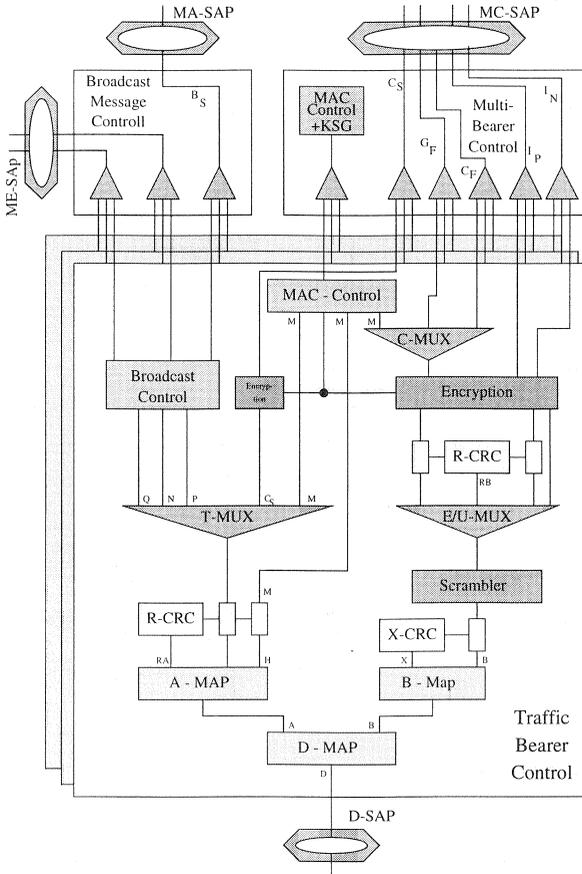


Abbildung 4.8: MAC-Traffic Bearer Control (TBC)

steht von der Feststation zur Mobilstation ein kontinuierlicher Dienst, in der anderen Richtung jedoch nicht. Die erlaubte Datensegmentlänge für den langsamen  $CL_S$  Kanal beträgt 40 bit, während der schnelle  $CL_F$  Kanal eine erlaubte Segmentlänge von 64 bit hat.

Der Informationskanal  $SI_N$  bietet einen ungeschützten Simplex Dienst für die Richtung Feststation – Mobilstation.

- **MC SAP**

Die Multi Bearer Control (MBC) Einheit ist über den MC-SAP mit der LLC-Schicht verbunden. Fünf logische Kanäle stehen zur Übertragung von Information zur Verfügung, die zur Datenflußsteuerung, Einrichtung, Aufrechterhaltung und Auslösung von MAC-Verbindungen vorgesehen sind:

- $C_S$
- $C_F$
- $G_F$
- $I_N$
- $I_P$

Die Steuerkanäle  $C_S$  und  $C_F$  bieten zwei unabhängige verbindungsorientierte Duplex Dienste. Für eine Verbindung eines langsamen  $C_S$  mit einer Segmentlänge von 40 bit beträgt der maximale Durchsatz 2 kbit/s. Der schnelle Steuerkanal  $C_F$  mit einer Datensegmentlänge von 64 bit erreicht bei Full-Slot Nutzung einen Durchsatz von 25.6 kbit/s. Die Informationen der beiden Steuerkanäle werden mit einer CRC-Prüfsumme versehen, die eine Fehlererkennung und Korrektur durch Wiederholung mit einem ARQ-Verfahren erlaubt.

Bei jeder Übertragung wird einer der beiden Informationskanäle  $I_P$  und  $I_N$  benutzt, um den höheren Schichten einen unabhängigen verbindungsorientierten Duplex-Dienst bieten zu können. Beim Gebrauch eines  $I_N$  Kanals zur Sprachübertragung werden die Informationen durch die MAC-Schicht mit einem Fehlererkennungsschutz von vier Bit (X-Feld) versehen.  $I_P$  Kanäle können sowohl für *error detection* als auch für *error correction* Sendungen vorgesehen werden.

Der  $G_F$  Kanal ist ein verbindungsorientierter Simplex-Dienst mit einer Datensegmentlänge von 54 bit. Er wird von der Benutzerebene (U-Plane) der LLC-Schicht benutzt. Der MAC-Layer erlaubt eine Fehlererkennung für diesen Kanal.

- **ME-SAP**

Zur Unterstützung der Lower Layer Management Funktionen besitzt die MAC-Schicht einen separaten Dienstzugangspunkt, den ME-SAP. Dieser ist nur insofern formal spezifiziert, als daß einzelne Dienstprimitive definiert sind, er aber keine logischen Kanäle zur Verfügung stellt.

Eine detaillierte Beschreibung der hier erwähnten logischen Kanäle des MAC-Layers, der internen Steuerkanäle  $Q_T$ ,  $N_T$ ,  $M_T$  und  $P_T$  und der Primitiven des MAC Layers sind in DECT Standard [18] und in [57] aufgeführt.

### 4.3.3 MAC – Multiplex-Funktionen

#### Multiframe Struktur

Die von dem Physical Layer (s. Kapitel 4.2) definierte TDM-Rahmenstruktur wird im MAC-Layer logisch von einer Multi-Rahmen Struktur überlagert. Ein *Multiframe* setzt sich aus 16 Einzel-Rahmen zusammen (s. Abb. 4.9) und startet normalerweise mit der ersten Hälfte des Rahmens 0, benutzt von der Feststation. Das Ende des Multiframe benutzt das mobile Endgerät in der letzten Hälfte des Rahmens 15. Die Nummer des aktuellen Multi-Rahmens wird nicht auf dem physikalischen Kanal übertragen, sondern dient ausschließlich zur Organisation der internen Protokolle.

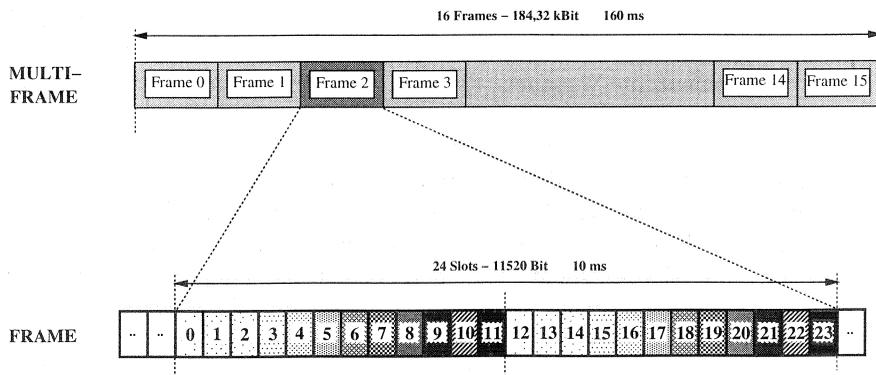


Abbildung 4.9: DECT Multiframe Einteilung

#### D-Feld

Das sog. Bit-Mapping, das Zusammenstellen des D-Feldes, welches anschließend an den Physical Layer weitergegeben wird, geschieht nach festgelegten

Regeln. Wie schon in Kapitel 4.2 beschrieben, ist die Länge des D-Feldes abhängig von der gewünschten Übertragungsart. Wird eine Full-Slot Übertragung angefordert, hat das D-Feld eine Länge von 388 bit. Bei Half- oder Short-Slot Operationen wird eine andere D-Feld Struktur benutzt.

Der D-Rahmen eines Full-Slot besitzt, wie in Abb. 4.10 zu erkennen ist, zwei Teile. Das A-Feld dient der kontinuierlichen Übertragung von Steuerinformationen und hat eine Länge von 64 bit. Das B-Feld steht den tatsächlichen Anwenderdaten zur Verfügung und ist im Full-Slot Betrieb 324 bit groß. Im

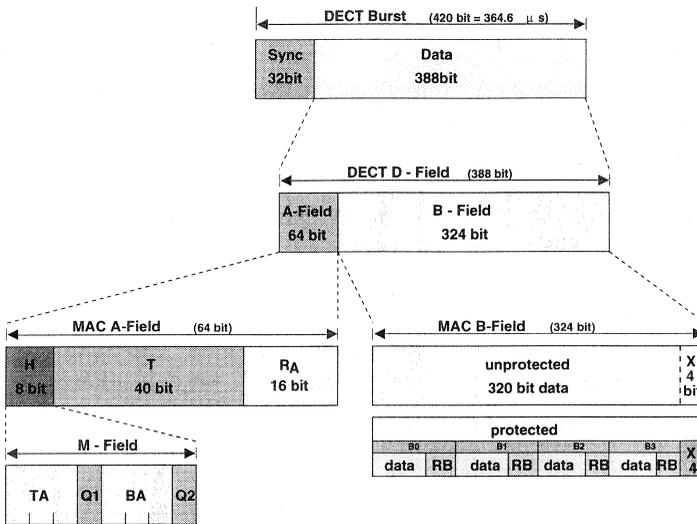


Abbildung 4.10: DECT Zeitmultiplex: D-Feld

folgenden werden die einzelnen Teile des A- bzw. des B-Feldes für ein normales Datenpaket (P32) erläutert.

**A-Feld** Das Steuerfeld enthält drei Bereiche (s. Abb. 4.10). Dem Kopf des A-Feldes (*Header*), der eine Länge von 8 bit aufweist, schließt sich die A-Feld-Information (*Tail*) mit 40 bit an. Den Abschluß bildet ein CRC-Feld ( $R_A$  - *Redundancy A*), welches mit 16 bit für die Sicherung der Steuerdaten sorgt.

- **TA (a0...a2)**

Das 3 bit lange TA-Feld am Beginn des Headers gibt die Art der A-

Feld Information (a8...a47) an. Es existieren fünf verschiedene logische Kanäle, aus denen einer für die Übertragung im A-Feld ausgewählt wird. Dabei ist neben den internen MAC-Kanälen  $N_T$ ,  $Q_T$ ,  $M_T$  oder  $P_T$  auch die Übertragung des  $C_S$ -Kanals mit Kontrolldaten höherer Schichten möglich.

- **Q1 (a3)**

Das Q1-Bit dient bei der verbindungsorientierten Übertragung mit Nutzung von Duplex Bearern zur Qualitätskontrolle des Kanals und wird als Handoverkriterium genutzt.

- **BA (a4...a6)**

Dieser Bereich gibt an, welche Beschaffenheit das B-Feld besitzt. Neben der normalerweise vorgesehenen geschützten oder ungeschützten Informationsübertragung ( $U$ -type,  $I_P$  oder  $I_N$ ) ist in Ausnahmefällen auch eine erweiterte Signalisierung ( $E$ -type,  $C_F$  oder  $C_L$ ) möglich.

- **Q2 (a7)**

Das Q2-Bit ist wie das Q1-Bit zur Qualitätskontrolle der Verbindung vorgesehen. Die Kombination aus Q1 und Q2 bildet ein Handoverkriterium.

- **A-Field Info (a8...a47)**

Innerhalb des 40 bit langen Tail-Feldes ist die Übertragung interner MAC-Control Nachrichten möglich. Dabei werden mittels eines Multiplexers ( $E$ -type) in aufeinanderfolgenden Zeit-Schlitzen verschiedene Steuerinformationen ausgesendet.

- **$R_A$ -CRC (a48...a63)**

Die logischen Kanäle des A-Feldes werden von der MAC-Schicht mit einem zyklischen Code (CRC) gesichert. Dabei werden 16 Redundanzbit berechnet, mit denen bis zu

- 5 unabhängige Fehler
- Büschelfehler bis zu einer Länge von 16 bit
- Fehlermuster mit ungerader Fehleranzahl

im A-Feld erkannt werden können [18] [50]. Eine mögliche Korrektur der Fehler ist im MAC-Layer nicht vorgesehen.

Die Steuerinformationen (Kanäle  $M_T$ ,  $N_T$ ,  $P_T$  und  $Q_T$ ) der MAC-Schicht und die Signalisierungsdaten des  $C_T$  Kanals werden im Tail-Feld des A-Feldes untergebracht. Dieses Multiplexen der Steuerkanäle beim Aussenden erfolgt nach einem festgelegten Schema, dem T-MUX-Algorithmus. In jedem Multiframe sind verschiedene Steuerinformationen für das A-Feld

vorgesehen, die nach einer für Mobilstation und Feststation unterschiedlichen Prioritätsliste ausgesendet werden. Dazu werden die 16 Frames eines Multiframe nach geraden und ungeraden Nummern unterschieden. Weiterhin wird für die jeweilige Übertragungsrichtung (Up-/Downlink) ein unterschiedliches Schema verwendet, da der Q- und P-Kanal nur in der Downlink-Richtung übertragen werden.

Das verwendete Belegungs- und Prioritätenschema ist für den Up- und Downlink in den Tabellen 4.3 und 4.2 dargestellt. In Abb. 4.11 ist ein

T-MUX (Downlink-Richtung)		
Frame-#	Kanäle	Prioritäten
ungerade	$M_T, C_T, N_T$	$M_T > C_T > N_T$
0,2,4,6,10,12	$P_T, N_T$	$P_T > N_T$
14	$N_T$	-
8	$Q_T$	-

Tabelle 4.2: T-MUX Algorithmus (downlink)

T-MUX (Uplink-Richtung)		
Frame-#	Kanäle	Prioritäten
ungerade	$N_T$	
gerade	$M_T, C_T, N_T$	$M_T > C_T > N_T$

Tabelle 4.3: T-MUX Algorithmus (uplink)

Multirahmen dargestellt. Der dadurch erzielte Durchsatz für jeden Kanal ist Tabelle 4.4 zu entnehmen.

**B-Feld** Im D-Feld folgt auf das Steuerfeld ein 324 bit langes Datenfeld, das B-Feld, für das ein geschütztes und ein ungeschütztes Format vorliegt. Die ungeschützte Übertragung von Daten, wie sie bei Sprachsendungen genutzt wird, benötigt für eine Datenrate von 32 kbit/s 320 effektive Nutzbit des B-Feldes. Die restlichen vier Bit (X-Feld) werden zum Fehlerschutz mittels CRC eingesetzt (X-CRC). Bei dem geschützten B-Feld-Format bleiben die

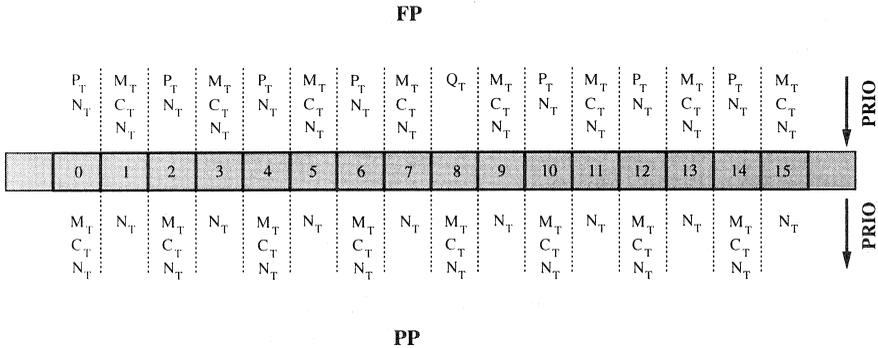


Abbildung 4.11: Steuerinformation im Multiframezyklus

Kanal	Durchsatz [frames/multiframe]	
	downlink	uplink
$C_T$	0 - 8	0 - 8
$M_T$	0 - 8	0 - 8
$N_T$	1 - 15	8 - 16
$P_T$	0 - 6	-
$Q_T$	1	-

Tabelle 4.4: Kanaldurchsatz im A - Tail-Feld

4 bit für den Fehlerschutz erhalten, während die 320 effektiven Datenbit in 4 Blöcke unterteilt werden. Innerhalb jedes Blockes werden die Nutzbit auf 64 reduziert, um mit den restlichen 16 bit eine R-CRC Prüffolge bilden zu können ( $R_B$  - Redundancy B). Die Nettodatenrate reduziert sich auf 25,6 kbit/s. Die Auswahl des verwendeten B-Feld Formats erfolgt durch den E/U-MUX Algorithmus, der für jeden Frame abhängig von den jeweiligen Verkehrsanforderungen zwischen dem E- und dem U-Modus auswählt.

- *E-Modus*

Im E-Modus wird immer das *protected* Format gewählt. Dabei werden für *traffic bearer* der M-,  $C_F$ - und  $G_F$ -Kanal in verschiedenen Kombinationen nach dem C-Mux Algorithmus in die jeweiligen Unterfelder

eingetragen.

- *U-Modus*

Im U-Modus werden die Informationskanäle übertragen. Entsprechend wird für den  $I_N$ -Kanal das ungeschützte Format gewählt, während für den  $I_P$ -Kanal das geschützte Format verwendet wird.

#### 4.3.4 Zustände der Mobilstation

Die Mobilstation kann sich bezogen auf die Protokolle des MAC-Schicht in einem der vier in Abb. 4.12 dargestellten Zustände befinden.

- **Active Locked**

Die synchronisierte Mobilstation hat mindestens eine Verbindung zu einer oder mehreren Feststationen

- **Idle Locked** Die Mobilstation ist mit mindestens einer Feststation synchronisiert. Sie hat zur Zeit keine Verbindung, ist jedoch in der Lage, Anfragen für Verbindungen zu empfangen.

- **Active Unlocked**

Die Mobilstation ist zu keiner Feststation synchronisiert und kann daher auch keine Verbindungswünsche empfangen. Sie versucht eine geeignete Feststation zu finden, um durch eine Synchronisation in den *Idle Locked* Zustand zu wechseln.

- **Idle Unlocked**

Die Mobilstation ist zu keiner Feststation synchronisiert und ist nicht in der Lage, geeignete Feststationen zu detektieren.

Ist das Endgerät ausgeschaltet, befindet es sich im *Idle Unlocked* Zustand. Beim Einschalten wechselt die Mobilstation in den *Idle Locked* Zustand. Sie beginnt nach einer geeigneten Feststation zu suchen, mit der sie sich synchronisieren kann. Gelingt dies, wird der *Idle Locked* Zustand eingenommen. Dort kann die Mobilstation Verbindungsaufrufe empfangen oder aussenden. Wird der erste Verkehrskanal eingerichtet, wechselt sie in den *Active Locked* Zustand. Wird hier nach Beendigung der Verbindung der letzte Kanal aufgelöst, kehrt die Mobilstation wieder in den *Idle Locked* Zustand zurück. Verliert sie die Synchronisation zu ihrer Feststation muß sie im *Active Unlocked* Zustand eine neue geeignete Feststation aussuchen.

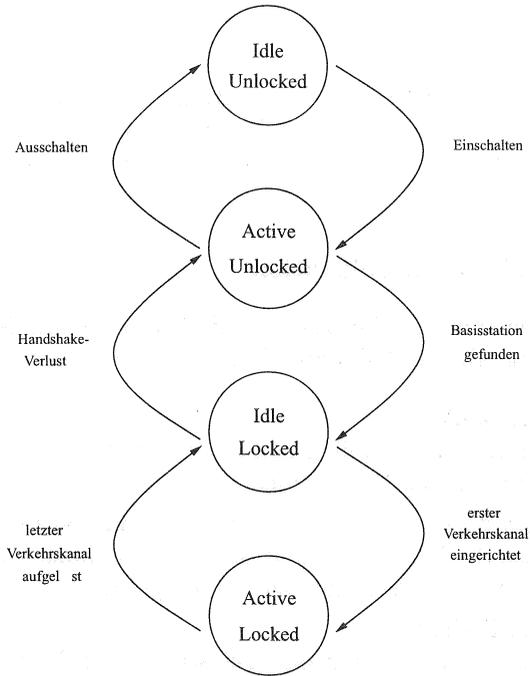


Abbildung 4.12: Zustände einer Mobilstation

### 4.3.5 Zustände der Feststation

Die Feststation kann sich in einem von vier Zuständen befinden. Der *Inactive* Zustand, in dem die Feststation ausgeschaltet ist, wurde in Abb. 4.13 nicht dargestellt.

- **Inactive**

Die Feststation ist ausgeschaltet und kann weder Nachrichten empfangen noch aussenden.

- **Active Idle**

Die Feststation betreibt keinen Verkehrskanal und strahlt deshalb einen Dummy Bearer aus, den der Empfänger beim Beobachten der physikalischen Kanäle detektieren kann.

- **Active Traffic**

Die Feststation betreibt mindestens einen Verkehrskanal. Der Dummy Bearer wird nicht mehr ausgesendet.

- **Active Traffic and Idle**

Neben mindestens einem Verkehrskanal (Traffic Bearer) unterhält die Feststation auch einen Dummy Bearer.

Im Grundzustand *Active Locked* sendet die Feststation einen Dummy Bearer aus, um den mobilen Endgeräten zu ermöglichen, sich auf ihren Rahmen- und Slottakt zu synchronisieren. Wird ein Traffic Bearer aufgebaut, geht die Feststation in den *Active Traffic* Zustand über. Dabei kann der Dummy Bearer entfallen. Der entgegengesetzte Übergang erfolgt nach dem Auflösen des letzten Verkehrskanal. Wird beim Aussenden der Traffic Bearer ein Dummy Kanal erforderlich, kann die Feststation in den Zustand *Active Traffic and Idle* wechseln. Ebenfalls kann beim Aufbau des ersten Verkehrskanals der Dummy Bearer erhalten bleiben. Dann wird ein Wechsel vom *Active Idle* zum *Active Traffic and Idle* Zustand vorgenommen.

#### 4.3.6 Bearertypen

MAC-Bearer sind Elemente, die durch die zellorientierten CSF-Funktionen erzeugt werden und jeweils mit einer Service-Instanz der physikalischen Schicht korrespondieren. Folgende Bearertypen existieren:

- **Simplex Bearer**

Dieser Bearertyp dient zur Erzeugung eines physikalischen Kanals in eine Richtung. Man unterscheidet lange und kurze Simplex Bearer. Während der kurze Bearer nur das A-Feld beinhaltet, wird im langen, neben dem A-Feld, auch ein B-Feld übertragen. Der *Dummy Bearer Control* (DBC, s. Kapitel 4.3.1) reserviert z.B. für die Aussendung einer Broadcast-Information einen Simplex Bearer, der von der Feststation übertragen wird.

- **Duplex Bearer**

Ein Paar Simplex Bearer, das in entgegengesetzte Richtungen auf physikalischen Kanälen überträgt, wird Duplex Bearer genannt. Die beiden Bearer benutzen die gleiche Frequenz und sind zeitlich um einen halben Rahmen versetzt (Slotpaar). Ein *Traffic Bearer Controller* (TBC) benutzt z.B. einen Duplex Bearer für einen Verkehrskanal zwischen Feststation und Mobilstation.

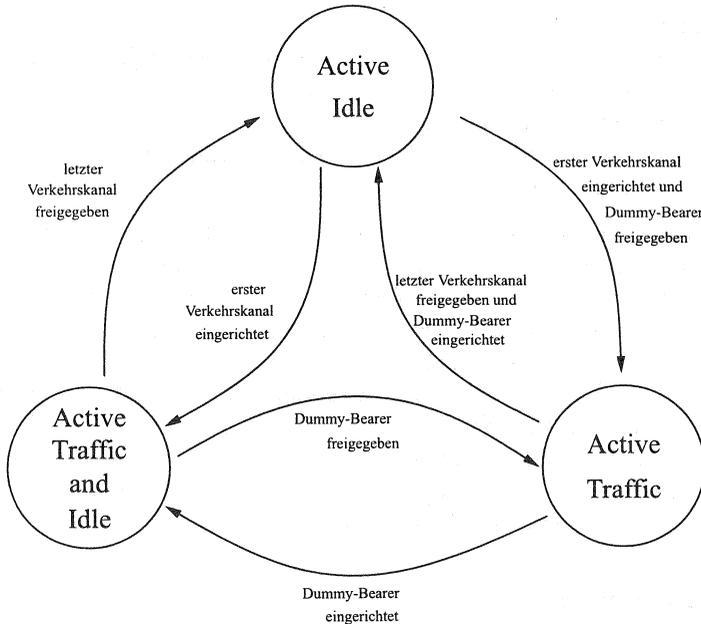


Abbildung 4.13: Zustände einer Feststation

- **Double Simplex Bearer**

Ein Paar langer Simplex Bearer, das in die gleiche Richtung auf zwei physikalischen Kanälen überträgt, wird als Double Simplex Bearer bezeichnet. Die beiden Bearer sollten wie bei dem Duplex Bearer auf der gleichen Frequenz in einem Slotpaar arbeiten. Diese Art von Bearer tritt nur bei der Nutzung von Multi-Bearer-Verbindungen auf und dient der asymmetrischen Übertragung.

#### 4.3.7 Verbindungsarten/MAC-Connection

Neben verbindungslosen Diensten, zu denen z. B. die Broadcast-Dienste gehören, bestehen verbindungsorientierte Instanzen. Jede *Multi Bearer Control* Einheit der MAC-Schicht ist für den Betrieb einer Verbindung verantwortlich. Sie steuert eine oder mehrere *Traffic Bearer Control* Instanzen, die

zur Verwaltung der Bearer dienen. Man unterscheidet zwischen Advanced Connections und Basic Connections:

- **Basic Connection**

Basic Connections besitzen keine gemeinsame Nummer (Connection Number), die sowohl der Feststation als auch der Mobilstation bekannt ist. Daher kann immer nur eine Basic Verbindung zwischen einer Feststation und einem mobilen Endgerät existieren. Sie besteht aus einem einzelnen Duplex Bearer. Während der Umschaltung des physikalischen Kanals (Handover-Vorgang) können für eine kurze Zeit zwei Basic Connections bestehen, die der gleichen LLC-Verbindung dienen.

- **Advanced Connection**

Eine *Advanced Connection* wird von genau einer MBC gesteuert, erhält aber im Gegensatz zu einer Basic Connection vom LLME eine Adresse zugeteilt, die als *Exchanged Connection Number* (ECN) bezeichnet wird. Damit können zwischen einer Mobilstation und einer Feststation mehrere *Advanced Connection* gleichzeitig unterhalten werden.

Daneben werden auch die von einer TBC für eine *Advanced Connection* verwalteten Bearer mit einer Adresse versehen, die als *Logical Bearer Number* (LBN) bezeichnet wird. Damit ist es möglich eine *Advanced Connection* aus mehreren Bearern verschiedenen Typs aufzubauen. Dabei muß für die Signalisierung zwischen beiden Verbindungspartnern immer ein *Duplex Bearer* bestehen.

Daneben kann eine MAC-Connection noch nach der Anzahl der verwendeten Bearer und der Symmetrie der Verbindung unterschieden werden.

Für die Unterscheidung nach der Anzahl der verwendeten Bearer wird zwischen *Single Bearer Connection* und *Multi Bearer Connection* getrennt.

- **Single Bearer Connection**

Unter einer *Single Bearer Connection* versteht man eine Verbindung, die genau einen *Duplex Bearer* benutzt. Sie ist damit gleichzeitig auch immer eine *Symmetric Connection*, kann aber sowohl vom Typ *basic* wie *advanced* sein.

- **Multi-Bearer Connection**

Eine *Multi Bearer Connection* besteht aus mindestens einem für die Signalisierung zwischen beiden Verbindungspartnern notwendigem *Duplex Bearer* und einem oder mehreren weiteren *Duplex Bearern* oder

*Double Simplex Bearern.* Eine *Multi-Bearer Connection* ist immer auch eine *Advanced Connection*.

Die Unterscheidung nach der Dienstsymmetrie erfolgt durch die Differenzierung zwischen symmetrischen- und asymmetrischen Diensten.

- **Symmetric Connection**

Eine *Symmetric Connection* hat immer die gleiche Anzahl von *Simplex Bearern* in beiden Übertragungsrichtungen. Daneben müssen auch die weiteren Dienstparameter für beide Richtungen übereinstimmen.

- **Asymmetric Connection**

Prinzipiell entspricht ein Dienst, der die Definition der symmetrischen Verbindung nicht erfüllt, einer *Asymmetric Connection*. Im DECT-Standard wird jedoch darüber hinaus angenommen, daß asymmetrische Verbindungen sich durch vollständige Asymmetrie auszeichnen, d.h. daß I-Kanal Daten nur in einer Verbindungsrichtung übertragen werden.

## 4.4 Verbindungsaufbau

Verbindungsorientierte Prozeduren innerhalb der MAC-Schicht benutzen zwei Punkt-zu-Punkt Verbindungen: *Connection* und *Bearer*. Für den *Data Link Layer* ist nur die reine *Connection* sichtbar. Die *Bearer*, die jede *Connection* für die Übertragung nutzt, werden innerhalb der MAC-Schicht verwaltet und sind für die höheren Schichten unsichtbar. Der Beginn eines Verbindungsaufbaues wird meistens vom mobilen Endgerät initiiert (*Portable Initiated*). Liegt ein Anruf aus dem Festnetz vor, muß die Mobilstation erst durch einen Funkruf (Paging) davon in Kenntnis gesetzt werden, damit sie mit der Setup-Prozedur beginnt.

### 4.4.1 Connection Setup

Der Ablauf des Verbindungsaufbaues kann mit der Beschreibung einiger Nachrichten (*Primitive*) des MAC-Layer erläutert werden. Die höheren Schichten (LLC-Layer) initiieren bei der MAC-Schicht einen Verbindungsaufbau (*Connection Setup*). Dieses Primitiv beinhaltet neben einem *MAC-Connection Endpoint Identifier* (MCEI), der für alle nachfolgenden Primitive als Referenzadresse gilt, einen Parameter, der den geforderten Dienst spezifiziert. Kann die MAC-Schicht die geforderten Dienste nicht erbringen,

schickt sie eine Disconnect-Anforderung an die LLC-Schicht (s. Abb. 4.14). Die durch den Request erzeugte *Multi Bearer Control* Instanz erhält von der *Lower Layer Management Entity* die Erlaubnis, eine Verbindung zwischen der Feststation und der Mobilstation aufzubauen. Entsprechend dem verlangten Dienst wird eine Basic oder Advanced Connection eingerichtet.

#### 4.4.2 Bearer Setup

Wurde durch einen Connection Setup in der MAC-Schicht des Endgerätes ein MBC eingerichtet, so wird anschließend versucht, die für den Dienst notwendigen Bearer aufzubauen. Dazu muß sich die Mobilstation im Zustand *Idle locked* befinden, also eine Feststation im Cluster kennen, bei der sie ihre Verbindungen einrichten kann. Der MBC erzeugt neue *Traffic Bearer Control* Instanzen, die die geforderten Bearer-Setups übernehmen. Der Ablauf

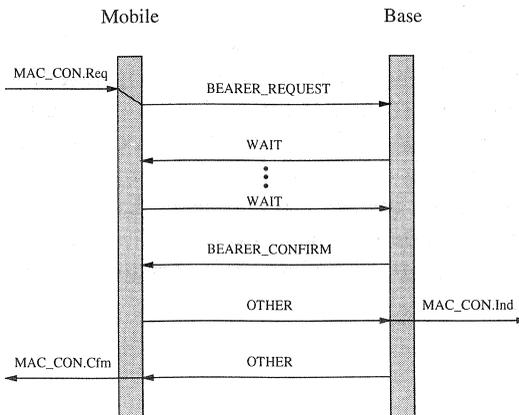


Abbildung 4.14: Verbindungsaufbau einer Basic Connection

des Beareraufbaues erfolgt nach folgendem Schema (s. auch Abb. 4.14):

1. Die Mobilstation sendet eine Bearer-Anforderung (*Bearer Request*) auf einem ausgesuchten Kanal zu einer bekannten Feststation. Dabei benutzt sie den *First Transmission Code*, innerhalb der 40 Tail-Bit des A-Feldes.

2. Die Feststation empfängt den Request fehlerfrei und richtet in ihrer MAC-Schicht einen neuen TBC ein.
3. Der TBC in der Feststation fordert von der Lower Layer Management Entity die Adresse einer unterstützenden MBC Instanz.
4. Ist die Feststation noch nicht für die Übertragung einer Bestätigung des Aufbaus an die Mobilstation bereit, sendet sie ein *WAIT*-Kommando. Das Endgerät erhält dieses Kommando und antwortet ebenfalls mit *WAIT*.
5. Nach Beendigung des Protokollablaufs auf der Festseite sendet die Feststation eine Bestätigung (*Bearer Confirm*).
6. Das Mobile erhält die Bestätigung und sendet direkt *Other* (im nächsten Rahmen).
7. Die Feststation empfängt die *Other*-Mitteilung und antwortet ebenfalls unmittelbar mit diesem Primitiv.
8. Die Mobilstation erhält das *Other* und der TBC informiert seinen MBC über den erfolgreichen Aufbau (*Bearer Established*).

Tritt bei dem Verbindungsaufbau zu einer beliebigen Zeit ein Fehler auf, so wird der Setup-Versuch abgebrochen, es kommt zu einer Wiederholung. Maximal sind 10 Aufbauversuche gestattet ( $N200$ ), die den Connection Setup Timer ( $T200 = 3$  Sekunden) nicht überschreiten dürfen. Also müssen beim Aufbau einer Verbindung alle geforderten Bearer innerhalb dieser Zeit eingerichtet sein. Ansonsten gilt der Aufbau als fehlgeschlagen. Während einer laufenden Verbindung können nach Bedarf zusätzliche Bearer eingerichtet oder aufgelöst werden, um die Gesamtübertragungskapazität zu erhöhen bzw. zu reduzieren.

# Radio Resource Management

Die Aufgabe des *Radio Resource Managements* (RRM) ist die Verwaltung des Funkmediums, unabhängig von einer Einteilung in das ISO/OSI Schichtenmodell. Beim DECT-System sind Funktionen aus allen Schichten zum RRM zu zählen. Das RRM des DECT-Systems kann in die zwei Bestandteile Setup bzw. Handover und die dafür genutzte dynamische Kanalwahl (*Dynamic Channel Selection* - DCS) unterteilt werden. Dabei regeln der Setup- bzw. Handover-Prozess die Einleitung, Steuerung, Überwachung und den Wechsel von Kanälen, während die Kanalwahl für die Wahl des geeigneten Kanals bei Setup und Handover verantwortlich ist.

## 5.1 Handover

Wird während einer bestehenden Verbindung aufgrund schlechter Qualität eine Zuordnung zu einer anderen Feststation oder ein Kanalwechsel vorgenommen, spricht man von einem Handovervorgang. Innerhalb mikrozellulärer Umgebungen entstehen aufgrund der kleinen Zellgrößen viele Handoverereignissen. Da der Handover-Vorgang mit erheblichem Signalisieraufwand verbunden ist und ebenfalls zusätzliche Systemressourcen erfordert, strebt man an, die Anzahl der Handover möglichst gering zu halten.

### 5.1.1 Handover im DECT-System

Das Radio Resource Management des DECT-Systems sieht einen dezentralen, von der Mobilstation gesteuerten Handoveralgorithmus vor. Dieser *Mobile Controlled Handover* (MCHO) entscheidet, ob und wann ein Handover notwendig ist. Der eingeleitete Handover ist meist ein *Seamless-Handover*, bei dem der alte Kanal erst verlassen wird, wenn der neue bereits eingerichtet worden ist. Im Gegensatz zum *Non-Seamless-Handover* merkt der Benutzer meist gar nicht, daß ein Kanal- oder Zellwechsel stattgefunden hat.

Es existieren zwei verschiedene physikalische Handoverformen (s. Abb. 5.1):

- **Intra-Cell**

Beim Wechsel eines Kanals innerhalb einer Zelle spricht man von einem Intracell-Handover. Dabei wird die gewählte Feststation beibehalten und nur die Frequenz und/oder der Zeitschlitz gewechselt.

- **Inter-Cell**

Wird beim Wechsel des Kanals die alte Feststation aufgegeben und ein neuer Kanal bei einer neuen Feststation eingerichtet, spricht man von einem Intercell-Handover. Dabei kann in der neuen Zelle sowohl die Frequenz als auch der Slot neu ausgewählt werden.

Neben der Unterteilung der Handover nach physikalischen Merkmalen kann man auch zwei logische Stufen des Kanalwechsels definieren:

- **Internal Handover**

Findet der Handovervorgang innerhalb eines geschlossenen DECT-Systems (*Fixed Part*, s. Kapitel 3.2) statt, spricht man von einem internen Kanalwechsel. Protokolltechnisch läuft dieser Handover entweder in der MAC-Schicht oder in der DLC-Schicht ab.

- **External Handover**

Der Wechsel zwischen zwei unabhängigen DECT-Systemen (*Fixed Part*, s. Kapitel 3.2) wird als externer Handover bezeichnet. Dies ist ein High-Level Handover, der im Mobility Management des Network Layer ausgeführt wird. Hier kann es zu einem kurzzeitigen Dienstverlust (*Non-Seamless-Handover*) kommen.

Ein Handover kann allgemein verschiedene Ursachen haben, die im folgenden aufgeführt werden.

### 5.1.2 Handoverkriterien

Einbußen der Kanalqualität im DECT-System sind meist auf zwei Gründe zurückzuführen. Einerseits kann durch die Mobilität des Teilnehmers der Pegel der zugehörigen Feststation abnehmen, wenn sich das Endgerät aus dem Empfangsradius entfernt, andererseits kommt es durch die Möglichkeit der Mehrfachbelegung eines Kanals in räumlicher Distanz zu mehr oder weniger starken Gleichkanalstörungen. Um beiden Effekten entgegenzuwirken, wird frühzeitig ein Handover eingeleitet. Im folgenden sollen die beiden Fälle etwas näher betrachtet werden.

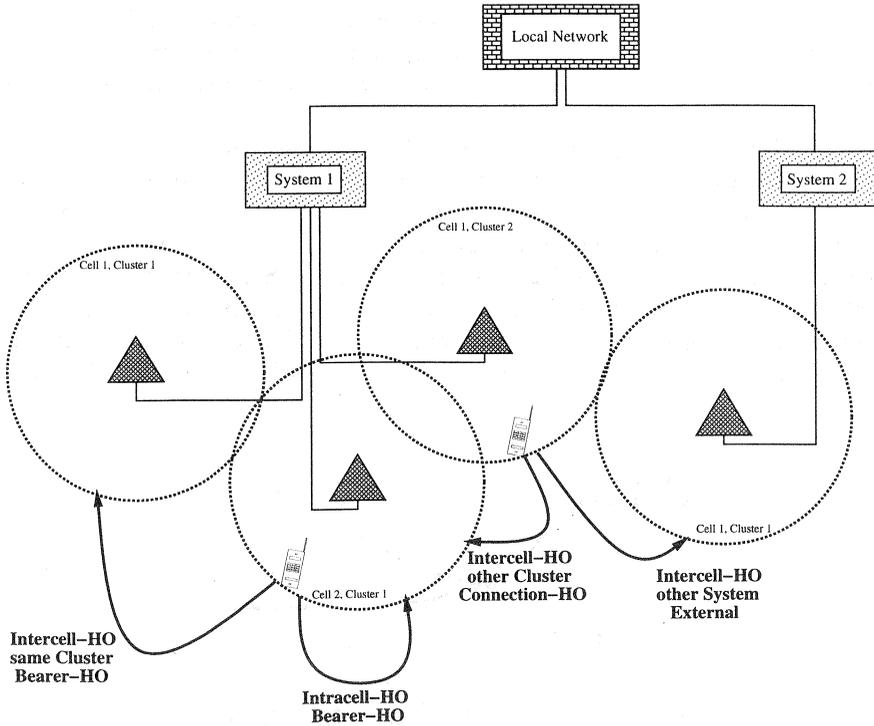


Abbildung 5.1: Physikalische und logische DECT-Handoverformen

### RSSI – Handover

Der Abfall des Signalpegels einer Feststation am Ort der Mobilstation kann mehrere Gründe haben. Der wichtigste Grund ist der durch die Mobilität hervorgerufene ständige Ortswechsel des Endgerätes. Entfernt sich die Mobilstation zu weit von ihrer augenblicklichen Feststation oder gerät sie bedingt durch ein Hindernis in einen Funkschatten, kann der Signalpegel (*Radio Signal Strength Indicator* - RSSI) stark absinken. Der plötzliche Verlust des Sichtkontaktes (*Line of Sight* - LOS) zur Feststation kann Einbrüche von 15–30 dB hervorrufen.

Bewegt sich eine Mobilstation über die logische Zellgrenze hinweg in eine

Nachbarzelle, so nimmt die Signalstärke der eigenen Feststation immer weiter ab, während die der Nachbarstation immer stärker zunimmt. Hier ist nun ein Intercellwechsel zur Nachbarzelle wünschenswert, um die Verbindungsqualität zu erhöhen.

Um den Einfluß kurzzeitiger Signaleinbrüche herauszufiltern, werden die gemessenen RSSI-Werte über ein Zeitfenster gemittelt. Der Intercell-Handover sollte erst dann eingeleitet werden, wenn der gemittelte Signalpegel der Nachbarstation um einen gewissen Schwellwert höher liegt als der der eigenen Feststation (s. Abb. 5.2). Es wird durch den Schwellwert verhindert, daß es an den Zellgrenzen häufig zu Intercell-Wechseln kommt, ohne daß sich der Empfangspegel signifikant verbessert hat. Dieser Vorgang zeigt mit dann ein der Schwelle entsprechendes Hystereseverhalten an den Zellgrenzen.

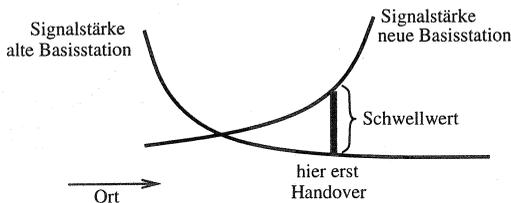


Abbildung 5.2: Schwellwert beim RSSI-Handover

### C/I Handover

Wenn sich trotz hohem Signalpegel die Qualität auf einem Kanal durch Interferenzen anderer Funkverbindungen verschlechtert, muß ein Handover in derselben oder zu einer besser versorgten Zelle durchgeführt werden. Die Störeinflüsse werden durch sogenannte Gleichkanalstörer hervorgerufen, die in ausreichendem Abstand den gleichen Kanal belegt haben. Größen zur Beurteilung dieser Interferenzen sind der Störabstand (C/I) bzw. die Bitfehlerrate (BER). Da der Störabstand nicht direkt meßbar ist, wird als Maß für dieses Gütekriterium immer die Bitfehlerrate verwendet. Unter Berücksichtigung der verwendeten Technologie und der Anforderungen an die Verbindungsqualität werden für das C/I-Verhältnis bzw. die Bitfehlerrate Grenzwerte definiert.

Im DECT-System wird zur Bewertung der Verbindungsqualität ein zyklischer Code benutzt, durch den Prüfbits zur Fehlererkennung gebildet werden. Bei der verwendeten Sprachcodierung mit 32 kbit/s ADPCM beträgt die maximal erlaubte Bitfehlerwahrscheinlichkeit 0,001. Für GFSK-Modulation mit  $B \cdot T = 0.5$  entspricht dies einem minimalen C/I-Verhältnis von 11dB, wobei die durch den Funkkanal entstehenden Feldstärkeschwankungen (Fading Effekte) noch nicht berücksichtigt sind [59]. Fading Effekte entstehen durch Interferenzen des direkt gesendeten Signals mit Reflexionen und Brechungen, die den Empfänger auf indirekten Wegen erreichen und so zu Signalschwund (engl. fades) führen. Werden neben diesen Mehrwegeausbreitungen auch Abschattungen durch Hindernisse zwischen Sender und Empfänger berücksichtigt, ergibt sich für das C/I-Verhältnis ein geforderter Schwellwert von 31 dB.

## 5.2 Dynamische Kanalwahl

Innerhalb des DECT-Systems sollen hohe Sprach- und Datenverkehrslasten bewältigt werden. Da die Belastung auf die Zellen meist ungleichmäßig verteilt ist und die Belastungsspitzen zeitlich und räumlich sehr variabel sind, wird ein dynamisches Kanalwahlverfahren (*Dynamic Channel Assignment* - DCA oder *Dynamic Channel Selection* - DCS, wie es bei DECT heißt, da hier die Mobilstation die Kanalwahl trifft) angewendet. Dadurch steht in jeder Zelle grundsätzlich das gesamte Kanalspektrum zur Verfügung und die Mobilstation kann sich einen geeigneten Kanal aussuchen.

In zellularen Mobilfunksystemen erfolgt die Kanaluweisung über einen festen Plan, bei welchem, abhängig vom erwarteten Verkehr, den Feststationen bestimmte Frequenzen zugeordnet werden. Diese *Fixed Channel Allocation* (FCA) erfordert eine sehr sorgfältige Zellplanung, da Änderungen nach der Installation nur noch schwer durchführbar sind. Kurzzeitige dynamische Laständerungen in einzelnen Zellen können mit diesem System schlecht aufgefangen werden.

Beim DECT-System ist aufgrund des DCS-Verfahrens keine Frequenzplanung, sondern nur eine Planung der Feststationsstandorte notwendig. Das System kann sich selbständig auf wechselnde Lasten einstellen und kann somit eine niedrigere Blockierwahrscheinlichkeit bieten als FCA-Netze.

### 5.2.1 DCA- vs. FCA-Systeme

In einem auf FCA basierendem Kanalzuordnungsverfahren wird das zur Verfügung stehende Frequenzband  $W$  z.B. in  $N$  gleichgroße Teilbänder  $B_c$  für FDMA-Zugriff geteilt. Jede dieser einem Teilband entsprechenden Trägerfrequenzen wird einer Basisstation zugeteilt, so daß innerhalb einer Zelle nur ein Bruchteil der insgesamt zur Verfügung stehenden Kanäle verwendbar ist. Da das zu versorgende Gebiet aus Gründen der zu tragenden Verkehrslast oder des mit einer bestimmten Sendeleistung maximal zu versorgenden Gebietes in der Regel nicht mit  $N$  Basisstationen abgedeckt werden kann, müssen die Trägerfrequenzen wiederverwendet werden. Um Gleichkanalstörungen zu minimieren, werden die Trägerfrequenzen in einem möglichst großen Abstand voneinander wiederverwendet. Auf diese Weise bilden die Zellen der Basisstationen, in denen jeweils eine andere Trägerfrequenz verwendet wird, ein Cluster. Für die Zellplanung in einem idealen Gelände ergibt sich eine hexagonale Clusterstruktur. So erhält man für ein System mit  $N = 7$  Frequenzgruppen ein hexagonales Cluster, in dem die Verbindungen in einer Zelle durch gleichzeitige Verbindungen in sechs anderen Zellen, die das gleiche Frequenzband benutzen, gestört werden können (s. Abb. 5.3).

Obwohl die Zellgröße in FCA-Systemen prinzipiell durch Senkung der Sendeleistung beliebig verkleinert werden kann, werden sie spätestens im picozellularen Indoorbereich unwirtschaftlich, da sie nicht auf starke Verkehrsbelastungen reagieren können und deshalb überdimensioniert werden müssen. Im Gegensatz dazu sind in einem System mit dynamischer Kanalvergabe in jeder Zelle alle Kanäle prinzipiell verfügbar. Damit ist es nicht mehr ausgeschlossen, daß in zwei benachbarten Zellen der gleiche Kanal benutzt wird, wodurch es zu stärkeren gegenseitigen Gleichkanalstörungen kommen kann. Deshalb ist es in DCA-Systemen notwendig, daß neben der Möglichkeit eines Intercell-Handovers wegen zu geringem Empfangspegel auch durch Gleichkanalstörungen ausgelöste Intracell-Handover effektiv unterstützt werden.

DCA-Systeme haben gegenüber FCA-Systemen folgende Vorteile :

- FCA-Systeme sind unflexibler gegenüber Konfigurationsänderungen, da eine Frequenzplanung notwendig ist. Eine Systemerweiterung erfordert deshalb in der Regel eine signifikante Modifikation bestehender Zellen.
- DCA-Systeme können stark schwankende, ungleichmäßig verteilte

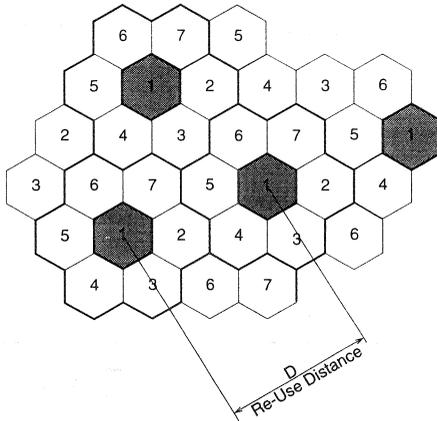


Abbildung 5.3: Frequenzplanung in FCA-Systemen

Verkehrslasten bedienen. Dies ist besonders für den mikro- und picocellularen Bereich wichtig, da eine Verkleinerung der Zellgrößen zu einer stärkeren Schwankung des angebotenen Verkehrs führt.

### 5.2.2 Die Wahl der stärksten Feststation durch die Mobilstation

Im DECT-Standard wird gefordert, daß eine Setup- oder Handover-Prozedur immer zu einer Verbindung mit der stärksten Feststation führen soll. Um diese ausfindig zu machen, teilt der MAC-Layer des *Portable Radio Termination* (PT) dem LLME die Identifikationsnummer des Systems mit, zu dem er Zugangsrechte besitzt. Diese Systemidentifikation wird als PARI (*Primary Access Rights Identifier*) bezeichnet.

Um *Radio Fixed Parts* (RFP) des im PT-PARI spezifizierten Systems ausfindig zu machen, empfängt der LLME die über einen kontinuierlichen Broadcastdienst übertragenen  $N_T$ -Kanalinformationen. Diese werden von den RFPs über alle *Traffic Bearer* bzw. den *Dummy Bearer* ausgesendet und enthalten den sogenannten *Radio Fixed Part Identifier* (RFPI), der aus dem PARI und der *Radio Fixed Part Number* (RPN) besteht.

Der LLME kann nun für RFPs mit gleicher Systemzugehörigkeit, wie das PT, den Empfangspegel messen. Er wählt dazu einen Kanal, auf dem er den entsprechenden RFPI empfangen hat. Die Ergebnisse werden in einer

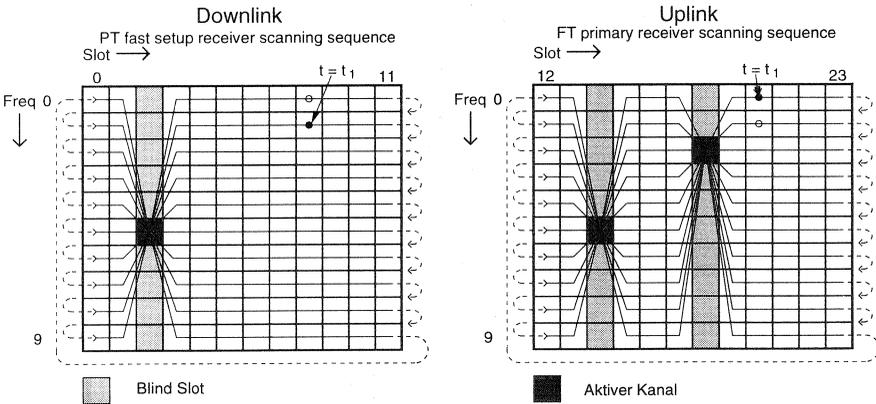


Abbildung 5.4: Scanning Sequence im DECT-System

Liste gespeichert und mit einer speziellen Nachricht an den MAC-Layer übergeben.

### 5.2.3 Die Wahl des ruhigsten Kanals

Vor einer Übertragung auf einem Bearer müssen PT bzw. RFP einen geeigneten Kanal wählen. Sie führen dazu eine Kanalliste, in der sie die Kanäle entsprechend der von ihnen durchgeführten Messungen einordnen.

Das Entscheidungskriterium für die Qualität eines Kanals ist der auf ihm empfangene Signalpegel RSSI, der in dBm (bezogen auf 1 mW) angegeben wird und ebenfalls in einer Kanalliste geführt wird.

Der Aufbau der Kanalliste erfolgt durch zyklisches Abhören aller Kanäle. Dies erfolgt für ein RFP nach der *RFP Idle Receiver Scan Sequence*. Für eine RFP mit einem Receiver wird die *Primary Scan* Prozedur durchgeführt. Sie verläuft für alle RFPs eines Clusters synchron. Dabei werden während eines Frames die Slots einer Frequenz gemessen. Die Frequenzen werden in aufsteigender Reihenfolge zyklisch durchgegangen, so daß eine Kanalmessung nach frühestens 100 ms auf den aktuellen Stand gebracht wird. Für RFPs mit mehr als einem Receiver werden außerdem der *Secondary Scan* bzw. *Third Receiver Scan* durchgeführt, die dem *Primary Scan* um 6 bzw. 3 TDMA-Frames folgen. Der Aufbau der Kanalliste bei dem PT erfolgt nach der *PT Fast Setup Receiver Scan Sequence*. Diese verläuft mit einer

Vorwärtsverschiebung von einem TDMA-Frame synchron zu der *Primary Receiver Scan Sequence* des zugeordneten RFPs. Dabei wird der PT die Abhörsequenz ihres RFPs durch die in den *Static System Information* des  $Q_T$ -Kanal übertragene *PSCN Primary Receiver Scan Carrier Number* bekanntgegeben. Sie entspricht der Frequenz, auf der das RFP im nächsten Frame scannen wird.

Dabei wird die Messung abhängig von dem aufzubauenden Trägerdienst und der die Verbindung einleitenden Instanz auf verschiedenen physikalischen Kanälen durchgeführt.

- **Duplex Bearer**

Um einen *Duplex Bearer* aufzubauen, wird der physikalische Empfangskanal gemessen. Dies bedeutet, daß das PT in diesem Fall einen der Downlink-Kanäle 0 bis 11 des jeweiligen TDD-Kanalpaares mißt, während das RFP einen der Uplink-Kanäle 12 bis 23 mißt.

- **Double Simplex Bearer**

Zur Wahl eines *Double Simplex Bearers* werden von der sendenden Instanz beide Kanäle des TDD-Paares gemessen. Relevant für die Einordnung des Kanals ist die Hälfte des TDD-Paares, auf dem der höhere RSSI-Wert gemessen wurde.

- **Simplex Bearer**

Für die Wahl eines *Simplex Bearers* ist die relevante Hälfte des TDD-Kanalpaares abhängig von der sendenden Instanz. Während ein PT für die Messung des Kanals immer die dem Kanal entsprechende andere TDD-Hälfte mißt, ist für ein RFP der Kanal des TDD-Paares, auf dem der höherer Signalpegel gemessen wurde, relevant.

Die Messung des RSSI-Pegels erfolgt mit einer Auflösung von mindestens 6 dB. Kanäle, für die ein RSSI-Wert unterhalb einer Meßgrenze von mindestens -93 dBm gemessen wurde, werden als *quiet* betrachtet und können sofort für einen Bearer Setup benutzt werden.

Oberhalb einer frei wählbaren oberen Grenze von z.B. -33 dBm wird ein Kanal als *busy* betrachtet. Kanäle mit einem RSSI-Pegel oberhalb dieser Grenze werden nicht weiter geordnet und sollten nicht für einen Bearer Setup benutzt werden. Kanäle für die die Messung ein Ergebnis zwischen beiden Grenzwerten ergeben, werden nach der Formel

$$k = \top \frac{\text{Pegel}[dBm] - \text{quiet}}{\text{Resolution}} \quad (5.1)$$

RSSI	$\Delta$ RSSI	band	comment
> max dBm	$\emptyset$	busy	busy don't try
⋮	$\leq 6$ dB	b(n)	possible candidates
	$\leq 6$ dB	b(4)	
	$\leq 6$ dB	b(3)	
	$\leq 6$ dB	b(2)	
	$\leq 6$ dB	b(1)	
	< min dBm	$\emptyset$	

Abbildung 5.5: Aufbau der DECT-Basiskanalliste

in eine der sich je nach Auflösung der Messungen ergebenden  $n$  Kategorien  $b(k)$  eingeordnet (s. Abb. 5.5). Die Kanalliste kann je nach gewünschtem Bearer-Typ nur für die Empfangsslots geführt werden oder für jedes TDD-Paar eines physikalischen Kanals.

#### 5.2.4 Blind Slots

Beim Aufbau einer Kanalliste ist es im Falle bereits bestehender Verbindungen normalerweise nicht möglich alle Kanäle zu messen. Kanäle, die nicht gemessen werden können, werden als *blind* bezeichnet und in der Kanalliste in die Kategorie *busy* eingeordnet.

- Unterhält ein RFP oder PT eine Verbindung mit einem Bearer auf der Frequenz  $f_x$  und Slot  $s_x$ , so muß er beim Messen der Kanäle immer

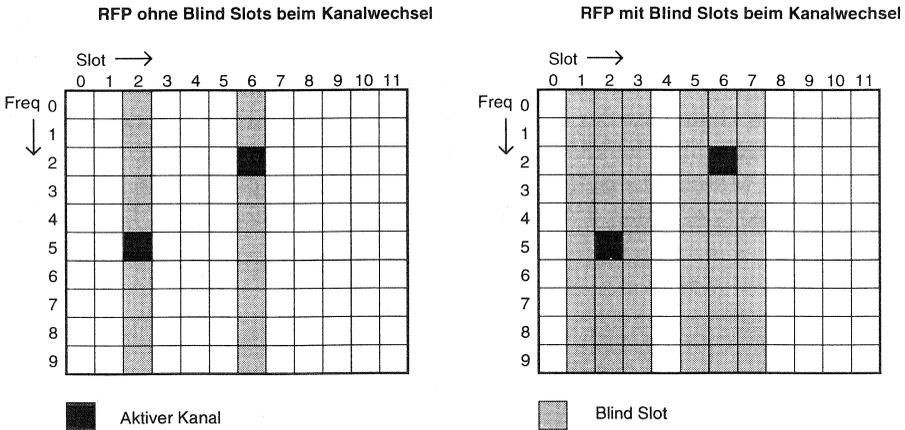


Abbildung 5.6: Blind Slots im DECT-System

wenn Slot  $s_x$  erreicht wird auf die Frequenz  $f_x$  umschalten, um auf dieser senden oder empfangen zu können. Damit können alle übrigen Kanäle in Slot  $s_x$  nicht gemessen werden. Bei Duplex- oder Double Simplex Bearern sind beide Hälften des TDD-Slot-Paares blind, während bei Simplex Bearern nur eine Hälfte betroffen ist. Für FTs mit mehreren Transceivern kommt dieser *Blind Slot*-Effekt erst zum Tragen, wenn in dem jeweiligen Slot so viele Bearer etabliert sind, wie Transceiver vorhanden sind.

- Im DECT-Standard ist ausdrücklich erlaubt, dass ein RFP oder PT bei einem Bearer in Slot  $s_x$  auch die Kanäle im vorhergehenden Slot  $s_{x-1}$  und im nachfolgenden Slot  $s_{x+1}$  nicht messen kann. Dies kann seine Gründe in benötigten Frequenzumschaltzeiten haben. Damit verringert sich die Anzahl zur Verfügung stehender Kanäle mit jeder neuen Verbindung im schlechtesten Fall um ein Viertel, wenn die verwendeten Kanäle jeweils drei Slots Abstand zueinander haben und eine PT kann höchstens vier Bearer gleichzeitig haben.

### 5.2.5 Kanalverdrängung und "Nah-/Fern-Effekt"

Die Mobilstation (PP) ordnet sich zu Beginn eines Verbindungsaufbaus der Basisstation mit dem höchsten Signalpegel zu. Bedingung für den erfolgrei-

chen Kanalaufbau ist ein ausreichendes C/I in einem der 120 Kanäle. Eine Mobilstation, die sich nahe an seiner Basisstation befindet, empfängt einen höheren Signalpegel als eine Mobilstation, die sich weiter entfernt befindet. Aus diesem Grund ist der erfolgreiche Verbindungsaufbau mit der näheren Mobilstation wahrscheinlicher als der Aufbau einer Verbindung zur weiter entfernten Mobilstation. In diesem Zusammenhang spricht man vom Nah-/Fern-Effekt, der anhand Abb. 5.7 näher erläutert werden soll. Ist der Ver-

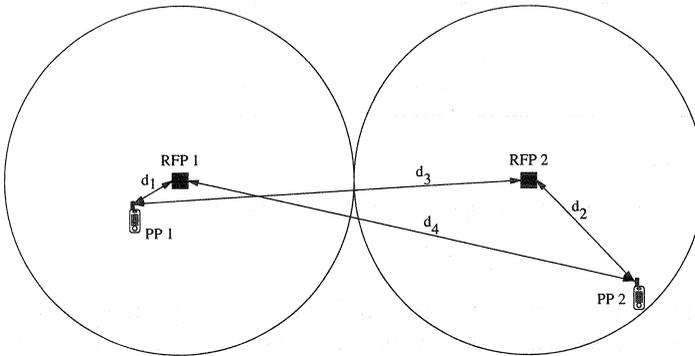


Abbildung 5.7: Kanalverdrängung aufgrund des Nah-/Fern-Effektes

bindungsaufbau der nahen Mobilstation (PP1) zu ihrer Feststation (RFP1) erfolgreich gewesen, so besteht zudem die Möglichkeit, daß eine andere Mobilstation (PP2), die weiter entfernt den gleichen Kanal an einer anderen Teststation (RFP2) belegt, aufgrund erhöhter Interferenzbelastung aus dem Kanal verdrängt wird.

Für den Gleichkanalstöranstand  $C/I$  am Ort der nahen Mobilstation PP1 gilt unter der Voraussetzung von zwei Verbindungen auf einem Kanal:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{PP_1} = \frac{d_3^\gamma}{d_1^\gamma}$$

Wobei  $\gamma$  der Verlustfaktor der Funkausbreitung ist. Am Ort der weiter entfernten Mobilstation PP2 gilt dann:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{PP_2} = \frac{d_4^\gamma}{d_2^\gamma}$$

Ist nun  $d_1 \ll d_2$  und  $d_3 \simeq d_4$  dann folgt:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{PP_1} > \left(\frac{C}{I}\right)_{PP_2} \quad (5.2)$$

Um eine Verbindung auf einem Kanal aufzubauen und zu betreiben, wird in einem DECT-System ein bestimmter Störabstand  $C/I$  von z.B.  $x$  dB gefordert. Im betrachteten Fall ist es möglich, daß die nahegelegene Mobilstation  $PP_1$  während ihres Verbindungsaufbaus einen Störabstand von mehr als  $x$  dB mißt und somit erfolgreich eine Verbindung auf diesem Kanal aufbauen kann. Für die weiter entfernte Mobilstation kann dann der Gleichkanalstörabstand unter den geforderten  $x$  dB liegen, d.h. die Mobilstation wird von seinem Kanal verdrängt. Als Konsequenz kann sogar die Verbindung des weiter entfernten  $PP_2$  unterbrochen werden, wenn kein alternativer Kanal gefunden werden kann. Dieses Verhalten ist eindrucksvoll bei den Simulationen mit ungleicher RFP-Dichte in Kapitel 13.2.5 zu erkennen.

# DECT - Relais

Der Einsatz von Relaisystemen (*Wireless Relais Station* - WRS) in DECT-Netzen ermöglicht eine erweiterte Anwendbarkeit durch eine erhöhte Flexibilität dieser Systeme. Durch das Einsparen aufwendiger Verkabelung wird in vielen Fällen eine attraktive Alternative zu Systemen mit drahtgebundenen RFPs entstehen. Von der ETSI werden die Einsatzmöglichkeiten von Relais in DECT-Systemen erörtert in [20]. Ein Standard für die WRS liegt seit März 1996 als stabiler Draft vor [23].

## 6.1 Einsatzmöglichkeiten von Relais

Durch den Einsatz von Relais in lokalen Netzen erhoffen sich die Betreiber von Telekommunikationssystemen bessere Marktchancen durch eine schneller realisierbare flächendeckende Erreichbarkeit in Ballungsgebieten. DECT-Relais können in RLL-Systemen unterschiedlich eingesetzt werden:

- schnelle Erschließung des RLL Gebietes durch DECT-Relaisfunkstrecken von der Hausanlage des Kunden bis zum Konzentrator am *Point of Presence* (POP) des Betreibers
- Ausleuchtung von Randbereichen bzw. abgeschatteten Gebieten bei DECT Mobilfunkanwendungen und RLL
- Realisierung der Hausanschlüsse als Relais zur Mobilitätserweiterung der angeschlossenen Teilnehmer
- Nutzung der installierten Hausanschlüsse als öffentliche Zugangspunkte zum DECT Netz (s. Abb. 2.2)

Der Verzicht auf den kabelgebundenen Anschluß der Kunden ermöglicht den flexiblen und schnelleren Aufbau eines Versorgungsgebietes, der so durch den Einsatz von Relais kostengünstiger realisierbar wird. Während diese Maßnahmen im Verteilnetz des Anbieters für den Kunden geringere Gebühren bedeuten können, wird in einem nächsten Schritt angestrebt, diese Betreiberstrecken dem allgemeinen Zugriff (*public access*) zu öffnen, falls

dafür die gesetzlichen Regelungen geschaffen werden. Das mobile DECT-Endgerät könnte dann nicht nur im privaten Bereich über hausintern installierte DECT-Anlagen kommunizieren, sondern auch das öffentliche Netz mit seinen Relais und Feststationen benutzen.

Die Nutzung von DECT-Relais bietet somit folgende Vorteile:

- **Einsparung aufwendiger Verkabelung**  
Dies ist für Outdoor- und Indoor-Anwendungen der entscheidende Vorteil des Einsatzes von DECT-Relais. Im RLL-Einsatz wird ein schnelles Installieren (Roll-Out) des RLL-Systems ermöglicht und eine nachfolgende flächendeckende Ausleuchtung für ein PCS System erleichtert.
- **Ausleuchtung größerer Flächen**  
Die Ausleuchtung des Szenarios kann durch den Einsatz von Relais entscheidend verbessert werden. Dabei lassen sich erst später festgestellte, ungenügend versorgte Bereiche (Ausleuchtungsschatten) durch Relais in das Gesamtsystem integrieren.
- **DECT-konforme Realisierung**  
Die Standardlösung bietet den Anwendern die Möglichkeit, mit herkömmlichen DECT-kompatiblen Endgeräten Verbindungen zu Feststationen und Relaisstationen aufzubauen. Nachträgliche Systemerweiterungen mittels Relais haben somit keine Auswirkung auf die Mobilstationen.
- **Beibehaltung der Frequenz und Sendeleistung**  
Bei der DECT-konformen Realisierung nutzen die Relais die für das DECT-System zugelassenen Frequenzbänder. Da die festgelegte maximale Sendeleistung der DECT-Einheiten mit 250 mW bei den Relaisanlagen ebenfalls nicht überschritten wird, benötigt man keine Zusatzgenehmigungen für den Aufbau und Betrieb von Relais.
- **Mobilität der Relais für wechselnde Einsatzorte**  
Der Umstand, daß die Relais netzseitig ungebunden sind, erlaubt dem Betreiber eine ständige manuelle Anpassung des Systems an längerfristige Laständerungen in ausgewählten Bereichen. Es muß dabei nur gewährleistet sein, daß eine gute Verbindung vom Relais zu einer übergeordneten Fest- oder Relaisstation besteht.

Es sind ausschließlich DECT Relais vom Typ *Fixed Relais Station (FRS)* vorgesehen [2], bei denen die Funkschnittstelle zum Benutzer erhalten bleibt und so im Endgerät des Anwenders keine Veränderungen vorgenommen wer-

den müssen. Der Einsatz einer Relaisstation ist somit für den Teilnehmer nicht erkennbar. Das Weiterleiten der Verbindung an eine netzgekoppelte Feststation ist Sache des Betreibers und kann netzintern gesteuert und verändert werden. Eine optimale Wahl des Standortes und der Einsatz gerichteter Antennensysteme ermöglichen eine hohe Übertragungsqualität.

## 6.2 Aufbau einer Relaisstation

Der Zusammenschluß der wichtigsten Funktionen eines *Radio Fixed Parts* (RFP) und eines *Portable Radio Termination* (PT) bildet die Basis einer DECT-Relaisstation. Dabei werden Netzübergänge, Benutzerschnittstellen, Sprach-Codierung usw. des PT und RFP nicht mit eingebunden. Für die Feststation erscheint das Relais wie eine Mobilstation (mit bis zu sechs Verkehrskanälen pro Transceiver). Das mobile Handgerät sieht im Relais einen scheinbar normalen drahtgebundenen RFP. Die zusätzlichen Relaisfunktionen sind für die richtige Umsetzung der Verbindung PT – Relais zur zugeordneten Relais – RFP Verbindung zuständig (s. Abb. 6.1). Wird

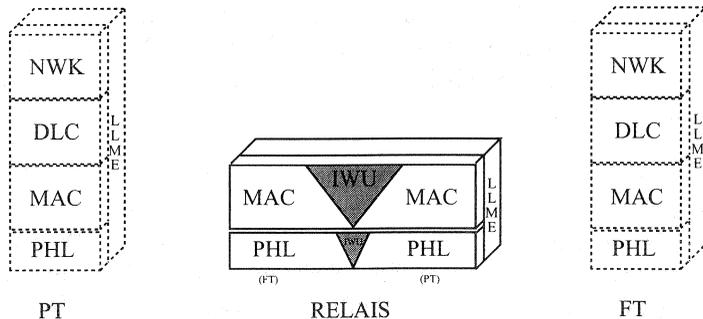


Abbildung 6.1: Referenzmodell des Relais

das Relais als reine Repeaterstation realisiert, so werden die jeweiligen Zeitschlitzte innerhalb des Physical Layer durch die Relaisfunktionen verknüpft. Dieser transparente Dienst ermöglicht eine Weitergabe der Daten innerhalb des gleichen Halb-Rahmens.

Geschieht das "Relaying" aber in der MAC-Schicht, erhält jede Verbindung im Relais eine eigene separate MAC Schicht Instanz. Damit kann sie

selbständig die Qualität der Kanäle beurteilen und mittels Dynamic Channel Selection einen Beareraufbau oder einen Handover durchführen. Dies ist die im Standard festgelegte Funktionsweise. Jeder Slot im Relais kann als Sende- oder Empfangsslot verwendet werden (s. Abb. 6.2). Für die Verbindung zu einem RFP gelten Slot 0-11 im Relais als Empfangsbereich (RX) und Slot 12-23 als Sendebereich (TX). Bei der Verbindung zum PT werden Slot 0-11 als Sende- und Slot 12-23 als Empfangsslots genutzt. Diese

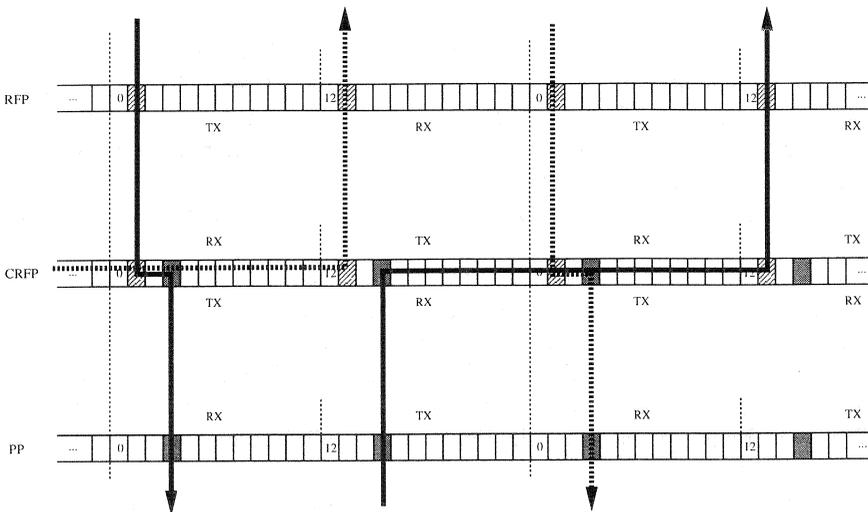


Abbildung 6.2: Slotbelegung beim Einsatz einer Relaisstation

Aufteilung der Sende- und Empfangsbereiche ermöglicht die Beibehaltung der standardkonformen Up- und Downlinkaufteilung im RFP und in der Mobilstation. Es bedarf also keiner Umbaumaßnahmen in den Endgeräten. Diese Form der WRS heißt *Cordless Radio Fixed Part* (CRFP), vgl. [12]. In Abb. 6.2 ist zu erkennen, daß eine Verbindung zwischen dem RFP und dem Relais auf dem Slotpaar 1/13 besteht. Die zugehörige Downlinkstrecke zwischen dem Relais und dem mobilen Endgerät belegt das Slotpaar 3/15. Ein Informationsaustausch (schwarze Linie in Abb. 6.2) von der Feststation zur Mobilstation und wieder zurück benötigt nun nicht mehr einen halben Rahmen, sondern nimmt eineinhalb Rahmenlängen in Anspruch. Diese Zeitverzögerung von 10 ms kann beim Einsatz mehrerer Relaisstufen zu

nicht akzeptablen Übertragungsverzögerungen (und daraus resultierenden Echostörungen) führen.

Eine technisch aufwendigere ebenfalls standardisierte Lösung ist der sogenannte *Repeater Part* (REP). Hier wird zur Verringerung des durch das Relais entstehende Delay eine Verschränkung der einzelnen Verbindungen vorgenommen. Die eindeutige zeitliche Zuordnung von Kanälen in Up- und Downlink ist damit nicht gewährleistet, so daß zwischen Relais und RFP ein zusätzlicher Kanal zur Steuerung eingerichtet wird. Damit ist der Kapazitätsverlust beim Einsatz eines REP größer als beim Einsatz eines CRFPs. Je nach Anwendungsfall ist eine Version der WRS besser geeignet. Wird z.B. ein Gebiet neu erschlossen, so können mehrere Hierarchien (z.B. Ringe) von Relais nur mit Hilfe von REPs verwirklicht werden, da sonst die Signalverzögerung zu hoch wird. Bei anwachsender Teilnehmerzahl und Verkehr müssen diese aber ersetzt werden.

Das Umschalten von Sende- zu Empfangsmodus zwischen zwei Slots bedarf einer schnellen Transceiver-Hardware im Relais. Ist dies nicht möglich, müssen einige Slots als *Blind* gesetzt werden, um dort dann die Transceivereinheit von Senden auf Empfang und umgekehrt umstellen zu können. Dadurch reduziert sich die Kanalkapazität im Relais.

In Abb. 6.2 ist der Fall dargestellt, daß das Relais nur eine Transceivereinheit besitzt. Es ist zu erkennen, daß bei jedem Verbindungsaufbau zwei Slotpaare benötigt werden. Ein Paar als Downlink vom mobilen Endgerät zur Relaisstation und ein Paar als Uplink vom Relais zum nächsten RFP. Dies hat eine Senkung der tragbaren Verkehrslast des Gesamtsystems zur Folge. Das Relais kann nur noch sechs unabhängige Bearer annehmen. Abhilfe schafft hier der Einbau eines zweiten Transceivers in das Relais. Damit werden die Uplink-Seite (RFP – Relais) und die Downlink-Seite (Relais – Mobile) physikalisch auf zwei Sende-/Empfangseinrichtungen getrennt.

Die durch den Einsatz der Relais wachsende Interferenz kann durch gerichtete Antennensysteme im Uplink verringert werden. Mit stark gerichteten Antennen, die einen geringen Öffnungswinkel haben, lassen sich richtfunkstreckenähnliche Uplinkverbindungen herstellen.

Gerichtete Antennen sind auch zur Ausnutzung der Reichweitenvergrößerung mit Relais notwendig. Da das Relais innerhalb des Sendebereiches einer Feststation höherer Ebene stehen muß, erweitert sich das System nicht um den kompletten Durchmesser der Relaiszelle. In Abb. 6.3a kann man erkennen, daß sich bei der Nutzung von Rundstrahlantennen ein großer Teil des Relaisfeldes mit dem der Feststation überlappt. Die tatsächliche Erwei-

terung ist somit sehr gering. Wie in Abb. 6.3b gezeigt, kann durch den Einsatz gerichteter Antennensysteme eine wesentlich bessere Verteilung erzielt werden. Hier wird nun fast vollständig der Empfangsradius der Relaisstation für die Ausleuchtung einer eigenen Zelle genutzt.

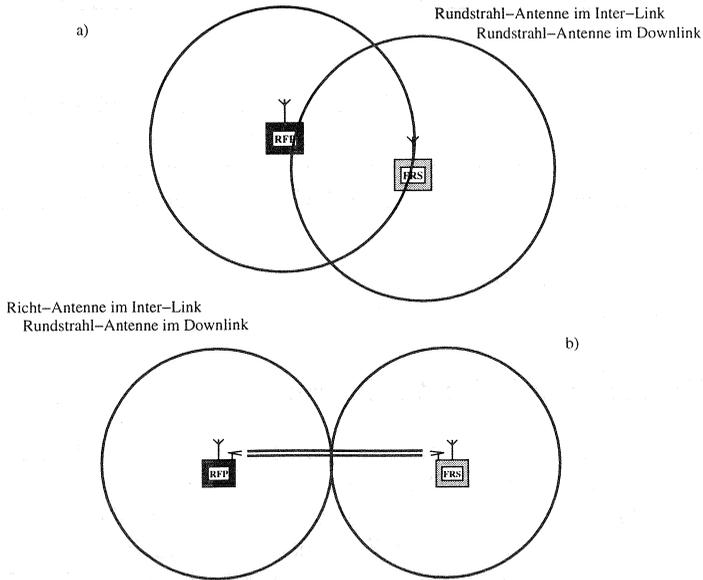


Abbildung 6.3: Reichweite eines Relaisystems mit Rundstrahl- und Richtantenne

---

## Methoden zur Funkprädiktion

Eine realitätsnahe Modellierung der Funkausbreitung und somit eine genaue Funkprädiktion ist die wichtigste Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse bei der simulationstechnischen Leistungsanalyse von Mobilfunksystemen. Man kann grundsätzlich zwei Verfahren der Modellierung unterscheiden:

- deterministische Modelle
- heuristische/empirische Modelle

### 7.1 Deterministische Verfahren

Bei der deterministischen Bestimmung wird die Funkausbreitung mit mathematischen Modellen unter Berücksichtigung des Szenarios berechnet. Die komplexeste Methode ist die Berechnung nach den Maxwell'schen Gleichungen. Theoretisch läßt sich so die Funkausbreitung in beliebig komplexen Szenarien bestimmen. Praktisch anwendbar allerdings ist diese Methode aufgrund des Rechenaufwandes nicht. Effektiver sind dagegen Raytracing Methoden. Hier werden die ausgesandten ebenen Funkwellen als Strahlen modelliert, durch das Szenario verfolgt, d.h. an Oberflächen reflektiert und transmittiert und an Ecken evtl. gebeugt. Hierfür muß man annehmen, daß ein Strahl, der auf ein Objekt trifft, spiegelnd (spektral) und nicht diffus reflektiert wird. Eine Unterscheidung der beiden Reflexionsmechanismen ermöglicht das Rayleigh-Kriterium. Dies beruht auf der Phasenverschiebung  $\Delta\Phi$  zwischen zwei Strahlen, die an einer rauhen Oberfläche reflektiert werden. Eine raue Oberfläche kann man sich als zwei um  $\Delta h$  versetzte parallele Ebenen vorstellen. Die Grenze, ab der dann eine Reflexion als spiegelnd oder diffus gilt, wird mit  $\Delta\Phi = \pi/4$  angegeben. Die Rauigkeit der Oberfläche kann gegenüber der Wellenlänge  $\lambda$  vernachlässigt werden, wenn gilt:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{16 \cos \alpha} \quad (7.1)$$

Für die hier betrachtete DECT-Frequenz von 1,88 GHz kann man folgende Abschätzung treffen:

$$\Delta h < \frac{1 \text{ cm}}{\cos \alpha} \quad (7.2)$$

Je größer der hier angegebene Einfallswinkel  $\alpha$  ist, desto rauher darf die Oberfläche sein. Für die betrachteten Modelle wird also davon ausgegangen, daß die Oberflächenrauigkeit den Wert von 1 cm nicht überschreitet, die betrachteten Gebäude also hinreichend glatt sind.

Mit Raytracing wird der Mehrwege-Einfluß des Szenarios mit Reflexionen über Decken, Boden und Wände berechnet. Im betrachteten Raumpunkt des Empfängers wird die komplexe Summe der Empfangssignale aller eintreffenden Pfade gebildet, um den Empfangspegel zu bestimmen. Durch die Überlagerung der einzelnen reflektierten Pfade kommt es an bestimmten Stellen zu einer destruktiven Interferenz, dem sog. Signalschwund (*Fading*). Bei der Berechnung werden sowohl der direkte Pfad als auch Mehrfachreflexionen und -transmissionen bis zu einer gewissen Tiefe berücksichtigt. Man unterscheidet zwei Raytracing Methoden, s. Abb. 7.1: die Spiegelungs- und die Strahlverfolgungsmethode (engl. raytracing). Bei der Strahlverfolgungsmethode werden ohne Wissen der Empfängerposition eine Vielzahl von Strahlen unter unterschiedlichen Winkeln abgestrahlt und verfolgt. Für die Empfängerposition wird dann jeweils geprüft, ob ein Strahl durch eine vorgegebene Umgebung den Empfänger erreicht. Es handelt sich um ein Näherungsverfahren. Nach der Spiegelungsmethode werden die exakten Spiegelungspunkte n-ten Grades des Empfängers an allen Flächen berechnet, um alle geometrisch exakten Strahlenwege zum Empfänger zu bestimmen. Diese Methode ist deutlich rechenzeitaufwendiger als die Strahlverfolgungsmethode. Außerdem verlangt die geometrische Exaktheit auch eine sehr exakte Beschreibung des Szenarios, die oft nicht möglich ist. Beide Methoden sind in einem Raytracing-Tool zur Funkprädiktion realisiert worden. Je nach vorgegebenem Szenario wird dabei die geeignetere Methode angewendet. Bei Frequenzen unterhalb von 5 GHz ist der relevante Ausschnitt eines Szenarios bei Anwendungen im Freien so groß, daß meist die Strahlverfolgungsmethode für die Pegelvorhersage verwendet wird. Bei Anwendung in Gebäuden oder bei sehr hohen Frequenzen (17 GHz, 60 GHz) wird dagegen die Spiegelungsmethode eingesetzt.

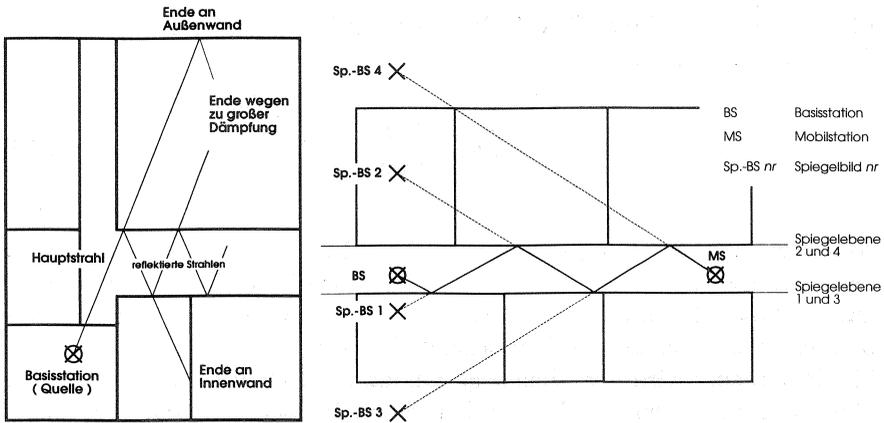


Abbildung 7.1: Spiegelungsmethode vs. Strahlverfolgungsmethode

## 7.2 Die empirischen Modelle

Empirische Modelle zur Feldstärkeprädiktion entstehen anhand einer Vielzahl von Messungen, die in verschiedenen realen Gebieten durchgeführt werden. Die Meßergebnisse werden als Ausbreitungskurven in Grafiken eingetragen, aus denen man die Feldstärkewerte ablesen kann. Das bekannteste Ergebnis solcher Messungen für den VHF- und UHF-Bereich ist das Modell von Okumura [32]. Dieses Modell wird z.B. für GSM (Global System for Mobile Communications) bei 900 MHz benutzt. Hier wurden Messungen für städtische, ebene Gebiete durchgeführt und für anders klassifizierte Gebiete oder unregelmäßiges Terrain Korrekturkurven ermittelt. Auf die gleiche Weise sind auch alle anderen empirischen Modelle entstanden. Nutzbar für Simulationen mit dem Rechner werden diese Modelle, indem man für diese Ausbreitungskurven passende Funktionen aufstellt. Bei dem Modell von Okumura hat Hata [29] dies durchgeführt.

Da das DECT-System mit einer geringeren Leistung und zusätzlich noch bei einer höheren Frequenz (1880 MHz) betrieben wird, entstehen viel kleinere Funkausleuchtungszellen. Dies bedeutet, daß für DECT andere Modelle zur Funkausleuchtung im Freien herangezogen werden müssen als bei GSM (Kap. 7.2.2 und 7.2.2). Für die Funkprädiktion in Gebäuden wurden zahlreiche Modelle unterschiedlicher Genauigkeit entwickelt. In dieser Arbeit

wurde auf Ergebnisse der COST Arbeitsgruppe 231 zurückgegriffen (Kap. 7.2.3).

### 7.2.1 Funkprädiktion im Freien

Vernachlässigt man im Freien konkrete Morphostrukturen, etwa bei Funkausbreitung über Dächer hinweg, so herrscht in den meisten Fällen eine freiraumähnliche Ausbreitung der Funkwellen zwischen Feststation und Mobilstation. Deshalb leitet sich das Modell von dem der Freiraumausbreitung elektromagnetischer Wellen eines punktförmigen Kugelstrahlers ab:

$$P_e \sim P_s \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = P_s \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^\gamma \quad \text{mit} \quad \gamma = 2.0 \quad (7.3)$$

Dabei sind  $P_s$  die abgestrahlte Leistung des Senders,  $P_e$  die empfangende Leistung,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $d$  der Abstand zwischen Sender und Empfänger. Die im allgemeinen Ausbreitungsfall nicht quadratische Abhängigkeit zwischen dem Abstand  $d$  und der Empfangsleistung wird durch den Verlustfaktor  $\gamma$  ausgedrückt. Der bei der Freiraumausbreitung auftretende Pfadverlust  $L_{path}$  ist das logarithmische Verhältnis von empfangener zu gesendeter Leistung:

$$\begin{aligned} \frac{L_{path}}{dB} &= -10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_e}{P_s} \right) \\ &= 32.44 + 20 \log_{10} \left( \frac{f}{MHz} \right) + 20 \log_{10} \left( \frac{d}{km} \right) \end{aligned} \quad (7.4)$$

Für diese Arbeit wurden die ETSI Pfadverlustmodelle für RLL Systeme aus [12] verwendet. Bei diesen Modellen werden die Auswirkungen der Topologie und der Morphostruktur nicht im Detail berücksichtigt. Für unterschiedliche Bebauungsarten gelten verschiedene Verlustmodelle. So gilt für dicht bebaute Gebiete (cluttered),

$$L_{path} = 58 + 10\gamma \cdot (\log_{10}(d) - 1) \quad \text{mit} \quad \gamma = 3.5 \quad (7.5)$$

für dünner bebaute Gebiete wie in einer Vorstadt (semi cluttered)

$$L_{path} = 58 + 10\gamma \cdot (\log_{10}(d) - 1) \quad \text{mit} \quad \gamma = 3.0 \quad (7.6)$$

und für offenes Gelände (open)

$$L_{path} = 53 + 10\gamma \cdot \log_{10}(d) \quad \text{mit} \quad \gamma = 2.0 \quad (7.7)$$

### 7.2.2 Das COST Multi-Slope-Modell

Dieses Modell [54] ist ein empirisches Funkausbreitungsmodell für Mikro- und Klein-Zellen im Bereich zwischen 1500 und 2000 MHz. Es entstand im Rahmen der Funkausbreitungsstudien der COST 231 Gruppe (COST - European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research), einer Arbeitsgruppe von europäischen Wissenschaftlern, die sich u.a. mit der Wellenausbreitung bei Frequenzen um 2 GHz beschäftigt. Das Multi-Slope Modell wurde aus einer Reihe von Messungen für Entfernungen von 50 bis 2000 m entwickelt. Die Feststationen waren dabei unterhalb der Häuserdächer angebracht. Es wird, wie für Mikro-Zellen üblich, zwischen Sichtverbindung (*Line of Sight* - LOS) und indirekter Funkversorgung (*Non Line of Sight* - NLOS) unterschieden. Im Fall der Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger gelten je nach Distanz der beiden Stationen folgende Formeln für den Pfadverlust  $L$ :

$$L = L_b + 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{x}{R_b} \right) \quad \text{für} \quad x < R_b, \quad (7.8)$$

$$L = L_b + 40 \cdot \log_{10} \left( \frac{x}{R_b} \right) \quad \text{für} \quad x > R_b. \quad (7.9)$$

mit

$$R_b = \frac{4 \cdot h_b \cdot h_m}{\lambda} \quad (7.10)$$

und

$$L_b = \left| 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{8 \cdot \pi \cdot h_b \cdot h_m} \right) \right|. \quad (7.11)$$

Ist zwischen Sende- und Empfangsstation keine Sichtverbindung vorhanden, wird zur Berechnung des Pfadverlustes folgende Formel benutzt:

$$L = L_F + A + 10 \cdot B \cdot \log_{10} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1} \right) \quad (7.12)$$

Hierin bedeuten

$$L_F = \left| 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d_1} \right) \right|, \quad (7.13)$$

$$A = -0.1 \cdot \omega + 0.05 \cdot d_1 + 20 \quad (7.14)$$

und

$$B = -0.05 \cdot \omega + 0.02 \cdot d_1 + 4. \quad (7.15)$$

Die in diesen Gleichungen auftretenden Parameter bedeuten:

- $L$  : Pfadverlust in dB
- $h_b$  : Höhe der Feststation in Meter (minimal 10 m; maximal 30 m)
- $h_m$  : Höhe der Mobilstation in Meter (minimal 1 m; maximal 5 m)
- $\lambda$  : Wellenlänge
- $x$  : Abstand zwischen Sender und Empfänger in Meter (gilt nur bei Sichtverbindung)
- $R_b$  : Dies ist der Punkt, an dem zwischen den beiden Formeln (7.8 und 7.9) für Sichtverbindung umgeschaltet wird
- $\omega$  : Straßenbreite bei nicht vorhandener Sichtverbindung im Bereich des Empfängers (minimal 15 m; maximal 75 m)
- $d_1$  : Abstand der Sendestation zur beugenden Kante falls keine Sichtverbindung besteht (minimal 10 m; maximal 1000 m)
- $d_2$  : Abstand der Empfangsstation zur beugenden Kante falls keine Sichtverbindung besteht

Ergänzend muß man hinzufügen, daß dieses Modell ohne Sichtverbindung nur Empfänger auf solchen Straßen erreicht, die die Straße kreuzen, auf welcher sich die Feststation befindet (s. Abb. 7.2). Man erkennt, daß Empfänger (E3) in einer Parallelstraße mit diesem Modell nicht erreicht werden. Die Länge des Gesamtpfades bei NLOS-Verbindung wird über die nächstliegende Straßenecke zum Empfänger berechnet. Dafür prüft man alle Ecken, welche von der Feststation aus sichtbar sind, ob von dort aus die Mobilstation erreichen wird. Dabei werden die Teilstücke  $d_1$  und  $d_2$  definiert.

### Das CNET-TELECOM-FRANCE Modell

Das von der CNET (Centre Nationale d'Etudes de Telecommunication) und der TELECOM FRANCE entwickelte Modell [63] dient der Funkausleuchtung von Mikro- und Klein-Zellen, wie das vorher in Kapitel 7.2.2 vorgestellte Modell. Hauptsächlicher Unterschied zum Multi-Slope-Modell ist die differenziertere Berücksichtigung der Beugung und die Möglichkeit, nicht rechtwinklige Ecken bei der Berechnung mit einzubeziehen. Dieses Modell wurde entwickelt, um den Pfadverlust unter Berücksichtigung der gebeugten und reflektierten Strahlen in Straßenzügen mit Kreuzungen aus vier Ecken zu berechnen. Zwei Arten der Ausbreitung wurden für Fälle ohne Sichtverbindung in diesem Modell bedacht: Einerseits Reflexionen in der ersten Straße gefolgt von Reflexionen in der zweiten Straße, andererseits Reflexionen in

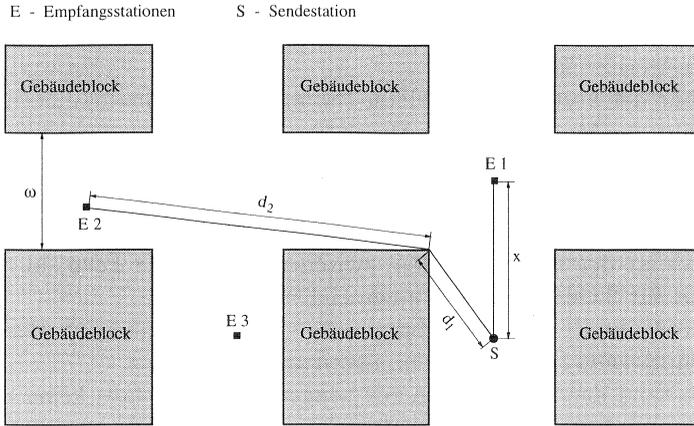


Abbildung 7.2: Verfahrensweise beim Multi-Slope Modell

der ersten Straße, gefolgt von Beugungen an Häuserecken und schließlich Reflexionen in der zweiten Straße.

Wiederum wird unterschieden zwischen Sichtverbindung (LOS) und fehlender Sichtverbindung. Bei Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger wird der Pfadverlust  $L_{LOS}$  wie folgt berechnet:

$$L_{LOS} = 20 \cdot \log_{10}(x) - C_{LOS} + L_{fre} \quad (7.16)$$

mit

$$L_{fre} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right), \quad (7.17)$$

wobei  $x$  die Entfernung zwischen Sendestation und Empfangsstation und  $\lambda$  die Wellenlänge ist.  $C_{LOS}$  stellt einen Ausbreitungsfaktor (Guidingfaktor) dar, welcher von der Dielektrizitätszahl und der Leitfähigkeiten des Bodens und der Wände abhängt. Zusätzlich besteht eine Abhängigkeit zur Straßbreite und der Distanz von Empfänger und Sender. In den Messungen in [63] zeigt sich, daß dieser Ausbreitungsfaktor nahe bei 0 dB liegt. Daher wird er hier zu null angenommen.

Ist keine Sichtverbindung vorhanden, spaltet sich die Pfadverlustberechnung in zwei Teile auf: Reflexion und Beugung. Der Anteil des Pfadverlustes  $L_{REF}$ , der durch die Reflexion hervorgerufen wird, läßt sich folgendermaßen

ausdrücken:

$$L_{REF} = 20 \cdot \log_{10}(d + x) - S \cdot x + L_{fre} \quad (7.18)$$

hierbei ist

$$S = \frac{d}{W_1 W_2} \cdot f(\alpha), \quad (7.19)$$

wobei  $\alpha$  der Eckwinkel (Abb. 7.3) ist.  $d$  und  $x$  sind die Entfernungen zwischen Sender bzw. Empfänger und Ecke. Die Funktion  $f(\alpha)$  in Abb. 7.4 ist eine empirisch hergeleitete Korrekturfunktion zur Berücksichtigung des Eckwinkels der Gebäude. In diesem Modell wird sowohl die Straßenbreite des Senders als auch die Straßenbreite des Empfängers durch  $W_1$  und  $W_2$  berücksichtigt. Der Anteil des Pfadverlustes  $L_{DIFF}$ , der durch die Beugung

E - Empfangsstationen      S - Sendestation

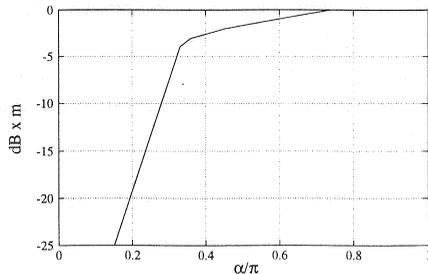
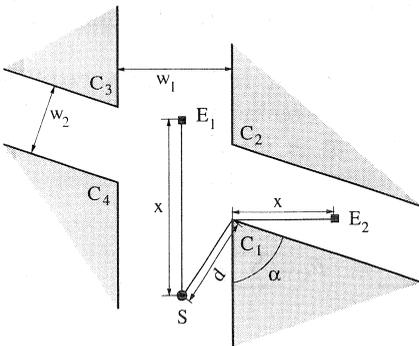


Abbildung 7.3: Beispielhafte Darstellung der Verfahrensweise des CNET Modells

Abbildung 7.4: Korrekturfunktion  $f(\alpha)$  aufgetragen über dem Eckwinkel  $\alpha$

hervorgerufen wird, berechnet sich nach folgender Formel:

$$L_{DIFF} = 20 \left( \frac{1}{2} \right) \log_{10} (x \cdot (x + d) \cdot d) + 2 \cdot D_a + L_{fre} \quad (7.20)$$

mit

$$D_a \approx \left[ \frac{45}{2\pi} \right] \arctan \left( \frac{x}{W_2} \right) + 23/\pi (\alpha - \pi/2) \quad (7.21)$$

Die Meßergebnisse in [63] zeigen, daß bei der Beugung alle vier Ecken (Abb. 7.3) zur Gesamtleistung beitragen. Den Hauptbeitrag zum gebeugten Feld in der Schattenzone bezüglich der Ecke  $C_1$  (bei Empfänger  $E_2$ ) leistet die Ecke  $C_3$  (Abb. 7.3).

Auch in diesem Modell bleiben Empfänger in parallelen Straßen unberücksichtigt, da auch hier jeweils nur solche Empfänger in Betracht gezogen werden, die um eine Ecke herum erreichbar sind.

### 7.2.3 Funkprädiktion in Gebäuden

Das verwendete Ausbreitungsmodell für Indoor-Szenarien soll hier näher beschrieben werden. Die Dämpfung des Signalpegels aufgrund der Entfernung zwischen Sender und Empfänger (Pfadverlust  $L_{path}$ ) durch die umgebenden Wände weicht von der Freiraumausbreitung ab. Eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle für die Indoor-Ausbreitung sind in der Vergangenheit entwickelt worden.

In [56] werden als Ausbreitungsmodell des RACE II Projektes “UMTS Code Division Testbed (CODIT)” u.a. die Ergebnisse der COST231-Arbeitsgruppe angegeben. Für die Dämpfung in einem Gebäude wurde folgendes Pfadverlustmodell entwickelt, welches auf einem Modell aus [35] basiert.

$$L_{path} = L_{1m} + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d) + \sum_i k_i \cdot F_i + \sum_j p_j \cdot W_j \quad (7.22)$$

Die einzelnen Terme bedeuten:

$L_{path}$  : Gesamter Pfadverlust in dB

$L_{1m}$  : Pfadverlust in einem Meter Entfernung vom Sender

$\gamma$  : Pfadverlustfaktor, empirisch bestimmte Steigung der Pfadverlustkennlinie

$d$  : Entfernung zwischen Sender und Empfänger

$k_i$  : Anzahl der Geschosßdecken des Typs  $i$  im Ausbreitungspfad

$F_i$  : Einfügedämpfung einer Decke des Typs  $i$

$p_j$  : Anzahl der Wände des Typs  $j$  im Ausbreitungspfad

$W_j$  : Einfügedämpfung einer Wand des Typs  $j$

$L_{path}$  ist die Dämpfung (in dB), die eine Welle auf einem Pfad der Länge  $d$  erfährt. Die Welle durchläuft dabei Geschosßdecken und Wände. Die Größe  $L_{1m} + 10\gamma \log_{10}(d)$  beschreibt die Freiraumausbreitung, wenn  $L_{1m} = L_0(d =$

1m) und  $\gamma = 2$  gilt. Für  $L_{1m}$  wurden ein Wert von 38 dB gemessen. Die Summanden  $\sum_i k_i F_i$  und  $\sum_j p_j W_j$  berücksichtigen die durch das Gebäude entstandene Zusatzdämpfung. Die für  $\gamma \neq 2$  noch auftretende Differenz entsteht durch eine Modellierungsvorgabe.

Der Ausbreitungspfad ist die direkte Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger. Entlang dieser Geraden werden die Dämpfungswerte eingefügt. Die Einfügungsdämpfungen für Wände und Decken können den Tabellen 7.1 und 7.2 entnommen werden.

Wandtyp	Einfügedämpfung [dB]
Gipskartonwand	0.9...1.3 oder 3...4
Leichtbauwand	2.3
Glaswand	2
Glasscheibe, drahtverstärkt	8
Ziegelwand, 10 cm	2.5
Ziegelwand, 63 cm	4
Ziegelwand, 70 cm	4.5
Ziegelwand, 100 cm	9.1
Stahlbetonwand, dünn	5.1
Betonwand, 10 cm	6
Gasbetonwand	6.6
Betonwand, 30 cm	9,4...16
Betonwand, 40 cm	17
Glas und Metall auf Stahlrahmen	3.9
Ziegelwand mit kleinen Fenstern	4
Betonwand mit großen Fenstern, 25 cm	4...5
Betonwand mit großen Fenstern, 20 cm	5.4
metallbedampfte Glasscheibe auf Stahlrahmen	6.9
große drahtverstärkte Fenster aus Stahl	10
Stellwände aus Metall	0.6, 3.8 oder 8

Tabelle 7.1: Einfügedämpfungen für Wände

Deckentyp	Einfügedämpfung [dB]
Stahlbetondecke in einem Wohnhaus	6...9
Steinfliesen auf Metallgitter	14.8
Stahlbetondecke	12...14 oder 16

Tabelle 7.2: Einfügedämpfungen für Decken

Neben dieser Berechnungsmethode kann der Pfadverlust auch überschlägig, ohne genaue Modellierung der Wandeinfügedämpfungen, durch die Näherungen aus Tabelle 7.3 bestimmt werden. Diese Näherungen beruhen auf Indoormessungen von *British Telecom Laboratory* und *Ericsson Radio Systems* [24]. Dabei bezeichnet die Variable  $d$  die direkte Entfernung zwischen Sender und Empfänger.

Entfernung $d$ in m	Dämpfung ( $L_{path}$ ) [dB]
$d \leq 10$	$30 + 20\log_{10}(d)$
$10 < d \leq 20$	$20 + 30\log_{10}(d)$
$20 < d \leq 40$	$-19 + 60\log_{10}(d)$
$40 < d$	$-115 + 120\log_{10}(d)$

Tabelle 7.3: Pfadverluste für Indoor-Szenarien

### 7.2.4 Eindringen von Funkwellen in Gebäude

Für den Fall einer außerhalb eines Gebäudes angebrachten Basisstation wurde bei COST231 das “penetration loss” Modell entwickelt. Es entspricht im wesentlichen dem Indoor-Modell, erweitert um einen winkelabhängigen Term für die Durchdringung der Außenwand.

$$L_{path} = L_d + \frac{L_{we}}{\cos(\theta)} + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d_i) + \sum_j p_j \cdot W_j - n_F \cdot G \quad (7.23)$$

Die zusätzlichen Terme bedeuten:

$L_d$  : Pfadverlust bis zum Gebäude

$\gamma$  : Verlustfaktor, empirisch bestimmte Steigung der Pfadverlustkennlinie innen

- $d_i$  : Entfernung zwischen Außenwand und Empfänger
- $L_{we}$  : Einfügedämpfung der Außenwand (Tabelle 7.1)
- $\theta$  : Einfallswinkel vom Sender zur Außenwand in Empfängerhöhe
- $G$  : Verstärkung pro Stockwerk. Beträgt 0 dB für Mikrozellen und 2 dB für Makrozellen
- $n_F$  : Stockwerk des Empfängers

Die für  $L_{we}$  geltenden Einfügedämpfungen bei  $\theta = 0$  sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

### 7.2.5 Vergleich der Methoden zur Funkprädiktion

Die hier vorgestellten Methoden zur Funkprädiktion im Freien wurden in [34] bezüglich ihrer Anwendbarkeit in unterschiedlichen Szenarien verglichen. Grundsätzlich sind empirische Modelle für modellhafte Untersuchungen den deterministischen in vereinfachten Szenarien vorzuziehen, da i.d.R. keine exakte Prädiktion für ein reales Szenario erforderlich ist und die Berechnungsgeschwindigkeit dieser Methoden deutlich höher als bei Raytracing- bzw. der Spiegelungsmethode ist. Sollen dagegen für ein Szenario genaue Vorhersagen gemacht werden, müssen deterministische Methoden angewendet werden. Vor allem dann, wenn Untersuchungen zur Signal-Spreizung (*Delay-Spread*) vorgenommen werden sollen, gibt es zu den aufgeführten deterministischen Methoden keine Alternative. Für große Szenarien kommt dabei nur die Strahlverfolgungsmethode in Frage, da in der Spiegelungsmethode keine Beugung verwirklicht werden kann und der Rechenaufwand bei einer großen Zahl von Oberflächen enorm ansteigt. An einem konkreten Beispiel sollen hier die genannten Punkte verdeutlicht werden. Das hier verwendete Szenario ist sehr realitätsnah, da es anhand eines Kartenausschnitts eines existierenden DECT-Versuchsnetzes erstellt wurde. Dieser Ausschnitt stellt einen Bereich der Innenstadt Gelsenkirchens dar.

In Abb. 7.5 erkennt man deutlich die verschiedenen Häuserhöhen und die unregelmäßigen Strukturen dieses Szenarios. Typisch für solche realen Szenarien sind die auftretenden Gebäudelücken, einzeln stehende Häuser und die schräg zueinander verlaufenden Straßen. Das Szenario hat eine Gesamtausdehnung von 190 m in der Länge und 95 m in der Breite. Das höchste Gebäude (25 m) ist der links in der Mitte stehende große Bunker. Für dieses Szenario wurde das Funkfeld mit allen drei Methoden bestimmt. Beim Ray-Trace-Verfahren wurde zusätzlich eine Variante mit und ohne Beugung

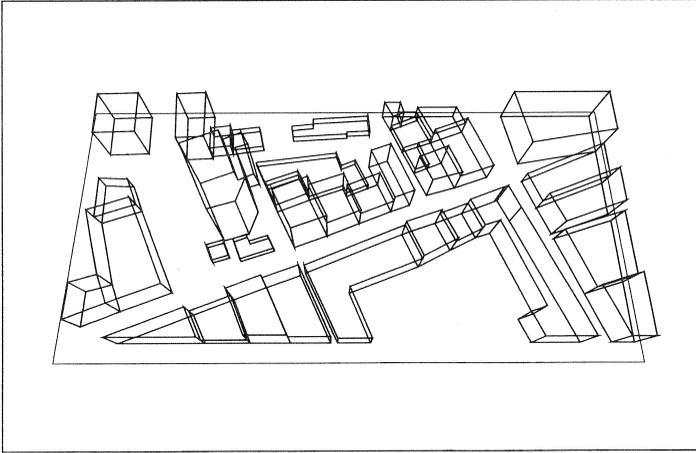


Abbildung 7.5: Dreidimensionale Ansicht des Szenarios Gelsenkirchen

erstellt. Ohne Beugung (s. Abb. 7.6) wurde eine Reflexionstiefe von zehn verwendet, mit Beugung (s. Abb. 7.7) eine Reflexionstiefe von fünf und eine Beugungstiefe von zwei. Die Feststation befand sich rechts an der unteren Ecke der links stehenden Gebäudegruppe in einer Höhe von 4,4 Metern (die Position ist in den Darstellungen durch ein Kreuz gekennzeichnet).

Die Abbildungen 7.8 und 7.9 zeigen die Ausleuchtungen mit dem Multi-Slope-Modell und dem TELECOM-FRANCE-Modell.

Beim Vergleich der Abbildungen 7.6 bis 7.9 fällt die Schwäche der empirischen Modelle bezüglich parallel zur Feststation auszuleuchtender Straßen auf. Dies erkennt man hinter dem hohen, alleinstehenden Bunker. In beiden Ray-Trace Ausleuchtungen wird hier ein Leistungspegel um die -65 dBm vorhergesagt, in den Ausleuchtungen der beiden empirischen Modelle aber ist dort kein Pegelwert oberhalb von -110 dBm vorhanden. Weiterhin fällt auf, daß die empirischen Modelle am Ende der langen Straße, welche diagonal über das Bild verläuft, keine Vorhersage treffen können, obwohl in den Ray-Trace Ausleuchtungen dort ein relevanter Leistungspegel vorhanden ist. Erklärbar ist dies durch den einzeln stehenden und eingerückten sechseckigen Gebäudeblock direkt unterhalb des Bunkers. Dieser Gebäudeblock verdeckt für die Feststation die untere Ecke des mittleren großen Gebäude-

blocks, welcher eine Seite der Straße, und somit den NLOS-Punkt der Feststation bzgl. dieser Straße bildet. Damit kann mit den empirischen Modellen nur der Bereich der Straße ausgeleuchtet werden, welcher von der Ecke des sechseckigen Gebäudeblocks aus „sichtbar“ ist.

Aus Ergebnissen von Messungen in diesem Bereich ist bekannt, daß in der Straße um den in der Mitte liegenden Wohnblock, bis auf die rechte obere Ecke, eine ausreichende Versorgung entlang dieser Straße vorhanden war.

Vergleicht man nun die beiden Ray-Trace Ausleuchtungen in Abb. 7.6 und 7.7, so zeigt sich die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Beugung bei der Funkprädition im Freien. In Abb. 7.6, in der die Beugung nicht berücksichtigt wurde, wird an den zwei der Feststation abgewandten Seiten des Gebäudeblocks keine Feldstärke oberhalb von  $-110$  dBm vorhergesagt. Mit Berücksichtigung von Beugung wird für beide eben genannten Straßen ein Pegel vorhergesagt, welcher einen Empfang erlauben würde.

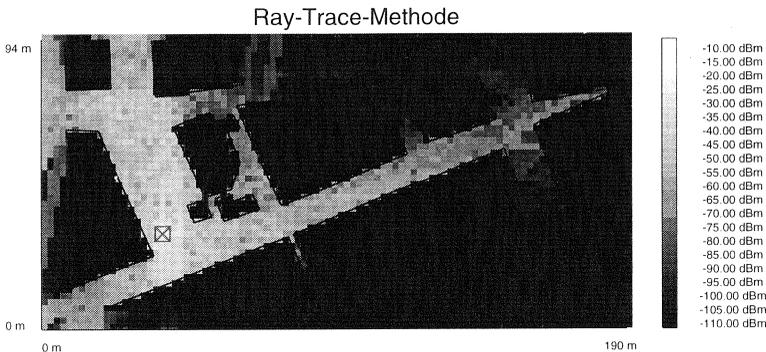
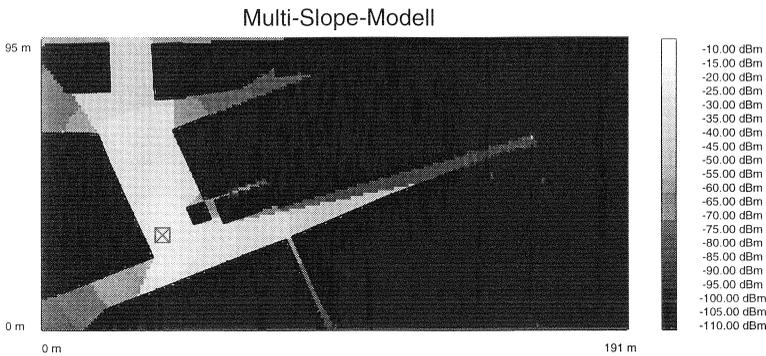
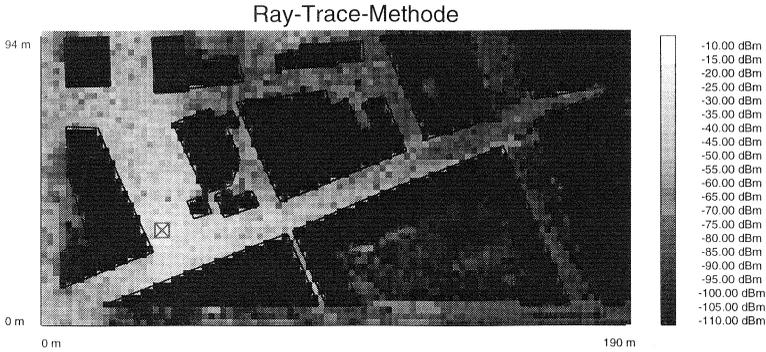


Abbildung 7.6: Ausleuchtung mit dem Ray-Trace-Tool ohne Beugung

In dieser Arbeit wurde für die Untersuchungen zur Kapazität des DECT-Systems mit konkreter Morphostruktur das COST Multi-Slope Modell verwendet, da die Unterschiede der beiden empirischen Modelle sich diesbezüglich unwesentlich unterscheiden.



Bei den später vorgestellten Untersuchungen des *Hot-spots* und des Indoor-Szenarios wurde das vorgestellte COST-Indoor Modell um eine Komponente zur Berücksichtigung des Pfadverlustes im Freien ergänzt. Für das Eindrin-

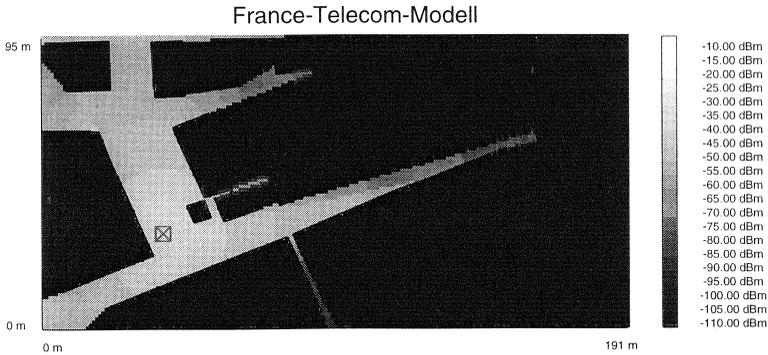


Abbildung 7.9: Ausleuchtung mit dem TELECOM FRANCE CNET Modell

gen in die Gebäude wurde nicht, wie im “penetration loss” Modell, die Ausbreitung erst zum Stockwerk des Empfängers und dort horizontal durch das Stockwerk bis zum Empfänger bestimmt, sondern der direkte Weg vom Sender zum Empfänger mit der entsprechenden Durchdringung von Wänden und Decken verfolgt. Auf eine winkelabhängige Berechnung der Dämpfung an der Außenwand wurde dabei verzichtet.

# Simulationstool DESI

Zur Analyse des Systemverhaltens von DECT Installationen besteht am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen das modular aufgebaute Simulationswerkzeug *DESI* (*DEct SIMulator*) [31], das in dieser Arbeit für die Untersuchung von DECT-Systemen im Freien wesentlich weiterentwickelt wurde. In mehrjähriger Arbeit ist dabei eine Software entstanden, mit der unterschiedlichste DECT-Konfigurationen untersucht werden können.

Das Simulationswerkzeug bildet das DECT-System mit seinen charakteristischen Eigenschaften detailliert nach. Die Algorithmen und Protokolle des DECT Radio Resource Management wurden dabei standardkonform implementiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der genauen Modellierung des jeweiligen Szenarios, um eine hohe Genauigkeit der Berechnungen zu erreichen und Einflüsse von Gebäuden, Abschattungen, Türen, Ecken usw. auf das Systemverhalten berücksichtigen zu können. Die implementierten Kanalmodelle (Kapitel 8.1) des Simulators nutzen zur Berechnung der Empfangsfeldstärke Informationen über Wände, Türen, Fenster und Hindernisse und beziehen sie über ihre Materialeigenschaften in die Berechnung ein. Durch die exakte Modellierung des Szenarios können, neben einfachen Pfadverlustmodellen, auch Raytracing Methoden zur Charakterisierung des Funkfeldes benutzt werden. Ein Mobilitätsmodell bildet das Benutzerverhalten entsprechend der Umgebung nach, um z.B. Raumwechsel (zwischen Büros) mit in die Simulation einzubeziehen.

Im Folgenden werden die zentralen Module des Simulators und die jeweils verwendeten Modelle erläutert, um eine Einordnung und Diskussion der Ergebnisse zu ermöglichen. Die verwendeten und in dieser Studie nicht variierten Parameter des Simulators werden anhand einer Parameterdatei erklärt (s. Anhang B).

## 8.1 Das Kanalmodell des Simulators

Das Kanalmodell stellt das wichtigste Modul dar und bestimmt die Realitätsnähe der ermittelten Ergebnisse. Es definiert für jeden Punkt im Szenario die zu erwartenden Empfangspegel von allen Feststationen. Vor der Simulationsuntersuchung eines gegebenen Szenarios wird ein Teil der aufwendigen Empfangspegel-Berechnung durchgeführt und entsprechend gespeichert. Die Berechnung erfolgt entsprechend den in Kapitel 7 beschriebenen Methoden.

Wird ein empirisches Modell für den Pfadverlust benutzt, so werden in einer Datei Empfangspegel gemäß der folgenden Formel für das gesamte Szenario abgespeichert:

$$P_r(\text{pre\_run}) = P_{tx} - L_{\text{path}} \quad (8.1)$$

Während der Simulationsuntersuchung eines Szenarios werden diese Werte aus der Datei ausgelesen. Erfolgte die Berechnung mit Hilfe von Raytrace Verfahren, so weist die Pegelinformation bei genügender Stützpunktdichte charakteristische Fadingverläufe auf. Liegen nicht genügend Stützstellen vor oder wurden empirische Modelle verwendet, so wird der gespeicherte Empfangspegel, der dann einen lokalen Mittelwert darstellt, durch geeignete Rauschprozesse wie folgt überlagert:

$$P_r(\text{run}) = P_r(\text{pre\_run}) - L_{\text{shd}} + L_{\text{multi}} \quad (8.2)$$

Es werden also nur noch die Einflüsse von Mehrwegeausbreitung und Abschattung durch Bestimmung von Zufallszahlen der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichten bei gegebenem Mittelwert bestimmt.

**Mehrwegeausbreitung**  $L_{\text{multi}}$  Ein gesendetes Signal erreicht den Empfänger nicht nur auf direktem Weg, sondern reflexionsbedingt auch auf indirekten Wegen (Mehrwegeausbreitung). Die verschiedenen langen Laufzeiten der direkten und indirekten Signale verursachen Phasenverschiebungen, die zu Interferenzen führen. Durch Auslöschung und Verstärkung der sich überlagernden Signale entstehen zufällige Pegelschwankungen. Auf Messungen basierende Untersuchungen haben ergeben, daß Interferenzen Signaleinbrüche ( $L_{\text{multi}}$ ) bis zu 30 dB verursachen, die bei Indooranwendungen durch eine Rice- bzw. Rayleighverteilung beschrieben werden können. Hat eine Übertragungsstrecke zwischen zwei Punkten eine Sichtverbindung, so wird der tatsächliche Signalverlauf durch Rice-verteilte Zufallszahlen mit dem berechneten Mittelwert beschrieben. Liegen Hindernisse zwischen den

zwei Punkten, eignen sich Rayleigh-verteilte Zufallszahlen zur Beschreibung des Signalverlaufs [47].

**Abschattungen**  $L_{shd}$  Die Empfangsleistung ist, außer durch Schwundefekte, zusätzlichen Schwankungen durch Abschattung an Hindernissen unterworfen, die zu logarithmisch normalverteilten Pegeleinbrüchen in der Größenordnung von 6 - 12 dB führen. Diese Schwankungen werden in der Simulation durch logarithmisch normalverteilte Zufallszahlen mit dem Mittelwert  $L_{shd}$  modelliert [47].

Zur Bemessung der Fadingeffekte finden sich in der Literatur zum Teil stark abweichende Aussagen. Nach [44], [43] sowie [10] ergibt sich für den Abschattungsschwund (*Shadow Fading*) eine Gleichverteilung mit Werten zwischen -10 dB und +10 dB. Brouwer berichtet dagegen in [5] von Messungen, entsprechend denen von Keenan/Motley [35], nach denen Abschattungsschwund als lognormalverteilt mit einem Mittelwert von 0 dB und Standardabweichungen zwischen 6 und 12 dB beschrieben werden kann. Für eigene Simulationen wurde bei Ericsson nach Brouwer ein Wert von 8 dB Varianz angenommen, ähnlich den Simulationen von Eriksson/Bownds [13]. Auch für die Modellierung des Multipath Fading waren in den genannten Literaturstellen abweichende Ansätze berichtet worden. Während in [5] die Effekte der Mehrwegeausbreitung mit einer zusätzlichen Marge von 10 dB berücksichtigt wurden, sind in [43] solche Einflüsse mit einer zweistufigen Markoff-Kette mit 20 dB Ausschlag, entsprechend Messungen der *Philips Research Labs* in England, nachgebildet worden.

Die genauen Einstellungen der Rauschprozesse sind im Simulator als Parameter einzugeben und in Anhang B genauer spezifiziert. Dabei wurde für diese Studie auf die feine Modellierung des Schwundes aus Gründen der Rechenzeiteffizienz des Simulators verzichtet. Stattdessen wurde eine feste Schwundreserve von 10 dB eingestellt, ein Wert, der im Falle von einfacher Diversität üblicherweise angenommen wird [5].

### 8.1.1 Das Bitfehlermodell

Um eine quantitativ richtige Aussage über die Kapazität des DECT Systems in einem gegebenen Szenario zu ermöglichen, muß die Bitfehlerrate als Funktion des Signal zu Störabstandes (C/I) genau modelliert werden. In dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Modelle verwandt. Zur Modellierung guter Funkkanäle wurde die Bitfehlerrate für nicht-kohärente FSK-Modulation verwendet, welche einen minimalen Wert von  $C/I =$

11 dB benötigt (s. Abb. 8.1). Sie entspricht damit dem Verhalten moderner DECT Empfänger bei wenig zeit-gespreiztem Funkkanal. Entsprechend Veröffentlichungen über das Verhalten des bei DECT benutzten GMSK Modulations-Verfahrens in Kanälen mit starker Mehrwegeausbreitung und hoher Signalspreizung (delay spread) [11] wurde für die Bitfehlerrate eine Funktion verwendet, welche bei einem C/I von 30 dB die geforderte Rate von  $10^{-3}$  erreicht (s. Abb. 8.1).

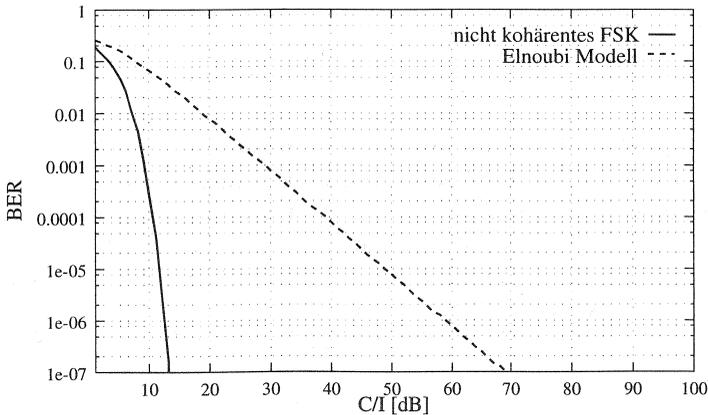


Abbildung 8.1: Bitfehlerwahrscheinlichkeiten über dem Störabstand C/I

## 8.2 Algorithmen von Kanalwahl und Handover

Die spezielle Realisierung der Algorithmen zur Kanalwahl und des Handovers sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit der simulierten Systeme. Der DECT-Simulator wurde in vorangegangenen Arbeiten zur Verbesserung von Handover-Algorithmen eingesetzt. Die Simulatorstruktur erlaubt einige Freiheitsgrade bei der Einstellung der Algorithmen. Es ist möglich, eine "bit-feine" Modellierung einzustellen oder mit absoluten Schwellen für das akzeptable C/I bei der Kanalwahl und für den Handover zu arbeiten. Die feine Modellierung zur Bestimmung der Signalqualität am Empfänger basiert auf berechneten CRC-Fehlern für A- und B-Feld im Up- und Down-Link der Verbindung entsprechend der durch das aktuelle C/I Verhältnis ge-

gebenen Bitfehlerwahrscheinlichkeit. Diese Qualität wird in Ringspeichern verwaltet. Erst ein CRC-Fehler in mehreren Stellen des Ringspeichers ergibt eine schlechte Qualitätsbewertung, um auf Auswirkungen kurzer Fadingeinbrüche nicht mit einem Handover zu reagieren. Die Einstellungen der Speichergrößen und akzeptablen CRC-Fehler wurde in früheren Arbeiten für detailliert modelliertes Fading in jedem Empfangssignal optimiert [49]. Es wird mit einer Puffergröße von 50 CRC-Werten gearbeitet, wobei bei einer Fehlerrate von 4%, also 2 CRC-Werten, ein Handover eingeleitet wird. Bei der Kanalwahl werden nur Kanäle akzeptiert, die ein aktuelles C/I von besser als 21dB aufweisen. Zusätzlich müssen 4 aufeinanderfolgende CRC Werte aus Up- und Downlink korrekt sein, damit eine Verbindung aufgebaut wird.

Die Einstellungen dieser Parameter hat großen Einfluß auf die Simulationsergebnisse und die detaillierte und damit auch spezielle Modellierung erschwert eine absolute Einordnung der Ergebnisse. Daher wurden neben Simulationen mit der feinen Standardeinstellung zur Bestimmung der Verbindungsqualität auch Simulationen mit festen C/I Schwellwerten für die Beurteilung der Kanalgüte (11 dB, 15 dB und 21 dB) durchgeführt. Außerdem wurden für die feine Modellierung Ergebnisse für beide Bitfehlermodelle ermittelt.

### 8.3 Das Modell der Lastgeneration

Der Lastgenerator steuert die Verkehrslast des DECT-Systems, die während der Simulationsdauer im Mittel konstant gehalten wird. Dabei werden mit Hilfe geeigneter Parameter die Ankunfts- und Endeprozesse, also der Eintritt (Beginn der Übertragung) bzw. Austritt (Ende der Übertragung) der Mobilstationen gesteuert. Beim DESI werden die durchschnittliche Verkehrslast (z.B. 0.1 Erlang) und die durchschnittliche Rufdauer (meist 120 s) im Parameterfile vorgegeben.

Modelliert wird der Zustandsprozeß des Systems mit einer Markoff-Kette, (s. Abb. 8.3). Ein Markoff-Prozeß ist ein stochastischer Prozeß, bei dem der Folgezustand nicht von allen, sondern nur vom vorhergehenden Zustand abhängt. Das bedeutet, daß ein Ankunftsereignis, also ein Ruf, nur vom aktuellen Gesamtzustand des Systems abhängt. Das DECT-System wird also als M/M/n/q Modell behandelt [60]:

- M: Eingabeprozess: Markoff-Prozeß

Gedächtnisloser Zugangsprozeß zum System mit negativ-exponentiell verteilter Zwischenankunftszeit. Die Ankunftsrate  $(q - k) \cdot \lambda$  beschreibt die Anzahl Zugänge pro Zeiteinheit in das System. Sie ist abhängig vom jeweiligen Zustand  $k$  (der Zahl bestehender Rufe im System), in dem sich der Prozeß befindet.

- M: Bedienprozeß: Markoff-Prozeß  
Gedächtnisloser Bedienprozeß der Rufe mit negativ-exponentiell verteilter Belegungsdauer (Bedienrate  $\mu$ ) der Kanäle. Die Enderate  $k \cdot \mu$  für das Kanalbündel hängt vom jeweiligen Systemzustand ab.
- n: Anzahl verfügbarer Bedienstationen  
Die Bedienstationen entsprechen in diesem Fall den Kommunikationskanälen.
- q: Quellenanzahl  
q bezeichnet die Zahl von Mobilgeräten, die als Verkehrsquellen auftreten und potentiell eine Verbindung fordern können. q ist als Parameter vorzugeben.

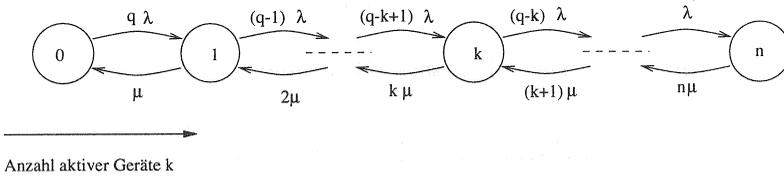


Abbildung 8.2: Markoff-Kette M/M/n/q ( $n=q$ )

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für  $k$  ( $k = 0, 1, \dots, n$ ) aktive Mobilstationen lautet:

$$p(k) = p(0) \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot \binom{q}{k} \tag{8.3}$$

$$p(0) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \binom{q}{i} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i} \tag{8.4}$$

Der Übergang vom Zustand  $k$  zum Zustand  $k+1$  ( $k=0,1,\dots,n-1$ ) bedeutet die Erzeugung einer neuen Verbindung für eine Mobilstation. Die Wechsel zwi-

schen den Zuständen werden durch entsprechende Vielfache der Ankunfts- und Endraten  $\lambda$  und  $\mu$  verursacht.

Bei der Modellierung des Lastgenerators sind für die Implementierung einige Vereinfachungen vorgenommen worden, da die beschriebenen Ankunfts- und Bedienprozesse nicht kontinuierlich bearbeitet werden, sondern nur zu diskreten Zeitpunkten (im Rahmentakt). Zu jedem Simulationstakt werden alle in der Zwischenzeit beendeten bzw. neu erzeugten Rufe betrachtet. Das ist zulässig, da die durchschnittliche Bediendauer von 120 sec wesentlich größer als die Taktdauer von 10 ms ist [28].

**Ankunftsprozess** Wie oben schon dargestellt, wird beim Ankunftsprozess eine negativ-exponentiell verteilte Zwischenankunftszeit vorgegeben. Die Ankunftsrate bezeichnet die Zahl der pro Zeiteinheit ankommenden (beginnenden) Rufe.

durchschnittliche Verkehrslast [Erlang] :  $V$

Anzahl der inaktiven Mobilstationen im aktuellen Simulationstakt:  $N_{Inactive}$

durchschnittliche Rufflänge (Bediendauer) :  $\beta = 120s$

durchschnittliche Bedienrate :  $\mu = \frac{1}{\beta}$

Die Ankunftsrate läßt sich ermitteln, wenn man die mittlere Zahl inaktiver Mobilstationen mit dem vorgegebenen Verkehrswert in Beziehung setzt:

$$\text{Ankunftsrate} : \lambda = \frac{V}{1 - V} \cdot \mu \quad (8.5)$$

Für den vorliegenden Fall (der in Abb. 8.3 gezeigten Kette) läßt sich folgende Beziehung für  $\lambda_k$ , die Ankunftsrate im Zustand  $k$ , angeben:

$$\lambda_k = (q - k) \cdot \lambda = N_{Inactive} \cdot \lambda \quad (8.6)$$

Im Zustand  $k$  wird mit der Rate  $\lambda_k$  eine negativ-exponentiell verteilte Zufallszahl gezogen, die die Zwischenankunftszeit der nächsten Mobilstation angibt.

**Bedienprozeß** Nach einer negativ-exponentiell verteilten Bedienzeit  $\beta$  von im Mittel 120 Sekunden wird die Mobilstation deaktiviert. Daraus folgt:

$$\text{Sterberate : } \mu = \frac{1}{\beta} \quad (8.7)$$

Für den speziellen Fall der in Abb. 8.3 gezeigten Kette läßt sich folgende Beziehung für  $\mu_k$ , die Sterberate im Zustand  $k$ , angeben:

$$\mu_k = k \cdot \mu = N_{Active} \cdot \mu \quad (8.8)$$

Wechselt der Zustandsprozeß in den Zustand  $k$  ( $k$  aktivierte Mobilstationen), wird mit der Rate  $\mu_k$  eine negativ-exponentiell verteilte Zufallszahl gezogen, die die Dauer bis zur nächsten Fertigstellung eines Rufes (Sterbezeit) bestimmt.

Im DECT-Simulator wird bei der Generation einer neuen Mobilstation jeweils die Länge der Bediendauer, also die Länge der Kommunikationsphase der Endgeräte, durch einen Zufallsgenerator bestimmt. Ist die Übertragungszeit abgelaufen, wird die Station in den Zustand inaktiv überführt.

## 8.4 Die Szenariobibliothek

Die für den Simulator entwickelte Szenario-Klassenstruktur ermöglicht die realitätsnahe Beschreibung beliebiger dreidimensionaler Szenarien. Sie beruht auf beliebigen polygonalen Elementen und ermöglicht so die Anwendung von Methoden und Funktionen, die zur Simulation von Funknetzen mit mikrozellulärer Struktur notwendig sind. So können durch die Bereitstellung umfangreicher Schnittstellenfunktionen auf einfache Weise Algorithmen, die eine dreidimensionale Modellierung der Umwelt benötigen, implementiert werden. Beispiele hierfür sind die Berechnung von Pfadverlusten mit Raytracing- oder Spiegelungsmethoden sowie die Modellierung der Teilnehmermobilität.

Die Bibliothek besteht aus verschiedenen funktionalen Elementen, die im folgenden vorgestellt werden.

- **Geometry**

Hier sind die geometrischen Grundelemente (Vector, Point, Polygon, Volume) implementiert, auf denen die Modellierung des Szenarios aufsetzt.

- **Scenario**  
Enthält die zur Modellierung des eigentlichen Szenarios notwendigen Klassen (Building, Obstacle, Plane, Surface).
- **Parser**  
Enthält die Klassen, die zum Einlesen einer Eingabedatei notwendig sind, die der Parsergrammatik entsprechen muß.
- **Calculation**  
Enthält alle für das Schreiben und Lesen von Pfadverlustdateien notwendigen Klassen. Dazu gehören auch die verschiedenen Methoden, mit denen die eigentliche Berechnung des Pfadverlustes erfolgt. Auch eine generative Antennenklasse zur Berücksichtigung von Richtantennen in der Ausleuchtungsberechnung wurde hierfür entwickelt.
- **Mobility**  
Enthält alle für die Modellierung der Teilnehmermobilität benötigten Klassen. Eine genaue Beschreibung ihrer Funktionen und Implementierung ist in [42] zu finden.
- **Tools**  
Hier sind verschiedene auf die Szenarioklassen abgestimmte Werkzeuge enthalten. Diese umfassen bisher ein Tool zur graphischen Eingabe von Szenarien sowie ein Tool, mit dessen Hilfe Pfadverlustdateien eingelesen, statistisch ausgewertet und graphisch ausgegeben werden können.

#### 8.4.1 Klassen- und Datenstruktur

Die Szenariobibliothek ist hierarchisch in 3 Ebenen eingeteilt (s. Abb. 8.3). Auf der unteren Ebene befinden sich die geometrischen Grundklassen *Vector*, *Line* sowie *Point* und *Polygon*. Die zweite Ebene stellt die Basisklassen für die vom Anwender benutzten Szenario-Klassen dar und besteht aus den Klassen *Plane* und *Volume*. Schließlich befinden sich in der dritten Ebene die eigentlichen Anwenderklassen. Sie setzen sich aus den von der Basis-klassse *Plane* abgeleiteten Klassen *Wall*, *Window* und *Door* sowie aus den von *Volume* abgeleiteten Klassen *Obstacle*, *Room*, *Building* und *Scenario* zusammen.

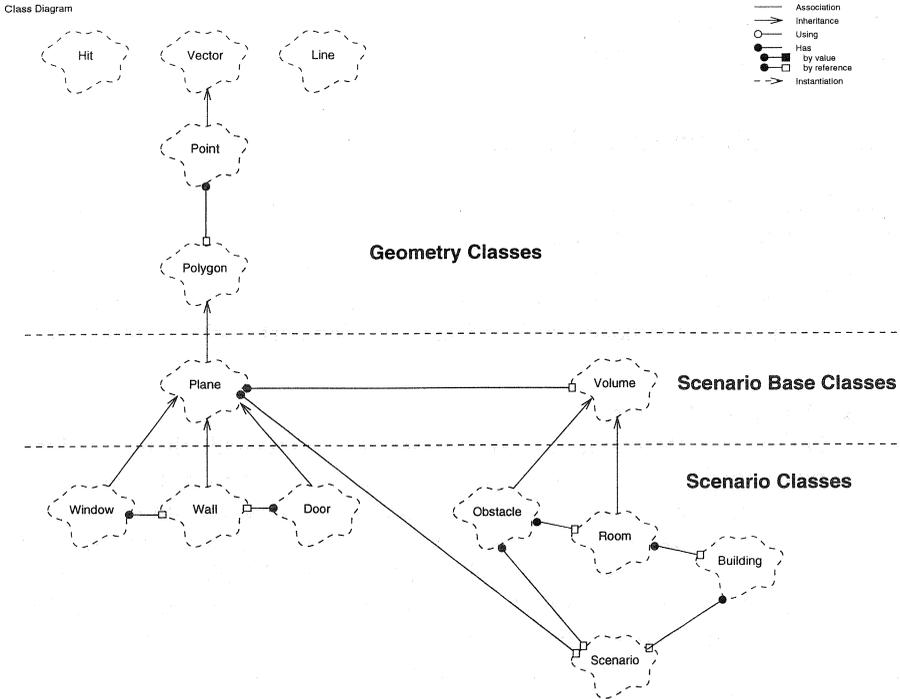


Abbildung 8.3: Klassenstruktur der Szenariobibliothek

## 8.5 Modellierung der Mobilität

Das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Szenario-Modell ermöglicht, eine Mobilität zu modellieren, die die örtlichen Gegebenheiten der zu betrachtenden Szenarien berücksichtigt. Die von einem Lastgenerator generierten Mobilstationen werden im definierten Szenario je nach zufällig ausgewähltem Mobilitätsgrad bewegt, wobei die Mobilität der Mobilstation sich nach dem augenblicklichen Aufenthaltsort richtet. Sie erfolgt innerhalb von Gebäuden anders als außerhalb. Bei der Bewegung in einem Gebäude bewegt sich die Station in einem Flur anders als in einem Büroraum, wobei auch ein Wechsel zwischen Räumen möglich ist. Bei den in dieser Arbeit hauptsächlich

untersuchten Outdoor-Szenarien wurde keine Bewegung der Mobilstationen nachgebildet, da drahtlose Teilnehmeranschlüsse fest installiert werden.

## 8.6 Struktur des Simulators

Der Simulator DESI hat eine modular aufgebaute, objektorientierte Struktur für einen flexiblen Einsatz bei Indoor- und Outdoor-Untersuchungen von DECT-Systemen. Durch einheitliche Schnittstellen nach außen ist der Anschluß verschiedener Systemkomponenten an den Simulator möglich. Die in Abb. 8.4 gezeigte Struktur des DESI hat drei definierte Schnittstellen nach außen:

- **Pathloss\_Admin**

Durch den Pegeladministrator lassen sich unterschiedliche Pfadverlustmodelle an den DESI anschließen. Neben theoretischen Pfadverlustmodellen für Indoor- und Outdoor-Szenarien kann man ein Raytracing-Verfahren [26] einsetzen, mit dem Mehrwege-Einflüsse von Hauptreflektoren wie Decken, Böden und Wände berechnet werden. Das eigenständige Raytracing-Tool erstellt mit Hilfe der Parameter und dem aktuellen Szenario die Pfadverlustmatrix, die der *Pathloss\_Admin* für den DESI passend konvertiert.

- **Scenario\_Admin**

Das Szenariomodell steht über eine zweite Schnittstelle (*Scenario\_Admin*) dem DESI zur Verfügung. Die eigenständige Klassenbibliothek für die Beschreibung der Räume, Stockwerke, etc. steuert die graphischen Ein- und Ausgaben, die das Szenario betreffen. Innerhalb des DESI nutzen vor allem die Mobilitätsklassen die Szenarioverwaltung durch das Modul *Scenario\_Admin*.

- **Output**

Die *Output*-Schnittstelle ermöglicht, während der Simulation ermittelte Ergebnisse auszugeben. Durch eine flexible Erweiterungsmöglichkeit dieser Klasse kann der Benutzer rasch neue Analysedateien generieren.

Durch die Schnittstellenstruktur lassen sich Veränderungen einzelner Module unbemerkt für andere durchführen, wenn die genormten Übergänge an der Oberfläche einheitlich gehalten werden. In Abb. 8.4 erkennt man die drei zentralen Funktionsblöcke des Simulators:

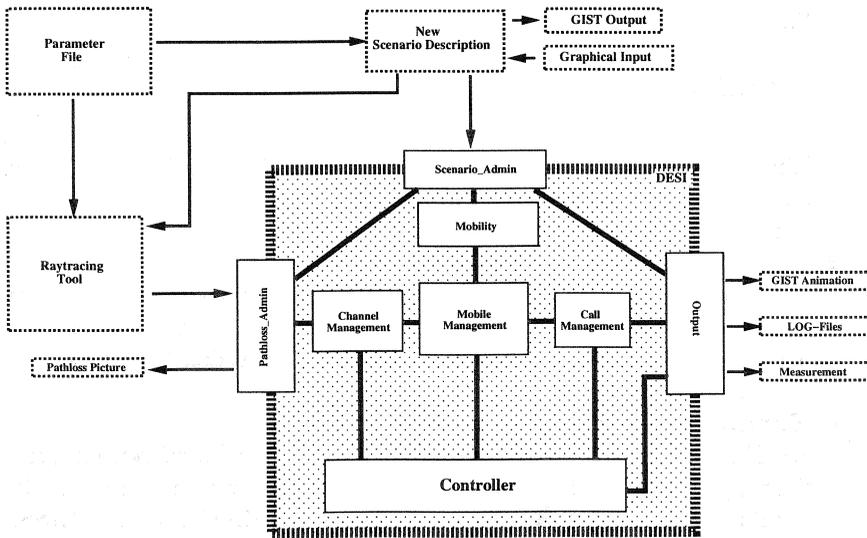


Abbildung 8.4: DECT Simulationstool: Übersicht über die Module

- Call-Management
- Channel-Management
- Mobile-Management

Diese werden vom übergeordneten *Controller* gesteuert und verwaltet. Eine umfangreiche Beschreibung des Simulationsprogramms (Struktur- und Ablaufdiagramme) ist in [40] zu finden.

## 8.7 Parameter der Leistungsbewertung

Während der Simulation werden folgende Leistungskenngrößen zur Bewertung des Kommunikationssystems ermittelt:

- **Anzahl blockierter Setup-Versuche bzw. Anzahl abgebrochener Handovervorgänge**

Mittels dieser zwei Parameter kann der Servicegrad (*Grade of Service* - GOS) des Systems bestimmt werden, welcher ein gewichtete Größe

für die Güte des Funknetzes darstellt.

$$GOS = \frac{\text{blockierte Setup Versuche} + 10 \cdot \text{abgebr. Verbindungen}}{\text{Gesamtanzahl der Verbindungen}} \quad (8.9)$$

Ein niedriger Servicegrad bedeutet eine hohe Dienstgüte im System, da nur wenige Verbindungsaufbaufehler und nahezu keine Verbindungsabbrüche auftreten.

- **Verteilungsfunktion von RSSI und C/I**

Die Versorgungsgüte einer Mobilstation hängt vom Pegel des Empfangssignals (RSSI) der Feststation am Ort der PP und der Bitfehlerwahrscheinlichkeit der Verbindung ab, die über den Parameter C/I abgeschätzt werden kann.

- **Handoververhalten**

Die Handoveraktivität deutet auf den Umfang der Interferenzen durch Störungen von anderen Teilnehmern (C/I-Handover) und auf die Dynamik der Wahl der Feststationen durch die Mobilstationen (RSSI-Handover) hin.

Mit diesen Parametern läßt sich die Güte einer Funkumgebung und die Leistungsfähigkeit von Kommunikationssystemen analysieren. In dieser Arbeit wurde ausschließlich der GOS zur Bewertung der DECT-Systeme verwendet.

In dieser Arbeit wird häufig der Begriff der *Kapazität eines Systems* verwendet. Hiermit ist im Falle der durchgeführten Untersuchungen der im betrachteten System tragbare Verkehr bei einer vorgegebenen einzuhaltenen Dienstgüte, meist  $GOS = 1\%$ , gemeint.

## Wechselwirkungen konkurrierender (a)synchroner DECT-Systeme

### 9.1 Einleitung

Dieses Kapitel enthält, neben der Beschreibung des Problems, alle wesentlichen bekannten Aussagen, Vermutungen und Ergebnisse über die gegenseitige Beeinflussung von DECT-Systemen, die man in der Literatur findet oder durch Überschlagsberechnungen erzielen kann.

Wie schon ausgeführt, kann DECT dank dezentraler dynamischer Kanalwahl (DCS) und der Möglichkeit der dezentralen Initiierung und Ausführung von Handovern auch benachbarte, asynchrone Systeme unterstützen [19].

Diese Fähigkeit macht einen Hauptvorteil des DECT-Systems gegenüber den FCA-Systemen wie TACS, NMT, GSM oder DCS 1800, aber auch gegenüber einem DCS-System mit eingeschränkter Mobilität wie CT2 aus.

Während bei RFPs, die zur gleichen DECT-Feststation gehören, Slot-, Frame-, und Multiframe-Synchronisation über die bestehende Verkabelung zwischen dem Festnetzanschluß (*Fixed Part* - FP) und den RFPs gewährleistet wird, ist eine Synchronisation zwischen Systemen, die in unmittelbarer Nachbarschaft betrieben werden, nicht ohne weiteres gegeben.

Die unterschiedlichen Systeme haben daher jeweils eine andere Zeitgabe ihrer TDMA-Struktur, so daß ein Frame des einen Systems, von einem anderen System aus gesehen, zeitlich verschoben beginnt (s. Abb. 9.1). Durch diese Verschiebung entstehen Effekte, die die tragbaren Verkehre in den Systemen verringern. Erwähnt werden soll hier, daß sich Systeme optional untereinander synchronisieren können. Diese Funktion ist jedoch in vielen Produkten nicht implementiert. Eine nähere Betrachtung erscheint daher für eine differenzierte Kapazitätsanalyse im Zusammenhang mit verschiedenen Anwendungsbeispielen angebracht.

Im DECT-System sind Möglichkeiten vorgesehen, Slotverschiebungen zu erkennen und mittels Handover einem plötzlichen Kanalverlust frühzeitig vorzubeugen. Durch die 56 bit lange Schutzzeit in den Zeitschlitzten ist si-

chergestellt, daß eine geringfügige Verschiebung nicht zu Fehlern in den Übertragungsdaten (Synchronisationsfeld und Datenfeld) führt. Hat der Synchronisationsfehler eine Dauer von mehr als 56 bit (ca.  $52\mu\text{s}$ ), so wird dies an der Störung der Synchronisationsinformation des S-Feldes (32 bit fest definiert) oder der X-CRC Prüfsumme erkannt und durch Initiierung eines Intracell-Handovers beseitigt. Daneben wird bei Verwendung des optionalen Z-Feldes durch Vergleich von Z- und X-Feld eine Slotverschiebung frühzeitig noch vor möglichem Datenverlust erkannt.

Da die Verkehrskapazität durch Störungen asynchroner Fremdsysteme eingeschränkt wird (wie im Folgenden noch näher erläutert) und die Systemdienstgüte durch häufige Handover leidet, ist für eine Kapazitätsanalyse die genaue Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Systeme nötig.

## 9.2 Sliding Collision Effekte

Auch innerhalb desselben Systems können Synchronisationsprobleme auftreten. Ungenauigkeiten des *Reference Timers* im Endgerät, der für die Taktung der Slots, Frames und Multiframe zuständig ist, können beispielsweise das Überlappen eines folgenden Slots mit dem Datenbereich des vorangegangenen bewirken (*sliding collision*).

Beim Betrieb eines RLL-Systems mit mehreren sequentiellen Relaisstufen wird die Synchronisation der einzelnen Stufen problematisch. Relais müssen ihren Referenztakt durch Selbstsynchronisation über die Signale der jeweils höheren Ebene beziehen. Dies führt bei Verwendung vieler Stufen zu einer Verschiebung der Synchronisation und resultiert in einem erhöhten Auftreten von Slotüberlappungen.

## 9.3 Gegenseitige Beeinflussung asynchroner DECT-Systeme

Asynchronitäten benachbarter Systeme verursachen ein gegenüber synchronen Systemen verändertes Störverhalten der Systeme untereinander.

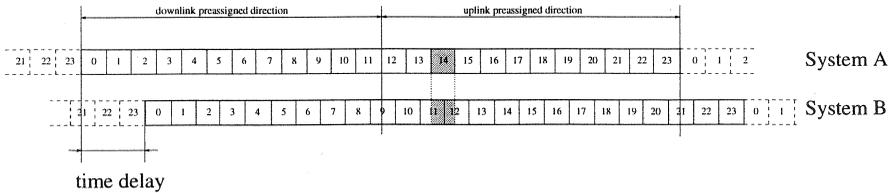


Abbildung 9.1: Frameverschiebung bei Asynchronität

### 9.3.1 Störung von zwei Slots im asynchronen Betrieb

Der Betrieb asynchroner Systeme in sich überlappenden Ausbreitungszonen führt zu erhöhten Gleichkanalstörungen (*Co-Channel Interference*). Durch die zeitliche Verschiebung der Rahmen benachbarter Systeme werden in der Regel pro belegtem Slot des einen Systems zwei Slots des anderen Systems gestört (s. Abb. 9.1). Dies bedeutet einen erheblichen Verlust an freien Kanälen, da jeweils in 2 Slots zu hohe Interferenzleistung gemessen wird und keine Verbindung aufgebaut werden kann.

### 9.3.2 Aufhebung der Up-/Downlinktrennung

Die im Multiplexrahmen des DECT-Systems definierte Zeitlagentrennung zwischen Up- und Downlinkübertragung hat zum Ziel, gegenseitige Interferenzen zu verhindern. Bei synchronen Systemen können Störungen am Empfänger der Mobilstation (PP) nur von Sendesignalen anderer RFPs verursacht sein. Da die Mobilstation in der Regel der stärksten bzw. der am nächsten gelegenen Feststation zugeordnet ist, werden die Störungen durch andere RFPs den Wert des Nutzsignal in der Regel nicht überschreiten.

Die zeitliche Verschiebung der Rahmen asynchroner Systeme kann jeden möglichen Wert annehmen. Deshalb ist eine Up-/Downlink-Trennung hier nicht mehr gewährleistet. Störungen auf dem Uplink eines Systems entstehen dann durch Downlink-Übertragungen anderer Systeme und umgekehrt. Neben RFPs des eigenen Systems tragen dann PP's asynchroner Fremdsysteme zu Gleichkanalstörungen beim Empfänger eines PP's bei (s. Abb. 9.2). Ebenso stören RFPs asynchroner Fremdsysteme den Empfang der eigenen Feststation. In Abb. 9.1 ist der Fall dargestellt, daß ein Slot (14) im System A belegt ist, der im Fremdsystem B mit einem Downlink- und einem Uplinkslot (11 und 12) überlappt.

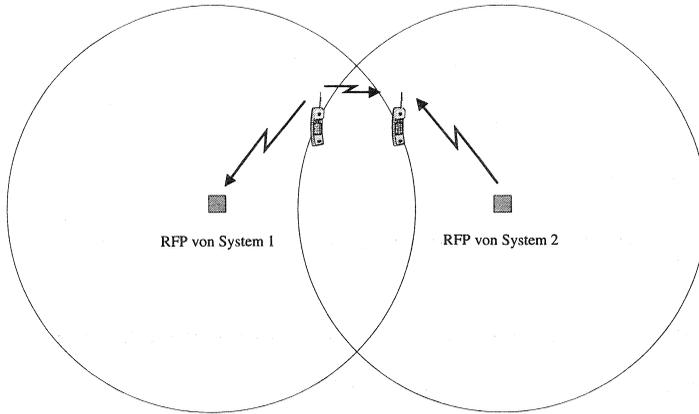


Abbildung 9.2: Portable-Portable Interferenz durch Aufhebung der Up-/Downlinktrennung

### 9.3.3 Einfluß asynchroner Systeme auf die Kapazität

DCS-Algorithmen sind prinzipiell in der Lage, sich jeder möglichen Verkehrslastsituation anzupassen. Gestützt auf Messungen wird ständig der beste Kanal für den Verbindungsaufbau bzw. Handover gewählt.

Abhängig von der Störleistung der Fremdsysteme werden gestörte Kanäle im schlimmsten Fall vom DCS-Algorithmus als *busy* klassifiziert und stehen somit für Verbindungen des eigenen Systems nicht mehr zur Verfügung. Die Zahl verfügbarer Kanäle wird aufgrund von Asynchronität in allen beteiligten Systemen in ihren Überlappungsbereichen u.U. stark eingeschränkt. Daraus resultiert eine Verringerung der Kapazität der Systeme bzw. der tragbaren Verkehrslast.

Bei bestehenden Verbindungen ist eine Erkennung derartiger Gleichkanalstörungen durch die CRC gestützte Erkennung von Bitfehlern gewährleistet (Abb. 4.10). Die Methoden zur Erkennung der Sliding Collision innerhalb desselben Systems, vgl. Abschnitt 9.2, sprechen auch auf Störungen asynchroner Systeme an und reagieren auf daraus resultierende Fehler mit Handover, um Verbindungsverluste vorzubeugen. Eine Häufung von Handovern beeinträchtigt die Dienstgüte des Systems und sollte vermieden werden. Haben z.B. mehrere asynchronen private DECT-Telefone innerhalb eines Funkbereiches einen Teil der 120 Kanäle belegt, so ist trotz der Asyn-

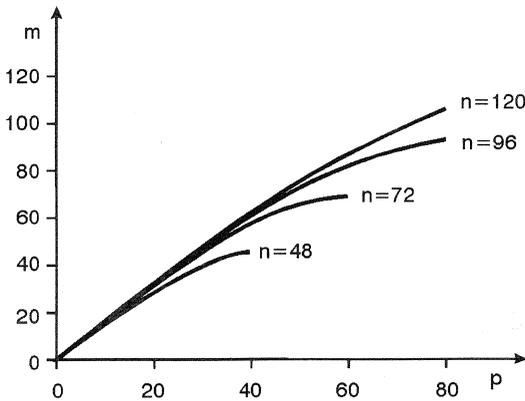


Abbildung 9.3: Zahl blockierter Kanäle  $m$  über der Zahl in einem der asynchronen Systeme benutzten Kanäle  $p$  mit insgesamt  $n$  Kanälen im System

chronität genügend freie Kapazität vorhanden. Durch die unterschiedlichen Synchronisationstakte wandern die einzelnen DECT-Verbindungs-paare in der Zeitachse aufeinander zu, bis es zur Überlappung kommt, die durch das Z-Feld frühzeitig erkannt und durch einen Handover vermieden werden kann. Die so entstehende Instabilität bewirkt eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Rufunterbrechung nach einem Handover und damit eine Verminderung des tragbaren Verkehrs.

Um gesicherte Aussagen zum jeweiligen Störabstand C/I am PP sowie den Beeinträchtigungen der Verkehrskapazität insgesamt treffen zu können, sind simulative Untersuchungen der entsprechenden Szenarien nötig. Laut vorläufiger und vereinfachter Überlegungen aus [30] kann die mittlere Zahl blockierter Kanäle  $m$  bei  $n$  insgesamt verfügbaren Kanälen und bei  $p$  in einem der Systeme benutzten Kanäle abgeschätzt werden zu

$$m = p \left( 1 + \frac{n-p}{n-1} \right) \quad (9.1)$$

Abbildung 9.3 zeigt  $m$  über  $p$  mit  $n$  als Parameter. Demnach ist die zu erwartende gegenseitige Störung asynchroner Systeme erheblich. Diese vorläufigen Ergebnissen werden in Kapitel 12 durch Simulation validiert.

## 9.4 Anwendungen mit wesentlicher Einbuße der Systemkapazität durch asynchrone Systeme

Die größten Verkehrsdichten in DECT Systemen fallen in Gebäuden bei drahtlosen Nebenstellenanlagen (drahtlose PBX) und außen bei PCS-/Telepoint Anwendungen in sog. *Hot-Spots* an [19]. Bei *Hot-Spots* handelt es sich um meist relativ kleine Flächen mit den angegebenen Spitzenverkehren, die von Gebieten mit deutlich kleinerer Verkehrslast umgeben sind.

### 9.4.1 Indoor-Beispiel

Als eine kritische Installationen ist folgendes Szenario denkbar: Mehrere Firmen betreiben unabhängig voneinander ihre DECT PBX-Systeme auf verschiedenen Etagen. Die Systeme sind nicht synchronisiert, z.B. weil die Betreiber nichts von der Existenz der Fremdsysteme wissen oder weil die Synchronisation technisch nicht möglich ist. Es entstehen Störungen durch Interferenzen der übereinanderliegenden Systeme, deren Auswirkungen durch ihre Asynchronität noch verstärkt werden. Die durch die jeweilige Ausstattung mit Transceivern mögliche bzw. die in DECT insgesamt verfügbare Verkehrskapazität steht nur eingeschränkt zur Verfügung und es kommt zu einer Häufung von Blockierungen, Verbindungsabbrüchen sowie insgesamt zu einer Verschlechterung der Übertragungsqualität. Asynchroner Betrieb von Systemen stört dann am meisten, wenn die Systeme über derselben Grundfläche betrieben werden, z.B. im Gebäude oder außen bei konkurrierenden Betreibern. In vielen Fällen werden Systeme nebeneinander, mit teilweiser Überlappung an den Rändern, betrieben, wobei die Störung auf die Überlappungsbereiche beschränkt bleibt.

In [30] wird für ein DECT-Standardszenario (PBX mit 540 Teilnehmern in einem dreistöckigen Gebäude mit 60 m Länge und 60 m Breite) bei 9 RFPs pro Etage der Einfluß eines Indoor- auf ein Outdoor-System untersucht, das einen RFP im Abstand  $\delta$  vom Gebäude betreibt, wobei ein Mobilteil im Abstand  $d$  von seinem RFP im Gebäude betrieben wird (s. Abb. 9.4-1)). Die Berechnungen für das Szenario ergeben, daß der Abstand  $\delta$  eines PP vom RFP eines Fremdsystems ca. 3 bis 5 mal (je nach Art des Bürogebäudes) größer sein muß, als vom RFP des eigenen Systems  $d$ , um den erforderlichen Störabstand von 20 dB für einen erfolgreichen Verbindungsaufbau zu erreichen. Das bedeutet, daß der Abstand  $\delta$  u.U. 200 m betragen muß, was in vielen praktischen Fällen nicht realistisch ist.

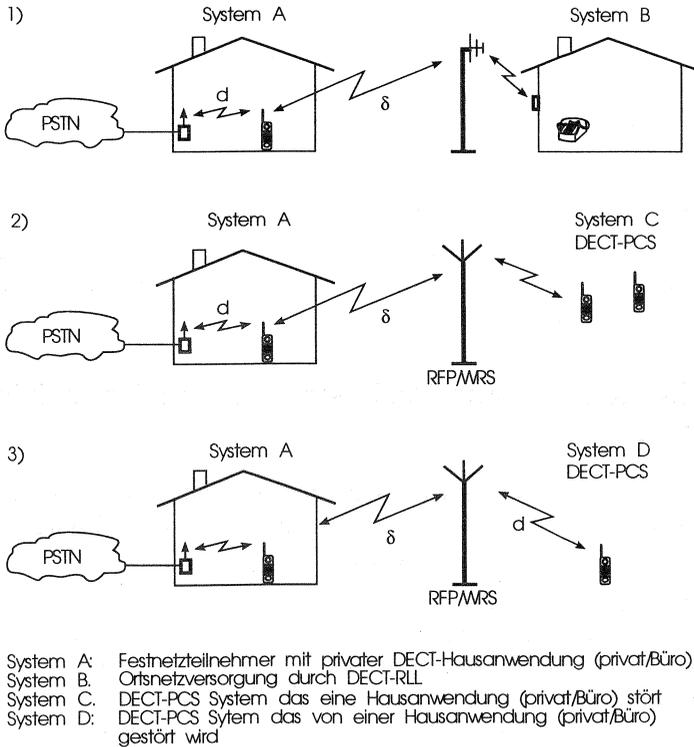


Abbildung 9.4: Beeinflussung von residential und RLL-Systemen

### 9.4.2 Outdoor-Beispiel

Im Ortsnetz, in dem die Versorgung eines Teils der Kunden über einen DECT RLL-Link erfolgt, werden lokale private DECT-Hausanlagen benachbarte Sender des RLL-Anbieters stören und umgekehrt.

In Abb. 9.4-1 ist dargestellt, wie sich ein herkömmlich verkabelter Haushalt mit privater Hausanlage bzw. ein Bürosystem mit DECT-PBX (System A) und eine RLL-Station (System B), die einen Teil der Häuser in der Nachbarschaft versorgt, gegenseitig beeinflussen. Nimmt man an, der private Nutzer würde seine DECT-Installation auch im Outdoorbereich betreiben (wie z.B. eine Firma, die ihr gesamtes Firmengelände mit DECT versorgt und RFPs

auch außen aufstellt), so wäre eine Störung des RLL-Systems erheblich. Die Beeinträchtigung wäre vor allem für den Netzbetreiber relevant: Er benötigt zur Versorgung seiner Kunden Kapazität, die frei von zufällig auftretenden (asynchronen) Störungen privater Systeme ist, um seinen Teilnehmern eine ausreichende Dienstgüte zu garantieren. Abb. 9.4-2 und 3 zeigen entsprechende Beeinflussungen von öffentlichem PCS-System (System C bzw. System D) und einem privaten Haushalt (System A).

Betreiben konkurrierende Netzanbieter asynchrone Systeme im gleichen Gebiet, so resultiert eine maximale gegenseitige Störung, weil die Überlappung der Systeme vollständig ist.

## 9.5 Maßnahmen zur Verbesserung von Kapazität und Dienstgüte

Um die Synchronisation verschiedener Systeme zu gewährleisten, stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, deren Aufwand und Eignung im Folgenden kurz besprochen werden sollen.

- **Synchronisation Port**

Zur Synchronisation verschiedener Systeme sieht der Standard einen optionalen Synchronisation Port vor. Die Verwendung dieses zusätzlichen Anschlusses ist nicht immer realisierbar. Im Ortsnetzbereich, wo Netzbetreiber und Privatanwender um die freien Kanalressourcen konkurrieren, dürfte die drahtgebundene Synchronisation nur schwer praktikabel sei, da RLL-Systeme ihre Berechtigung aus der Vermeidung von Kabeln ableiten. Durch den Einsatz von DECT-Relais (WRS), wie in [40] beschrieben, wird die Synchronisation zusätzlich problematisch.

- **Reference Timer Adjustment for Synchronisation**

Um eine Synchronisation geringfügig verschobener Systeme zu erzielen, sieht der Standard vor, daß Fest- und Mobilstation die Länge eines Rahmens verändern können. Die Länge aneinandergrenzender Rahmen kann dabei um eine Dauer entsprechend der Übertragungszeit von 2 bit verändert werden. Diese Möglichkeit bietet angesichts 480 bit langer Slots nur bei geringer Slotüberlappung im eigenen System eine Korrekturmöglichkeit.

- **Gerichtete Antennen**

Durch Verwendung gerichteter Antennen lassen sich allg. Gleichka-

nalstörungen in den nicht in Strahlungsrichtung liegenden Empfängern verringern. Für eine umfassende Ausleuchtung des Versorgungsgebietes sind solche gerichteten Antennen jedoch kontraproduktiv. Sich gegenseitig störende Systeme werden wahllos verteilt im Versorgungsgebiet liegen, so daß eine ausgezeichnete Strahlungsrichtung unter Umgehung von Störsystemen nicht gegeben sein wird.

#### • **Global Positioning System**

Eine attraktive Lösung, die Synchronisation verschiedener Systeme auch für öffentliche Anwendungen (RLL und Telepoint) ohne Verkabelung zu gewährleisten, bietet der Bezug der Synchronisationsreferenz über das Global Positioning System (GPS), wie in [19] beschrieben.

Weitere im Folgenden aufgeführte Maßnahmen erfordern eine aufwendige Planung bei Errichtung der Systeme und würden den Hauptvorteil von DECT, seine flexible Erweiterbarkeit ohne Vorabplanung, zunichte machen.

- Größere räumliche Trennung der RFPs
- Zusätzliche Dämpfungsmaßnahmen
- Optimierte Anordnung der RFPs/WRSs

## 9.6 Kenntnisse und Vermutungen über die gegenseitige Beeinflussung von DECT-Systemen in verschiedenen Szenarien nach ETSI/RES-3R

Die gegenwärtige Sicht bei RES-3R ist [1], daß die bestehenden Modelle und Szenarien Ergänzungen benötigen bzgl. der Abschätzung von

- Wachstum der Installationsdichte in den nächsten Jahren
- Unterschieden zwischen mittlerer Verkehrsdichte und Dichte in sog. *Hot-Spots*
- technischen, planenden und ökonomischen Möglichkeiten und Grenzen, um die angestrebte Dienstgüte in bestehenden und zukünftigen *Hot-Spots* zu erzielen
- realistischen Modellen für Datenanwendungen

<sup>1</sup>Simulationsergebnisse entsprechender Szenarios sind vorhanden

<sup>2</sup>Vermutung von RES-3R

<sup>3</sup>Empfehlung durch RES-3R

<sup>4</sup>Simulationsergebnis

<sup>5</sup>Vermutung von RES-3R

	gegenseitige Störung von:	Belastung des Spektrums und Erkenntnisse bzw. Vermutungen
1	Privat und Privat	Spektrumsbelastung ist gering, verglichen mit Büroanwendung. Apartmenthaus entspricht Büroanwendung mit geringer Teilnehmerdichte.
2	Privat und Büro, PCS, RLL	Die mögliche Störung durch Privatsysteme ist viel geringer als durch Bürosysteme; die mögliche Störung von Privatsystemen liegt in der gleichen Größenordnung wie die Störung von Bürosystemen, vgl. 4.
3	Büro und Büro	20 MHz reicht für den wirtschaftlichen Betrieb vieler gleichzeitiger Sprach-Bürosysteme aus <sup>1</sup> Bei ISDN/Datendiensten stehen Ergebnisse noch aus.
4	Büro und RLL, PCS	Die mögliche Störung von Bürosystemen ist wesentlich geringer als bei 3 <sup>2</sup> . Eine mögliche Störung von RLL/PCS- durch Bürosysteme ist evtl. kritisch; Simulationen sind zur Klärung erforderlich <sup>3</sup> .
5	PCS und RLL (RLL über Dächer, PCS an Lampen)	Das PCS- bemerkt RLL-System kaum <sup>4</sup> . Der max. mittlere RLL-Verkehr fällt um z.B. 25%; weitere Simulationen sind nötig.
6	RLL und RLL	Kritisches Szenario, bei dem die Synchronisation der Systeme für den Betrieb als nötig erachtet wird <sup>5</sup> .

Tabelle 9.1: Gegenwärtige Einschätzung verschiedener Szenarien bei ETSI/RES-3R [5], [1], [6], [7], [30]

- Notwendigkeit und Einfluß möglicher Frequenzzuweisungen für DECT im europäischen und/oder nationalen Bereich.

Folgende Ergebnisse gelten aus Berechnungen als gesichert [30]:

1. In PCS-Systemen (*neighbourhood access*) mit Ausleuchtung der Häuser von außen (s. Abb. 9.4-3) liegt bei 70 mErl pro Teilnehmer die typische Reichweite der RFPs bei 70 m. Üblicherweise werden ortsfeste Relais benutzt, weil diese Anwendung durch den Pfadverlust des

Funksystems in der Kapazität beschränkt ist. Falls der Anteil des ISDN-Verkehrs hoch ist (10%), müssen RFPs eingesetzt werden.

2. Innerhalb von Gebäuden werden, je nach Art des Gebäudes, mit gebäudeinternen RFPs Reichweiten zwischen 20 m (Kaufhaus) und 90 m (großräumiges Büro mit geringer Dämpfung) erreicht. Bei 150 mErl je Teilnehmer können dann ca. 35 Teilnehmer je RFP bedient werden (21 bzw. 15 Teilnehmer, falls 10 bzw. 20% ISDN-Verkehr unterstellt werden).
3. Zwei Systeme im gleichen Gebäude werden sich sehr wahrscheinlich gegenseitig beeinflussen. Wenn der Abstand eines PP zur störenden RFP  $d_1$  beträgt und der Abstand zum für die Verbindung benutzten RFP  $d_2$  beträgt, muß  $d_1/d_2 > 4.5$  sein, wenn eine mittelgroße Dämpfung angenommen wird; bei höherer Dämpfung muß  $d_1/d_2 > 3.2$  sein.
4. Sind die sich gegenseitig störenden Systeme in zwei benachbarten Gebäuden im Abstand  $\delta$  untergebracht, dann werden RFPs in nach außen zum Nachbargebäude angrenzenden Räumen solche PPs stören, die sich dort in den Fensterräumen aufhalten, falls deren Abstand zu ihrem RFP groß oder  $\delta$  klein ist. RFPs, die nicht in den Fensterräumen zum benachbarten Gebäude stehen, werden das DECT-System im benachbarten Gebäude nicht nennenswert stören.
5. Untersuchungen zur Interferenz von außen nach innen (s. Abb. 9.4-2) ergeben, daß alle Kanäle, die von einem 20 m entfernten RFP außen belegt sind, innen nicht benutzbar sind. Selbst bei 50 m entferntem RFP werden alle PPs in den hinter der Außenwand des Gebäudes liegenden Räumen und alle, die nicht nahe bei einer RFP im Gebäude sind, spürbare Einschränkungen der Kapazität erfahren. Interferenz wird erst dann vermieden, wenn der Abstand größer als 200 m ist.
6. Ergebnisse zur Interferenz von innen nach außen (s. Abb. 9.4-3) aus [30] ergeben, daß alle innen in den an die Außenwand des Gebäudes angrenzenden Räumen benutzten Kanäle außen wiederbenutzt werden können, wenn der Abstand  $d$  zwischen PP und ihren RFPs außen kleiner als 40% des Abstandes  $\delta$  vom gebäudeinternen System ist. Kanäle, die von PPs und RFPs im Zentrum des Gebäudes benutzt werden, können wiederbenutzt werden, wenn  $d$  kleiner als  $1.3\delta$  ist. Um Interferenz von den entfernten Bereichen im Gebäude nach außen zu vermeiden, sollte  $d/\delta < 3.2$  sein.
7. Konkurrierende Systeme außerhalb von Gebäuden (RLL-/PCS-Betreiber) stören sich gegenseitig erheblich, mehr als Systeme in Gebäuden: an-

genommen, der Zellradius sei 50 m, dann können die in einer solchen Zelle benutzten Kanäle erst 500 m entfernt wiederbenutzt werden, was einer Reduktion der Zahl verfügbarer Kanäle um den Faktor 6 entspricht.

Alle hier aufgeführten Ergebnisse und Aussagen gelten unter Vorbehalt und sind, so die Autoren ([5], [1], [6], [7], [30]), noch durch Simulation zu validieren. Sie zeigen jedoch die Tendenz, wie sich Systeme in den jeweiligen Szenarien beeinflussen werden. Entsprechende Simulationsergebnisse und zugehörige Interpretationen findet man in den Kapiteln 12 und 13.

## 9.7 Konkurrierende Betreiber im gleichen Versorgungsgebiet

Existieren mehrere konkurrierende Anbieter im selben Versorgungsbereich, es werden nachfolgend beispielhaft meist zwei Betreiber angenommen, ist, neben den zuvor dargestellten Fällen, auch die Beeinflussung der Netzbetreiber untereinander zu beachten, die sich das Funkspektrum teilen.

Aus einer globalen verkehrstheoretischen Sicht gelten die Ausführungen in Abschnitt 10 auch bei mehreren Betreibern. Unabhängig von der RFP/WRS-Dichte der Betreiber steht dieselbe Gesamtkapazität des DECT-Systems zur Verfügung, wie in der Tabelle 10.2 berechnet. Die Betreiber können und müssen sich diese Kapazität teilen.

In Abschnitt 10 wird darauf hingewiesen, daß

- die pro RFP/WRS eingesetzte Sendeleistung und damit die Überlappung der Versorgungsgebiete benachbarter Zellen eines Betreibers sowie
- die Zahl Transceiver pro Basistation

wesentliche Einflüsse auf die von einem PP erreichbare Zahl Kanäle (die Bündelstärke) haben. Die Dienstgüte der Betreiber läßt sich also durch entsprechende Maßnahmen beeinflussen. Die Simulationsergebnisse in Kapitel 12 zeigen, daß bei konkurrierenden Betreibern jeder seine RFPs mit mehr Transceivern ausstatten muß, als ein einzelner Betreiber, um die Systemkapazität voll auszuschöpfen und die gleiche Dienstgüte wie ein einzelner Betreiber zu erreichen. Neben der Ausrüstung mit vielen Transceivern gibt es weitere Möglichkeiten, wie ein Betreiber sich auf Kosten des ande-

ren (bei Bedarf oder ständig) Vorteile verschaffen kann. Die nachfolgende Aufzählung ist daher sicher sehr unvollständig.

Konkurrierende Betreiber im gleichen Frequenzband haben u.a. folgende Freiheitsgrade, um sich Kapazitätsvorteile auf Kosten des Mitbewerbers zu verschaffen:

- **Einsatz einer höheren Dichte von RFP/WRS-Stationen**

Im DECT-System ist in Situationen mit hohem Verkehrsaufkommen, das die (aufgrund der Ausstattung und Basisstationsdichte) lokal verfügbare Systemkapazität von DECT überschreitet, derjenige Betreiber zu Ungunsten des Mitbewerbers im Vorteil, der seine RFP/WRS-Stationen dichter aufstellt und damit näher bei den PPs seiner Teilnehmer präsent ist. Generell kann ein PP, die dicht bei der Feststation ihres Betreibers ist, viel wahrscheinlicher eine Verbindung einrichten, als ein entfernteres PP, da bei gleicher Entfernung das C/I-Verhältnis besser ist. Dabei kann sie sogar, bedingt durch ihre Signalleistung, andere PPs mit bestehenden Verbindungen, die relativ weit von ihrer RFP/WRS entfernt sind, interferenzbedingt aus ihrem bestehenden Kanal verdrängen. Als eine Konsequenz kann möglicherweise kein alternativer Kanal gefunden werden und die Verbindung muß unterbrochen werden. Dieses tritt wahrscheinlicher bei einem Wettbewerber mit kleinerer Stationsdichte auf. Der Betreiber mit höherer Feststationsdichte kann so die Dienstgüte eines Wettbewerbers lokal spürbar beeinträchtigen.

- **Einsatz mehrerer Transceiver pro RFP/WRS-Basistation**

In Kapitel 10 wird gezeigt, daß die Beschaltung mit mehreren Transceivern pro RFP/WRS die Zahl möglicher Kanäle für den Verbindungsaufbau bzw. Handover eines PP und damit die Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  günstig beeinflusst. Durch Ausstattung mit einer ausreichenden Zahl Transceiver pro RFP/WRS kann ein Betreiber mit kleinerer Stationsdichte den durch den Nah-/Ferneffekt entstehenden Nachteil wettmachen, wenn die Kapazitätsgrenze des Systems örtlich noch nicht erreicht ist.

- **Einsatz der maximal zulässigen Sendeleistung**

Senden die RFPs, unabhängig von der Stationsdichte, mit maximaler Leistung, um eine große Überlappung ihrer Versorgungsgebiete zu erreichen, so wirkt diese Maßnahme ähnlich wie die Ausstattung der RFPs mit vielen Transceivern je RFP.

- **Anwendung technischer Maßnahmen, um Kanäle zu reservieren**

PPs versuchen laut DECT-Standard generell nur auf solchen Kanälen einen Verbindungsaufbau bzw. Handover, für die der erforderliche Störabstand (z.B.  $C/I = 11$  dB plus Schwundreserve) gemessen worden ist. Im Rahmen des Standards sind technische Maßnahmen denkbar, um Kanäle durch gezielte Belegung (mit dem Ziel der Reservierung) unzugänglich für PPs des Wettbewerbers zu machen, sie aber eigenen PPs durch nicht standardisierte Bekanntmachung über den Beacon-Kanal zugänglich zu machen. Eine dafür geeignete Methode wäre der Betrieb mehrerer Beacon-Kanäle pro RFP/WRS durch den reservierenden Betreiber. Durch (lastabhängige/dynamische) Belegung von Kanälen (z.B. mit Übertragung betreiberspezifischer Information auf diesen Kanälen) mit dem Ziel der Reservierung dieser Kanäle kann der Wettbewerb zwischen Betreibern verzerrt werden.

- **Absichtliche Störung bestehender Verbindungen des Wettbewerbers mit dem Ziel, den gestörten Kanal selbst zu nutzen**

Eine alte Weisheit für die Benutzung von Funksystemen mit Vielfachzugriff lautet *wer sich nicht traut zu senden, der findet nie einen Kanal*. Dementsprechend könnte ein Betreiber für sein System festlegen, daß weniger als die üblichen 20 dB Störabstand für den Verbindungsaufbau ausreichen, wenn ein z.Zt. durch ein PP des anderen Betreibers genutzter Kanal versuchsweise belegt wird. Damit wird das PP des Wettbewerbers durch gezielte Störung aus dem Kanal, evtl. auch aus dem System verdrängt, falls das PP lokal keinen anderen nutzbaren Kanal findet. Der so freigeschaufelte Kanal kann anschließend selbst genutzt werden. Das DECT-System setzt kooperative PPs voraus. Wenn die PPs der Wettbewerber sich nicht kooperativ verhalten, gilt das Faustrecht mit allen Konsequenzen.

- **Verwendung besserer Empfängertechnologie**

Wie in den Kapiteln 10 und Abschnitt 13.2.4 gezeigt wird, ist der für die Aufrechterhaltung eines Kanal notwendige Störabstand ein sehr effizienter Hebel gegen Mitbewerber. Eine bessere Empfängertechnologie bewirkt eine bessere Dienstgüte im eigenen System auf Kosten des Mitbewerbers.

Konkurrierende RLL-/PCS-Betreiber können sinnvoll nur dann im gleichen Band existieren, wenn sich ihre PPs und Basisstationen kooperativ und fair

verhalten. Die Definition dieser Begriffe ist schwierig und eine Abgrenzung zwischen fair und unfair kaum möglich. Außerdem ist das Verhalten eines DECT-Systems durch Vorgaben über den Beacon-Kanal dynamisch steuerbar also kaum extern überwachbar.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß der konkurrierende Betrieb öffentlicher DECT-Systeme wahrscheinlich Anlaß zu Problemen geben wird, da sie am selben Ort koexistieren müssen. Dies gilt auch für den konkurrierenden Betrieb privater und öffentlicher Systeme, jedoch nur am jeweiligen Ort ihrer Überlappung.

---

## Verkehrstheoretische Analyse von DCA–Mobilfunksystemen

### 10.1 Das M/M/N Verlustsystem - Erlang-B Formel

Aus der Verkehrstheorie ist bekannt und wird bei Mobilkommunikationssystemen mit fester Kanalvergabe (z.B. GSM) genutzt, daß die Erlang-B Formel zur Berechnung der Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  angewendet werden darf, wenn viele unabhängige Verkehrsquellen (z.B. Mobilstationen PP) und eine bekannte Zahl gleichartiger, durch jede Station erreichbarer Bedienstationen (z.B. Kanäle pro RFP) vorliegen. Die Bediendauer (z.B. Verbindungsdauer der Kanäle) darf beliebig verteilt sein und wird dabei nur durch ihren Mittelwert erfaßt. Die Verbindungsanforderungen der PPs werden realitätsnah durch einen Poisson-Ankunftsprozeß mit der Rate  $\lambda$  (Rufe pro Zeiteinheit) modelliert, während die Verbindungsdauer  $\beta$  und Bedienrate einer Station  $\mu = \frac{1}{\beta}$  ist. Das Produkt aus mittlerer Verbindungsdauer und Ankunftsrate heißt Angebot  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ . Der übernommene Verkehr  $\rho_C$  ist in der Regel kleiner als  $\rho$ , weil es sich hier um ein Verlustsystem handelt, bei dem ankommende Verbindungswünsche, die keinen freien Kanal antreffen, nicht berücksichtigt werden und verlorengehen. Der übernommene Verkehr  $\rho_C$  kann auch durch das Produkt von Verbindungsdauer und Durchsatz  $\lambda_C$  (in Verbindungen pro Zeiteinheit) charakterisiert werden. Das Angebot und der übernommene Verkehr werden in der Einheit Erlang angegeben. Abbildung 10.1 zeigt das Verlustsystem als Wartemodell. Dieses System läßt sich mit einer Markoff-Kette entsprechend Abb. 10.2 modellieren [60]. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für  $k$  ( $k = 0, 1, \dots, N$ ) belegte Bedienstationen lautet:

$$p(k) = p(0) \cdot \frac{\rho^k}{k!} \quad (10.1)$$

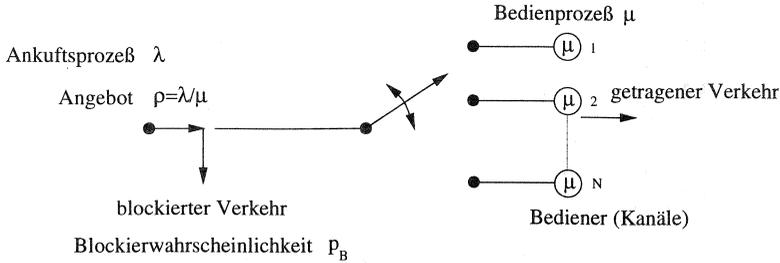


Abbildung 10.1: Verlustsystem M/M/N

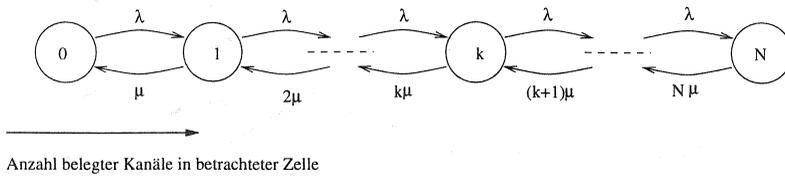


Abbildung 10.2: Markoff-Modell des Verlustsystems M/M/N

$$p_{(0)} = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \frac{\rho^i}{i!}} \tag{10.2}$$

Die Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  eines solchen Systems ist gegeben durch  $p_{(N)}$ , denn ein ankommender Ruf geht bei besetztem System verloren.

$$p_B = p_{(N)} = \frac{\frac{\rho^N}{N!}}{\sum_{i=0}^N \frac{\rho^i}{i!}} \tag{10.3}$$

Diese Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  wird bei der Beschreibung von Telekommunikationssystemen synonym auch als Blockierwahrscheinlichkeit bezeichnet.

In Abb. 10.3 ist  $p_B$  über der Zahl Kanäle  $N$  im Bündel mit dem Angebot pro Kanal  $\rho/N$  als Kurvenparameter allgemein dargestellt. Beispielsweise würde

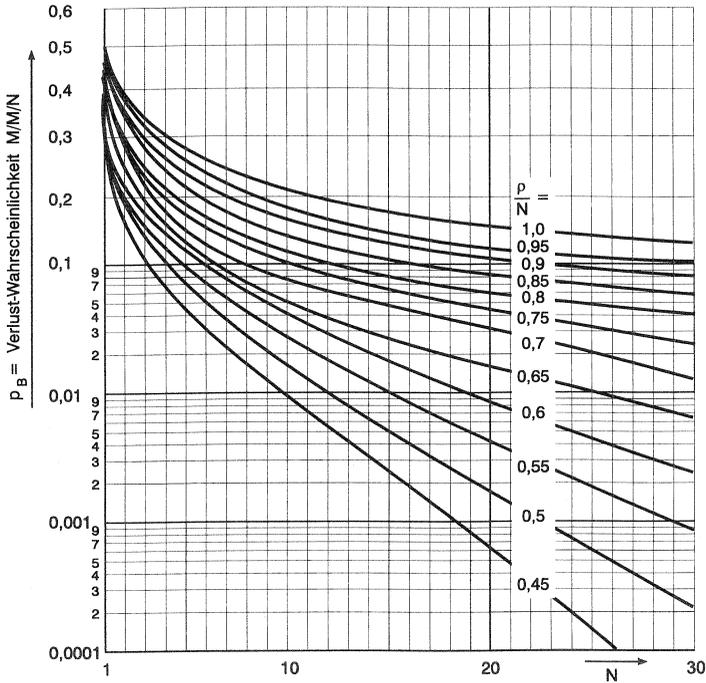


Abbildung 10.3: Blockierwahrscheinlichkeit über der Bündelstärke nach Erlang-B Formel

bei  $N = 12$  Kanälen eine Blockierwahrscheinlichkeit  $p_B = 0.01$  auftreten, wenn man jeden Kanal im Mittel etwa zu 48% auslastet.

## 10.2 Interferenz- und Kapazitätsbegrenzung

Die in dieser Arbeit festgestellten auftretenden Begrenzungen des tragbaren Verkehrs lassen sich durch zwei Mechanismen erklären, die in Abbildung 10.4 dargestellt sind. Es tritt zum einen die Begrenzung aufgrund des Fehlens freier Kanäle wegen einer ungenügenden Ausstattung der Feststationen mit Transceivern und zum anderen die Begrenzung des Verkehrs aufgrund eines zu hohen Interferenzpegels auf den 120 DECT-Kanälen auf.

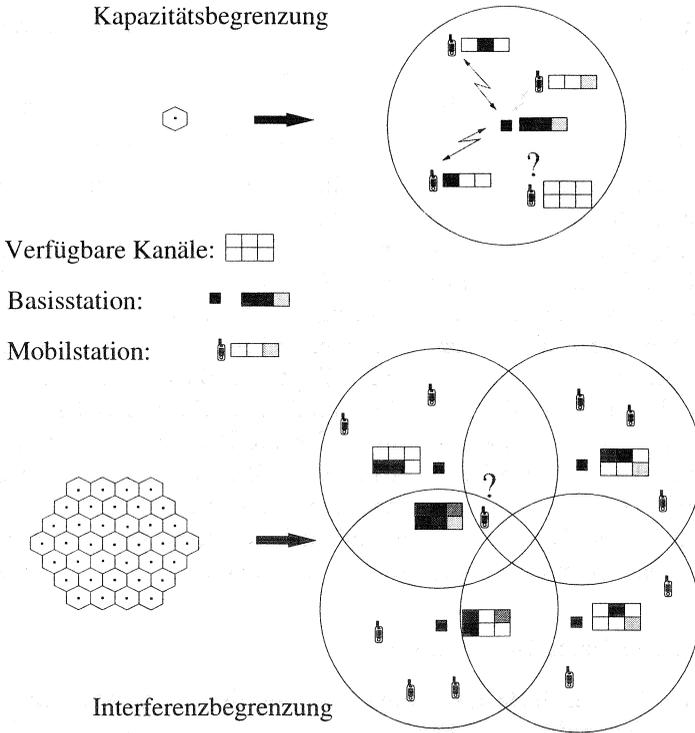


Abbildung 10.4: Situationen mit Kapazitäts- bzw. Interferenzbegrenzung

### 10.2.1 Kapazitätsbegrenzung

Eine Begrenzung des lokal tragbaren Verkehrs aufgrund einer unzureichenden Anzahl von physikalischen Kanälen, die durch die gewählte Feststation unterstützt werden, nennt man *Kapazitätsbegrenzung*. Das bedeutet, daß die Interferenzverhältnisse in einem gegebenen Szenario die Belegung eines Kanals durch eine Mobilstation erlauben würden, jedoch keine unbelegten Kanäle wegen mangelnder Ausrüstung der Feststation an Transceivern (TRX) genutzt werden können (s. Abb. 10.4 links). Von den hier beispielhaft 2x3 Kanälen kann die Feststation nur 3 gleichzeitig bedienen (1 TRX), auch wenn noch 3 Kanäle frei von Interferenzen sind.

Man kann zwischen zwei Arten von Kapazitätsbegrenzung unterscheiden :

- Kapazitätsbegrenzung bei isolierter Feststation
- Kapazitätsbegrenzung bei Feststationen mit überlappendem Versorgungsbereich, also einem flächendeckendem Zellularsystem

Bei Isolierung der Feststationen empfängt die Mobilstation keine Interferenzleistung von anderen Feststationen. Dies kann zum einen durch die Verwendung von gerichteten Antennen an den Mobilstationen (vgl. Kapitel 12.2.4) und zum anderen durch die Abschirmung der Feststation durch Gebäude o.ä. verursacht sein. Bei ideal isolierten Feststationen kann der tragbare Verkehr durch Hinzufügen von weiteren Transceivern (max. 10 TRX) vergrößert werden. In diesem Fall ist das Blockierverhalten des Systems durch die Erlang-B Formel bestimmbar (s. Kapitel 10.3).

Im Falle überlappender Zellen kann die Erlang-B Formel nicht angewendet werden, um den tragbaren Verkehr bei Kapazitätsbegrenzung zu berechnen (s. Kapitel 10.5). Auch ist die Steigerung des tragbaren Verkehrs durch zusätzliche Transceiver nur begrenzt möglich, da durch die Interferenzen der benachbarten Zellen eine obere Grenze nicht überschritten werden kann.

### 10.2.2 Interferenzbegrenzung

Das wesentliche Entscheidungsmerkmal bei der Kanalwahl im DECT-System ist der auf einem Kanal vorherrschende Störabstand. Wie aus Gl. 10.21 zu erkennen ist, ist das C/I-Verhältnis wesentlich vom Abstand des Empfängers zur eigenen Feststation sowie zu den störenden Stationen abhängig. Findet eine Übertragung zwischen Mobil- und Feststation auf einem bestimmten Kanal statt, so ist dieser erst wieder in einer durch den geforderte Störabstand beschriebenen Entfernung, dem Wiederverwendungsabstand, nutzbar, wenn die bestehende Verbindung nicht gestört werden soll. Für alle Fest- und Mobilstationen, die innerhalb dieses Wiederverwendungsabstandes liegen, gilt, daß deren benutzte Kanäle am betrachteten Ort gesperrt sind. Dadurch vermindert sich die Anzahl der lokal zur Verfügung stehenden freien Kanäle. Sind die Feststationen genügend gut ausgestattet, so kommt es zu Blockierungen, wenn am Ort der Mobilstation (oder der Feststation) alle 120 Kanäle durch Interferenzleistung von anderen Verbindungen so stark gestört werden, daß kein Kanal den notwendigen Störabstand für einen Verbindungsaufbau zur eigenen Feststation aufweist (s. Abb. 10.4). Das System gilt dann als interferenzbegrenzt. Ab

einer bestimmten Anzahl von Transceivern, also bei genügend hohen installierten Kapazitäten, läßt sich der tragbare Verkehr also nicht mehr durch Hinzufügen von zusätzlichen Transceivern vergrößern, da alle Kanäle des Systems lokal benutzt oder zu stark gestört sind. Wie später noch gezeigt wird, ist dieser Übergang von Kapazitätsbegrenzung zu Interferenzbegrenzung in flächendeckenden DECT-Systemen mit überlappenden Zellen fließend und örtlich stark differenziert. Die Beschreibung dieses Mechanismus wird in Kapitel 10.6 vorgenommen.

### 10.3 Kapazitätsbegrenzung einer isolierten Feststation

Durch die Isolierung der Feststation, sei es durch Bebauung oder durch den Einsatz gerichteter Antennen z.B. an der Teilnehmeranschlußbox, ist das Systemverhalten einfach zu bestimmen, da die zur Verfügung stehende Zahl  $N$  an Kanälen durch die Zahl  $n$  der Transceiver bekannt ( $N = nx12$ ) ist. Die Erlang-B Formel liefert eine exakte Schätzung des tragbaren Verkehrs. Abbildung 10.5 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit entsprechend für 1, 2, 3, 4 bzw. 10 Transceiver<sup>1</sup> an einer (isolierten) RFP und Tabelle 10.3 den tragbaren Verkehr bei einer Blockierwahrscheinlichkeit von 1%. Man sieht, daß mit steigender Bündelstärke (Anzahl Kanäle) der Prozentsatz belegbarer Kanäle steigt. Man nennt das Bündelgewinn.

Anzahl Transceiver	verfügbare Kanäle (= Bündelstärke)	tragbarer Verkehr bei 1% $p_B$	Prozentsatz nutzbarer Kanäle
1	12	5.9	0.491
2	24	15.3	0.638
3	36	25.5	0.708
4	48	36.1	0.767
10	120	103	0.858

Die Relevanz dieser Ergebnisse ist dadurch gegeben, daß eine der wichtigsten Konfiguration realer DECT-Netze gerichtete Antennen am Teilnehmeranschluß aufweist, die zur Isolierung führen. Die analytischen Ergebnisse

<sup>1</sup>Lt. DECT Standard sind maximal 3 Transceiver an einer Antennenposition erlaubt, so daß diese Berechnung für 4 und 10 Transceiver nur Modellcharakter hat.

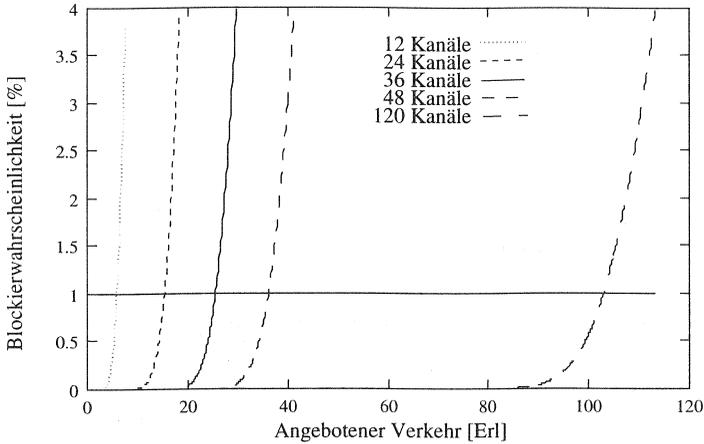


Abbildung 10.5: Blockierwahrscheinlichkeit bei 12, 24, 36, 48 und 120 Kanälen nach Erlang-B Formel

ermöglichen eine genaue Beschreibung dieser Konfiguration, wie der Vergleich von analytisch und simulativ bestimmten Ergebnissen in Kap. 12.2.4 (s. Abb. 12.15) zeigt.

Kommt es zur Überlappung benachbarter Zellen, so kann der tragbare Verkehr nicht durch die Erlang-B Formel bestimmt werden, da Mobilstationen bei voller Auslastung ihrer RFP auch zu einer anderen Feststation ausweichen können. Dies führt zu einer größeren wirksamen Bündelstärke pro Feststation (vgl. Kapitel 12.2.1). In Kapitel 10.5 wird ein Modell zur Beschreibung dieser Situation hergeleitet.

#### 10.4 Kapazitätsbegrenzung einer isolierten Feststation bei gemischtem und mehrkanaligem Verkehr

Neben Sprachverbindungen über einen Kanal werden im DECT-Standard auch Verbindungen unterstützt, die mehrere Kanäle belegen. So wurde in dieser Arbeit auch gemischter Verkehr mit anteiligem ISDN-Verkehr untersucht, der mehrere DECT Kanäle benötigt. Ähnlich wie in Abschnitt 10.2.1 kann auch hier eine Formel zur Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit isolierter RFPs bei gegebenem Verkehr hergeleitet werden. Abbildung 10.6

zeigt das zu Abb. 10.1 äquivalente Verlustsystem. Es existieren nun zwei ankommende Verkehrsströme mit unterschiedlichen Ankunftsraten  $\lambda_i$  und Bedienraten  $\mu_i$ .

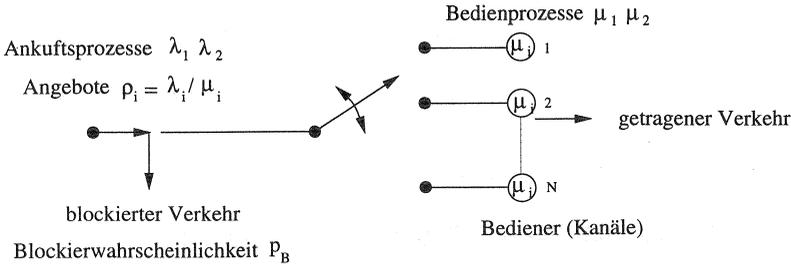


Abbildung 10.6: Verlustsystem für gemischten Verkehr

Ausgegangen wird von der Annahme, daß eine Sprachverbindung einen und eine Datenverbindung  $m$  Kanäle belegt. Das Zustandsdiagramm der entsprechenden 2-dimensionalen Markoff-Kette für ein Bündel mit  $N$  Kanälen ist in Abb. 10.7 dargestellt. Die einzelnen Zustände sind durch zweidimensionale Zustandsvariablen  $(j,i)$  charakterisiert und erfüllen die Bedingung

$$i + (m \cdot j) \leq N \tag{10.4}$$

wobei  $i$  die Anzahl der Sprachkanäle und  $j$  die Anzahl der mehrkanaligen Verbindungen darstellt. Die Ankunftsraten der Sprach- und Datenverbindungen seien  $\lambda_1$  bzw.  $\lambda_2$ . Die mittleren Verbindungsdauern betragen  $\beta_1 = 1/\mu_1$  und  $\beta_2 = 1/\mu_2$ . Sprachverbindungen gelten erst dann als blockiert, wenn alle Kanäle belegt sind. Datenverbindungen werden abgewiesen, wenn weniger als  $m$  freie Kanäle zur Verfügung stehen.

Für die Wahrscheinlichkeit, daß  $i$  Sprachverbindungen und  $j$  Mehrkanal-Datenverbindungen bestehen, ergibt sich nach [3]:

$$P_{ij} = \frac{\rho_1^i \rho_2^j}{i! j!} \quad \text{mit} \quad \rho_k = \frac{\lambda \rho_k}{\mu_k} \quad \text{für } k = 1, 2 \tag{10.5}$$

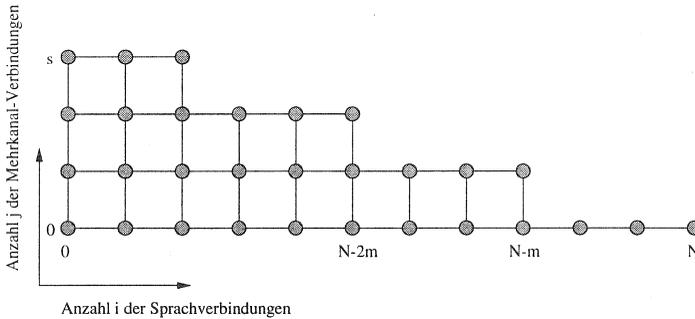


Abbildung 10.7: Zustandsdiagramm mit mehrkanaligem Verkehr

Mit der Normalisierungsbedingung folgt

$$P_{00} = \left( \sum_{j=0}^s \sum_{i=0}^{N-mj} \frac{\rho_1^i \rho_2^j}{i!j!} \right)^{-1} \quad (10.6)$$

Um die Blockierwahrscheinlichkeit eines Systems mit mehrkanaligem Datenverkehr zu bestimmen, müssen zuerst die Blockierwahrscheinlichkeiten für Sprach- ( $p_{B_1}$ ) und Mehrkanalverbindungen ( $p_{B_s}$ ) separat ermittelt werden. Daraus folgt durch entsprechende Wichtung die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit.

$$p_{B_1} = \sum_{j=0}^s P_{N-mj,j} = P_{00} \sum_{j=0}^s \frac{\rho_1^{N-mj}}{(N-mj)!} \frac{\rho_2^j}{j!} \quad (10.7)$$

$$p_{B_2} = \sum_{i=0}^k P_{is} + \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=N-mj-m+1}^{N-mj} P_{ij} \quad (10.8)$$

$$= P_{00} \left( \frac{\rho_2^s}{s!} \sum_{i=0}^k \frac{\rho_1^i}{i!} + \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=N-mj-m+1}^{N-mj} \frac{\rho_1^i \rho_2^j}{i!j!} \right) \quad (10.9)$$

hierbei gilt  $k = N - ms$ .

Die gesamte äquivalente Last  $A$  und die durchschnittliche Blockierwahrscheinlichkeit  $p_B$  sind gegeben durch

$$A = \rho_1 + m\rho_2 \qquad p_B = \frac{\rho_1 \cdot p_{B1} + m\rho_2 \cdot p_{B2}}{A} \quad (10.10)$$

Dieses Ergebnis kann nun zur Vorhersage des Systemverhaltens z.B. bei anteiligem ISDN-Verkehr benutzt werden. Angenommen wird dabei, daß im Mittel für eine ISDN-Verbindung 3 DECT Duplex-Bearer verwendet werden. In Abb. 10.8 ist dieses Ergebnis für ein DECT-System mit einem Transceiver an der isolierten Basisstation für verschiedene Verkehrslasten dargestellt. Dieses verkehrstheoretisch hergeleitete Ergebnis wurde durch

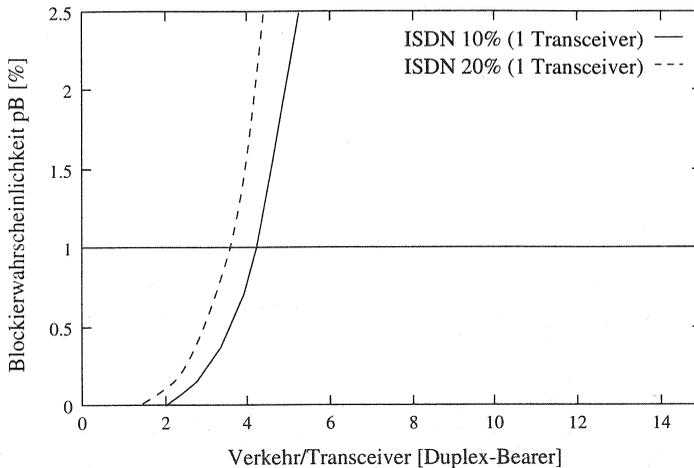


Abbildung 10.8: Grade of Service für 10 % und 20 % Anteil des ISDN-Verkehr am Gesamtverkehr

Simulation überprüft. Die Ergebnisse für reale Systeme mit Isolierung durch gerichtete Antennen am Teilnehmeranschluß (s. Kapitel 12.2.5) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (s. Abb. 12.18). Es ist also möglich das Verhalten isolierter DECT-Basisstationen bei verschiedenen Belastungen (rein einkanaliger und gemischter Verkehr) analytisch vorherzusagen.

### 10.5 Kapazitätsbegrenzung bei überlappenden Zellen

Wie in Kapitel 10.2.1 gezeigt, ist die Bestimmung der Blockierwahrscheinlichkeit durch Kapazitätsbegrenzung bei einer isoliert stehenden RFP mit der Erlang-B Formel durchführbar. Überlappen sich  $n$  benachbarte Zellen, so kann für diese Berechnung eine  $n$ -dimensionale Markoff-Kette mit  $n$ -dimensionalen Zuständen  $Q[i,j,k,..]$  mit  $i,j,k,..=0,1,..,N$  benutzt werden. Die Zahl belegter Kanäle jeder Zelle entspricht der Zustandsvariablen einer Dimension. Abbildung 10.9 zeigt die entsprechende Markoff-Kette für  $n=2$  benachbarte Zellen (s. auch Abb. 10.10). Der Zustand  $Q[i,j]$  entspricht der

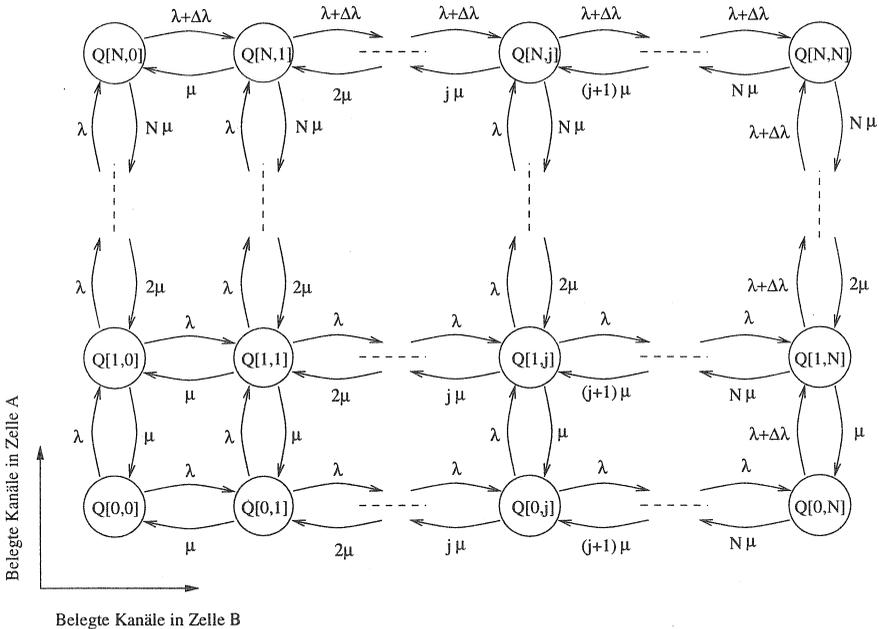


Abbildung 10.9: Markoff-Kette für 2 überlappende Zellen A und B

Belegung von  $i$  Kanälen in Zelle A und  $j$  Kanälen in Zelle B. Entsprechend der Modellierung der Markoff-Kette in Kapitel 10 sind die Übergangsintensitäten bei nicht vollausgelasteten Zellen durch die Sterberate  $\mu_a = \mu_b = \mu$

(es wurden zur Vereinfachung identische Intensitäten in beiden Zellen angenommen) und die Rate der ankommenden Rufe  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda$  in den Zellen gegeben. Sind die Kanäle einer Zelle besetzt, so können die Rufe aus dem Überlappungsbereich der Zellen von der Nachbarzelle übernommen werden. Bei der vollen Belegung einer Zelle  $((i = N) \wedge (j < N))$  oder  $((j = N) \wedge (i < N))$  erhöht sich die Rate ankommender Rufe in der freien Zellen somit um die Rufe der blockierenden Zelle aus dem Überlappungsbereich der Zellen  $\Delta\lambda$ . Rufe, die nur von der besetzten Zelle übernommen werden können, da die PPs nicht im Überlappungsbereich positioniert sind, gelten als blockiert. Sind die Kanäle in allen Zellen besetzt, so kann kein neuer Ruf angenommen werden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 10.10 skizziert.

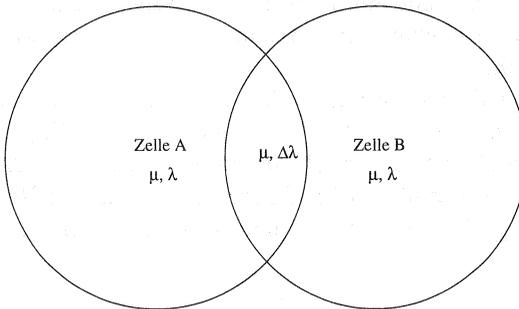


Abbildung 10.10: Intensitäten in 2 überlappende Zellen A und B

Eine Markoff-Kette dieser Form läßt sich allgemein durch folgende Gleichung beschreiben [58]

$$0 = \sum_{ij'} p_i q_{ij} - p_j q_j \quad (10.11)$$

wobei  $p_i$  die Wahrscheinlichkeit des Zustandes  $i$  darstellt,  $q_{ij}$  die Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand  $i$  nach  $j$  und  $q_j$  die Änderungswahrscheinlichkeit des Zustandes  $j$ .

Angewendet auf das hier dargestellte Problem ergibt sich ein Gleichungssystem mit  $N^2$  Unbekannten entsprechend

$$0 = \mu \cdot p_{Q[0,1]} + \mu \cdot p_{Q[1,0]} - 2 \cdot \lambda \cdot p_{Q[0,0]} \quad (10.12)$$

$$\begin{aligned}
0 &= 2 \cdot \mu \cdot p_{Q[0,2]} + \mu \cdot p_{Q[1,2]} + \lambda \cdot p_{Q[0,0]} - (2 \cdot \lambda + \mu) \cdot p_{Q[0,1]} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
0 &= (\lambda + \Delta\lambda) \cdot p_{Q[N,N-1]} + (\lambda + \Delta\lambda) \cdot p_{Q[N-,N]} - 2 \cdot N \cdot \mu \cdot p_{Q[N,N]}
\end{aligned}$$

Dieses Gleichungssystem ist linear abhängig und kann durch die Vollständigkeitsbedingung

$$\sum_i p_i = 1 \quad (10.13)$$

gelöst werden. Damit sind die Zustandswahrscheinlichkeiten der Zustände  $Q[i, j]$  bekannt und können zur Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit verwendet werden.

Eine Blockierung dieses Systems tritt dann ein, wenn in einer Zelle alle Kanäle besetzt sind ( $Q[i = N, j < N]$  oder  $Q[i < N, j = N]$ ), ein Ruf in dem nicht überlappten Bereich der besetzten Zelle eintrifft oder wenn alle  $2N$  Kanäle beider Zellen beim Eintreffen eines neuen Rufes besetzt sind ( $Q[i = N, j = N]$ ). Für die Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit relevant sind also

$$p_{Block}(i = N, j < N) = \sum_{j=0}^N P[i = N, j < N] \cdot p(\text{Ruf in A}) \quad (10.14)$$

$$p_{Block}(i < N, j = N) = \sum_{i=0}^N P[i < N, j = N] \cdot p(\text{Ruf in B}) \quad (10.15)$$

$$p_{Block}(i = N, j = N) = P[i = N, j = N] \cdot p(\text{Ruf in A/B}) \quad (10.16)$$

Die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Rufes in dem exklusiven Bereich einer RFP  $p(\text{Ruf in A})$  bzw.  $p(\text{Ruf in B})$  sind

$$p(\text{Ruf in A}) = \frac{\lambda - \Delta\lambda}{\lambda} \quad (10.17)$$

und für einen Ruf im Gesamtsystem  $p(\text{Ruf in A oder B})$

$$p(\text{Ruf in A oder B}) = \frac{2 \cdot \lambda}{\lambda} = 2 \quad (10.18)$$

Die gesamte Blockierwahrscheinlichkeit beider Zellen ist

$$p_{ges} = p_{Block}(i = N, j < N) + p_{Block}(i < N, j = N) + p_{Block}(i = N, j = N) \tag{10.19}$$

Die Blockierwahrscheinlichkeit  $p_B$  einer Zelle ist

$$p_B = \frac{p_{ges}}{2} \tag{10.20}$$

Abbildung 10.11 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit über dem Verkehr für verschiedene Zellüberlappungen (0%, 1/6%, 1/3%, 100%), was einem  $\Delta\lambda$  von 0,  $\lambda/6$ ,  $\lambda/3$  und  $\lambda$  entspricht. Die Ergebnisse zeigen die bei Kapazitäts-

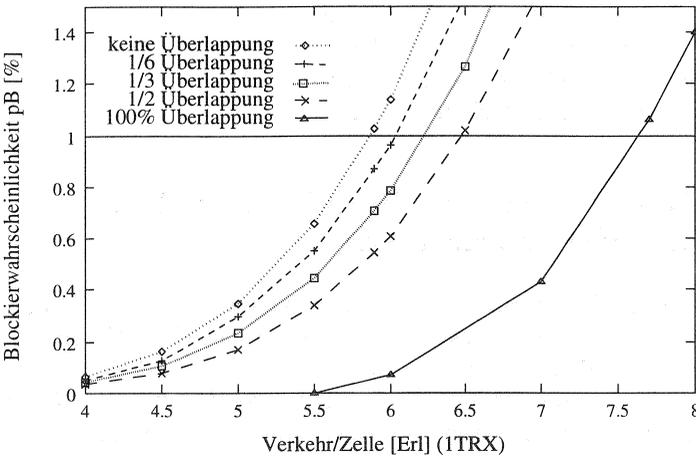


Abbildung 10.11: Blockierwahrscheinlichkeit zweier benachbarter Zellen bei Kapazitätsbegrenzung (je 1 TRX)

begrenzung durch überlappende Zellen erreichbare Steigerung des tragbaren Verkehrs. Schon bei geringer Überlappung erhöht sich der tragbare Verkehr um 10%. Bei 100% Überlappung ergibt sich exakt das Verhalten einer RFP mit 2 Transceivern (24 Kanäle). Der tragbare Verkehr bei 1% Blockierwahrscheinlichkeit ist dann 15.3 Erlang (s. Tabelle 10.3). Es zeigt sich bei der Analyse der simulativ bestimmten tragbaren Verkehre bei flächendeckenden DECT-Systemen in Kapitel 12.2.1, daß die Kapazitätsbegrenzung bei einem

Transceiver/RFP durch die Überlappung der Zellen tatsächlich bei höheren Verkehrswerten als für 12 Kanäle (5.8 Erl/RFP) eintritt (7.3 Erl/RFP, s. Tab. 12.4). Das dort verwendete Szenario weist eine Überlappung der Zellen von 95% auf. Berechnet man den tragbaren Verkehr durch das hier entwickelte analytische Modell, so erhält man einen Verkehrswert von 7.56 Erl/RFP. Mit diesem analytischen Modell läßt sich demnach die erreichbare Verbesserung durch Überlappungen exakt voraussagen.

Im Gegensatz zu isoliert zu betrachtenden Zellen wird bei Überlappungen der Zellen bei Hinzufügen von Transceivern der tragbare Verkehr nur bis zum Einsetzen der Interferenzbegrenzung gesteigert. Durch die dynamische Kanalvergabe im DECT-System kann die Erlang-B Formel im Gegensatz zu FCA-Systemen also nicht für die Vorhersage des tragbaren Verkehrs bei gegebener Blockierwahrscheinlichkeit an einer RFP angewandt werden. Im Abschnitt 10.6 wird deshalb ein Berechnungsansatz zur allgemeinen Beschreibung vorgestellt, der der Dynamik des Übergangs von Kapazitäts- zu Interferenzbegrenzung Rechnung trägt.

## 10.6 Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit bei Interferenzbegrenzung

Anders als im FCA-System erfolgt die Kanalwahl und der Handover im DECT-System dezentral, gesteuert von beiden an einer Verbindung beteiligten Partnern, dem PP und dem RFP. Eine neue Verbindung kommt zustande, wenn einer der 120 DECT Kanäle für den Empfang am PP und RFP einen akzeptablen Störabstand aufweist. Durch existierende Verbindungen in der Umgebung stehen Kanäle nicht zur Verfügung, wenn die Orte der PPs bzw. RFPs existierender Verbindungen näher liegen als der *Interferenzradius*, welcher durch den notwendigen Störabstand und den Pfadverlustfaktor gegeben ist.

Um zu entscheiden, ob für einen neuen Ruf einer Mobilstation alle 120 Kanäle lokal besetzt sind, kann die Erlang-B Formel verwendet werden. Der Belastung des Bündels (120 Kanäle) entspricht der in der *Interferenzfläche* entstehende *Interferenzverkehr*. Die Wahrscheinlichkeit der Blockierung ist identisch mit der Wahrscheinlichkeit des besetzten Bündels, wenn ein neuer Ruf am betrachteten Ort auftritt.

Die Abbildung 10.12 zeigt deutlich, wie örtlich unterschiedlich die Blockierungen auftreten. In diesem Beispiel einer durchgeführten Simulation tritt

nur an der inneren Feststation Interferenzbegrenzung auf, und zwar nur am Rand der Zelle, da dort der Abstand der PPs zur eigenen Feststation am größten und die Zahl der relevanten Störer am höchsten ist.

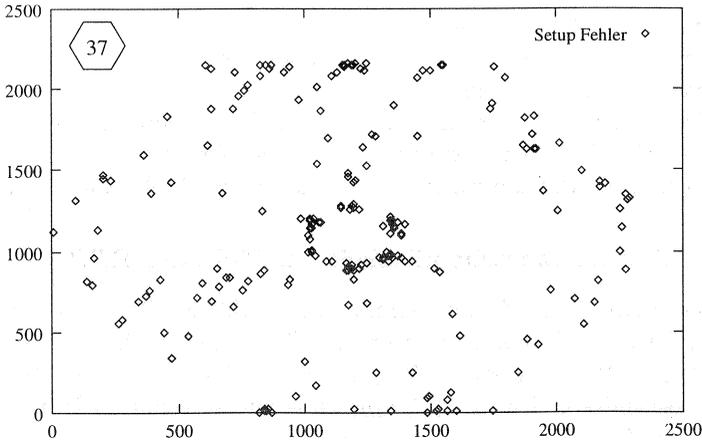


Abbildung 10.12: Setup-Fehler bei ETSI-Pfadverlustmodell

Das hier entwickelte analytische Modell greift genau diese Beobachtung auf und beschreibt die Vorgänge der Blockierung einer Zelle.

Da die Orte neuer Rufe gleichverteilt in der Fläche angenommen werden können, müssen die Blockierwahrscheinlichkeiten für alle Orte einer Zelle aufsummiert werden, um die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit zu berechnen.

Aus der Sicht einer bestimmten RFP wird der relevante Interferenzverkehr nicht nur durch in der Zelle aktive PPs, sondern auch durch PPs in Nachbarzellen erzeugt. Je nach Abstand zum eigenen zu bedienenden PP ergibt sich aus Störabstand  $C/I$  und Pfadverlustfaktor  $\gamma$  ein Interferenzkreis um das RFP, dessen Fläche das relevante Angebot des Interferenzverkehrs bestimmt. Die Blockierwahrscheinlichkeit, berechnet mit der Erlang-B Formel für den so bestimmten relevanten Interferenz-Verkehr und 120 Kanäle, ist eine Funktion des Abstandes  $r$  der eigenen PPs vom RFP. Wird diese Funktion mit der Wahrscheinlichkeit des PP-Abstandes gewichtet, so erhält man

die Wahrscheinlichkeitsdichte der Blockierung über dem Abstand der PPs aus Sicht der RFP.

In ähnlicher Weise kann aus Sicht der PPs einer Zelle der relevante Interferenzverkehr aus der Zahl der RFPs im relevanten Interferenzradius ermittelt und daraus die Blockierwahrscheinlichkeit der PPs bestimmt werden. Beide Wahrscheinlichkeiten zusammen liefern die Gesamtblockierwahrscheinlichkeit, mit der eine allgemeine Berechnung des tragbaren Verkehrs eines DECT-Systems erfolgen kann.

Dazu wird in den folgenden Abschnitten aus hier schon angedeuteten geometrischen Überlegungen der pro Ort jeweils relevante Interferenzverkehr bestimmt und die Blockierwahrscheinlichkeit eines DCA-Systems ermittelt.

### 10.6.1 Blockierwahrscheinlichkeit aus Sicht der RFPs

Formuliert man diesen Zusammenhang aus Sicht der RFPs, so ergibt sich Gl. 10.23 für den relevanten Interferenzradius  $R_{Int}$  um ein RFP, wenn sich das sendende PP im Abstand  $R_{Sender} = r$  befindet, aus der Berechnung des Störabstandes C/I in dB ( $C/I_{dB}$ ) zu einem störenden PP im Abstand  $R_{Störer}$  nach Gl. 10.21.

$$\begin{aligned}
 C/I_{dB} &= P_{E_{Sender}} - P_{E_{Störer}} \\
 &= P_S - L_{Path-Sender} - (P_S - L_{Path-Störer}) \\
 &= L_{Path-Störer} - L_{Path-Sender} \\
 &= Loss \cdot \log_{10}\left(\frac{R_{Störer}}{R_{Sender}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{10.21}$$

$$\tag{10.22}$$

mit

$P_{E_{Sender}}$  : Empfangsleistung vom betrachteten Sender

$P_{E_{Störer}}$  : Empfangsleistung vom betrachteten Störer

$P_S$  : Sendeleistung von Sender und Störer (gleich groß angenommen)

$L_{Path-Sender}$  : Pfadverlust zwischen Sender und Empfänger

$L_{Path-Störer}$  : Pfadverlust zwischen Störer und Empfänger

$R_{Sender}$  : Entfernung zum Sender

$R_{Störer}$  : Entfernung zum Störer

$Loss = 10 \cdot \gamma$  : mit dem Verlustfaktor der Funkausbreitung  $\gamma$

Der relevante Interferenzradius entspricht dem Abstand zum Störer in dieser Gleichung.

$$\Rightarrow R_{Int}(r) = r \cdot 10^{\frac{C/I_{dB}}{Loss}} \quad (10.23)$$

Aus diesem Abstand kann man die relevante Fläche  $F_{rel}$  für eine kreisförmige Zelle bestimmen durch

$$F_{rel}(r) = \pi \cdot R_{Int}^2 = \pi \cdot (r \cdot 10^{\frac{C/I_{dB}}{Loss}})^2 \quad (10.24)$$

Legt man eine bekannte Verkehrslast pro RFP  $V_{RFP}$  und den Zellradius  $R_{Zelle}$  oder den Verkehr pro Flächeneinheit  $V_{km^2}$  zugrunde, so kann man den Verkehr dieser relevanten Fläche angeben.

$$V_{rel}(r) = F_{rel}(r) \cdot V_{km^2} \quad (10.25)$$

$$\text{oder} \quad (10.26)$$

$$V_{rel}(r) = F_{rel} \frac{V_{RFP}}{\frac{3}{2}\sqrt{3}R_{Zelle}^2}$$

Eingesetzt in die Erlang-B Formel (Gl. 10.3) für  $N=120$  Kanäle, ergibt sich eine vom PP Abstand  $r$  abhängige Blockierwahrscheinlichkeit der RFP.

$$p_{RFP-Block}(r) = ErlangB_{120}(V_{rel}(r)) = \frac{\frac{V_{rel}^{120}}{120!}}{\sum_{i=0}^{120} \frac{V_{rel}^i}{i!}} \quad (10.27)$$

Die Verteilungsdichtefunktion  $p(r)$  des Abstandes  $r$  der PP in einer Zelle mit dem Radius  $R$  ist durch einen einfachen linearen Zusammenhang gegeben,

$$p(r) = \frac{2}{R^2} \cdot r \quad (10.28)$$

wobei sich die Skalierung durch die Bedingung in Gl. 10.29 ergibt.

$$\int_0^R p(r) dr = 1 \quad (10.29)$$

Die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit der Zelle aus Sicht der RFP läßt sich nun angeben durch

$$\overline{p_{RFP-Block}} = \int_0^R p_{RFP-Block}(r) \cdot p(r) dr \quad (10.30)$$

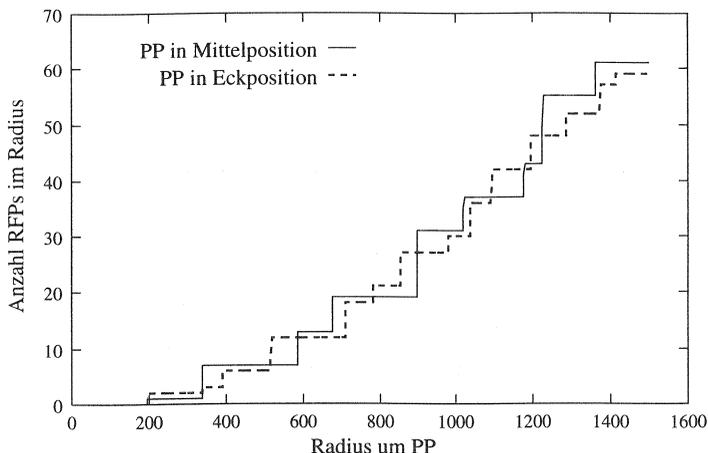


Abbildung 10.13: Anzahl von RFPs um PP

Gleichung 10.30 gilt nur für kreisrunde Zellen. Ein flächendeckendes DECT-System weist eine hexagonale Struktur auf. Zur Bestimmung von  $\overline{p_{RFP-Block}}$  muß nach dem gleichen Verfahren für alle PP-Positionen der Zelle die Blockierwahrscheinlichkeit  $p_{RFP-Block}$  bestimmt und gemittelt werden.

### 10.6.2 Blockierwahrscheinlichkeit aus Sicht der PPs

In gleicher Weise läßt sich auch aus Sicht der PPs einer Zelle die Blockierwahrscheinlichkeit angeben. Für ein PP am Ort  $(x,y)$  im Abstand  $r(x,y)$  zur eigenen RFP ist der Verkehr zur Bestimmung der Blockierwahrscheinlichkeit anzusetzen, der von allen RFPs im relevanten Interferenzradius  $R_{int}(r)$  um den PP getragen wird. Im Gegensatz zur Betrachtung einer RFP ist die räumliche Verteilung der RFPs um ein PP nicht gleichmäßig und hängt stark vom Ort innerhalb der Zelle ab. Abbildung 10.13 zeigt die berechnete Zahl von RFPs um ein PP, welches sich in der Mitte des hexagonalen Szenarios nach Abb. 12.3 bzw. an der Ecke des mittleren Hexagon befindet. Dadurch ergibt sich je nach Ort des PPs ein anderes Blockierverhalten, auch wenn der Abstand zur eigenen RFP gleich ist. Die Abhängigkeit der Zahl RFPs ( $NoRFP(x,y,r)$ ) im Radius  $R_{int}$  um ein PP läßt sich nicht

geschlossen ausdrücken. Deren Bestimmung und damit die Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit muß demnach explizit für das verwendete Szenario erfolgen (z.B. das o.g. hexagonale Szenario). Dadurch kann im grunde jedes Szenario konkret beschrieben werden. Entsprechend dem oben entwickelten Algorithmus wird für alle PP-Positionen einer Zelle der relevante Interferenzradius aus dem Abstand  $r$  zur RFP, dem Pfadverlustfaktor  $\gamma$  und dem notwendigen C/I bestimmt, s. Gl. 10.23 bzw. 10.34. Der relevante Verkehr zur Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit für ein PP an diesem Ort ist der mittlere Verkehr pro RFP, multipliziert mit der Zahl an RFPs ( $NoRFP(x, y, r)$ ) im Interferenzradius.  $NoRFP(x, y, r)$  wird durch Abzählen der RFPs bestimmt.

$$V_{rel}(x, y, r) = NoRFP(x, y, r) \cdot V_{RFP} \quad (10.31)$$

Bestimmt man die Blockierwahrscheinlichkeit

$$p_{PP-Block}(x, y, r) = ErlangB_{120}(V_{rel}(x, y, r)) = \frac{V_{rel}^{120}}{120!} \sum_{i=0}^{120} \frac{V_{rel}^i}{i!} \quad (10.32)$$

für jeden Ort  $(x, y)$  der Zelle, so ergibt die Mittelwertbildung die mittlere Blockierwahrscheinlichkeit  $\overline{p_{PP-Block}}$  in einer Zelle aus Sicht der PP.

Zur Bestimmung der mittleren Gesamblockierwahrscheinlichkeit  $\overline{p_{Block}}$  in einer Zelle muß für jeden Ort einer Zelle die Blockierwahrscheinlichkeit aus Sicht des PPs (Gl. 10.32) und aus Sicht des RFPs für ein PP an dieser Stelle nach Gl. 10.27 addiert werden (da ein Duplexkanal<sup>2</sup> erforderlich ist) und über alle Werte der Zelle gemittelt werden, da alle Positionen der Zelle gleichwahrscheinlich sind.

### 10.6.3 Berücksichtigung von Kanalwiederverwendung

Komplizierter wird die oben durchgeführte Betrachtung der Blockierwahrscheinlichkeit bei Berücksichtigung von  $K_i$  (gleichzeitigen) Störern im Abstand  $R_{Störer}$ . Es muß deren Interferenzleistung für den Störabstand in mW ( $C/I_{mW}$ ) aufsummiert werden, bevor das Dezibelmaß für den Störabstand

<sup>2</sup>Exakt gilt diese Betrachtung nur bei freier Kanalwahl der Duplexkanäle.

notwendiges C/I	$\gamma = 3.5$	$\gamma = 2.0$
11 dB	410 m	1038 m
15 dB	534 m	1645 m
21 dB	793 m	3282 m
31 dB	1434 m	10381 m

Tabelle 10.1: Mittlerer Interferenzradius einer hexagonalen Zelle mit  $R = 196m$ 

$(C/I_{dB})$  bestimmt wird.

$$C/I[mW] = \frac{C}{K_i} = \frac{x^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_i} I_k} = \frac{x^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_i} R_{Störer}^{-\gamma}} \quad (10.33)$$

$$\Rightarrow R_{Int}(r) = R_{Störer} = r \cdot \sqrt[\gamma]{K_i} \cdot 10^{\frac{C/I_{dB}}{10\gamma}} \quad (10.34)$$

Die Berücksichtigung gleichzeitiger Störer bedeuten aber nicht nur eine erhöhte Interferenzleistung und damit einen größeren relevanten Interferenzbereich. Die Berücksichtigung der gleichzeitigen Nutzung eines Kanals von mehreren PPs im Interferenzbereich (Kanalwiederverwendung) im hier entwickelten Modell bedeutet auch eine Verringerung des relevanten Interferenzverkehrs. Der aus der Fläche  $F_{Rel}(r)$  nach Gleichung 10.24 bzw. aus  $NoRFP(x,y,r)$  jeweils berechnete Verkehr  $V_{Rel}$  verringert sich um das Maß der Kanalwiederverwertung ( $WV(r)$  s.u.).

Betrachtet man ein System, in dem sich für alle Kanäle entsprechend den jeweiligen Abständen von RFPs zu PPs ein "stationärer" Zustand einstellt, so existieren jeweils 6 Störer im gleichen Abstand  $R_{int}(r)$  um ein RFP. Der mittlere Interferenzradius  $\overline{R_{Int}}$  bei 6 Störern wird durch Einsetzen des mittleren PP-Abstandes  $\bar{r}$  in Gl. 10.34 mit 6 Störern bestimmt. Für eine hexagonale Zelle mit einem "Innenradius" von 170 m (Außenradius 196.3m), wie in dieser Arbeit häufig verwendet, ist  $\bar{r} = 119.5m$ . Die sich aus dieser Berechnung ergebenden  $\overline{R_{Int}}$  sind in Abb. 10.14 und in Tabelle 10.1 über dem notwendigen C/I aufgetragen.

Als Wiederverwendungsquotient  $WQ(r)$  zur Verringerung des relevanten Verkehrs an einer Position der Zelle mit dem Abstand  $r$  zwischen PP und

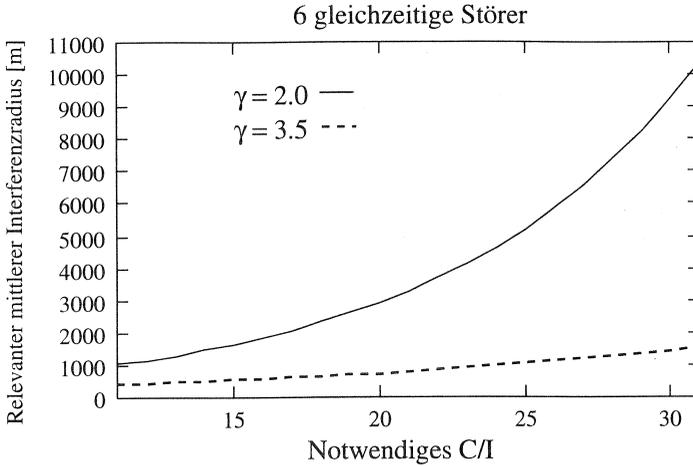


Abbildung 10.14: Mittlerer Interferenzradius einer hexagonalen Zelle mit  $R = 196m$

RFP wird das Verhältnis aus der Kreisfläche mit  $R_{Int}(r)$  und  $\overline{R_{Int}}$  gebildet.

$$WQ(r) = \left( \frac{R_{Int}(r)}{\overline{R_{Int}}} \right)^2 \tag{10.35}$$

Im Mittel passen  $WQ(r)$  runde Zellen mit  $\overline{R_{Int}}$  in den Kreis mit dem Radius  $R_{Int}(r)$ . Der relevante Verkehr  $V_{Rel}(r)$  (Gl. 10.25) bzw.  $V_{Rel}(x, y, r)$  (Gl. 10.31) wird zur Berücksichtigung der Kanalwiederverwertung durch  $WQ(r)$  geteilt (Gl. 10.36).

$$V_{rel} = \frac{V_{rel}}{WQ} \tag{10.36}$$

Damit ist die Berechnung der mittleren Blockierwahrscheinlichkeit aus der gemittelten Summe aus  $p_{PP-Block}(x, y, r)$  und  $p_{RFP-Block}(r)$  unter Berücksichtigung der Verkehrsverringerng möglich.

Um diese Modellierung der Blockierwahrscheinlichkeit einer Zelle anschaulicher zu machen, sind in den Abbildungen 10.15 bis 10.19 die Blockierwahrscheinlichkeiten in einer Zelle aufgezeichnet. Es handelt sich hierbei

um die mittlere Zelle des Szenarios mit 61 Zellen bei 11 dB notwendigem C/I,  $\gamma = 3.5$ , 6 gleichzeitigen Störern und einer Last von 17 Erl/RFP. Die Abbildungen 10.15 und 10.16 zeigen die räumliche Verteilung der Blockierwahrscheinlichkeiten in einer Zelle (jeweils aus Sicht der RFP bzw. der PP wenn  $P_{Block}$  für jeden Ort berechnet wird) ohne Reduzierung des relevanten Verkehrs durch Kanalwiederverwendung. Deutlich ist die sehr hohe Blockierwahrscheinlichkeit an den Zellrändern zu erkennen. In den Ecken wird bis zu 75% Blockierwahrscheinlichkeit erreicht. Die Abbildun-

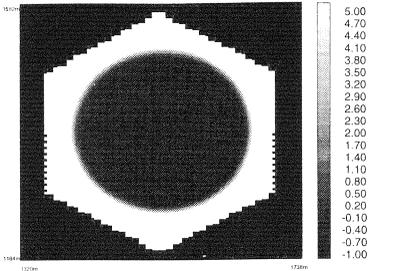


Abbildung 10.15: RFP-Blockierwahrscheinlichkeit (%) ohne Berücksichtigung Wiederverwendungsquotient

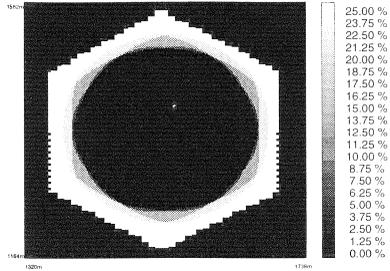


Abbildung 10.16: PP-Blockierwahrscheinlichkeit (%) ohne Berücksichtigung Wiederverwendungsquotient

gen 10.17 und 10.18 dagegen zeigen dieselbe Berechnung, nur wurde hier der relevante Verkehr jeweils um den Quotient  $WQ(r)$  verringert. Für die RFP erkennt man eine konstant niedrige Blockierwahrscheinlichkeit ab einem bestimmten Radius. Durch die Modellierung der Kanalwiederverwendung ergibt sich ein mit  $R_{Int}$  quadratisch steigender Verkehr  $V_{Rel}(r)$ , der durch den ebenfalls quadratisch steigenden Wiederverwendungsquotient mit  $WQ(r)$  verringert wird. Für die PPs erkennt man zum Rand jeweils ein Abnehmen der Blockierung, wenn sich bei gleicher Zahl relevanter RFPs  $NoRFP(x, y, r)$  der Wiederverwendungsquotient erhöht. Abbildung

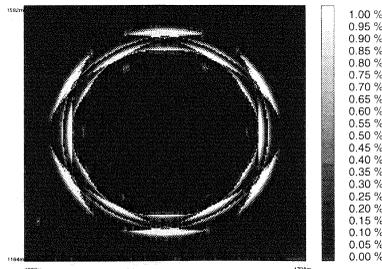
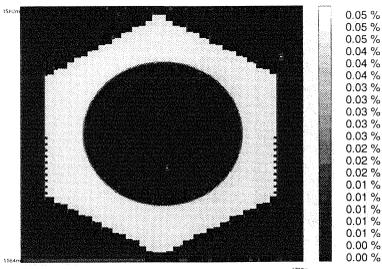


Abbildung 10.17: RFP-Blockierwahrscheinlichkeit (%) mit Berücksichtigung Wiederverwendungsquotient

Abbildung 10.18: PP-Blockierwahrscheinlichkeit (%) mit Berücksichtigung Wiederverwendungsquotient

10.19 schließlich zeigt die Verteilung der kombinierten (=aufsummierten) Blockierwahrscheinlichkeit von PP und RFP, die ebenfalls um den Wiederverwendungsquotient reduziert ist. Die Mittelwertbildung aller Werte der Zelle ergibt die Blockierwahrscheinlichkeiten, wie sie in den Abbildungen 10.20 und 10.21 dargestellt sind.

Diese Abbildungen 10.20 und 10.21 zeigen die so bestimmten Blockierwahrscheinlichkeiten bei verschiedenen notwendigen C/I Werten und  $\gamma = 2.0$  bzw.  $\gamma = 3.5$ . Es wurde für  $\gamma = 3.5$  ein Hexagon mit 61 RFPs und für  $\gamma = 2.0$  ein Hexagon mit 91 RFPs verwendet. Nur die Ergebnisse für  $\gamma = 3.5$  eignen sich als absolute Kapazitätsangaben eines DECT-Systems, während die Angaben für den tragbaren Verkehr bei  $\gamma = 2.0$  wegen des zu kleinen Szenarios und dadurch bedingte Randeffekte etwas zu hoch sind (s.u.).

Die sich ergebenden Kapazitätsunterschiede der beiden Pfadverlustmodelle sind hoch. Der tragbare Verkehr bei 1% Blockierwahrscheinlichkeit und einem C/I = 15 dB liegt für das LOS-Pfadverlustmodell ( $\gamma = 2.0$ ) bei 1.1 Erl/RFP und für das ETSI Pfadverlustmodell ( $\gamma = 3.5$ ) bei 11.3 Erl/RFP

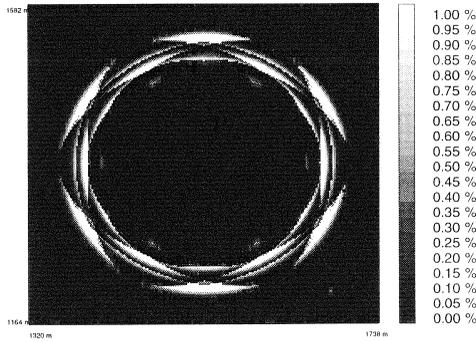


Abbildung 10.19: Gesamtblokkierwahrscheinlichkeit

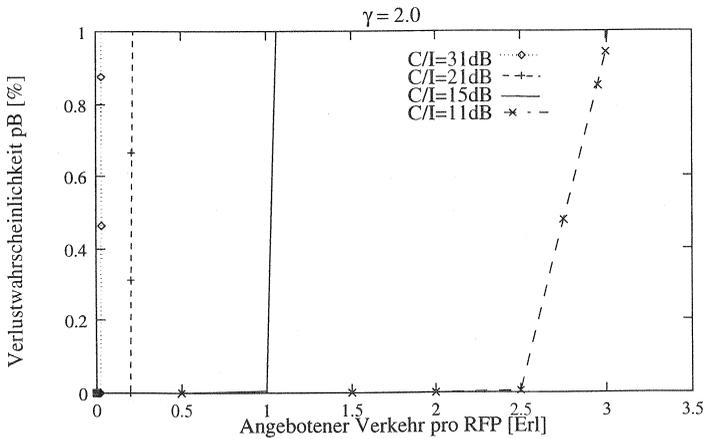


Abbildung 10.20: Blockierwahrscheinlichkeit für  $\gamma = 2.0$

(s. Tabelle 10.2). Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen in Kapitel 12.2.6, Abb. 12.21 zeigt, daß Theorie und Simulation in hohem Maße

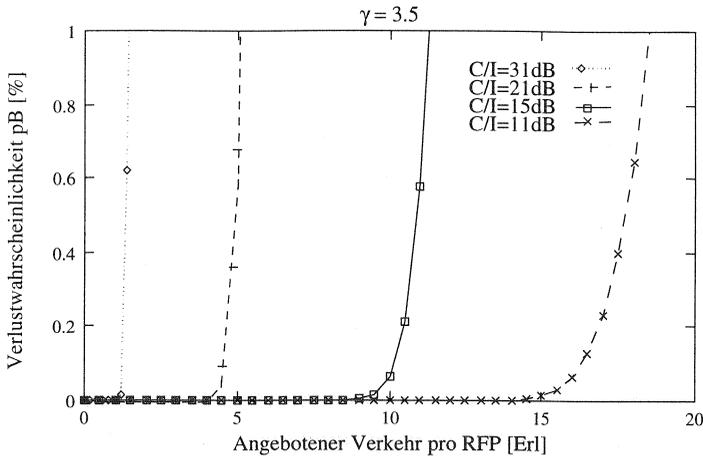


Abbildung 10.21: Blockierwahrscheinlichkeit für  $\gamma = 3.5$

notwendiges C/I	$\gamma = 2.0$	$\gamma = 3.5$
11 dB	3.0	18.5
15 dB	1.1	11.3
21 dB	0.4	5.01

Tabelle 10.2: Theoretisch tragbarer Verkehr bei 1% Blockierwahrscheinlichkeit

übereinstimmen.

Es ist mit dem entwickelten Modell möglich, ohne aufwendige Simulationen Voraussagen für das Verhalten von DECT-Systemen unter verschiedenen Randbedingungen zu treffen. Es sind vor allem unterschiedliche notwendige Störabstände von Interesse, für die Gesamtkapazitätsangaben möglich sind. Wichtig ist dies vor allem deshalb, weil simulative Methoden zur Bestimmung des Verhaltens derartig komplexer und ausgedehnter Systeme an die Grenzen der Durchführbarkeit stoßen, wenn Randeﬀekte wie in dieser Arbeit ausgeschlossen werden sollen.

Betrachtet man die ermittelten mittleren Interferenzradien (s. Tabelle 10.1), so wird deutlich, wie groß relevante Szenarien für die Simulation gewählt werden müssen, um analytisch bestimmte Aussagen simulativ validieren zu können. Verwendet man den größten auftretenden Abstand in einer Zelle

( $R = 196.3$  m), um eine Maximalabschätzung vorzunehmen, so ergeben sich die Werte aus Tabelle 10.3 für den maximalen Interferenzradius  $R_{Int-max}$ . Einen wie oben erwähnten "stationären" Zustand kann man erst dann für

notwendiges C/I	$\gamma = 3.5$	$\gamma = 2.0$
11 dB	675 m	1706 m
15 dB	878 m	2704 m
21 dB	1304 m	5395 m

Tabelle 10.3: Interferenzradien bei  $R = 196$  m

die mittlere Zelle annehmen, wenn auch für die in  $R_{Int}$  befindlichen Zellen ein 6 Störer-Zustand besteht. Hierfür muß der Radius des Szenarios zumindest  $\overline{R_{Int}} \cdot 2$  betragen.

Für das bei der Berechnung von  $\overline{p}_{PP-Block}$  verwendete exemplarische Szenario muß der Radius  $R_{Int-max} + 196m$  betragen, um die exakte Zahl an relevanten RFPS (NoRFP(x,y,r)) zu bestimmen. Bei  $\gamma = 3.5$  und C/I=11 dB bzw. 15 dB reicht dafür ein 61 Hexagon (4 RFP-Ringe) aus. Für C/I=21 dB muß ein 91 Hexagon (5 RFP-Ringe) verwendet werden. Bei  $\gamma = 2.0$  sind Szenarien mit 8, 10 bzw. 20 RFP-Ringen für diese C/I Werte notwendig. Daraus ergibt sich, daß die Szenarien der Simulationen mit Freiraumausbreitung und einem Störabstand von 21 dB (s. Kapitel 12.2.6) nicht groß genug dimensioniert sind, um die Ergebnisse der hier durchgeführten analytischen Betrachtung validieren zu können.

Zur Untersteichung dieses Zusammenhanges sollen die in einer konkreten Simulation festgestellten Orte der Fehler beim Verbindungsaufbau (*Setup*) die Überprüfung der Szenario-Ausdehnung ermöglichen. In den Abbildungen 10.12 und 10.22 sind diese Orte im Szenario mit 37 RFPs für zwei verschiedene Pfadverlustmodelle dargestellt, wobei jedes RFP drei Transceiver hat. Der geschlossene Ring von Setup-Fehlern um die innere Feststation in Abb. 10.12 weist darauf hin, daß der tragbare Verkehr dort interferenzbegrenzt ist, wohingegen sich dieser Ring bei den umgebenden Feststationen nur andeutet. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß die umgebenden Feststationen lediglich über einen kompletten Ring von Störern verfügen, die innere Feststation aber von zwei Ringen von Störern umgeben ist. Man hat hier also örtlich verschiedene Grade von Interferenzbegrenzung vorliegen. Solche Effekte sind nicht erwünscht, weil die Ergebnisse aller ausgewerteten

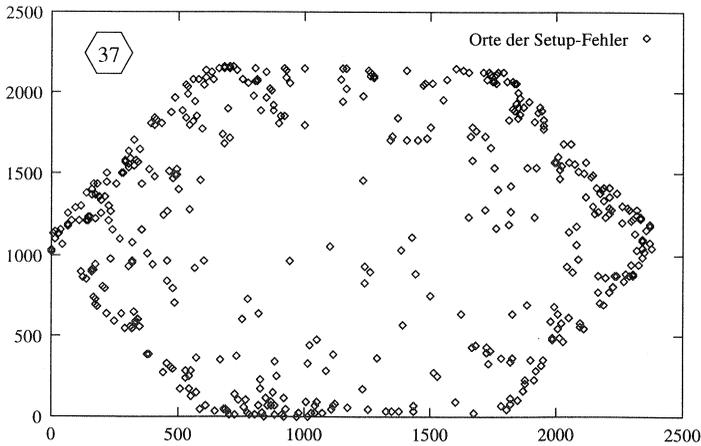


Abbildung 10.22: Setup-Fehler bei Freiraumausbreitung

Feststationen bei gleichem eingestellten Verkehr pro RFP auch gleich sein sollten.

In Abb.10.22 kann man für dasselbe Szenario aber mit Freiraumausbreitung das entgegengesetzte Verhalten bezüglich der örtlichen Verteilung der Interferenzstärke erkennen. Wie in Tabelle 10.3 berechnet, ist das Szenario zu klein gewählt, um Interferenzbegrenzung der mittleren Zelle zu gewährleisten. Es tritt erst am Rand des Szenario Kapazitätsbegrenzung der dort etwas größeren Zellen auf, bevor es zu Interferenzbegrenzungen der inneren Zellen kommt.

### Fazit

Als Fazit kann festgehalten werden, daß die hier durchgeführte Modellierung die Vorgänge in DCA-Systemen wie DECT sehr genau nachbildet, da konkrete geometrische Strukturen exakt einbezogen werden.

Auch in beliebigen, nicht gleichmäßigen Szenarien, wie hier verwendet, ist nach dieser Methodik die Kapazitätsgrenze durch Interferenzbegrenzung bestimmbar. Das trifft sowohl für DECT-Systeme in konkreten Morphostrukturen als auch für den Einsatz von gerichteten Antennen und Sektorisierung zu. Angepaßt werden müssen hierfür die Überlegungen zur Wiederverwendung. Während in homogenen Szenarien der oben verwendete mittlere Wiederverwendungsradius ein vernünftiger Ansatz ist, müssen bei Morphostruk-

turen für die relevanten störenden RFPs konkrete Wiederverwendungswahrscheinlichkeiten aus der Lage abschattender Gebäude bestimmt werden.

## Methodik der simulativen Untersuchung

Um das Verhalten von DECT Systemen methodisch zu untersuchen und Rückschlüsse auf allgemeingültige Modelle zur Systembeschreibung zu ermöglichen, müssen DECT Systeme in vereinfachten Szenarien untersucht werden. Die vorliegende Arbeit beantwortet gleichzeitig aber auch technische Fragestellungen, die sich aus der Nutzung von DECT Systemen durch öffentliche Betreiber im existierenden DECT-Band ergeben. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, auch konkrete, in derartigen Systemen zu erwartende Szenarien und Konfigurationen zu analysieren. Es werden für die Problemstellung relevante Szenarien durch stochastische Verkehrssimulation in modellierter Funkumgebung untersucht. Die Definition dieser Szenarien lehnt sich an Standardszenarien der Literatur der ETSI RES-3 Standardisierungsgruppe für DECT an, vgl. [12]. Dadurch wird die Relevanz dieser Szenarien und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Voraussagen und Ergebnissen anderer Untersuchungen erreicht, vgl. Abschnitt 9.6. Sie erstreckt sich aber auch auf konkrete, durchaus nur sehr lokale Gegebenheiten.

Ziele der Arbeit sind somit die

1. Ermittlung der DECT-Kapazität (= tragbarer Verkehr bei gegebener Dienstgüte (GOS=1%)) in den ausgewählten Szenarien, unter Einsatz unterschiedlicher Antennentechnologien ohne und mit bebauungsbedingter Zusatzdämpfung.
2. Untersuchung von Systemen verschiedener Betreiber in einem Gebiet. Es werden bei synchronem Betrieb die Effekte von co-positionierten und versetzt positionierten RFPs bei unterschiedlichen Dichten der RFPs analysiert.
3. Untersuchung des Einflusses asynchroner Systeme auf die Systemkapazität
4. Wirkung eines anteiligen ISDN-Verkehrs auf die DECT-Systemkapazität

5. Charakterisierung von *Hot-Spots*. Für einen speziell ausgewählten Ausschnitt dieses Szenarios wird die Wechselwirkung zwischen synchronen privaten DECT-Systemen und einem öffentlichen DECT-System untersucht.
6. Für die Abschätzung der gegenseitigen Störung asynchroner DECT Systeme innerhalb eines Gebäudes werden zwei Etagen aus einem Bürogebäude simuliert.
7. Die Wirkung von Relais-Systemen wird exemplarisch in die Untersuchung einbezogen. Anhand eines für die Erschließung eines Stadtteiles typischen Szenarios mit zentralem Versorgungspunkt werden die Leistungsfähigkeiten von Relais-basierten Installationen und RFP-basierten Installationen gegenübergestellt.

Hierzu werden durch stochastische Simulation mit dem in Kapitel 8 beschriebenen DECT Simulator für charakteristische Basiskonfigurationen, die typisch für reale Anwendungen des öffentlichen Betriebs sind, grundsätzliche Aussagen ermittelt, die allgemeinere Rückschlüsse und Prognosen zulassen. Folgende Szenarien werden analysiert:

1. ETSI RLL Versorgungsbeispiel 4 - neuer Betreiber in Konkurrenz zum drahtgebundenem Ortsnetz [12]: Abb. 11.1 und Tabelle 11, insbesondere Gebiet A1, Abb. 11.2
2. Öffentlicher Telepoint mit benachbarten mehrstöckigen Gebäuden Abb. 9.4 und Abb. 11.4.
3. Gegenseitige Beeinflussung von DECT Systemen innerhalb eines Gebäudes, vgl. die Abbildungen 11.5 und 11.6
4. Vergleich von DECT-Relais und RFP-basierten DECT-Ortsnetzen

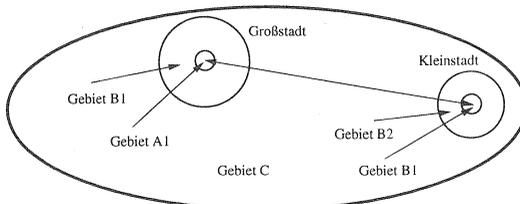


Abbildung 11.1: Ortsnetz-Szenario mit zwei getrennten Städten

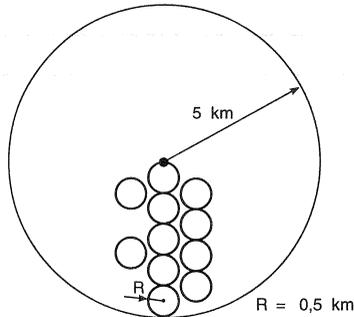


Abbildung 11.2: Detail aus Szenario 4: Area A1, vgl. Abb. 11.1

Die Untersuchung wird für die Szenarien unter verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt:

- ETSI RLL Versorgungsbeispiel 4 (s. Abb. 11.2): neuer Betreiber in konkurrierendem Betrieb zum drahtgebundenen Ortsnetz. Dieses Szenario stellt laut Untersuchungen der ETSI die größten Anforderungen an das DECT-System. Folgende Merkmale werden angenommen: Bei den Teilnehmern handelt es sich um eine Mischung aus

	Großstadt	Kleinstadt
Anzahl Telefone	500.000	50.000
Dichte im Kern A1	2.000/km <sup>2</sup>	1.000/km <sup>2</sup>
Dichte Bereich B1	500/km <sup>2</sup>	500/km <sup>2</sup>
Radius der Zelle	Kern = 4,5 km Ring = 16 km	Kern = 2 km Ring = 5 km
Verkehrswert je Tln.	70 mErl.	70 mErl.

Tabelle 11.1: Parameter für das Versorgungsbeispiel 4 [12]

privaten Hausanschlüssen (mit 70 mErl/Tln) und kleinen Betrieben (150 mErl/Tln), wobei der mittlere Verkehrswert 100 mErl/Tln beträgt. Für private Nebenstellenanlagen größerer Betriebe, Bürokomplexe oder Industriebetriebe wird angenommen, daß sie über gesonderte Maßnahmen (Richtfunk, Primärmultiplex-Leitungen, usw.) an-

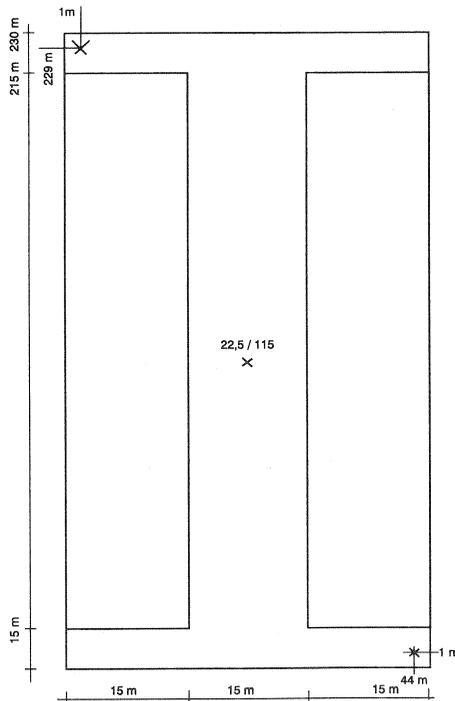


Abbildung 11.3: Grundriß des Hot-Spots

geschlossen sind, vgl. die Einteilung in Benutzerklassen in Kapitel 1. Die größte Verkehrsdichte<sup>1</sup> im Gebiet A1 wird demnach mit  $2000 \cdot 0,1 \text{ Erl/km}^2 = 200 \text{ Erl/km}^2$  vergleichsweise gering angenommen. In einer ETSI Veröffentlichung zur Abschätzung des Verkehrsaufkommens in einem Gebäude wird eine Verkehrsdichte von  $200 \text{ Erl/km}^2$  errechnet, wobei pro Etage  $4000 \text{ Anschlüsse/km}^2$  bei einer Aktivität von  $50 \text{ mErl/Tln}$  angenommen werden. Dieser Wert muß mit der Anzahl der Stockwerke multipliziert werden, um den Gesamtverkehr über der Gebäudegrundfläche zu ermitteln: Für 2-3 stöckige Bebauung ergibt sich eine Verkehrswert von  $500 \text{ Erl/km}^2$ .

<sup>1</sup>Marktanteil von 20% an DECT-Versorgung in Gebieten mit  $20000 \text{ Einw./km}^2$

Öffentliche Telepoint-Anwendungen verursachen an besonders belasteten Orten (*Hot-Spots*) einen Verkehr von bis zu 5500Erl/km<sup>2</sup>. Dieser Wert gilt allerdings nur für die absolute Höchstbelastung z.B. im Zentralbereich des Flughafens Heathrow und stellt somit lediglich eine außergewöhnliche Belastung für einen *Hot-Spot* dar. Für die großflächigen Untersuchungen wird von 200 Erl/km<sup>2</sup> als zu erreichendem Verkehr ausgegangen, weil *Hot-Spots* dort nur einen kleinen Prozentsatz ausmachen. Daneben werden *Hot-Spots* mit hoher Verkehrslast getrennt betrachtet.

Folgende Analysen werden für das Gebiet A1 (s. Abb. 11.2) des Versorgungsbeispiels 4 durchgeführt:

1. Für einen repräsentativen Ausschnitt des Gebietes A1 wird der tragbare Verkehr bei 1% GOS bei gegebener RFP Dichte simulativ ermittelt. Ausgangspunkt sind die Annahmen über RFP Abstände aus bekannten ETSI Veröffentlichungen. Diese Untersuchungen werden mit empirischen Pfadverlustmodellen, die ohne Morphostruktur-Informationen auskommen (ETSI-RLL), und mit morphostrukturabhängigen Kanalmodellen (COST231) durchgeführt. Morphostrukturabhängige Kanalmodelle model-

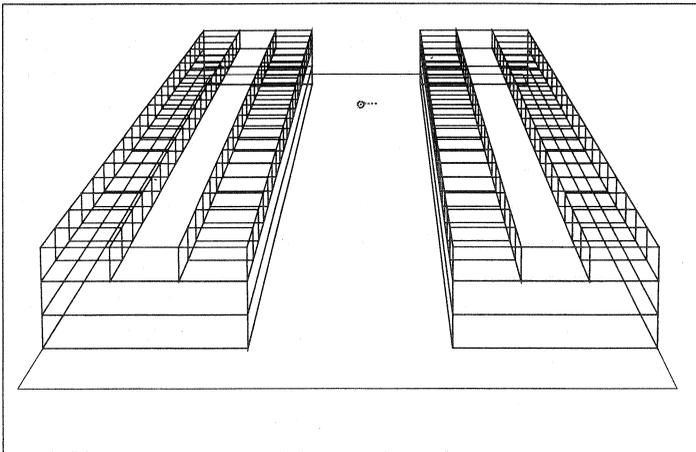


Abbildung 11.4: Aufsicht des Hot-Spots

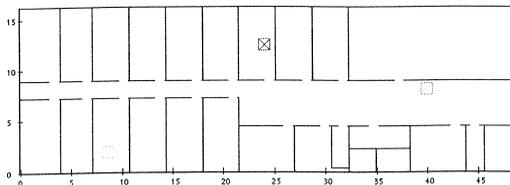


Abbildung 11.5: Gebäude mit asynchronen DECT-Installationen: obere Etage

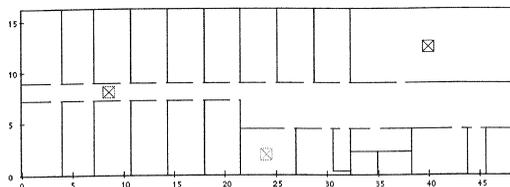


Abbildung 11.6: Gebäude mit asynchronen DECT-Installationen: untere Etage

lieren die Realität besser, führen aber zu einer Abhängigkeit der Ergebnisse vom gewählten Szenario. Das Pfadverlustmodell (vgl. Gl. 7.5) entspricht mit seiner Dämpfungscharakteristik einer Mittelwertbildung der in Innenstadtbereichen anzutreffenden Dämpfungen, weist dabei aber eine rundstrahlende Charakteristik auf. Dagegen ermöglichen die Multi-Slope Modelle eine Abschätzung der Ausleuchtungsbedingungen und des tragbaren Verkehrs in einer konkret erstellten Bebauung. Ein weiterer Aspekt der Untersuchung ist der Einsatz unterschiedlicher Antennenkonfigurationen. Neben Rundstrahlantennen werden sektorisierte Antennen an den RFPs verwendet, um durch die Verringerung der Interferenzleistungen eine kleinere Clustergröße und folglich einen größeren tragbaren Verkehr zu erreichen. Entsprechend der Installationstechnik für ortsfeste RLL-Versorgung werden an den ortsfesten PPs gerichtete Antennen angebracht, um die zu erwartende Entkoppelung der Übertragungsstrecken und die so stark verringerte Interferenzleistungen zu quantifizieren. Daneben werden Kapazitätseinbußen bei anteiligem ISDN-Verkehr für ortsfeste und mobile PPs ermittelt.

## 2. Betrieb zweier flächendeckender Systeme

In diesem Ausschnitt werden Untersuchungen zum synchronen und asynchronen Betrieb von zwei flächendeckenden DECT Systemen verschiedener Betreiber vorgenommen. Dabei werden der synchrone und asynchrone Betrieb bzgl. ihrer Kapazität verglichen. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen für nur einen Betreiber werden die Beeinträchtigungen durch Konkurrenz ermittelt. Die Feststationen werden co-positioniert und versetzt positioniert angenommen und die entsprechenden Ergebnisse verglichen. Eine ungleichmäßige Verteilung des Verkehrs auf die Systeme zweier Betreiber wird untersucht, bei unterschiedlicher Dichte der RFPs, entsprechend den Ergebnissen der 1. Untersuchung.

## 3. In einer weiterführenden Untersuchung werden der frequenzbandgetrennte Betrieb mit dem integrierten Betrieb zweier Netze verglichen, um Prognosen über die Auswirkung des dabei verringerten Bündelungsgewinns und der Asynchronität der Netze zu validieren.

- Öffentlicher Telepoint mit benachbarten mehrstöckigen Gebäuden (s. Abb. 9.4):

Um die Auswirkungen privater DECT Benutzer auf den Betrieb öffentlicher DECT Netze beurteilen zu können, wird exemplarisch ein begrenzter Bereich simuliert, in dem beide Netze konkurrieren. Ein Bereich der Größe 230 m x 50 m wird umgeben von unterschiedlichen Gebäuden. Als Szenario wird eine Einkaufsstraße mit anliegenden Kaufhäusern und Büros untersucht, so daß sich ein relevant hoher Verkehr der privaten DECT Installationen ergibt und die Beeinflussung des öffentlichen DECT Systems analysiert werden kann. Auf dem öffentlichen Bereich wird zentral 1 RFP installiert, der eine öffentliche Versorgung gewährleistet (je nach Verkehr wird ein Multitransceiver eingesetzt). Die Konfiguration enthält 2 RFPs an den Ecken (s. Abb. 11.3). Der private Verkehr wird im Rahmen der Vorgaben aus der Literatur variiert. Als Kanalmodell kommen einfache Pfadverlustmodelle, vgl. [52], [53], für die Dämpfung an Wänden und Decken zum Einsatz.

Diese Untersuchung soll qualitativ darüber Aufschluß geben, wie stark ein öffentliches Netz von privaten Installationen beeinflusst werden kann und umgekehrt.

- Gegenseitige Beeinflussung von DECT Systemen innerhalb eines

Gebäudes (s. Abbildungen 11.5, 11.6):

Asynchrone DECT Systeme innerhalb von Gebäuden verhalten sich durch die zusätzliche Bedämpfung anders als im Freien. Eine Aussage über die Beeinflussung der DECT Hausanschlüsse und die Versorgung der Privatbereiche durch andere private DECT Installationen innerhalb des Gebäudes lassen sich nur durch gesonderte Simulationen ermitteln. Hierzu wird ein 2 stöckiges Gebäude modelliert, welches pro Stockwerk eine DECT Installation enthält, vgl. Abschnitt 14.4.

- Vergleich einer Relais gestützten mit einer RFP gestützten Installation ein typisches Szenario der Erschließung einer Stadt ist in Abb. 15.1 gegeben. Um einen POP wird ein Ring aus DECT-Relais zur erschließung verwendet. Dies wird einer Installation mit RFPs gegenübergestellt

# Simulationsergebnisse für einen DECT-Betreiber

In diesem Kapitel werden die erzielten Simulationsergebnisse zur Bestimmung der DECT-Kapazität bei der Versorgung durch einen Betreiber strukturiert dargestellt, erläutert und interpretiert. Es werden jeweils das verwendete Szenario, die Einstellung des Simulators und die Ergebnisse der Simulationen im Zusammenhang beschrieben.

## 12.1 Kalibrierung des Simulators

### 12.1.1 Reichweiten von DECT-Systemen für RLL

Unter Zuhilfenahme der Ausbreitungsmodelle nach Gl. 7.5, 7.6 und 7.7 kann man den maximalen Versorgungsradius bei verschiedenen Antennenkonfigurationen des Systems berechnen. Dafür wird das *Link Budget* einer Konfiguration bestimmt. Folgende Parameter wurden hier berücksichtigt und wurden in gleicher Weise auch in den Berechnungen der ETSI in [12] verwendet:

- Empfängerempfindlichkeit (hier -86 dBm)
- Sendeleistung (hier +24 dBm)
- Antennengewinn der Mobilstation (+0, +6 oder +17 dBi)
- Antennengewinn der Feststation (+6 oder +14 dBi)

In Tabelle 12.1 sind die möglichen Antennenkonfigurationen zusammengestellt. Die zur Berechnung des Versorgungsradius nötigen Schwundreserven (*Fade Margin*) wurden ebenfalls [12] entnommen. Die Schwundreserve ist eine Sicherheitsreserve der Berechnung. Sie soll garantieren, daß trotz mehrwegebedingter Signaleinbrüche (*Fading*) die Signalleistung am Empfänger bei berechnetem Maximalabstand von PP und RFP über der Empfängerempfindlichkeit liegt. Daher muß für Modell 1, bei dem das Signal durch die

Link Budget	Antennengewinn PP	Antennengewinn RFP	ges. Link Budget (ohne Schwundreserve)
A	0 dBi	6 dBi	116 dB
B	6 dBi	6 dBi	122 dB
C	17 dBi	6 dBi	133 dB
D	6 dBi	14 dBi	130 dB
E	17 dBi	14 dBi	141 dB

Tabelle 12.1: Zu den möglichen Antennenkonfigurationen gehörige Link Budgets

dichte Bebauung besonders häufig reflektiert wird, eine höhere Schwundreserve vorgesehen werden als bei Modell 3, bei dem quasi freie Ausbreitung vorliegt. Die Höhe der Schwundreserve kann herabgesetzt werden, wenn wahlweise eine von zwei Antennen benutzt werden kann (Antennendiversität), weil den Pegel einbrüchen ausgewichen werden kann. Für die unter-

	Schwundreserve (mit Antennen Diversität)	Schwundreserve (ohne Antennen Diversität)
1. starke Dämpfung	A=B=10dB, C=D=E=8dB	A=B=18dB, C=D=E=15dB
2. mittlere Dämpfung	A=B=8dB, C=D=E=7dB	A=B=15dB, C=D=E=12dB
3. freie Ausbreitung	A=B=5dB, C=D=E=4dB	A=B=9dB, C=D=E=7dB

Tabelle 12.2: Zu den Link Budgets aus Tabelle 12.1 gehörige Fade Margins

stellten Antennengewinne und Schwundreserven ergeben sich die in Tabelle 12.3 angegebenen maximalen Reichweiten der RFPs. Bei 5000 m Reichweite erreicht die Signallaufzeit die in der TDMA/TDD Slotstruktur vorgesehene Schutzzeit. Damit ist die gegebene maximale Reichweite des DECT-Systemen erreicht<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Der Zeitabstand (*Gap*) zwischen zwei DECT-Zeitschlitzten, die Synchronisationsungenaugigkeit der Stationen und die Umschaltgeschwindigkeit der Hardware begrenzen die maximal mögliche Laufzeit der Signale zwischen Fest- und Mobilstation. Inzwischen sind einzelne Hersteller in der Lage, 7,5 km zu realisieren.

Link Budget	Mod.1 o.Div	Mod.1 m.Div.	Mod.2 o.Div.	Mod.2 m.Div.	Mod.3 o.Div.	Mod.3 m.Div.
A	140m	180m	270m	465m	500m	795m
B	210m	350m	430m	740m	1000m	1600m
C	520m	820m	1300m	1800m	4500m	5000m
D	420m	670m	1000m	1500m	3200m	4500m
E	880m	1400m	2300m	3400m	5000m	5000m

Tabelle 12.3: Maximale Reichweite von DECT-Systemen

### 12.1.2 Festlegung der Feststationsdichte

Wie in [62] gezeigt, hängen bei Verwendung desselben Ausbreitungsmodells Systemradius und tragbarer Verkehr pro Fläche linear voneinander ab. Der tragbare Verkehr pro RFP ist von der Reichweite (Zellradius) unabhängig, denn er ergibt sich allein durch den Störabstand  $C/I$ .

Bei PCS-Systemen unterhalb der Dächer kann man ab etwa 150 m davon ausgehen, daß das Pfadverlustmodell unabhängig vom Zellradius ist. Wenn die Zellgröße sehr klein ist, z.B. kleiner als 50m, steigt die Wahrscheinlichkeit für Sichtverbindungen erheblich an, so daß ein deutlich geringerer Pfadverlustfaktor verwendet werden muß. Dies führt, wie noch gezeigt wird, zu einer drastischen Abnahme des tragbaren Verkehrs.

Für die im folgenden diskutierten Simulationsuntersuchungen wurde ein Zellradius von 170 m gewählt und ein Versorgungspegel auf der Zellgrenze von -65 dBm eingestellt. Die entsprechende Zellgröße ist nach [12] ausreichend, um einen Verkehr von  $200 \text{ Erl}/\text{km}^2$  und damit 100% des Verkehrsaufkommens im Ortsnetz zu tragen. Bei Untersuchungen mit isotroper Antennencharakteristik am RFP wurden Antennen mit 6 dBi Gewinn bei einer Sendeleistung von 24 dBm angenommen. Daneben wurden Antennen mit Richtcharakteristik durch konkrete Antennendiagramme und mit entsprechend verringerten Sendeleistung berücksichtigt, wobei dieselbe Randversorgung der Zelle vorgegeben wurde.

### 12.1.3 Untersuchung der erforderlichen Szenario-Ausdehnung

Die detaillierte Modellierung des DECT-Systems mit dem Ziel der Kapazitätsuntersuchung (also die Bestimmung des tragbaren Verkehrs bei Inte-

ferenzbegrenzung) großflächiger DECT-Installationen, wie in dieser Arbeit durchgeführt, erfordert eine Definition der Szenarien nach folgenden Kriterien:

1. Die Symmetrie des Szenarios erleichtert die Interpretation der Ergebnisse.
2. Der Betrieb einer ausreichenden Anzahl zusätzlicher, nicht in die Auswertung einbezogener DECT-Zellen vermeidet Randeffekte, die durch das Fehlen von Störleistung betriebener Verbindungen entstehen würden.
3. Die Szenarien wurden so klein wie möglich definiert, um die durch die detaillierte Modellierung des DECT-Systems bedingten langen Laufzeiten der Simulationen auf höchstens 2 Wochen pro Experiment zu beschränken.

Die hier vorgestellte Arbeit stellt im Bezug auf die Eignung der verwendeten Szenarien eine wesentlich genauere Untersuchung der Leistungsfähigkeit von DECT-Systemen in öffentlichen Anwendungen dar, als in [62] durchgeführt. Das dort verwendete rechteckige Szenario mit 16 DECT-Zellen erfüllt die Kriterien 1 und 2 nicht ausreichend.

Für diesen Zweck sind die hier verwendeten symmetrischen, hexagonalen Szenarien mit einer unterschiedlichen Anzahl von Zellringen, und einem Zellradius von 170 m, besser geeignet. Je nach verwendetem Pfadverlustmodell bzw. eingestelltem C/I-Schwellwert und dem sich dadurch ergebenden Kanalwiederverwendungsabstand wurde die benötigte Szenariogröße nach den Abbildungen 12.1, 12.2 und 12.3 verwendet. Es handelt sich um Szenarien mit 19, 37 und 91 Zellen. Verwendet wurde zusätzlich ein Szenario mit 61 Zellen.

## 12.2 Simulationsergebnisse für großflächige DECT-Systeme

Bei den folgenden Untersuchungen wurden zur Analyse der Kapazität und Dienstgüte von DECT-Systemen in den o.g. Szenarien, neben der Verkehrslast, auch die technische Ausstattung der RFPs variiert. So wurde bei den Untersuchungen mit nur einem DECT System<sup>2</sup> die Transceiverzahl von 1 auf

---

<sup>2</sup>In Kapitel 13 wird der Betrieb von mehreren DECT-Systemen verschiedener Betreiber behandelt

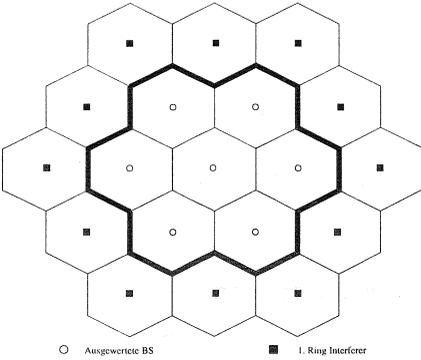


Abbildung 12.1: Hexagon mit 19 RFPs und 170 m Senderadius

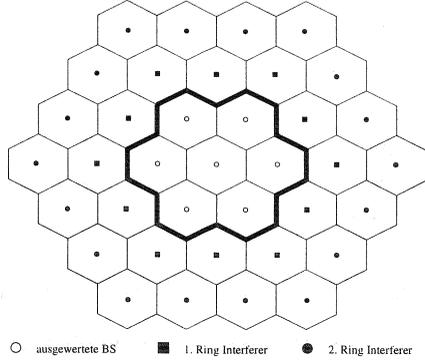


Abbildung 12.2: Hexagon mit 37 RFPs und 170 m Senderadius

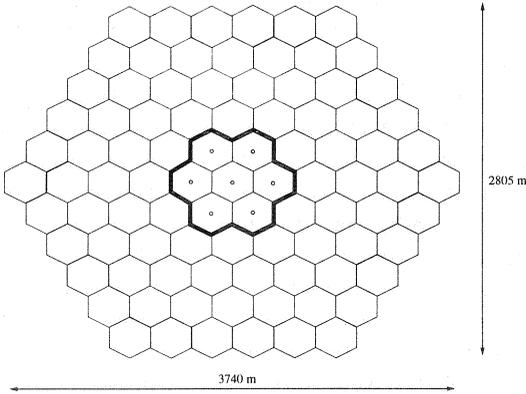


Abbildung 12.3: Hexagon mit 91 RFPs und 170 m Senderadius

3 erhöht. Diese Ergebnisse lassen wichtige Rückschlüsse auf das grundsätzliche Verhalten von DECT-Systemen zu, die durch theoretische Betrachtungen in Kapitel 10 unterstützt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden mit der detaillierten Modellierung der Kanalwahl- und Handoveralgorithmen unter Verwendung des Bitfehlermodells für nicht kohärentes

FSK ermittelt. Zur absoluten Einordnung der Ergebnisse wurden zusätzlich Untersuchungen mit unterschiedlichen Einstellung der Algorithmen durchgeführt, die in Kapitel 12.2.6 dargestellt werden.

Daneben wurden zur Berücksichtigung von in der Realität eingesetzten Antennenkonfigurationen RFPs mit 120 Grad Sektorisierung untersucht bzw. die stationären RLL-Mobilstationen mit gerichteten  $9^\circ$  Antennen (12 dB Gewinn) ausgestattet.

### 12.2.1 Tragbarer Verkehr mit Standardantennen

Das ETSI Pfadverlustmodell für stark bebaute Gebiete, s. Gl. 7.5, beschreibt den Fall, daß die RFPs unterhalb der Dachkanten angebracht werden. Es ergibt sich durch die dabei auftretenden Abschattungen ein mittlerer Pfadverlustfaktor von  $\gamma = 3.5$ . Dieses Modell beschreibt die Ausbreitungsbedingungen in einem PCS-System bei genügend großem Abstand  $d$  zwischen den RFPs z.B.  $d > 150m$ . Sind die Abstände der RFPs kleiner, z.B. bei großer Benutzerdichte, so tritt häufiger eine Sichtverbindung der Mobilstationen zu den RFPs auf, und es muß im ungünstigsten Fall ein Pfadverlustmodell für Freiraumausbreitung ( $\gamma = 2.0$ ) verwendet werden.

Modelliert man ein RLL-System, in dem die Versorgung der Benutzer über die Dächer vorgenommen wird, so kann man in den meisten Fällen von Sichtverbindungen ausgehen, also  $\gamma = 2.0$  annehmen. Der tragbare Verkehr pro RFP entspricht in RLL-Systemen ohne gerichtete Antennen demnach exakt dem in einem PCS-System mit geringen Zellradien.

Bei rundstrahlenden (isotropen) Antennen am RFP und PP und einem Pfadverlustfaktor von  $\gamma = 3.5$  ergeben sich z.B. im Szenario mit 37 RFPs die Ausleuchtungsbedingungen wie in Abb. 12.4 gezeigt. Es ist zu erwähnen, daß für alle verwendeten Pfadverlustmodelle die Sendeleistung so angepaßt wurde, daß auf den Zellgrenzen jeweils eine Empfangsleistung (einschließlich Empfängerantenne) von -65 dBm möglich ist. Die Abb.12.5 zeigt den tragbaren Verkehr pro Transceiver bei stark dämpfenden Ausbreitungsbedingungen.

Laut Tabelle 12.4 ist das System bei einem Transceiver kapazitätsbegrenzt, da sich durch den Einsatz von zwei Transceivern der tragbare Verkehr pro RFP steigern läßt. Dagegen stellt sich bei zwei bzw. drei Transceivern Interferenzbegrenzung ein, denn der theoretisch mögliche Verkehr für Kapa-

---

<sup>1</sup>Bei Kapazitätsbegrenzung mit Blockierwahrscheinlichkeit von 1%, s. Tabelle 10.3

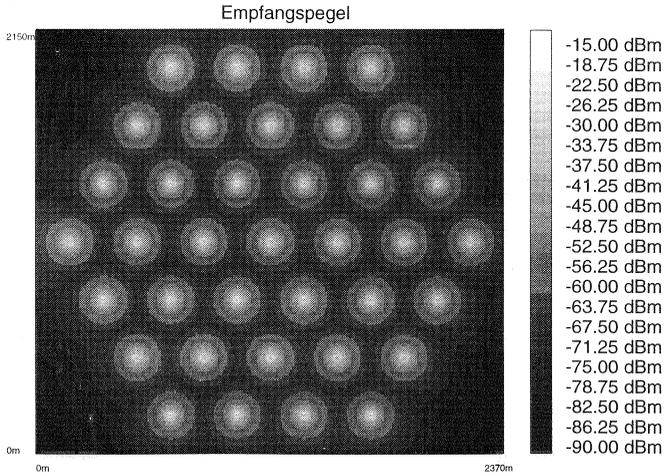


Abbildung 12.4: Ausleuchtung im 37er Hexagon

Transceiverzahl	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS	theor. tragbarer Verkehr <sup>1</sup>
1	7.2	7.56	5.8
2	12.2	13.0	15.3
3	12.1	13.1	25.5

Tabelle 12.4: Tragbarer Verkehr bei ETSI Pfadverlustmodell mit  $\gamma = 3.5$ 

zitätsbegrenzung (15.3 Erl/RFP bei 24 Kanälen) wird nicht erreicht, und der zusätzliche 3. Transceiver bewirkt keine Verbesserung des Verkehrs pro RFP. Bei genügend Transceivern pro RFP liegt im Szenario also Interferenzbegrenzung bei einem tragbaren Verkehr von 13.1 Erl/RFP und einem GOS = 1% vor.

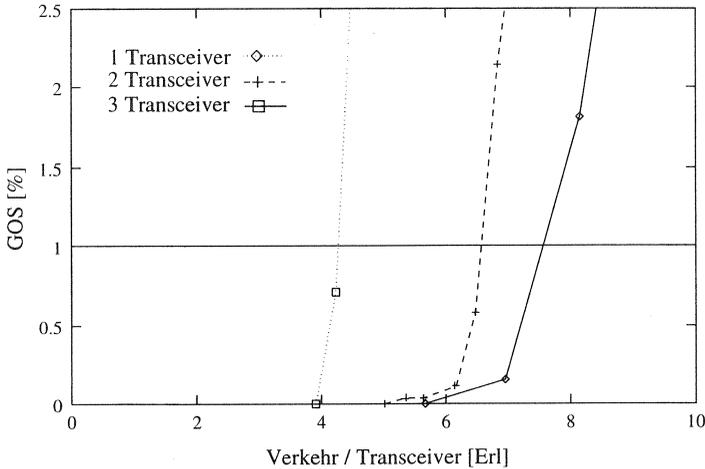


Abbildung 12.5: Simulationsergebnisse für ETSI Pfadverlustmodell mit  $\gamma = 3.5$

Zu bemerken ist, daß bei Kapazitätsbegrenzung des Systems mit einem Transceiver, abweichend von analytischen Kapazitätsvoraussagen (5.8 Erl/RFP bei 12 Kanälen), das System 7.56 Erl Verkehr pro RFP bei einer Blockierwahrscheinlichkeit von 1% tragen kann. Wie in Kapitel 10.5 analytisch beschrieben, gibt es durch die starken Überlappungen der Zellen große Bereiche, in denen die Mobilstationen zu Nachbarzellen ausweichen können, falls die stärkste eigene RFP besetzt ist. Dadurch wird der kritische Grade of Service erst bei höherer Last erreicht. Die Überlappung der Zellen beträgt in diesem Szenario 95%. Berechnet man den tragbaren Verkehr nach dem analytischen Modell in Kapitel 10.5 so ergibt sich mit 7.56 Erl/RFP dasselbe Ergebnis, wie simulativ bestimmt. Dieser Vergleich ist auch in Abb. 12.6 dargestellt.

In Abb. 12.7 ist der GOS des Systems für Sichtkontakt ( $\gamma = 2.0$ ) der Mobilstation zu den RFPs aufgetragen. Im Vergleich zum Modell ohne Sichtverbindung wird der starke Abfall des tragbaren Verkehrs/Transceiver auf 4.8 Erl/RFP bei GOS=1% bei einem Transceiver/RFP deutlich. Der tragbare Gesamtverkehr/RFP in Tabelle 12.5 zeigt, daß das Hinzufügen eines weiteren Transceivers keinen Gewinn an Systemkapazität bringt. Dieses System weist bereits bei nur einem Transceiver Interferenzbegrenzung auf.

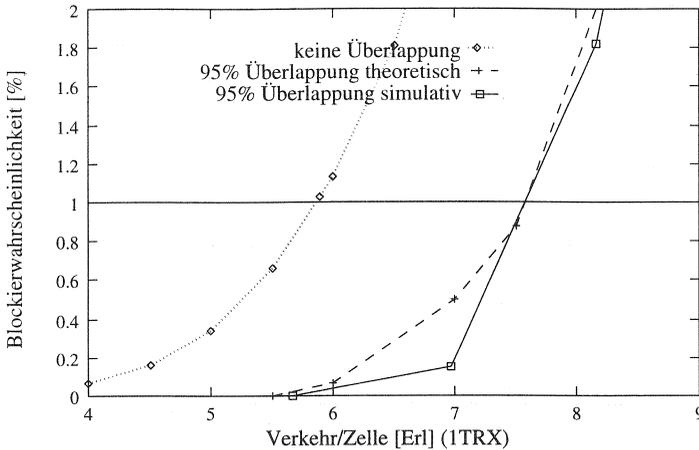


Abbildung 12.6: Vergleich von analytischem und simulativem Ergebnis für 95 % Überlappung

Transceiverzahl	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
1	4.8	4.9
2	4.5	4.8

Tabelle 12.5: Tragbarer Verkehr bei Freiraumausbreitung mit  $\gamma = 2.0$

Bei der Interpretation der Ergebnisse für  $\gamma = 2.0$  ist anzumerken, daß das betrachtete Szenario mit 37 Zellen nicht die notwendige Größe aufweist, um gesicherte absolute Kapazitätsangaben ableiten zu können. Der mittlere Wiederholradius bei sechs gleichzeitigen Störern (s. Tab. 10.1) liegt für die hier verwendete Einstellung des Simulators<sup>3</sup> bei 2144 m, bzw. 875 m bei einem Störer, also außerhalb des Szenarios. Die Interferenzbegrenzung tritt im betrachteten Szenario erst bei höherem Verkehr ein als in einem unendlich ausgedehnten Szenario, d.h. der tragbare Verkehr ist tatsächlich noch kleiner als in Tabelle 12.5 angegeben. Die Ergebnisse der analytischen

<sup>3</sup>Detaillierte Modellierung der Kanalwahl und des Handovers

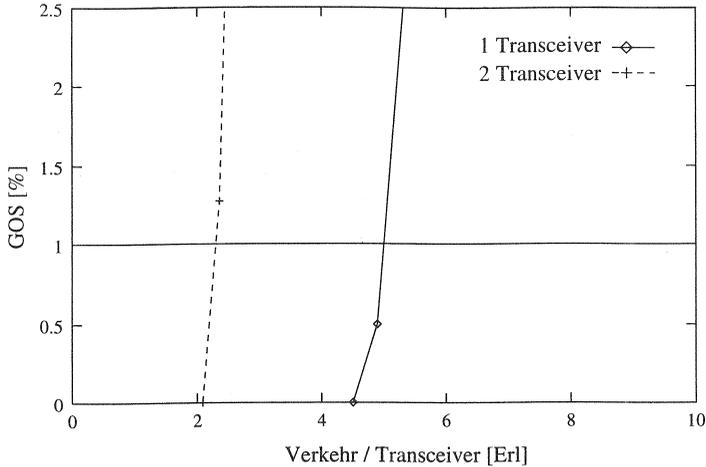


Abbildung 12.7: Simulationsergebnisse für Freiraumausbreitung bei  $\gamma = 2.0$

Modellierung können nach der hier durchgeführten Validierung des Modells als Maß für den tragbaren Verkehr gelten.

### 12.2.2 Nutzung der Simulationsergebnisse zur Kapazitätsberechnung für andere RFP-Dichten

Eine wichtige Schlußfolgerung aus der Betrachtung in Kapitel 10 ist, daß bei unverändertem Pfadverlustmodell die Kapazität linear vom Zellradius abhängt. Die Kapazität hängt im wesentlichen vom notwendigen Störabstand ab. Nach den Ergebnissen der Simulation stehen für  $\gamma = 2.0$  4.9 Erl/RFP und für  $\gamma = 3.5$  13.1 Erl/RFP tragbarer Verkehr zur Verfügung. Wird ein bestimmter Verkehr pro Fläche gefordert, so ist über die Fläche einer Zelle  $F_{Zelle}$  mit

$$F_{Zelle} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 \quad (12.1)$$

der notwendige Zellradius zu bestimmen. Abb. 12.8 zeigt diesen Zusammenhang. Das System ist in seiner Kapazität über den Radius seiner Zellen skalierbar, solange durch die Wahl des Radius kein Wechsel des zugrundeliegenden Kanalmodells und damit der Interferenzsituation notwendig ist.

Möchte man die benötigte RFP-Dichte für einen Verkehr eines RLL-Systems

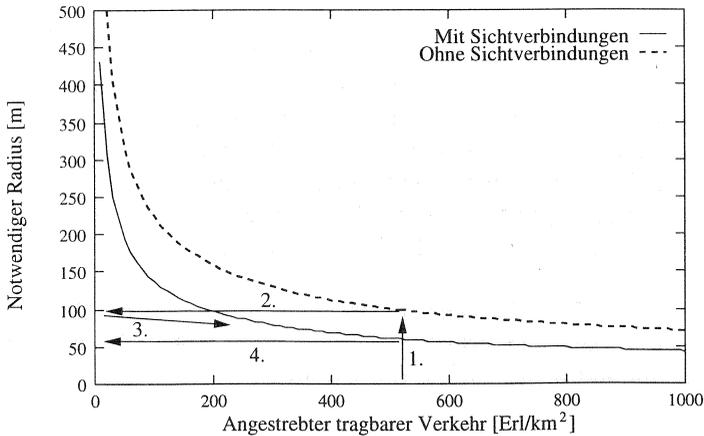


Abbildung 12.8: Benötigter Zellradius bei gegebenem angestrebten tragbarem Verkehr

von  $200 \text{ Erl/km}^2$  errechnen, muß die Kurve für Sichtverbindung benutzt werden. Es ergibt sich ein Radius von ca.  $97 \text{ m}$ .

In gleicher Weise kann man den in einem PCS-System (ohne Sichtverbindung) tragbaren Verkehr bestimmen. Berechnet man z.B. die Kapazität bei einem Radius von  $97 \text{ m}$ , so ergeben sich  $535 \text{ Erl/km}^2$ .

Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Berücksichtigung des korrekten Pfadverlustmodells. Für ein PCS-System gilt bei genügend großem Zellradius  $r$  (z.B.  $r > 150 \text{ m}$ ) das stärker gedämpfte Ausbreitungsmodell und damit die Kurve ohne Sichtverbindungen in Abb. 12.8. Bei hoher Benutzerdichte und somit kleinen Zellradien verliert das Ausbreitungsmodell die Gültigkeit und es muß mit Sichtverbindungen gerechnet werden. Bei der Bestimmung des notwendigen Zellradius kommt es zu einer Iteration. Für einen gewünschten tragbaren Verkehr (1.) wird der notwendige Zellradius aus der Kurve ohne Sichtverbindung ermittelt (2.). Handelt es sich um einen Zellradius, der für dieses Pfadverlustmodell zu klein ist, so muß auf die Kurve mit Sichtverbindung zugegriffen werden (3.), um den Radius zu bestimmen (4.).

Es wird deutlich, daß aus ökonomischer Sicht Grenzen für den Einsatz von DECT Systemen existieren, wenn durch hohe RFP-Dichten Sichtverbin-

dung zwischen den RFPs bestehen. Durch den Wechsel zum ungünstigen Pfadverlustmodell sind zur Bewältigung sehr hoher Verkehre äußerst kleine Zellradien notwendig.

Es folgt, daß zur Erzielung der optimalen DECT-Kapazität in einem PCS-System durch gezielte Planung der RFP-Standorte das Auftreten von Sichtverbindungen vermieden werden muß. Es folgt für öffentliche DECT Anwendungen, daß auch mehrere konkurrierende Betreiber koordiniert planen müssen, um Interferenzen zu vermeiden und die mögliche Kapazität von DECT nicht unnötig zu verringern. Ohne Koordination werden sich die Betreiber gegenseitig stören und die Kapazität von DECT nicht ausschöpfen können.

Großflächig sind 5500 Erl/km<sup>2</sup> nicht möglich. Für durch Gebäude abgeschattete *Hot-Spots* sind jedoch auch viel größere lokale Verkehre möglich, z.B. 85 Erlang auf 0.004 km<sup>2</sup>, vergl. Kapitel 14.

### 12.2.3 Tragbarer Verkehr mit sektorisierten Antennen

In diesem Kapitel werden Systeme mit sektorisierten Feststationsantennen untersucht, der mögliche tragbare Verkehr bestimmt und mit dem bei isotropen Antennen verglichen<sup>4</sup>. Benutzt man gerichtete statt isotroper Antennen bei den Feststationen, so entstehen sektorisierte Funkzellen. Da eine gerichtete Antenne die Wellenausbreitung auf die jeweilige Richtung beschränkt, wird die Abstrahlung von Gleichkanalstörleistung in benachbarte Zellen und die restlichen Sektoren reduziert.

In [8] wird für die Verbesserung der Spektrumseffizienz ( $\frac{\text{tragbarer Verkehr}}{\text{Bandbreite} \cdot \text{Fläche}}$ ) von FCA-Systemen durch den Einsatz von Sektorantennen (120°, 60°) für unterschiedliche Clustergrößen und Zellradien untersucht. Dabei sind zwei Voraussetzungen gültig:

- Kanäle des Systems teilen sich auf N Zellen pro Cluster und auf K Sektoren pro Basistation auf.
- Es ergeben sich nicht sechs gleichzeitige Störer, sondern nur (6/Sektorgrad) Störer, wodurch ein verbesserter Störabstand entsteht.

Abhängig von Clustergröße und Zellradius ergibt die Kombination aus verbessertem Störabstand und dem um den Sektorgrad verkleinerten Bündel eine Erhöhung oder Verringerung der Effizienz.

---

<sup>4</sup>Die Mobilstationen benutzen isotrope Antennen

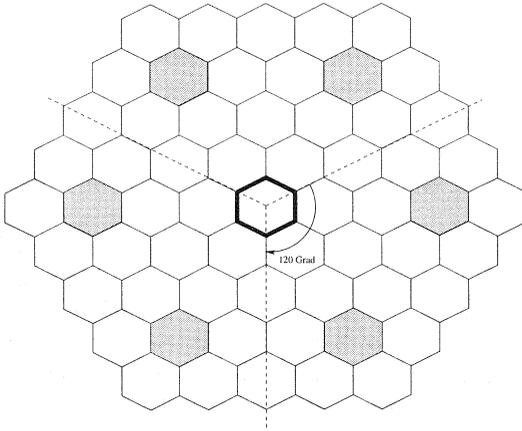


Abbildung 12.9: Reduzierung der Interferenz aufgrund von Sektorisierung

Die Aussagen lassen sich nicht unmittelbar auf DCA-Systeme und DECT übertragen, denn an jeder Feststation und in jedem Sektor sind alle Kanäle verfügbar. Die Berechnung der Störabstandverbesserung in [8] basiert auf der Annahme, daß ein bestimmter Kanal nur in einer Raumrichtung verwendet wird, wodurch sich ein fester Mindestabstand der Wiederverwendung ergibt. In einem DCA-System wird ein Kanal beliebig verteilt verwendet. Das System kann in allen Sektororientierungen Kanäle anderer Sektoren wiederverwenden, solange das C/I ausreichend ist. Daher reduziert sich die Störzahl für eine Mobilstation nicht, denn im Abstand  $R_{Int}$  existieren weiterhin sechs zur Mobilstation gerichtete Sektoren. Es gilt für die Mobilstationen aber eine geringere Blockierwahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 10.6), da nur noch der  $1/\text{Sektorgrad-te}$  Teil des an den relevanten RFPs getragenen Verkehrs als Interferenzverkehr (vgl. Kapitel 10.6) gilt, weil der Anteil der anders orientierten Sektoren lokal keinen der 120 DECT Kanäle belegt. Daraus läßt sich eine Steigerung des tragbaren Verkehrs um den Sektorisierungsgrad annehmen. Aus Sicht der Basistationen bewirkt die Sektorisierung unter diesen Annahmen nicht die in [8] angenommene Verringerung der Störzahl, denn jede Zelle im Einzugsbereich eines Sektors verfügt über  $K$  Sektoren, so daß die Häufigkeit einer Kanalwiederverwendung in dem Sektor die gleiche wie ohne Sektorsierung ist. Bezüglich der Blockierwah-

scheinlichkeit an einer RFP, entspre. Kapitel 10.6 reduziert sich der relevante Interferenzverkehr auf den Verkehr eines Sektors ohne Verringerung des Interferenzradius. Deshalb ist eine Verbesserung des tragbaren Verkehrs um den Sektorisierungsgrad anzunehmen. Da es sich in diesen Untersuchungen um reale Antennen handelt, bewirkt die Sektorüberlappung und der verbleibende Signalpegel im Rückbereich der Antennen eine Verringerung dieses Effektes.

In [25] sind Simulationsergebnisse für verschiedene DCA-Algorithmen bei  $60^\circ$  und  $120^\circ$  Sektorantennen (etwa Antennentyp 2) zusammengefasst. Es werden Verbesserungen des tragbaren Verkehrs bei  $GOS = 1\%$  durch die Sektorisierung um den Faktor 2.5 bzw 1.5 erreicht.

Bei den Simulationsuntersuchungen dieser Arbeit wurden  $120^\circ$  Sektorantennen gewählt. Kleinere Sektoren sind aufgrund der resultierenden Laufzeit des Simulators nicht durchgeführt worden. Es wurden zwei Antennentypen verwendet, eine Antenne ohne Abstrahlung in den rückwärtigen Bereich und mit geringen Überlappungen zu den benachbarten Sektoren derselben Zelle, und eine mit einer rückwärtigen Abstrahlung von  $-25$  dBi und einer stärkeren Überlappung (s. Abb. 12.10). Es ergibt sich für Antenne 1 ein Überlappungsbereich von  $11\%$  und für Antenne 2 ein Überlappungsbereich von  $25\%$ . bei der Verwendung von drei Antennen pro Feststation und einem notwendigen Setup-Pegel von  $-75.0$  dBm.

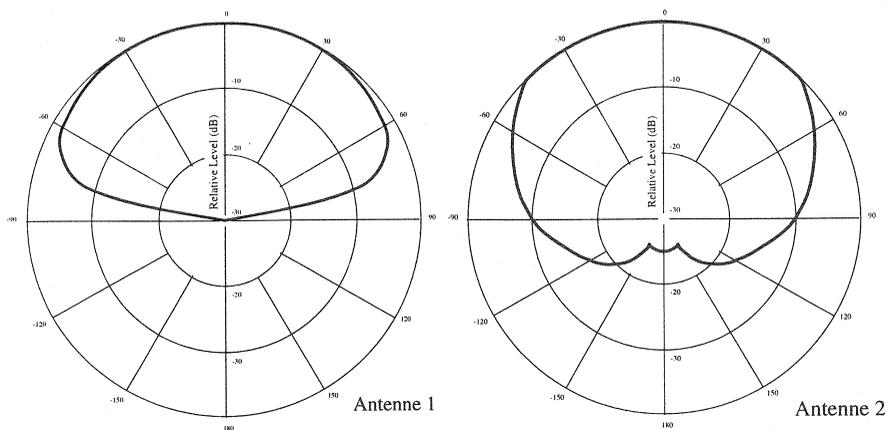


Abbildung 12.10: Die beiden verwendeten Antennentypen

Ein DECT-System mit sektorisierten Antennen an den Feststationen wird in erster Linie zur zellularen Versorgung von RLL-Systemen eingesetzt werden. Unterhalb der Dachkanten werden gerichtete Antennen im Einzelfall zur Reichweitenerhöhung der Feststationen dienen. Für eine  $120^\circ$  Sektorantenne hat sich unter Verwendung von Antennencharakteristik 2 eine Blockierwahrscheinlichkeit über dem angebotenen Verkehr ergeben, wie in Abb. 12.11 dargestellt. Zum Vergleich ist die Kurve für isotrope Antennen

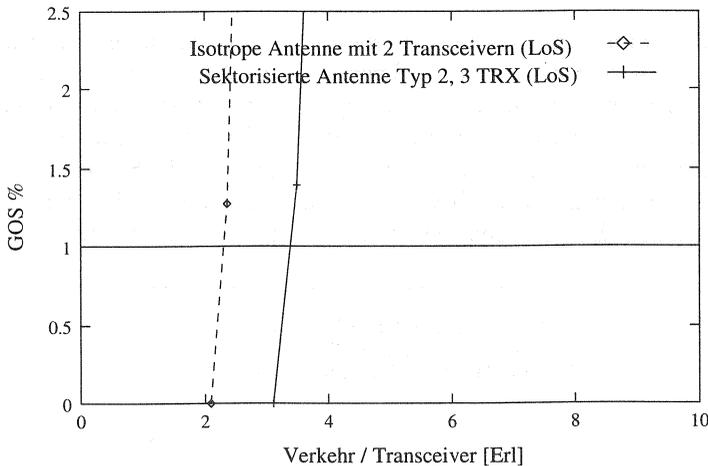


Abbildung 12.11: GOS bei isotroper und  $120^\circ$ Sektorantenne (Typ 2) bei Freiraumausbreitung

für zwei Transceiver/RFP angegeben. Für beide Fälle liegt Interferenzbegrenzung vor, da pro Transceiver die bei Kapazitätsbegrenzung möglichen Verkehre nicht erreicht werden.

Wie Tabelle 12.6 zeigt, erhält man bei Sektorantennen gegenüber isotropen Antennen einen Gewinn an tragbarem Verkehr pro RFP um den Faktor 2.25. Man muß bei diesem Ergebnis beachten, daß ein höherer Hardwareaufwand für die Beschaltung von drei Antennen anstelle von einem Transceiver bei isotropen Antennen benötigt wird. In [25] wurde gezeigt, daß eine stärkere Sektorisierung mit  $60^\circ$  Sektorantennen den tragbaren Verkehr ebenfalls noch weiter erhöht.

Antennentyp	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Isotrop	4.5	4.8
120° Sektor	10.4	10.8

Tabelle 12.6: Tragbarer Verkehr für isotrope und sektorisierte Antennen bei Freiraumausbreitung

Untersucht man den Einsatz von sektorisierten Antennen unterhalb der Dachkanten, so ergibt sich der GOS wie in Abb. 12.12 dargestellt. Es wurden Antennentyp 1 mit marginaler Überlappung der Sektoren und Antennentyp 2 mit stärkerer Überlappung verwendet. Die Resultate mit jeweils einem Transceiver pro Antenne werden mit der Kurve für ein System, bestehend aus Feststationen mit drei Transceivern und isotropen Richtcharakteristiken, verglichen. Es wird deutlich, daß die Ausstattung an Transceivern für

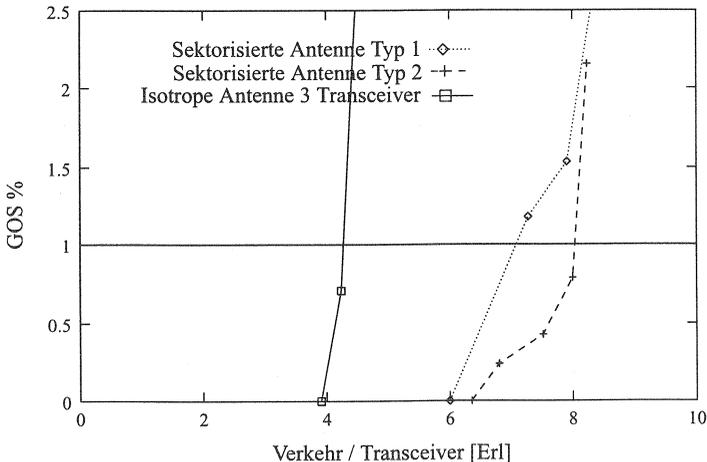


Abbildung 12.12: GOS bei isotroper und 120°Sektorantennen bei gedämpfter Ausbreitung

Interferenzbegrenzung nicht ausreicht, da der tragbare Verkehr die Ergebnisse für Interferenzbegrenzung bei Rundstrahlantennen nicht erreicht. Pro

Transceiver ist aber ein Verkehr tragbar, der über dem theoretischen Verkehr bei Kapazitätsbegrenzung von 12 Kanälen liegt. Ähnlich wie in Kapitel 12.2.1 bewirkt die Überlappung der Zellen eine entsprechende Vergrößerung des Bündels. Deutlich aber ist die Vergrößerung des tragbaren Verkehrs im Vergleich zu isotropen Antennen. Der Vergleich der beiden Antennentypen

Antennentyp	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Isotrop 3 TRX	12.3	13.1
Antenne 1	19.65	21.15
Antenne 2	22.95	24.0

Tabelle 12.7: Tragbarer Gesamtverkehr für isotrope und sektorisierte Antennen bei gedämpfter Ausbreitung

zeigt, daß bei Kapazitätsbegrenzung die größere Überlappungszone von Antenne 2 einen um 2.85 Erlang/RFP höheren Verkehr bei GOS=1% zuläßt als Antenne 1.

Betrachtet man den tragbaren Verkehr im Falle von Interferenzbegrenzung, so sind größere Überlappungen der Sektoren wie bei Antenne 2 aufgrund der daraus resultierenden stärkeren Abstrahlung von Interferenzleistung in Nachbarzellen und -sektoren nachteilig.

Zu erwähnen ist, daß im hier vorliegenden Simulationsmodell Funkkanäle in verschiedenen Sektoren einer Feststationen wiederverwendet werden konnten. Im realen Funkfeld ist dies vermutlich nicht möglich. Die Dämpfung zwischen Sektoren derselben RFP wird wegen Reflektionen und mangelnder Entkoppelung bei naher Wiederverwendung von Kanälen in den Transceivern derselben Feststation dazu nicht ausreichen. Falls es in realen Szenarien nicht möglich sein sollte, Kanäle an verschiedenen Sektoren einer Feststation mehrfach zu verwenden, wird die tragbare Kapazität pro Feststation schätzungsweise 10% - 15% niedriger liegen als hier ermittelt. Diese Abschätzung beruht auf der Untersuchung der Häufigkeit, mit der der oben genannte Fall während der Simulationen vorgekommen ist.

### 12.2.4 Tragbarer Verkehr mit gerichteten Antennen am Endgerät

Sowohl bei der Versorgung über die Dächer als auch bei der Versorgung unterhalb der Dachkanten können bei festinstallierten Teilnehmeranschlüssen Richtantennen eingesetzt werden (s. Abb. 2.3).

Sie weisen einen entsprechenden Richtgewinn auf und bewirken eine Isolierung von Störleistung und damit höheren Störabstand gegenüber ungerichteten Antennen. Gleichzeitig wird die zeitweise Nutzung anderer Feststationen unmöglich. Dadurch geht der entsprechende Bündelungsgewinn verloren. Daher erwartet man, und dies bestätigen die Ergebnisse der Simulationen, daß sich derartige Systeme näherungsweise wie isolierte Systeme verhalten und der tragbare Verkehr allein durch die Ausstattung der RFP mit Transceivern bestimmt wird (Kapazitätsbegrenzung). Deshalb wird auch das Ausbreitungsmodell den tragbaren Verkehr nicht beeinflussen, solange der notwendige Empfangspegel erreicht wird.

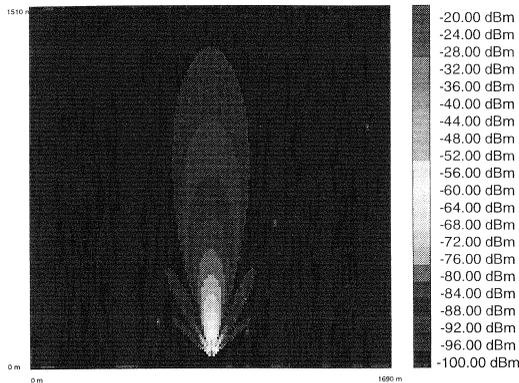


Abbildung 12.13: Verwendete Richtantenne am Teilnehmeranschluß

In der Simulation wurden die RLL-Teilnehmerstationen mit Richtantennen der nächstgelegenen Feststation zugeordnet. Intercell-Handover wurden unterbunden, während Intracell-Handover möglich waren. Abbildung 12.13

zeigt das Diagramm der verwendeten Richtantenne. Wegen des entsprechenden Antennengewinns in Hauptstrahlrichtung von 12 dB wurde eine Sendeleistung von 24 dBm verwendet und kein Antennengewinn an der Mobilstation angenommen. In Abb. 12.14 und in Tabelle 12.8 sind die Simulati-

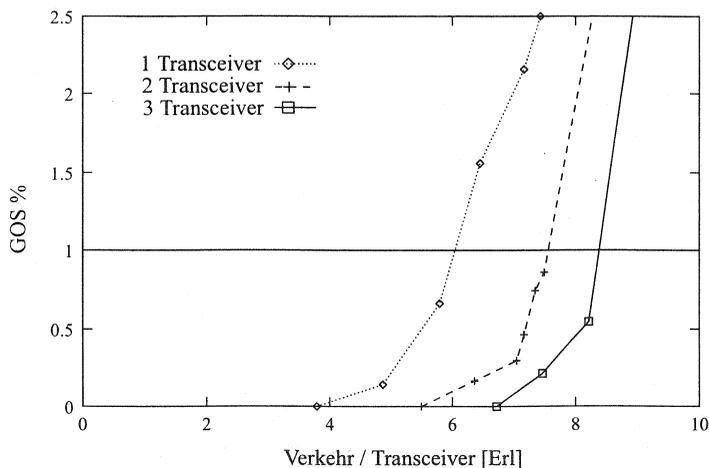


Abbildung 12.14: Simulationsergebnisse für Teilnehmer mit gerichteten Antennen

onsresultate dargestellt. Aufgrund des hohen Richtgewinns sind Interferenzerscheinungen unwirksam. Wie erwartet, verhalten sich die Systeme hier in

Transceiverzahl	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
1	5.6	6.0
2	14.4	15.3
3	24.3	25.2

Tabelle 12.8: Tragbarer Verkehr bei Einsatz von Teilnehmeranschlüssen mit gerichteten Antennen

sehr guter Näherung gemäß der Theorie. Die gerichteten Antennen bewirken eine nahezu ideale Isolierung, so daß der tragbare Verkehr ausschließlich durch Kapazitätsbegrenzung beschrieben werden kann.

In Abb. 12.15 sind zur Verdeutlichung noch einmal die Kurven für die Simulationsergebnisse der tragbaren Kapazität pro Feststation und die entsprechenden Kurven nach der Erlang-B Formel für die Kanalzahlen 12, 24, 36 und 48 aufgetragen.

Es ist also möglich, den tragbaren Verkehr durch Hinzufügen von weiteren Transceivern sehr stark zu erhöhen. Es ist jedoch zu erwarten, daß für extreme Verkehrsdichten der Einfluß der Interferenz zunehmen wird, da die Wahrscheinlichkeit von einer weiteren Feststation im Antennenkegel der Mobilstation mit der Zahl der Mobilstationen wächst. Ein weiterer negativer Einflußfaktor sind Reflektionen an Gebäuden. Es ist anzunehmen, daß trotz richtender Antennen Reflektionen von z.B. gegenüberliegende Gebäuden Interferenzen von benachbarten Feststationen empfangen werden und keine ideale Isolation eintritt. Dies konnte jedoch im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gezeigt werden.

Ein wichtiger Punkt, der in diesem Zusammenhang noch genannt werden sollte, ist die große Fläche, die man mit wenigen Feststationen aufgrund der günstigen Link Budgets versorgen kann. Bei gerichteten Antennen an den Mobiles ist für  $\gamma = 3.5$  ein Radius der Funkzellen von etwa 520 m möglich (vgl. Tab. 12.3). Falls man die Feststation zusätzlich noch mit sektorisierten Antennen ausstattet, erhöht sich die Reichweite sogar auf 880 m. Die sektorisierten Antennen haben in diesem Fall nicht mehr die Aufgabe, die Interferenzleistung zu vermindern. Bei Einsatz hochgerichteter Antennen ist für  $\gamma = 2.0$  die Reichweite nur durch die Signallaufzeit und die TDMA/TDD Rahmenstruktur des DECT-Systems begrenzt und beträgt 5000 m.

Durch den Einsatz von Richtantennen am Teilnehmeranschluß werden ökonomischen Bedingungen des Einsatzes von DECT-Systemen als WLL stark verbessert. Die deutliche Erhöhung des tragbaren Verkehrs pro Feststation bedeutet, daß meistens nicht die zu installierende Kapazität sondern eher die Funkversorgung bei der Netzplanung eine Rolle spielt. Für einen Verkehrswert<sup>5</sup> von  $200 \text{ Erl}/\text{km}^2$  ist bei 60 Erl/RFP ein Radius von 345 m notwendig. Bei einem Marktanteil von 10% steigt der Radius auf 480 m. Das bedeutet, daß nach der Installation der zur Funkversorgung notwendigen Feststationen (Reichweite max. 500 m in derartigen Ballungszonen) schon

---

<sup>5</sup>20% Marktanteil in den am dichtesten besiedelten Gebieten mit  $20000 \text{ Einw.}/\text{km}^2$

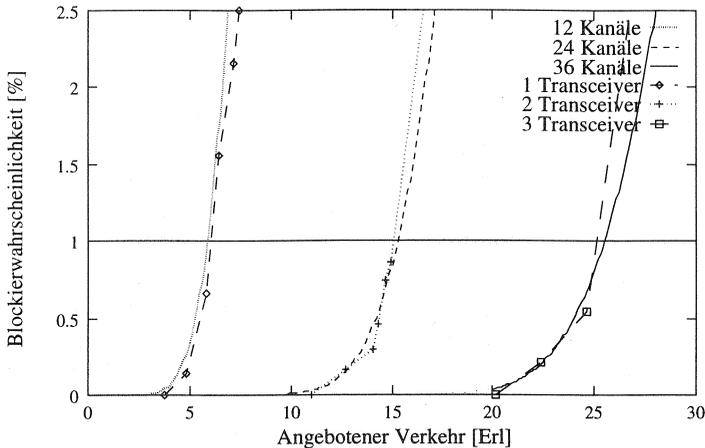


Abbildung 12.15: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den aus der Erlang-B Formel folgenden Resultate

ausreichend Verkehrskapazität für diesen Marktanteil existiert.

### 12.2.5 Tragbarer Verkehr bei anteiligem ISDN-Verkehr

Der DECT-Standard wurde mit dem Ziel entwickelt, verschiedene Datendienste wie z.B. Fax Gruppe 4 und ISDN Dienste zu unterstützen. So ist es nach den Vorgaben der *Data Services Profiles* möglich, in einer Richtung einen Übertragungsdienst mit einer maximalen Datenrate von 552 kbit/s, bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-7}$ , zu leisten. Dies entspricht 23 Simplex-Kanälen mit einer Datenrate von je 24 kbit/s. Falls höhere Fehlerraten toleriert werden, können auch noch höhere Datenraten erreicht werden. Im Laufe der folgenden Simulationen wurde das Systemverhalten bei verschiedenen Anteilen von 2B+D ISDN-Verbindungen am Gesamtverkehr untersucht. Diese arbeiten mit einer Gesamtdatenrate von 144 kbit/s (2 mal 64 kbit/s Nutzkanal + 16 kbit/s Signalisierungskanal) und belegen damit vier DECT-Duplex-Kanäle in Form von je 2 Doppel-Slot Bearern in Up- und Down-Link. Bei ISDN-Sprachverbindungen wird nur ein einfacher Duplex-Kanal gebraucht, da eine Umkodierung der Sprachinformation eingesetzt

wird. Für die Untersuchung wurden im Mittel 3 gleichzeitig erforderliche DECT Duplex-Kanäle unterstellt.

Der Aufbau einer Datenverbindung gestaltet sich um einiges komplizierter als bei einer herkömmlichen Verbindung. Zuerst wird eine Duplex-Verbindung aufgebaut, wobei die übliche Setup-Routine verwendet wird. Im Anschluß daran werden dann entsprechend dem Verbindungstyp benötigte Bearer aufgebaut. Die Informationen über die dafür jeweils am besten geeigneten Kanäle werden hierbei von der ersten Duplex-Verbindung geliefert. Falls die maximale Anzahl von Kanalwahlversuchen erreicht wird und noch nicht genügend viele Bearer belegt sind, so gilt der Verbindungsaufbau als gescheitert. Eine bereits etablierte Datenverbindung wird unterbrochen, wenn entweder der Signalisierungskanal gestört wird oder die Gesamtzahl der belegten Bearer unter die minimal benötigte fällt.

Untersucht wurde in dieser Arbeit das Systemverhalten bei Anteilen des ISDN-Verkehrs am Gesamtverkehr von 10% und 20%. Unterschieden wurde außerdem zwischen dem Fall der Verwendung isotroper Antennen und der Verwendung von gerichteten Antennen an den Mobilstationen. Es wurde nur mit dem für stark gedämpfte Funkausbreitung geltenden Ausbreitungsmodell simuliert.

Die Angaben der Verkehrswerte in diesem Kapitel beziehen sich zum besseren Verständnis nicht auf bestehende Verbindungen, sondern auf ausgelastete DECT-Kanäle (was bei reinem Sprachdienst mit der Anzahl an Verbindungen identisch ist).

### **Anteiliger ISDN-Verkehr bei Verwendung von isotropen Antennen**

In Abb. 12.16 ist die Dienstgüte über dem angebotenen Verkehr aufgetragen. Es wurden Simulationen für 10% und 20% Anteil von ISDN-Verbindungen am Gesamtverkehr durchgeführt, sowie für jeweils einen oder zwei Transceiver. Zum Vergleich wurden noch die jeweiligen Kurven für Systeme ohne ISDN-Verkehr eingezeichnet. Wie aus Abb. 12.16 und Tabelle 12.9 hervorgeht, verliert ein DECT-System bei auftretendem ISDN-Verkehr durch die größere Anzahl von Bearern pro Verbindung an verfügbarer Kapazität. Bei 10 % ISDN-Verkehr und einem bzw. zwei Transceivern liegt dieser Verlust bei etwa 13 %. Erhöht man den ISDN-Anteil auf 20 %, so tritt jeweils jeweils in etwa 21 % Kapazitätsverlust ein.

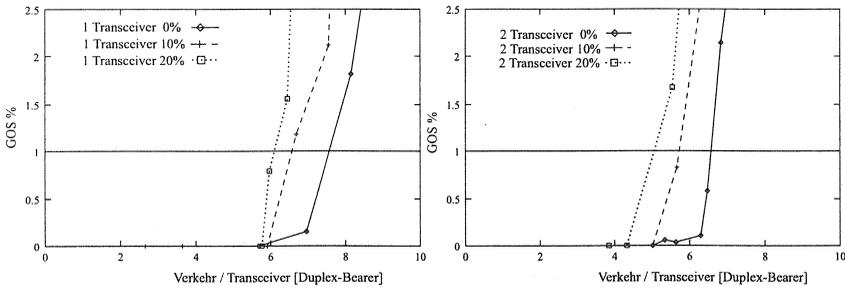


Abbildung 12.16: Simulationsergebnisse für anteiligen ISDN-Verkehr und isotropen Antennen

Anteil des ISDN-Verkehrs	Transceiverzahl	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
0%	1	7.2	7.56
0%	2	12.3	13.1
10%	1	6.25	6.6
10%	2	10.9	11.6
20%	1	5.9	6.1
20%	2	9.30	10.1

Tabelle 12.9: Tragbarer Verkehr bei anteiligem ISDN-Verkehr und isotropen Antennen

### Anteiliger ISDN-Verkehr bei Verwendung von gerichteten Antennen

Diese Untersuchung behandelt den Fall, daß feste Hausanschlüsse durch gerichtete Antennen auf eine bestimmte Feststation ausgerichtet sind. Dieser Fall wurde analytisch in Kapitel 10.4 modelliert. Es handelt sich demnach wiederum um durch Antennen isolierte Feststationen, so daß Kapazitätsbegrenzung auftritt. Mehrkanaliger Verkehr ist deshalb besonders nachteilig, da nur 12 bzw. 24 Kanäle zur Verfügung stehen, ein Intercell-Handover zu einer anderen Feststation ist für diese Anordnung nicht möglich und gleichzeitig mehrere Kanäle unbesetzt sein müssen.

In Abb. 12.17 und Tabelle 12.10 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Bei

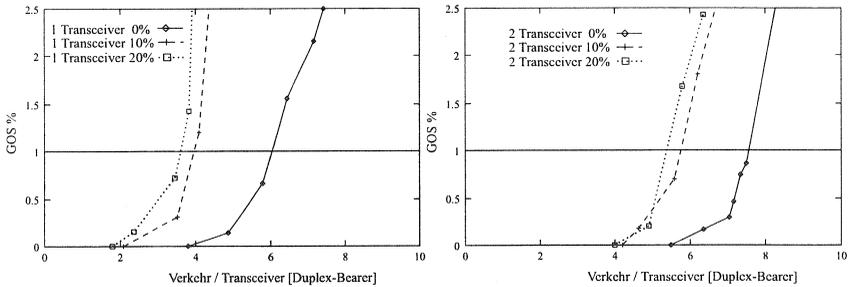


Abbildung 12.17: Simulationsergebnisse für anteiligen ISDN-Verkehr und gerichtete Antennen

der Auswertung der Ergebnisse fällt vor allem der Abfall der Systemkapazität bei anteiligem ISDN-Verkehr um 35 % bei zwei bzw. um 39 % bei einem Transceiver auf. Es kann durch die Kapazitätsbegrenzung lediglich eine ISDN-Verbindung pro Feststation unterstützt werden. Bei zwei Transceivern fällt der Abfall der tragbaren Kapazität mit 25 %, bzw. 30 % schon weniger stark aus, da in diesem Fall mehrere ISDN-Verbindungen pro RFP aufgebaut werden können. In Abb. 12.18 wurde der in den Simulationen

Anteil des ISDN-Verkehrs	Transceiverzahl	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
0%	1	5.6	6.0
0%	2	14.4	15.3
10%	1	3.7	3.9
10%	2	10.4	11.5
20%	1	3.0	3.7
20%	2	10.1	10.7

Tabelle 12.10: Tragbarer Verkehr bei anteiligem ISDN-Verkehr und gerichteten Antennen

tragbare Verkehr für einen Transceiver und 10%, bzw. 20% ISDN-Anteil bei Verwendung gerichteter Antennen mit den Vorhersagen aus Kapitel 10.4 für multidimensionalen Verkehr bei isolierter RFP verglichen. Man erkennt hier

wieder die sehr gute Übereinstimmung der analytischen Vorhersagen mit den Ergebnissen der Simulationen, die zur Validierung der Modelle dient. Bei Verwendung gerichteter Antennen ist der Verlust von Kapazität infolge

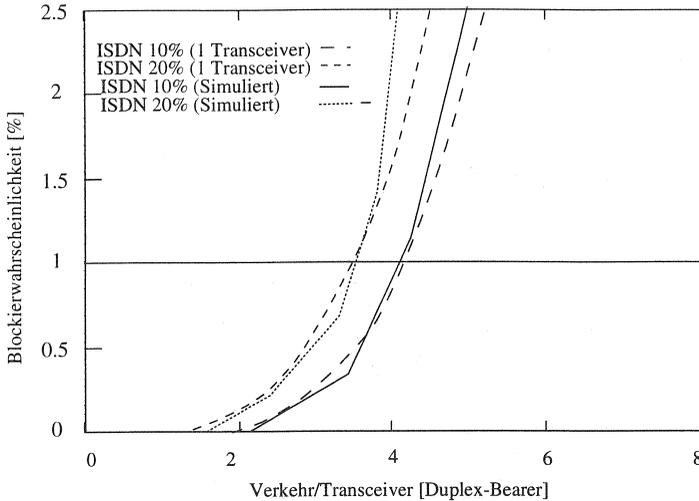


Abbildung 12.18: Vergleich der Simulationsergebnisse für anteiligen ISDN-Verkehr mit der verkehrstheoretischen Berechnung

von ISDN Verbindungen somit eher akzeptabel, da man in der Lage ist, den tragbaren Verkehr durch zusätzliche Transceiver zu steigern.

### 12.2.6 Auswirkungen verschiedener Empfängermodelle

Die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse sollen Aussagen ermöglichen, wie sich die tragbaren Verkehre von DECT-Systemen verändern, wenn unterschiedliche Empfängertechnologien eingesetzt werden oder der Funkkanal durch Signalspreizung einen erhöhten Störabstand erfordert.

Die Relevanz dieser Fragestellung ergibt sich aus Untersuchungen in realen Szenarien. In Abb. 12.19 ist ein Bereiche eines DECT-Netzes abgebildet, in dem örtlich begrenzt Empfangsprobleme festgestellt wurden, die nicht durch zu geringe Empfangsleistung zu erklären sind. Mit dem Ray-Tracing-Tool (s. Kapitel 7) wurden für diesen Bereich das Maß der Signal-Spreizung

(*Delay Spread*) bestimmt. Es übersteigt teilweise den für DECT-Empfänger kritischen Wert von 90 ns. Im Falle derartiger Kanaleigenschaften kann das verwendete Bitfehlermodell für kohärentes FSK nicht uneingeschränkt verwendet werden. Deshalb wurde eine Untersuchung mit dem in Kapitel 8.1.1 vorgestellten Bitfehlermodell nach Elnoubi durchgeführt, welches einen wesentlich höheren Störabstand (ca. 30 dB) für eine Bitfehlerrate von  $10^{-3}$  benötigt.

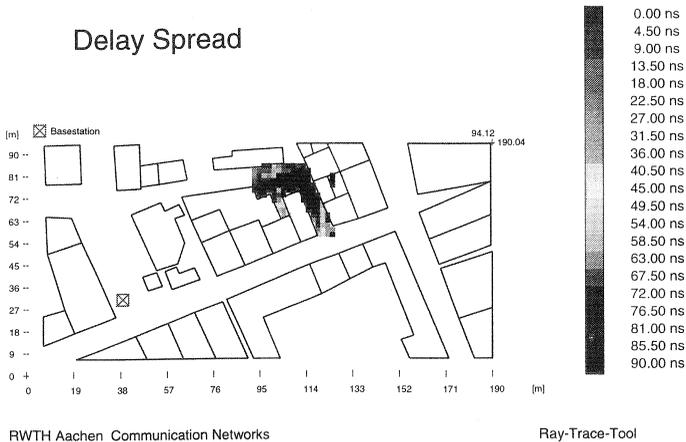


Abbildung 12.19: Bestimmung des Delay-Spread im DECT-Netz Gelsenkirchen

Neben dieser Untersuchung sollten Simulationen mit vereinfachten Algorithmen und Empfängermodellen eine bessere Einordnung der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel ermöglichen.

Wie in Kapitel 8 dargestellt, wird im DESI die Signalqualität am Empfänger bestimmt, indem anhand des empfangenen C/I Verhältnisses mittels des jeweils verwendeten Bitfehlermodells CRC-Fehler berechnet werden. Diese Fehler werden in Ringspeichern verwaltet. Anhand der eingetragenen Fehler in diesen Ringspeichern wird dann entsprechend dem Handover-Algorithmus eine Qualitätsbewertung der Verbindung vorgenommen. Kurze Schwankungen in der Qualität werden dabei durch Mittelwertbildung herausgefiltert. Daneben können konkrete "notwendige C/I" Werte für die Kanalwahl- und Handoverentscheidung verwendet werden. In diesem Fall entscheidet nur

der aktuelle Störabstand über Handover und Kanalwahl. In dieser Arbeit wurden so neben der detaillierten Modellierung die absoluten C/I-Werte 11 dB, 15 dB und 21 dB verwendet.

In Tabelle 12.11 und Abb. 12.20 sind die Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Einstellungen mit den genannten Bitfehlermodellen und den C/I-Grenzen von 11 dB, 15 dB und 21 dB im gleichen Szenario dargestellt<sup>6</sup>. Für diese Untersuchungen wurde das Pfadverlustmodell nicht variiert. Es handelt sich um das ETSI Pfadverlustmodell mit  $\gamma = 3.5$ . Die Ergebnisse

Bitfehlermodell	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Inkohärente FSK	12.3	13.1
Elnoubi	4.20	4.80
C/I 11 dB	17.5	18.1
C/I 15 dB	10.8	11.4
C/I 21 dB	7.20	7.35

Tabelle 12.11: Tragbarer Verkehr für verschiedene Bitfehlermodelle

lassen einige sehr wesentliche Schlüsse zu. Der tragbare Verkehr hängt, wie auch schon bei der verkehrstheoretischen Betrachtung dieser Fragestellung festgestellt, sehr stark von dem notwendigen Störabstand des Empfängers ab. Deutlich wird, wie stark bei stark gestörtem Kanal, modelliert durch die Verwendung des Elnoubi Bitfehlermodells, der tragbare Verkehr sinkt. Allerdings muß dazu angeführt werden, daß hier angenommen wurde, es gelte überall dieser notwendige Störabstand aufgrund von zu hohem Delay-Spread, das aber in realen Systeme (s. Abb. 12.19) nur örtlich begrenzt auftritt.

Wie man aus den Kurven entnehmen kann, entspricht die hier durchgeführte detaillierte Modellierung des Kanalwahl- und Handover- Algorithmus bei Verwendung des Bitfehlermodells für kohärentes FSK etwa einem verwendeten festen Störabstand des einfachen Algorithmus von 14 dB.

Die Ergebnisse dieses Kapitels können als Validierung der theoretischen Voraussagen aus Kapitel 10.6 genutzt werden. In Abb. 12.21 werden die ana-

<sup>6</sup>zur Vermeidung von Kapazitätsbeschränkung wurden bei C/I = 11dB 6 Transceiver eingesetzt

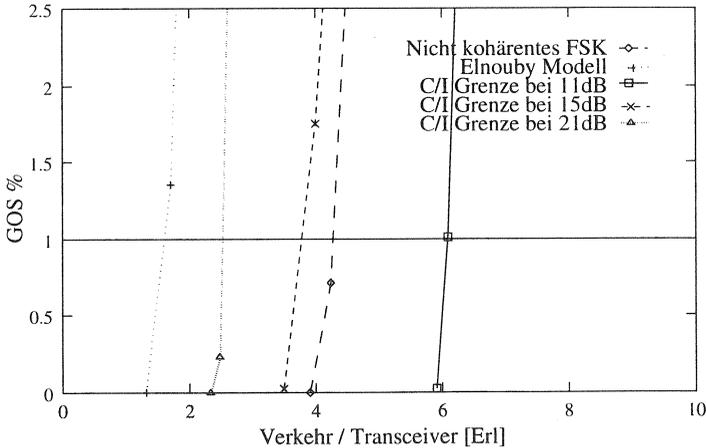


Abbildung 12.20: Tragbarer Verkehr für verschiedenen Bitfehlermodelle (jeweils 3 bzw. 6 Transceiver)

lytischen Ergebnisse mit den simulativ bestimmten Ergebnissen verglichen.

Störabstand	Analytisches Ergebnis	Ergebnis der Simulation
C/I 11 dB	18.5	18.1
C/I 15 dB	11.3	11.4
C/I 21 dB	5.01	7.35

Tabelle 12.12: Vergleich des tragbarer Verkehrs (Erl/RFP) als Ergebnis der Simulationen bzw. der analytischen Vorhersagen

Der Vergleich (Tabelle 12.12) zeigt die ausgezeichnete Übereinstimmung der analytisch und simulativ ermittelten Ergebnisse für 11 dB und 15 dB. Für größere C/I = 21 dB reicht die verwendete Szenariogröße nicht aus, denn der Interferenzkreis ist bei 21 dB zu groß. Die entsprechenden Ergebnisse der Simulation sind zu optimistisch.

Diese Ergebnisse ermöglichen es, Aussagen über das Systemverhalten bei unterschiedlich guten DECT-Empfängern oder Algorithmen der Kanal-

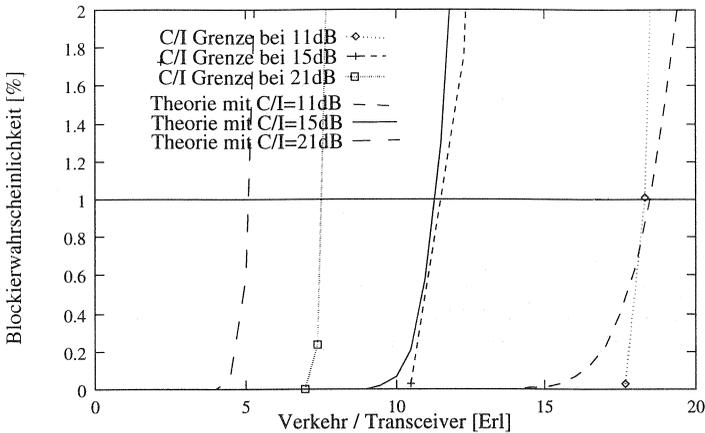


Abbildung 12.21: Vergleich der Simulationsergebnisse mit analytischen Vorhersagen

wahl/Handover zu treffen. In Kapitel 13.2.4 werden die Auswirkungen von unterschiedlichen Systemeigenschaften auf das Verhalten konkurrierender Systeme untersucht.

### 12.3 Untersuchungen mit konkreter Morphostruktur

Untersuchungen in konkreten Szenarien sollen hier mit Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen an Szenarien ohne Morphostruktur verglichen werden.

Die Untersuchung eines konkreten Szenarios lässt naturgemäß keine allgemeingültigen Aussagen zu. Es können deswegen nur einzelne RFPs und deren Verhalten betrachtet werden. Als Szenario wurde die Struktur nach Abb. 12.22 entwickelt. Es wurde versucht, eine Straßen/Häuser-Anordnung zu "erschaffen", welche einer typischen deutschen Großstadt ähnlich ist (sofern dies allgemein überhaupt möglich ist). Dabei wurden auch verschiedene Innenstadtszenarien eingebaut (offener Platz, lange Straßen mit Sichtverbindung, usw.).

Anders als in den Untersuchungen ohne detaillierte Morphostruktur berücksichtigt hier das Kanalmodell die LOS- und NLOS-Bedingungen in den Stra-

benützen, vgl. Abschnitt 12.2.1 z.B. Abb. 12.4. Dies bedeutet, daß Bereiche, in denen Mobilstationen mehrere RFPs "sehen", keine gleichen Kanäle benutzen dürfen. Andererseits können durch eine Häuserfront zwei räumlich nahe beieinander liegende RFPs so weit entkoppelt werden, daß eine Wiederholung des gleichen Kanales in unmittelbarer Nähe möglich ist.

Dieses Szenario beinhaltet somit die verschiedenen Grenzfälle, die in den vorherigen Abschnitten angesprochen wurden. Untersuchungen wurden mit 18 und 36 RFPs durchgeführt (Abb. 12.23, Abb. 12.24 und Abb. 12.25). Die beiden verschiedenen Untersuchungen mit 36 RFPs demonstrieren die Bedeutung der Wahl der Standorte für RFPs und die damit verbundenen Konsequenzen für mehrere Betreiber.

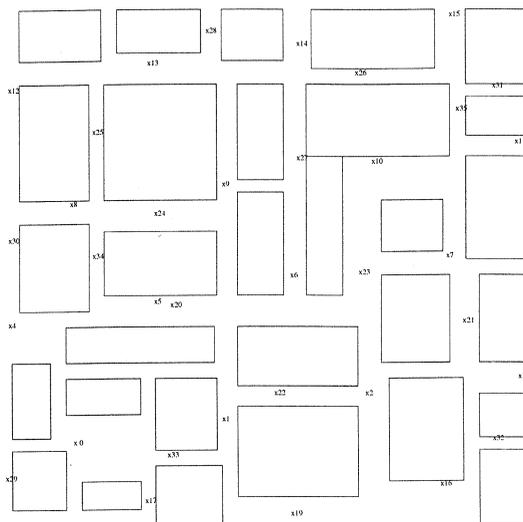


Abbildung 12.22: Innenstadtszenario mit konkreter Morphostruktur  
(hier mit 36 günstig positionierten RFPs)

Die simulative Untersuchung der Straße mit RFP 13 (links oben Abb. 12.22) ergibt, daß bei 18 Feststationen im Szenario (Abb. 12.23) bei RFP 13 ein GOS von 1% bei ca. 7 Erlang tragbarem Verkehr erreicht wird. Bei Ausleuchtung desselben Szenarios mit 36 RFPs (Abb. 12.24) kann dagegen bei

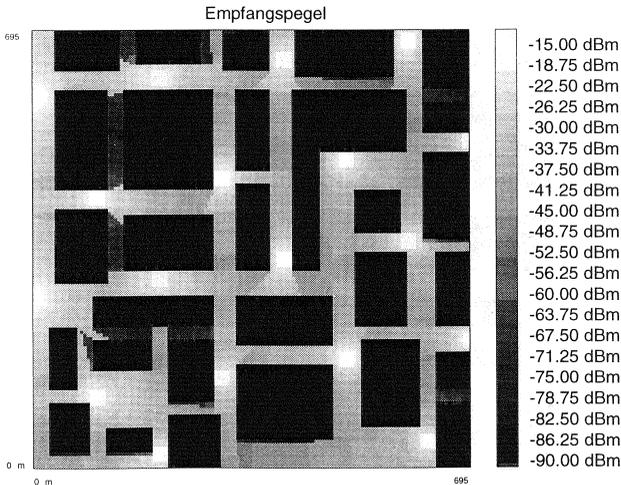


Abbildung 12.23: Ausleuchtung mit konkreter Morphostruktur und 18 RFP

GOS=1% ein von RFP 13 ein Verkehr von knapp über 10 Erlang getragen werden. Dieses Resultat entspricht in seiner Tendenz dem der beiden Untersuchungen mit fester Zuordnung eines PP zu einem RFP, bzw. einer freien Wahl von RFPs was einer Auflösung der Kapazitätsbeschränkung entspricht. Bei der Ausleuchtung mit 18 RFPs kann durch starke Entkoppelung der einzelnen RFPs durch Gebäude im Versorgungsbereich von RFP 13 nur dieser RFP erreicht werden (entspricht fester Zuordnung), bei 36 RFPs können dagegen durch überlappende Versorgungsbereiche mehrere RFPs den gleichen Bereich versorgen (entspricht freier Wahl).

Weiterhin wurde in diesem Szenario versucht, die maximalen Grenzen durch Kapazität- und Interferenzbegrenzung zu bestimmen. Interessant ist dies für den isolierten Platz mit der zentralen Feststation 0 (s. Abb. 12.22 links unten). Die Ergebnisse zeigen, daß der einzelne RFP über 50 Erlang Verkehr tragen kann ohne die Nachbar-RFPs zu stören. Dies beweist, daß die isolierte Untersuchung des *Hot-Spots* berechtigt ist, vgl. Abschn. 14.

Für die Kapazitätsgrenzen von Bedeutung ist die Plazierung der RFPs. Daher wurden Untersuchungen mit den beiden 36-RFP Szenarien durchgeführt. Die unterschiedlichen Strategien zur Plazierung von RFPs bestanden darin, entweder die RFPs

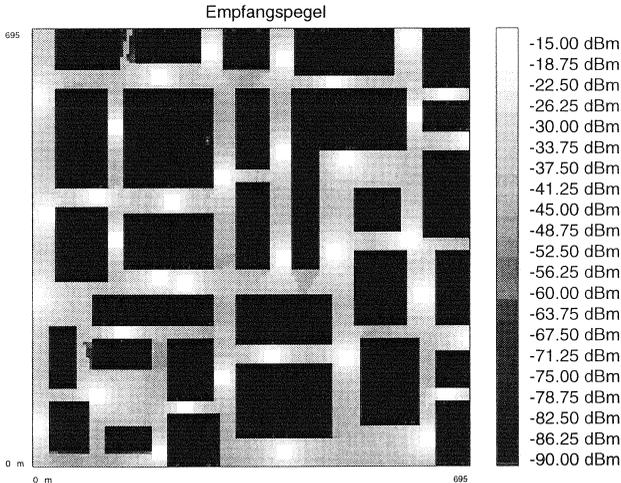


Abbildung 12.24: Ausleuchtung mit konkreter Morphostruktur und 36 RFP (günstige Position der RFPs)

- auf den Kreuzungen zu platzieren und damit einen möglichst großen Bereich mit einem RFP abzudecken, oder
- in den Straßen zu platzieren und damit die Interferenzleistung zu reduzieren.

Die unterschiedliche Ausleuchtung der beiden Szenarien (Abb. 12.24 und Abb. 12.25) wird besonders deutlich an der zweiten, vertikal von rechts verlaufenden Straße. Diese Straße wurde deswegen speziell auf die Kapazitätsgrenze des DECT-Systems untersucht. Es zeigt sich, daß die unterschiedlichen Strategien der RFP-Aufstellung interferenzbedingt zu unterschiedlichen Kapazitätsgrenzen führen. Im Fall der ungünstiger platzierten RFPs kann ca. 15% weniger Verkehr getragen werden. Dies liegt daran, daß die RFPs mehr LOS-Verbindungen haben, weswegen bei einem geringeren Verkehrswert pro RFP die Interferenzbegrenzung einsetzt.

Dies weist deutlich auf ein Problem hin, das mehrere Betreiber am gleichen Ort haben werden. Jeder Betreiber kann die Platzierung seiner RFPs nach eigenen Strategien ändern. Dies kann ihm auch kaum untersagt werden. Mehrere Betreiber müßten jedoch schon während der Planungsphase kooperieren, um gemeinsam eine möglichst hohe Kapazität vor Ort zu errei-

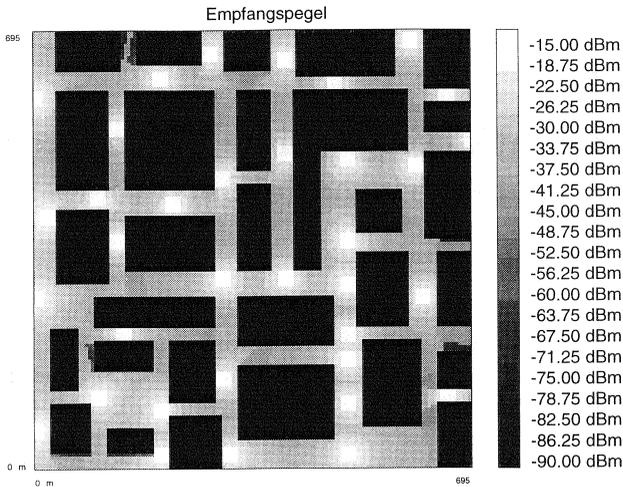


Abbildung 12.25: Ausleuchtung mit konkreter Morphostruktur und 36 RFP (ungünstigere Position der RFPs)

chen. Auf jede Änderung der Positionen der RFPs müssten also alle Betreiber gemeinsam reagieren, damit keine Kapazität verschwendet wird. Dies kann aber dadurch schon sehr schwierig werden, daß unterschiedliche Betreiber verschiedene Versorgungsgrade anstreben könnten und deshalb verschiedene Ausbaustrategien verfolgen.

# Simulationsergebnisse für mehrere konkurrierende Betreiber

Schon in [62] wurde auf eine mögliche Beeinträchtigung des tragbaren Verkehrs hingewiesen, für den Fall, daß mehrere Betreiber das gleiche Gebiet mit DECT-Technologie versorgen. Außerdem wurden Szenarien entwickelt, die eine massive Beeinflussung der konkurrierenden Betreiber untereinander zeigen. In dieser Arbeit werden wesentliche Punkte dieser Überlegungen aufgegriffen und durch Simulationen in geeigneten Szenarien untersucht. Für die Einstellungen und Parameter des Simulators gelten die Annahmen aus Kapitel 12. Es wurde das ETSI-Pfadverlustmodell mit  $\gamma = 3.5$  verwendet. Die Einstellungen von Sendeleistung und Antennengewinn sind entsprechend den Angaben im Kapitel 12.1.1 so vorgenommen, daß auf den Zellgrenzen ein Empfangspegel von -65 dBm und in den Ecken zwischen den Zellen ein Pegel von -75 dBm herrscht. Es wurden jeweils drei Transceiver pro RFP verwendet, um möglichst nur Kapazitätsaussagen über interferenzbegrenzte Szenarien zu treffen. Die verwendeten Szenariengrößen entsprechen nicht der für absolute Kapazitätsaussagen für unbegrenzte Systeme notwendigen Ausdehnung (s. Kapitel 12.1.3). Die auftretenden Randeffekte sind identisch, so daß die gemachten Aussagen nur einen relativen Vergleich der Systeme untereinander erlauben. Allerdings sind reale Systeme üblicherweise ebenfalls lokal begrenzt, so daß die Aussagen unter Umständen zutreffen können.

### 13.1 Simulationsszenarien

Im Rahmen dieser Arbeit sind Untersuchungen in den folgenden Szenarien durchgeführt worden:

1. Szenario mit versetzt positionierten Feststationen.
2. Szenario mit co-positionierten Feststationen.

3. Szenario mit unterschiedlichen Dichten der Feststationen pro Betreiber.
4. Ausgewähltes Szenario aus dem Innenstadtbereich mit hoher Verkehrsbelastung, unter anderem auch von privaten DECT-Installationen (*Hot-Spot*).
5. Beeinflussung von zwei konkurrierenden DECT-Systemen auf 2 Etagen eines Gebäudes

### 13.1.1 Szenario mit versetzt positionierten Feststationen

Dieses Szenario dient dazu, Aussagen über die zu erwartende Dienstgüte und Begrenzungen der Kapazität für den Fall zu machen, daß zwei konkurrierende öffentliche Betreiber das gleiche Versorgungsgebiet abdecken sollen, ihre Feststationen aber nicht an den gleichen Orten aufstellen können. Als Versorgungsgebiet wurde ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 1360 m, also mit einer Grundfläche von  $1.85 \text{ km}^2$  gewählt. System 1 besteht aus 25 RFPs im regelmäßigen Abstand von 340 m (Zellradius 170 m). In Abb. 13.1 ist die genaue Anordnung der RFPs dargestellt. In den nachfolgenden

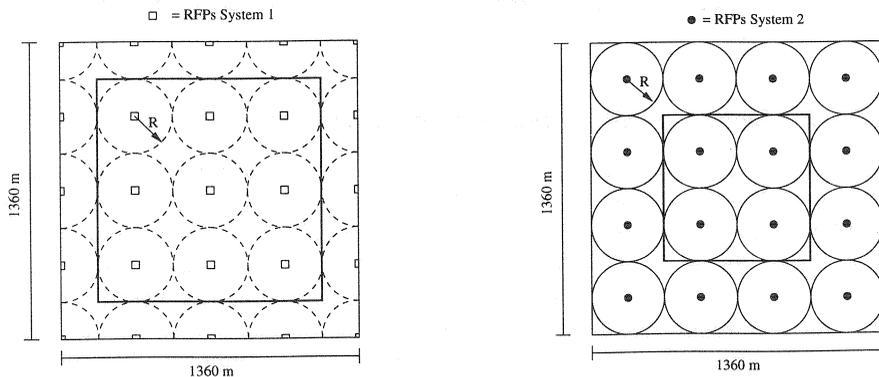


Abbildung 13.1: Versetzt angeordnete Feststationen - System 1 bzw. System 2

den Simulationen in diesem Szenario wurden nur die umrandeten mittleren neun Feststationen für die Auswertungen herangezogen. Damit sollen die Einflüsse von nicht kalkulierbaren Randeffekten in den Auswertungen verringert werden. System 2 besteht aus 16 RFPs, ebenfalls in einem Abstand

von 340 m. In System 2 wurden nur die vier umrahmten Feststationen für die Auswertung berücksichtigt. Abb. 13.2 zeigt die beiden versetzt positionierten, konkurrierenden Systeme in einem Bild. Daran soll die Überlappung der Funkausleuchtungen der einzelnen Systeme verdeutlicht werden.

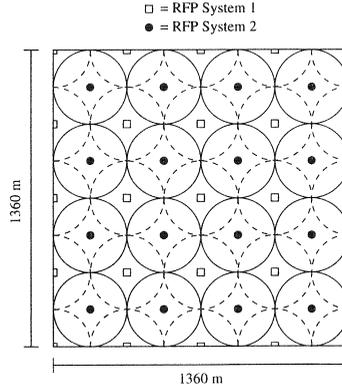


Abbildung 13.2: Versetzt angeordnete Feststationen beider Systeme

### 13.1.2 Szenario mit co-positionierten Feststationen

In diesem Szenario können beide Betreiber, im Gegensatz zum vorherigen Szenario ihre Feststationen an denselben Orten aufstellen. Als Versorgungsgebiet wurde wieder ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 1360 m und 1.85 km<sup>2</sup> Grundfläche gewählt. System 1 und 2 enthalten jeweils 25 Feststationen im Abstand von 340 m. Abb. 13.3 zeigt die Anordnung der Feststationen. In den in diesem Szenario durchgeführten Simulationen wurden die inneren neun umrahmten Feststationen des jeweiligen Systems zur Auswertung herangezogen.

### 13.1.3 Szenario mit unterschiedlichen RFP-Dichten pro Betreiber

Durch Untersuchungen mit unterschiedlichen Dichten an RFPs sollen Wechselwirkungen zweier Betreiber analysiert werden, die unterschiedliche Benutzerdichten versorgen müssen. Das Szenario tritt auch ein, wenn in einem

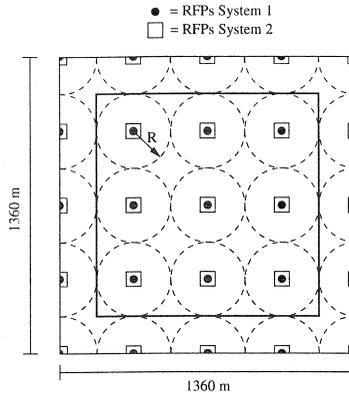


Abbildung 13.3: Co-positionierte Feststationen - System 1 und 2

schon versorgten Gebiet ein zweiter neuer Betreiber aktiv wird und mit einer geringeren Dichte an RFPs startet. Das Versorgungsgebiet besteht aus einem Quadrat mit der Kantenlänge von 2040 m und einer Grundfläche von  $4.16 \text{ km}^2$  (Abb. 13.5). Das System 1 repräsentiert in diesem Szenario das System mit der höheren Dichte an Feststationen, insgesamt 36. Der Abstand zwischen den einzelnen RFPs beträgt 340 m. In Abb. 13.1.3 werden links die Positionen der Feststationen mit ihrem Zellradius  $R_1$  dargestellt. In Simulationen mit diesem Szenario wurden die umrandeten sechzehn Feststationen zur Auswertung herangezogen. Das System 2 repräsentiert das System mit der niedrigeren RFP-Dichte. Es enthält 16 Feststationen, die im Abstand von 680 m aufgestellt wurden. Abb. 13.1.3 zeigt rechts die Anordnung der RFPs. Die vier mittleren eingerahmten Feststationen wurden bei der Auswertung der Simulationen berücksichtigt. Anhand der Abb. 13.5 wird deutlich, daß eine RFP des Systems 2 fast die gleiche Fläche ausleuchtet, wie vier RFPs des Systems 1.

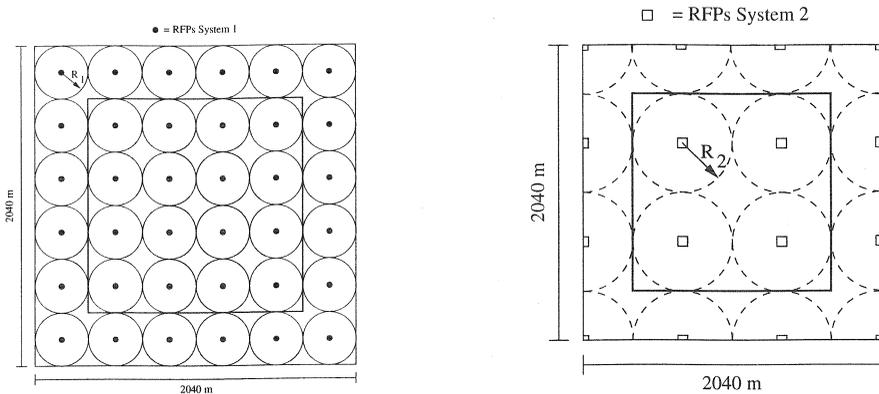


Abbildung 13.4: Unterschiedliche Feststationsdichte - System 1 bzw. System 2

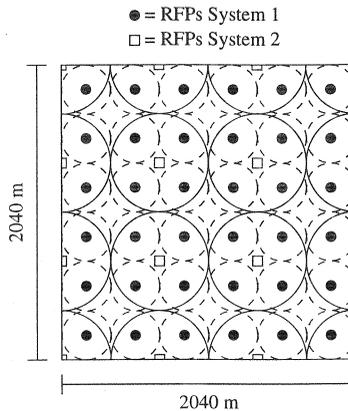


Abbildung 13.5: Unterschiedliche Feststationsdichte - Beide Systeme

## 13.2 Simulationsergebnisse für synchron konkurrierende Systeme

### 13.2.1 Tragbarer Verkehr bei einem und zwei Betreibern

Um abschätzen zu können, wie stark die Beeinträchtigungen durch zwei konkurrierende Betreiber im gleichen Versorgungsgebiet sind, wurde eine Simu-

lationsreihe mit einem System durchgeführt, wobei die 41 Feststationen der zwei versetzt angeordneten konkurrierenden Betreiber einem System zugeordnet wurden. Wie aus Abb. 13.6 und Tabelle 13.1 ersichtlich ist, scheint

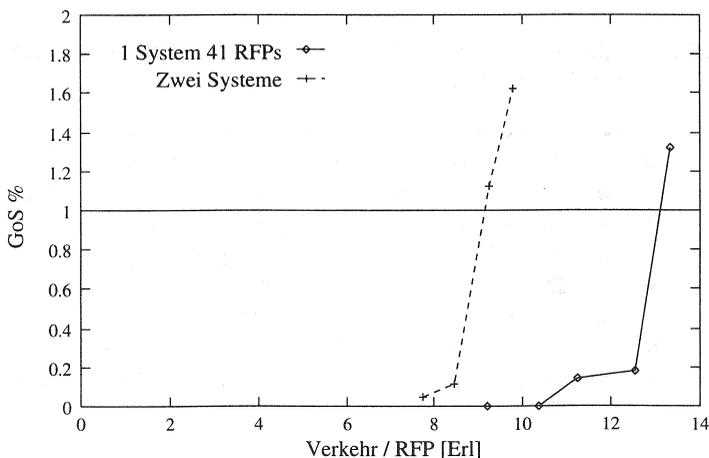


Abbildung 13.6: Vergleich von einem und zwei versetzt angeordneten Systemen im gleichen Versorgungsgebiet (s. Abb. 13.1)

der Einfluß auf den tragbaren Verkehr durch zwei Systeme ganz erheblich zu sein. Bei einem GOS von 1% ist 30% weniger Verkehr bei zwei Systemen tragbar, als bei nur einem einzelnen System. Dieses Ergebnis kann dadurch erklärt werden, daß im Fall des einzelnen Betreibers die Dichte der Feststationen höher ist, als wenn diese Feststationen auf zwei Systeme aufgeteilt würden. Es verringert sich der Abstand zum nächsten RFP des eigenen Systems von 340 m auf 240 m. Wie schon in Abschnitt 5.2.5 erläutert, ist ein erfolgreicher Verbindungsaufbau zu einer näher an der Mobilstation liegenden Feststation wahrscheinlicher, da durch den höheren Empfangspegel ein besseres C/I wahrscheinlicher ist. Um zu verdeutlichen, wieso es zur Verschlechterung kommt, sind in Abb. 13.7 die Orte der fehlgeschlagenen Verbindungsaufbauversuche dargestellt. Im linken Bild der Abb. 13.7 sind die fehlgeschlagenen Setup-Versuche für den Fall nur eines Betreibers und im rechten Bild die Setup-Fehler für den Fall der zwei konkurrierenden Be-

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Ein System	12.76	13.11
Zwei Systeme	8.75	9.14

Tabelle 13.1: Tragbarer Verkehr/RFP bei einem System und bei versetzt angeordneten Feststationen zweier Systeme

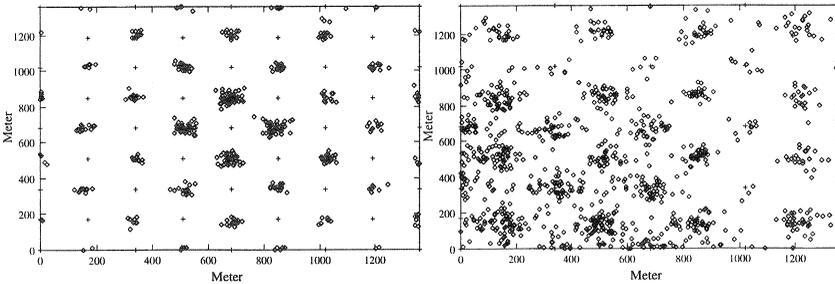


Abbildung 13.7: Orte fehlgeschlagener Setup-Versuche  
(links: 1 Betreiber, rechts: 2 Betreiber)

treiber dargestellt. Die Positionen der Feststationen werden in den Bildern durch kleine Kreuze symbolisiert.

Im linken Bild ist deutlich zu erkennen, daß die Orte der fehlgeschlagenen Verbindungsaufbauversuche gehäuft in der Mitte zwischen vier umliegenden RFPs auftreten. An dieser Stelle ist außerdem die Störleistung von den umliegenden RFPs am größten und die Empfangsleistung am geringsten, d.h. das System ist dort interferenzbegrenzt. Im rechten Bild erkennt man, daß die blockierten Rufe gehäuft um die Positionen der Feststationen herum vorkommen. Für zwei konkurrierende Systeme sind die Positionen der Konkurrenz-Feststationen die Orte mit der höchsten Interferenzbelastung und weitesten Entfernung zur eigenen RFP. Jede RFP des Systems 1 ist von vier RFPs des Systems 2 umgeben (s. Abb. 13.2), d.h. für eine Mobilstation des Systems 2 kann dort mit dem schlechtesten C/I-Verhältnis, schon durch das eigene System bedingt, gerechnet werden. Hinzu kommt noch, daß Kanäle, die von der dort positionierten Feststation des Systems 1

belegt sind, aufgrund der hohen Sendeleistung in deren nächster Umgebung, für das System 2 blockiert sind.

Aus diesen Ergebnissen läßt sich ableiten, daß es selbst bei gleicher Dichte der Feststationen durch die gegenseitige Beeinflussung zu Kapazitätseinbußen im Vergleich zum Betrieb eines Systems kommt.

### 13.2.2 Beschränkung der zulässigen Frequenzen bei konkurrierendem Betrieb

Eine Möglichkeit, die beschriebenen Effekte einzudämmen, wäre eine Trennung konkurrierender Betreiber durch geeignete Frequenzzuweisungen. In den hier durchgeführten Simulationen wurden die Frequenzen wie folgt zugewiesen:

- Beide Systeme nutzen 7 von 10 Trägerfrequenzen
- Die Systeme nutzen von den 7 Frequenzen jeweils 3 Frequenzen exklusiv

Dadurch, daß drei Frequenzen von den jeweiligen Systemen exklusiv genutzt werden, beide Systeme aber insgesamt nur 7 Frequenzen nutzen dürfen, wird auch in diesen Simulationen das komplette DECT-Frequenzband genutzt. Beide System nutzen die Frequenzen 0 bis 3 gemeinsam, während System 1 die Frequenzen 4 bis 6 exklusiv nutzt und System 2 die Frequenzen 7 bis 9 exklusiv belegen darf. Abb. 13.8 und Tabelle 13.2 zeigen die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Untersuchungen von zwei konkurrierenden Systemen, die alle 10 Frequenzen nutzen. Da für jedes der beiden Systeme im beschränkten Fall nur noch 84 der insgesamt 120 Kanäle zur Verfügung stehen, kann damit gerechnet werden, daß auch der tragbare Verkehr erheblich reduziert wird. Ein isolierter RFP kann bei 120 Kanälen 103 Erlang bei 1% GOS tragen, während er bei 84 Kanälen nur 69 Erlang tragen kann. Dagegen ergibt sich bei einer Dienstgüte von 1% GOS bei den frequenzbeschränkten Systemen ein Verkehr pro RFP von 8 Erlang, also eine Kapazitätseinbuße von 12.5%. Der geringe Einbruch läßt sich durch die 3 exklusiv genutzten Frequenzen erklären. Auf diesen Frequenzen können Interferenzen nur durch das eigene System entstehen und nicht durch das konkurrierende. Das bedeutet, daß diese 36 Kanäle nur durch das eigene System interferenzbegrenzt sind und nicht durch das andere System blockiert werden können. Die Dienstgüte der 36 exklusiv nutzbaren Kanäle ist also besser als die der gemeinsam genutzten Kanäle. Der tragbare Verkehr

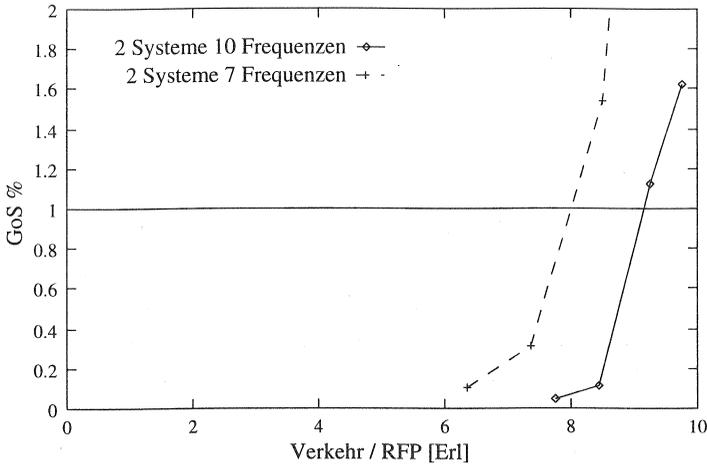


Abbildung 13.8: Vergleich von konkurrierenden Betreibern mit und ohne Beschränkung des Frequenzbandes

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
10 Frequenzen	8.75	9.14
7 Frequenzen	7.54	8.0

Tabelle 13.2: Tragbarer Verkehr/RFP bei Beschränkung des zulässigen Frequenzbandes

wäre mit einem angepaßten Kanalwahlmodell noch zu steigern. Würde z.B. das Kanalwahlmodell so modifiziert, daß zuerst nach belegbaren Kanälen im gemeinsam genutzten Frequenzband gesucht wird, und erst, wenn dort kein geeigneter Kanal gefunden wird, das exklusiv genutzte Frequenzband belegt, hätten beide Systeme eine bestmögliche Strategie gewählt. Setzt nur ein Betreiber eine derartige Verbesserung ein, so erhält er einen entscheidenden Vorteil gegenüber dem Konkurrenten.

Als Resümee kann man festhalten, daß das hier betrachtete Modell zwar zu einer Kapazitätsreduktion führt, dafür aber die Planungssicherheit der Betreiber verbessert.

### 13.2.3 Vergleich von co-positionierten und versetzt positionierten Feststationen

In diesem Abschnitt sollen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien genauer untersucht werden. Dazu wurde das Szenario mit versetzt positionierten Feststationen mit dem Szenario mit co-positionierten Feststationen verglichen und die erzielten Ergebnisse interpretiert. Die Feststationen waren in beiden Szenarien mit 3 Transceivern ausgestattet, um den Fall der Interferenzbegrenzung zu simulieren. In Abb. 13.9 sind die erzielten Ergebnisse für die beiden betrachteten Szenarien dargestellt. Es ist zu erken-

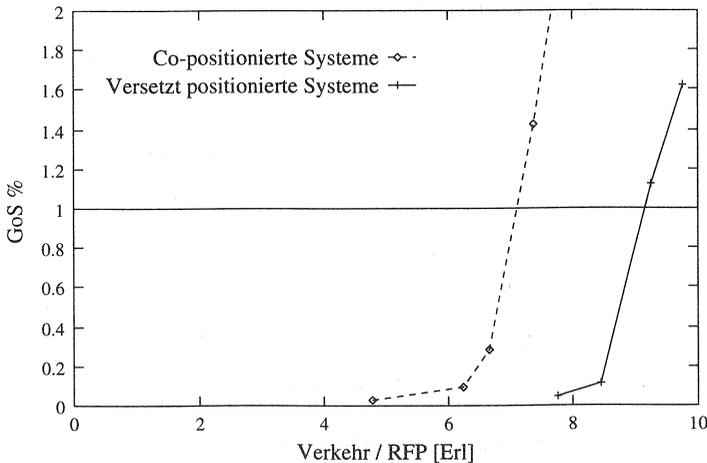


Abbildung 13.9: Vergleich von co-positionierten und versetzt positionierten Feststationen

nen, daß im Szenario mit versetzt positionierten Feststationen ein höherer Verkehr getragen werden kann als im anderen Szenario. Bei einem GOS von 1% ist der tragbare Verkehr im Szenario mit versetzten Feststationen um 16,2% höher als im Szenario mit co-positionierten Feststationen. Obwohl die Simulationsszenarien die gleiche Grundfläche haben, zeigt sich ein deutlicher Unterschied im tragbaren Verkehr. Die Positionierung der Feststationen scheint also einen wichtigen Einfluß auf die Verkehrskapazität zu

haben. Wie in Kapitel 10.6 für ein gleichmäßiges hexagonales Szenario gezeigt, kann auch hier die Anzahl der möglichen Störsender im Umkreis um eine Mobilstation als Faktor für die Begrenzung der tragbaren Verkehrslast durch Interferenzbegrenzung herangezogen werden. Ausgehend von einem Ort, an dem es zur Häufung von fehlgeschlagenen Verbindungsaufbauten kommt (in der Ecken einer Zelle), wurde die Anzahl der umliegenden Feststationen im Kreis mit dem Radius  $R$  bestimmt. Die erzielten Kurven sind in Abb. 13.10 dargestellt. Dort ist zu erkennen, daß für das co-positionierte

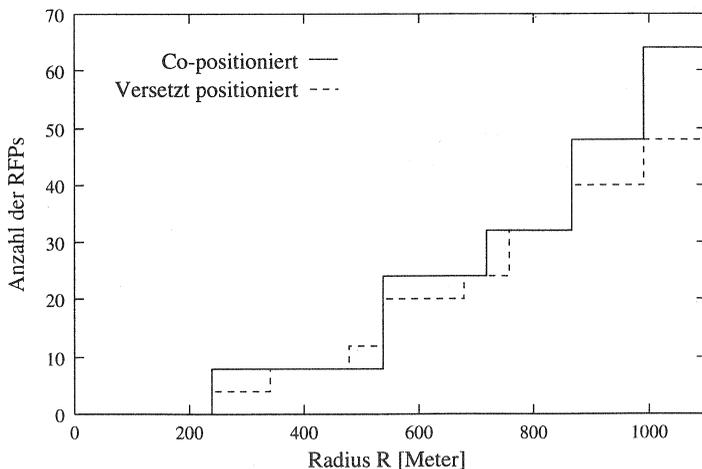


Abbildung 13.10: Anzahl der RFPs im Kreis mit dem Radius  $R$

Szenario die Anzahl der Feststationen in bestimmten Entfernungen von der Mobilstation größer ist als für das andere Szenario. Eine größere Anzahl von Störsendern im Umkreis der betrachteten Mobilstationen führt auch zu einer größeren Anzahl belegter Kanäle in diesem Bereich. Die Wahrscheinlichkeit, einen belegbaren Kanal in diesem Bereich zu finden, sinkt also, was dazu führt, daß mehr Mobilstationen keinen geeigneten Kanal finden und somit die tragbare Verkehrslast abnimmt.

Um zu überprüfen, ob diese Tatsache der Grund für die unterschiedlichen Simulationsergebnisse beider Szenarien ist, kann der relevante Interferenzabstand für die Eckposition einer Zelle bestimmt werden. Der Abstand dieser Position zur Feststation ist 240 m. Für  $\gamma = 3.5$  ergibt sich aus Gl. 10.23

ein Interferenzradius  $R_{Int}$  von 564 m. Vergleicht man den erzielten Wert mit den Kurven aus Abb. 13.10, so stellt man fest, daß im Szenario mit co-positionierten Feststationen die Anzahl der möglichen störenden Feststationen beim berechneten Wert größer ist als für den Fall der versetzten RFPs. Zusammen mit der Argumentation aus dem vorherigen Absatz ergibt sich damit eine Begründung für die niedrigere tragbare Verkehrslast im co-positionierten Szenario.

Wichtig ist festzuhalten, daß dieses Verhalten natürlich stark vom relevanten Interferenzradius (als Funktion des Störabstandes und des Pfadverlustmodells) und der prinzipiellen Positionierung (hier quadratisch) abhängt, da diese Bedingungen die Zahl der relevanten Störer in  $R_{Int}$  beeinflussen. Das kann dazu führen, daß andere z.B. hexagonal co-positionierte Szenarien bessere tragbare Verkehre ermöglichen als die entsprechenden versetzt positionierten Szenarien

#### 13.2.4 Vergleich von verschiedenen Empfängermodellen pro System

In den bisherigen Untersuchungen wurde für die konkurrierenden Systeme das gleiche Empfängermodell zugrunde gelegt. In Kapitel 12.2.6 wurde für ein System die Untersuchung verschiedener Empfängermodelle und Handover-Algorithmen durchgeführt. Das für die bisherigen Untersuchungen konkurrierender Systeme verwendete Bitfehlermodell entspricht dem Verhalten moderner DECT-Empfänger bei einem normal zeitgespreizten Funkkanal (s. Abb. 8.1.1 Kurve für nicht-kohärentes FSK). Eine weitere Möglichkeit des DESI, verschiedene Empfänger zu modellieren, ist die Angabe eines festen C/I-Verhältnisses, ab dem ein Kanal als ausreichend gut betrachtet wird. Diese Methode ist für die folgenden Simulationen gewählt worden. Dabei wurden für ein System 15 dB und für das zweite System 21 dB als C/I-Grenzwert gewählt. In Abb. 13.11 und Tabelle 13.3 sind die Simulationsergebnisse im Vergleich zu Ergebnissen von zwei Systemen, die das FSK-basierte Empfängermodell benutzen, abgebildet. Der tragbare Verkehr in System 2 ist um 24.8% geringer als für System 1 oder die zwei Systeme mit FSK-Empfang. Das System 2 reagiert aufgrund seines erforderlichen hohen Signal-Störabstandes viel empfindlicher auf Gleichkanalstörungen. Während das System 1 noch in der Lage ist, Verbindungen auf einem Kanal mit einem C/I-Verhältnis von weniger als 21 dB aufzubauen und zu betreiben, kann das System 2 diese Kanäle nicht mehr für

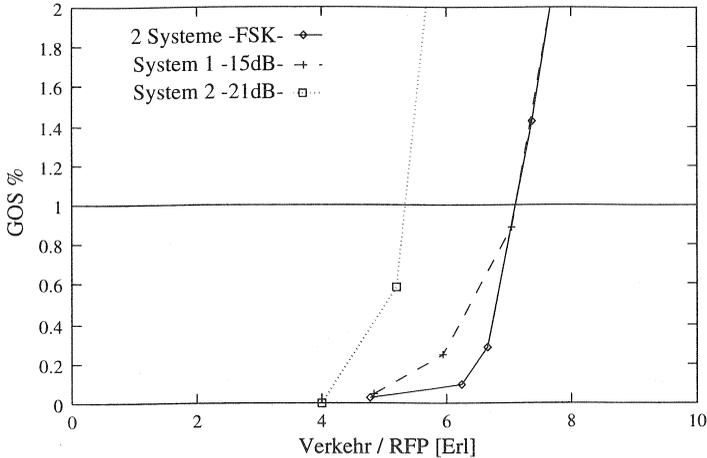


Abbildung 13.11: Vergleich der unterschiedlichen Empfängermodelle

Verbindungen nutzen und muß sich einen besseren Kanal suchen. Dies bedeutet, daß gerade in den Bereichen mit hoher Interferenzbelastung das System 1 dem System 2 überlegen ist und es zu Kanalverdrängungen von System 2 durch System 1 kommt. Vergleichbar mit den Verdrängungen durch den Nah-/Fern-Effekt (vgl. Abschnitt 5.2.5) kann es hier zur Verdrängungen von Kanälen kommen, die von System 2 belegt sind, wenn System 1 eine Verbindung auf dem gleichen Kanal aufbaut und danach das C/I-Verhältnis auf dem Kanal auf unter 21 dB fällt. Das System 1 ist dann zwar noch in der Lage diesen Kanal aufrecht zu erhalten, das andere System müßte jedoch durch einen Handover auf einen anderen Kanal ausweichen. Dabei kann es durchaus zu einem Verbindungsverlust kommen, wenn kein geeigneter Kanal gefunden werden kann. Wie aus Abb. 13.11 hervorgeht, verhält sich das System mit dem 15 dB Empfängermodell annähernd genauso wie die Systeme mit FSK-basiertem Empfänger. In Kapitel 12.2.6 wurde festgestellt, daß die detaillierte Modellierung etwa einem notwendigen Störabstand von 14 dB entspricht. Die Tatsache, daß hier das System mit 15 dB Störabstand ähnlich gut wie das detaillierte FSK-Modell abschneidet, zeigt, daß eine leichte Verbesserung im tragbaren Verkehr mit dieser Empfängereinstellung auftritt, auf Kosten des anderen, deutlich schlechter abschneidenden Sy-

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
System 1 15dB	6.38	7.1
System 2 21dB	-	5.34
2 Systeme FSK	6.8	7.12

Tabelle 13.3: Tragbarer Verkehr/RFP bei unterschiedlichen Empfängermodellen

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Sys.1 (36 RFPs)	6.3	6.82
Sys.2 (16 RFPs)	4.47	4.6

Tabelle 13.4: Tragbarer Verkehr/RFP bei unterschiedlichen Feststationsdichten

stems mit 21 dB Störabstand. Zusammenfassend kann man sagen, daß der Betreiber, der einen Empfänger mit kleinerem erforderlichen Störabstand C/I benutzt, auf Kosten des anderen Betreibers im Vorteil ist.

### 13.2.5 Tragbarer Verkehr bei unterschiedlichen RFP-Dichten pro System

Wie schon in Abschnitt 9.7 beschrieben, besteht die Möglichkeit, sich einen Dienstgütevorteil auf Kosten des Mitbewerbers zu verschaffen, wenn ein Betreiber seine Feststationen im Versorgungsgebiet dichter aufstellt als sein Konkurrent. Um diese Aussage zu verifizieren, wurde die folgende Simulationsreihe durchgeführt. Im betrachteten Szenario versucht ein Betreiber das Versorgungsgebiet mit 16 RFPs abzudecken, während sein Konkurrent die gleiche Fläche mit 32 Feststationen versorgt. Im ausgewerteten Bereich des Versorgungsgebietes (vgl. Abschnitt 13.1.3) besitzt der Betreiber mit der höheren Feststationsdichte viermal mehr RFPs als sein Mitbewerber. In Abb. 13.12 und in Tabelle 13.4 sind die Ergebnisse der Simulationen aufgeführt. Der tragbare Verkehr des Systems mit der niedrigeren Dichte ist bei 1% GOS um 32.5% kleiner als der des anderen Systems. Aufgrund des Nah-/Fern-Effektes (vgl. Abschnitt 5.2.5) ist ein Verbindungsaufbau zu einer nahe bei einer Feststation gelegenen Mobilstation sehr viel wahr-

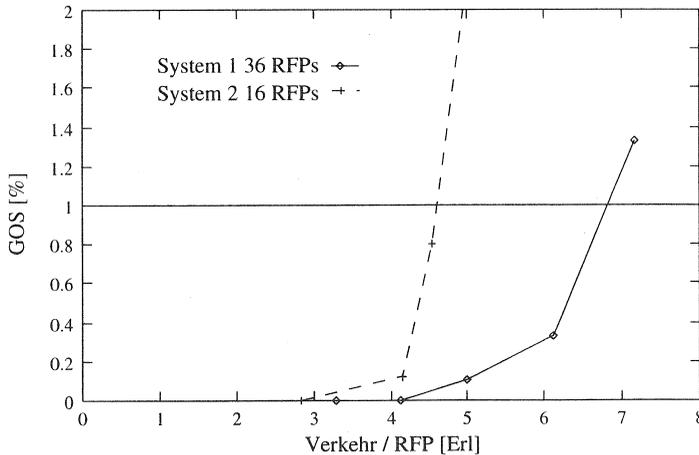


Abbildung 13.12: Vergleich von unterschiedlichen Feststationsdichten

scheinlicher. Im System mit der niedrigeren Dichte müssen Mobilstationen versorgt werden, die in einem Zellradius von 340 m um die ihnen zugeordneten Feststationen liegen, während sich im System mit der hohen Dichte dieser Zellradius auf 170 m verkleinert. Im System mit dem kleineren Zellradius sind die Mobilstationen im Mittel also viel näher an den Feststationen als im konkurrierenden System. In Abb. 13.13 ist die Verteilungsfunktion der Verbindungen über dem Abstand der Mobilstation von seiner RFP angegeben. Gleichzeitig ist die Verteilungsfunktion der tatsächlichen Abstände zwischen PP und RFP als durchgezogene Linie eingetragen. Man erkennt deutlich, daß Verbindungen, die einen Abstand von mehr als 220 m aufweisen, mit geringerer Häufigkeit vorkommen als es zu erwarten ist. Abbildung 13.13 zeigt deutlich, daß Verbindungen, die einen großen Abstand zwischen Mobilstation und Feststation haben, bei hoher Last durch Verbindungen mit kleineren Abständen (also einem besseren Störabstand) verdrängt werden - also Verbindungen von System 2.

In Abb. 13.14 sind die Orte der fehlgeschlagenen Verbindungsaufbauversuche dargestellt. In dieser Abbildung sind die Feststationen des Systems mit der niedrigeren Dichte als kleine Vierecke, und die Feststationen des anderen Systems als kleine Kreuze gekennzeichnet.

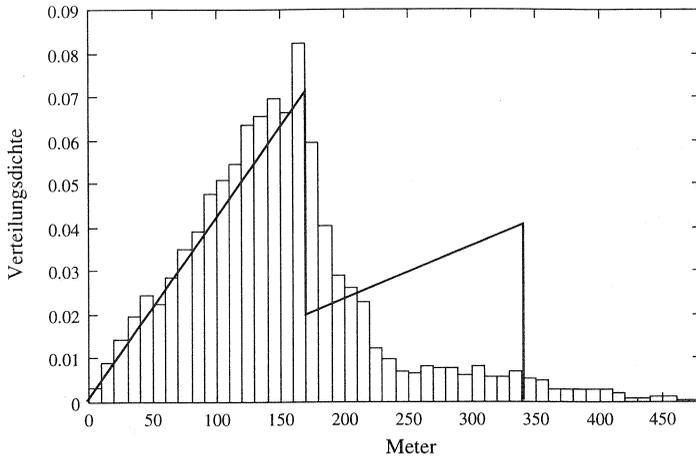


Abbildung 13.13: Verteilungsfunktion von Verbindungen über dem Abstand

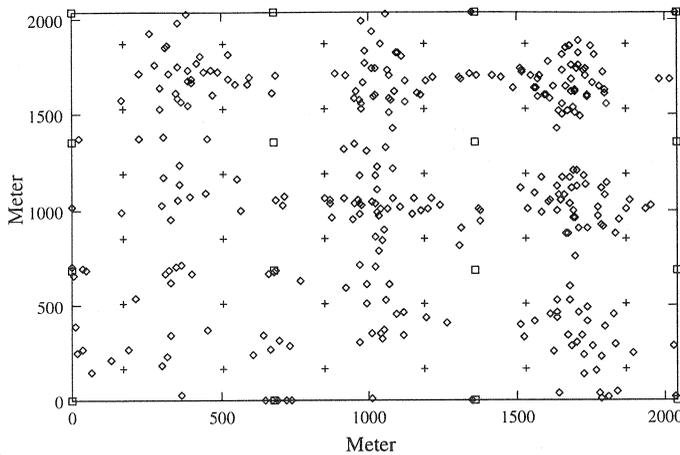


Abbildung 13.14: Orte fehlgeschlagener Verbindungsaufbauversuche

Man erkennt eine Häufung von fehlgeschlagenen Verbindungsaufbauversuchen in der Mitte von vier Feststationen des Systems mit höherer Dichte.

Dies läßt sich durch die hohe Interferenzbelastung an diesem Ort und der gleichzeitig großen Entfernung zu den Feststationen des Systems mit der niedrigeren Dichte erklären. Aus der Abbildung ist ferner zu ersehen, daß fehlgeschlagene Setup-Versuche auch häufig an den Zellgrenzen des Systems mit der niedrigeren Dichte vorkommen. Faßt man die Ergebnisse zusammen, so ergibt sich, daß das System mit der höheren Dichte auf Kosten des anderen Systems eine größere Kapazität aufweist.

### 13.2.6 Unterschiedliche Empfängermodelle bei Systemen mit verschiedener Feststationsdichte

Wie in Abschnitt 13.2.4 beschrieben, kann sich ein System auf Kosten des anderen einen Vorteil verschaffen, indem es auf Empfänger zurückgreift, die die Verbindungen noch bei niedrigeren C/I-Verhältnissen betreiben können. In den folgenden Simulationen soll deshalb untersucht werden, ob die Kapazitätseinbußen des Systems mit niedrigerer Feststationsdichte durch Verwendung eines geeigneten Empfängermodells kompensiert werden können. Dazu wurde das System mit der niedrigeren Dichte mit einem Empfängermodell ausgestattet, welches höhere Störleistungen auf den Kanälen zuläßt. Erst bei einem C/I-Verhältnis von 15 dB werden Kanalwechsel eingeleitet, während diese im System des Wettbewerbers schon früher bei einem Störabstand von 21 dB durchgeführt werden. In Abb. 13.15 und in Tabelle 13.5 sind die Ergebnisse dargestellt. Die gewünschte relative Kapazitätsverbesserung

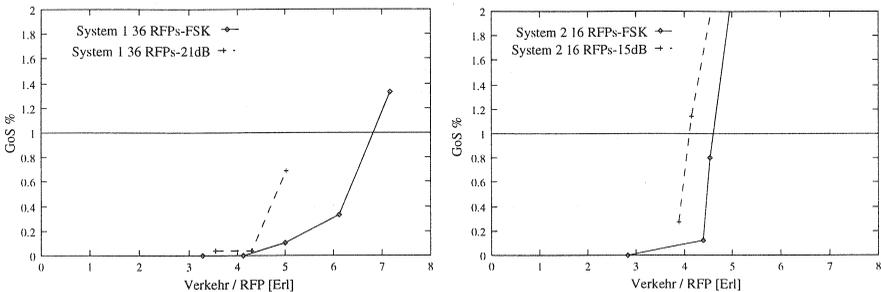


Abbildung 13.15: Vergleich von unterschiedlichen Empfängermodellen bei verschiedenen Dichten

ung bei der Verwendung des oben beschriebenen Empfängermodells stellt

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
System 1 (FSK)	6.3	6.82
System 1 (21dB)	4.8	-
System 2 (FSK)	4.47	4.6
System 2 (15dB)	3.95	4.1

Tabelle 13.5: Tragbarer Verkehr/RFP bei unterschiedlichen Empfängermodellen und Feststationsdichten

sich ein. Zwar verschlechtert sich der tragbare Verkehr des Systems 2 (13.15 rechts) noch einmal um 8.3% gegenüber dem FSK-basierten Empfängermodell, da dieses etwa einem C/I-Verhältnis von 14 dB entspricht, aber für das System mit der hohen Dichte an RFPs (System 1, 13.15 links) ergibt sich ein deutlich stärkerer Einbruch im tragbaren Verkehr um 23.8%. Die Nachteile der geringeren Dichte lassen sich demnach nicht ganz kompensieren, aber zumindest stark abbauen. Es besteht bei der Netzauslegung also ein weiterer Freiheitsgrad.

### 13.3 Simulationsergebnisse für asynchron konkurrierende Systeme

In diesem Abschnitt sollen die Untersuchungen zum asynchronen Betrieb zweier Systeme vorgestellt und interpretiert werden. In den verschiedenen Szenarien wurden unterschiedliche Zeitverzögerungen zwischen den Systemen eingestellt, um Effekte wie die Verschmelzung der Up- und Down-Link Bereiche genauer analysieren und den Einfluß auf den tragbaren Verkehr besser einschätzen zu können.

#### 13.3.1 Asynchronität bei versetzter Anordnung der Feststationen

In dem Szenario mit versetzten Feststationen (s. Kapitel 13.1.1) wurden drei verschiedene Simulationsreihen mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen (*Delay* der Rahmenlagen durchgeführt, um die einzelnen in Kapitel 9 vorgestellten Effekte möglichst genau zu untersuchen.

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Syn. Systeme	8.75	9.14
Asyn. Systeme	8.36	8.66

Tabelle 13.6: Tragbarer Verkehr/RFP bei asynchronen Systemen mit 5 ms Zeitverzögerung

Um die Einflüsse der Auftrennung des Up- und Down-Links auf den tragbaren Verkehr genauer zu untersuchen, wurde in einem System eine Zeitverzögerung von 5 ms (1/2 Rahmen) gegenüber dem anderen eingestellt. Dadurch sendet der Up-Link des einen Systems zur gleichen Zeit wie der Down-Link des konkurrierenden Systems. Abb. 13.16 stellt diese Einstellung der Zeitverzögerung dar. Die Zeitschlitze aktiver Verbindungen sind

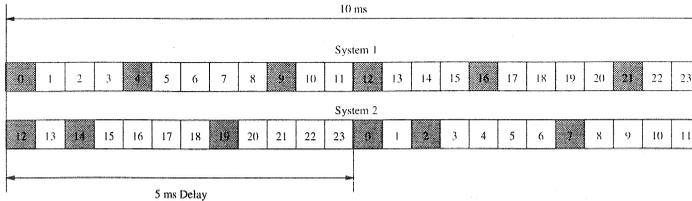


Abbildung 13.16: 5 ms Zeitverzögerung zwischen den Systemen

grau unterlegt. Es wird deutlich, daß die Down-Link-Slots 0 bis 11 des einen Systems die Up-Link-Slots 12 bis 23 des anderen Systems stören. In Abb. 13.17 und in Tabelle 13.6 sind die Ergebnisse der Simulationen im Vergleich zu synchronen Systemen dargestellt. Der Einfluß auf den tragbaren Verkehr durch die Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung beträgt bei 1% GOS nur 5.25%. Hebt man die Trennung zwischen Up- und Down-Link auf, so treten am Ort einer Mobilstation nicht nur Störleistungen von eigenen Feststationen auf, sondern zur Hälfte auch von Mobilstationen des anderen Systems. Da für das C/I-Verhältnis die Abstände zwischen zugeordneter Feststation und Störsender wesentliche Bedeutung besitzen, liegt eine völlig andere Verteilung der C/I-Werte und als belegt erkannter Kanäle vor.

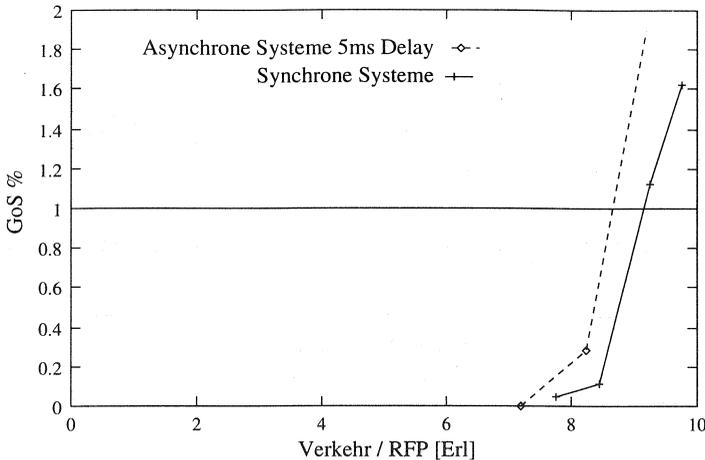


Abbildung 13.17: Vergleich von synchronen und asynchronen Systemen bei 5 ms Zeitverzögerung

Betreibt man asynchrone Systeme derart, daß die Slotgrenzen nicht mehr synchron zueinander liegen, so stört ein benutzter Slot des asynchronen Systems zwei Slots des anderen Systems. Der Einfluß dieses Effektes auf den tragbaren Verkehr soll im folgenden anhand von zwei Simulationsreihen mit unterschiedlicher Zeitverzögerung genauer analysiert werden. Da es bei asynchronen Systemen immer auch zu einer Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung kommt, wurde die erste Simulationsreihe mit einer Verzögerung von 5.208 ms durchgeführt. Dies entspricht einer zusätzlichen Verzögerung um einen halben Slot gegenüber den zuvor beschriebenen Simulationen (Abb. 13.18). Durch diese Einstellung ist es möglich, den Einfluß der Störung zweier Slots durch einen Slot des asynchronen Systems im einzelnen zu analysieren, da durch die vorangegangenen Simulationen schon Ergebnisse über den Einfluß der Aufhebung des Up- und Down-Links für einen vergleichbaren Fall vorliegen. In Abb. 13.19 und in Tabelle 13.7 sind die Simulationsergebnisse im Vergleich zum synchronen Betrieb dargestellt. Der Einbruch im tragbaren Verkehr ist für diesen Fall erheblich. Bei einem GOS von 1% sind die asynchron betriebenen Systeme in ihrem tragbaren Verkehr um 30.6% schlechter als die synchronen Systeme. Berücksichtigt man

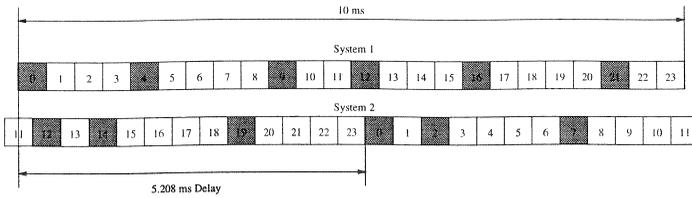


Abbildung 13.18: 5.208 ms Zeitverzögerung zwischen den Systemen

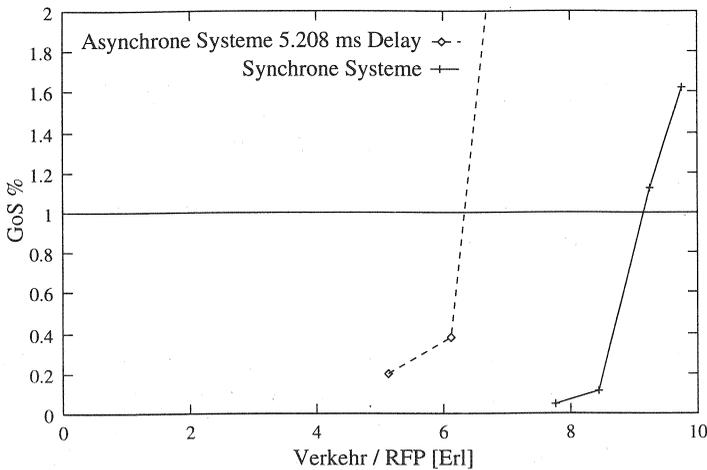


Abbildung 13.19: Vergleich von synchronen und asynchronen Systemen bei 5.208 ms Zeitverzögerung

die Verschlechterung von 5.25% durch die Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung, so verbleiben Einbußen von über 25% alleine aufgrund der Aufhebung der Slotsynchronisation. Dieser Einbruch im tragbaren Verkehr läßt sich durch eine erhöhte Anzahl von blockierten Slots erklären. Es werden insgesamt viel mehr Kanäle gestört werden als im synchronen Fall und es damit zu den hohen Einbußen in der tragbaren Verkehrslast kommt.

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Syn. Systeme	8.75	9.14
Asyn. Systeme	6.17	6.34

Tabelle 13.7: Tragbarer Verkehr/RFP bei asynchronen Systemen mit 5.208 ms Zeitverzögerung

### 13.3.2 Asynchrone Systeme bei co-positionierten Feststationen

Für die folgenden zwei Simulationsreihen wurde das Szenario mit co-positionierten Feststationen verwendet, wie es in Abschnitt 13.1.2 beschrieben wurde.

Um eine perfekte Auftrennung des Up- und Down-Links zu erreichen, wurde für das asynchrone System wieder eine Zeitverzögerung von 5 ms eingestellt (s. Abb. 13.17). In Abb. 13.20 und in Tabelle 13.8 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Der tragbare Verkehr bei einem GOS von 1% ist bei

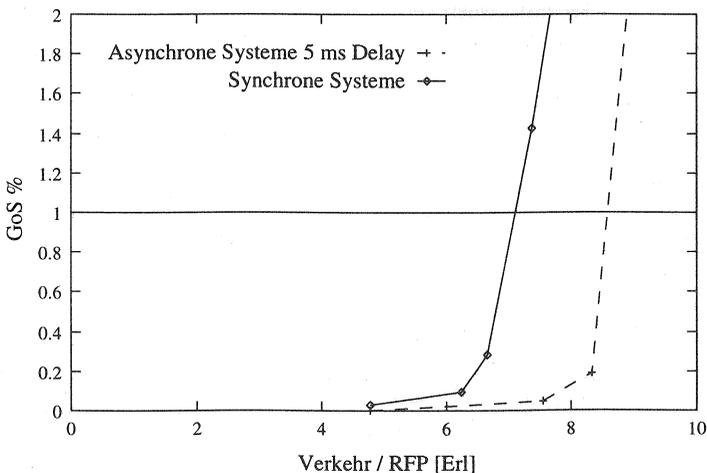


Abbildung 13.20: Vergleich von synchronen und asynchronen Systemen bei 5 ms Zeitverzögerung

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Syn. Systeme	6.8	7.12
Asyn. Systeme	8.42	8.58

Tabelle 13.8: Tragbarer Verkehr/RFP bei asynchronen Systemen mit 5 ms Zeitverzögerung

versetzt arbeitenden Systemen um 17% höher. In diesen Simulationen ist das asynchrone Verhalten völlig entgegengesetzt zu dem im vorigen Abschnitt untersuchten Verhalten bei Auftrennung des Up- und Down-Links. Während in den vorherigen Untersuchungen ein asynchrones Systemverhalten zu Einbrüchen im tragbaren Verkehr geführt hat, ist bei diesem Szenario ein Gewinn an tragbarem Verkehr festzustellen.

Das Verhalten soll nun entsprechend den Überlegungen aus Kapitel 10.6 und Abb. 13.21 genauer erläutert werden. In Abb. 13.21 ist, vom Ort einer

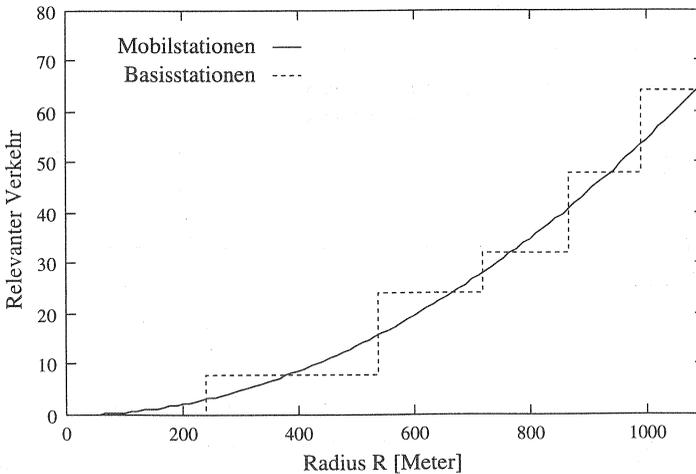


Abbildung 13.21: Relevanter Verkehr im Radius R um eine Mobilstation

Mobilstation aus gesehen, der relevante Verkehr aufgetragen, der in einem

Kreis mit dem Radius  $R$  um die betrachtete Mobilstation auftritt. Dabei wurde unterschieden zwischen Mobil- und Feststationen. Man erkennt, daß die Mobilstationen über dem Abstand gleichverteilt sind, während der Verkehr der Basistationen an diskreten Stellen ansteigt. Die Kurve für den Verkehr der störenden Feststationen erhält man durch Auswertung des speziellen Szenarios durch Abzählen (wie auch in Kapitel 10.6 durchgeführt) der betreffenden Feststationen und Skalierung mit dem Verkehr pro RFP. Für die Kurve des Verkehrs der Mobilstationen im Radius  $R$  gilt bei zwei Systemen ähnlich Gleichung 10.25:

$$\text{Anzahl PPs im Radius } R = 2\pi \cdot R^2 \cdot \frac{\text{Verkehr}}{\text{RFP}} \cdot \frac{1}{4R_{\text{Zelle}}^2} \quad (13.1)$$

Zum besseren Verständnis dieses Zusammenhangs und der Abb. 13.21 zeigt Abb. 13.22 den konkreten Fall. Sei der betrachtete Interferenzradius der

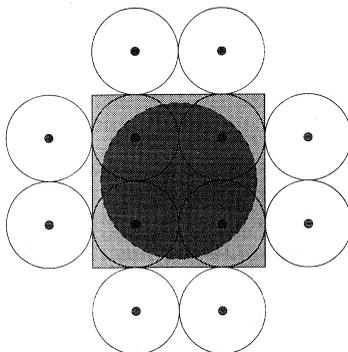


Abbildung 13.22: Verschiedene Radien um die Position einer Mobilstation

dunkelgrau eingefärbte Kreis, so ist der Verkehr durch die Mobilstationen exakt durch diesen Kreis gegeben. Dagegen ist der Verkehr, der durch die RFPs zu berücksichtigen ist, der gesamte Verkehr im hellgrauen Quadrat. Das bedeutet, daß der Verkehr der Feststationen sprunghaft ansteigt, sobald die RFPs im Kreis liegen, und dann konstant bleibt, bis die nächsten Feststationen vom Kreis "eingefangen" werden. Je nach betrachtetem Interferenzradius ist der relevante Interferenzverkehr durch Mobilstationen geringer

oder höher als der Verkehr durch RFPs. Es existiert also am entsprechenden Ort ein unterschiedlich großes Bündel freier Kanäle aus den 120 DECT-Kanälen. Da bei Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung neben den Basistationen des eigenen Systems zur anderen Hälfte auch die Mobilstationen des konkurrierenden Systems für den Interferenzverkehr verantwortlich sind, kann es je nach Szenario zu Verbesserungen oder Verschlechterungen kommen.

Nimmt man einmal an, daß ein Kanal in einer Entfernung von 580 m wiederverwendet werden kann, so wären im synchronen Fall alle Kanäle, die von Mobilstationen mit einer Entfernung bis zu 630 m belegt sind, nicht wiederverwendbar, weil die effektive Entfernung vom Störsender 540 m beträgt. Bei asynchronen Systemen sind die Kanäle, die von Mobilstationen des konkurrierenden Systems in einer Entfernung von mehr als 580 m belegt sind, jedoch für einen Verbindungsaufbau nutzbar (s. Abb. 13.21). Dies bedeutet, daß in diesem Fall mehr belegbare Kanäle zur Verfügung stehen und somit die Blockierwahrscheinlichkeit geringer ist. Dieser Effekt scheint in der vorliegenden Simulationsreihe für den Gewinn an tragbarem Verkehr verantwortlich zu sein.

Wie sich in den Simulationen zur Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung im Szenario mit versetzt positionierten Feststationen gezeigt hat, kann die Aufhebung auch zu Einbußen im tragbaren Verkehr führen. Faßt man die Aussagen zusammen, so stellt man fest, daß der tragbare Verkehr bei asynchronen Systemen sehr stark abhängig ist von der Abstandsverteilung der möglichen Störsender und der Form der Zellen, denn diese gibt die Positionen der PPs vor.

Auch für den co-positionierten Fall sollen die Auswirkungen der Aufhebung der Slotsynchronisation auf den tragbaren Verkehr untersucht werden. Als Zeitverzögerung des asynchronen Systems wurde wiederum 5.208 ms gewählt (s. Abb. 13.18). In Abb. 13.23 und in Tabelle 13.9 sind die erzielten Simulationsergebnisse im Vergleich mit dem synchronen Systemverhalten dargestellt. Man erkennt, daß der tragbare Verkehr bei einem GOS von 1% um 9.8% niedriger ist als im synchronen Fall. Im Vergleich zu synchronen Systemen stellt sich in diesem Fall wieder eine Verschlechterung ein. Der Gewinn durch die Aufhebung der Up- und Down-Link-Trennung ist durch die Aufhebung der Slotsynchronisation völlig aufgehoben worden. Im Vergleich zu den vorangegangenen Simulationen mit 5 ms Zeitverzögerung ist in diesem Fall eine Verschlechterung bzgl. des tragbaren Verkehrs von 25.2% festzustellen. Dieser Wert entspricht der festgestellten Verschlechterung im

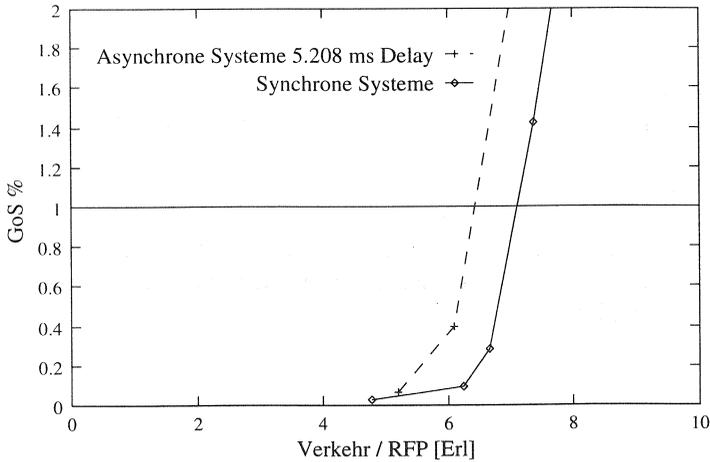


Abbildung 13.23: Vergleich von synchronen und asynchronen Systemen bei 5 ms Zeitverzögerung

	Verkehr/RFP [Erl] bei 0.5% GOS	Verkehr/RFP [Erl] bei 1.0% GOS
Syn. Systeme	6.8	7.12
Asyn. Syst. 5 ms Delay	8.42	8.58
Asyn. Syst. 5.208 ms Delay	6.14	6.42

Tabelle 13.9: Tragbarer Verkehr/RFP bei synchronen und asynchronen Systemen

Fall der versetzt positionierten Feststationen. Zusammenfassend kann man sagen, daß eine Aufhebung der Slotsynchronisation in allen betrachteten Fällen zu einer hohen Einbuße im tragbaren Verkehr führt.

Es scheint unwahrscheinlich, daß es in der Realität bei asynchronen Systemen zur Einhaltung der Slotsynchronisation kommen wird. Vielmehr wird sich eine völlig beliebige Zeitverzögerung zwischen den Systemen einstellen und zu den beschriebenen Einbußen von bis zu 30% führen. Um die

tragbare Kapazität bei konkurrierenden DECT-Systemen nicht unnötig zu verkleinern, sollten zwei Betreiber im gleichen Versorgungsgebiet ihre Systeme untereinander synchronisieren.

Dagegen ist es bei privaten DECT-Systemen besser, wenn diese nicht synchronisiert sind. Durch den geringen Verkehrswert dieser Systeme besteht die wesentliche Verkehrslast in der Aussendung von Dummy-Bearern. Diese verkürzten Slots würde im synchronen Fall immer einen ganzen Verkehrskanal belegen, während im asynchronen Fall die Wahrscheinlichkeit von 2 Dummy-Bearern unterschiedlicher privater Stationen in einem Verkehrskanal nicht gering ist.

## Gegenseitige Beeinflussung öffentlicher und privater DECT-Systeme

Um die Beeinträchtigung öffentlicher Betreiber durch private Fremdsysteme und umgekehrt zu untersuchen, wurde aus dem oben gezeigten Innenstadtszenario ein *Hot-Spot* Bereich ausgewählt und betrachtet. Beeinträchtigungen in der Versorgungsgüte werden nur dort auftreten, wo die Gesamtbelastung die Kapazitätsgrenze erreicht.

Es handelt sich um eine 200 m lange Fußgängerzone mit entsprechend großem Kommunikationsverkehr im öffentlichen System. Die Fußgängerzone wird von je 3 Kaufhäusern mit Glasfronten umgeben, die sich über zwei Etagen erstrecken. In der dritten Etage befinden sich Büros o.ä.. Die Häuserfront ist hier mit großen Fenstern durchsetzt. Entsprechend dem Penetrations-Verlust Modell aus [30] wird die 3. Etage in 3 Zonen unterteilt, mit 4 m breiten Büros an der Front und im hinteren Bereich der Gebäude, während die beiden unteren Etagen je einen großen Raum bilden.

Ziel der Untersuchungen ist es, exemplarisch die kritischen Verkehrsbelastungen zu bestimmen, bei denen Beeinträchtigungen auftreten. Dadurch kann die Relevanz dieser Szenarien abgeschätzt und auf die Häufigkeit von *Hot-Spots* geschlossen werden. Zum besseren Verständnis sind der Grundriß und eine dreidimensionale Aufsicht des Szenarios in den Abbildungen 11.3 und 11.4 dargestellt.

Für die gebäudeinternen DECT-Systeme wurden folgende Verkehrsannahmen gemacht.

- Der Verkehr in den Kaufhäusern stammt von Kassenterminals und  $3 * 200 = 600$  Angestellten von denen 20% DECT-Terminals benutzen. Es wurde angenommen, daß eine Kasse pro Flächenelement ( $10m * 10m$ ) 150 mErl/Kasse beiträgt und daß die Angestellten 100 mErl/Tln. Verkehrslast verursachen. Daraus ergeben sich durch die Angestellten pro Block 3 Erlang und für jede Etage 4.5 Erlang Verkehr. Zusätzlich wird pro Kaufhaus der Verkehr aus 10 angegliederten

Büros hinzugefügt ( $3 * 10 * 0.150 = 4.5$  Erlang/Etage). Der in den Simulationen angenommene Verkehr beträgt demnach pro gesamte Kaufhausetage 10.5 Erlang.

- Für die Büroetage wird angenommen, daß ein Büro an der Straßenseite 4 m breit ist und daß es in dem 15 m tiefen Gebäude 2 Bürozeilen (100 Büros) gibt. 50% der Büros sollen über ein DECT-System verfügen mit einer Aktivität von je 150 mErl/Anschluß. Jeder 2. Büroanschluß ist als ISDN Anschluß angenommen (3 DECT Kanäle je Verbindung). Insgesamt wird pro Büroetage ein Verkehr von 15 Erlang angenommen.

Der Verkehr, der in den privaten DECT-Systemen entsteht beträgt 72 Erlang.

Für dieses Szenario wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt, um eine umfassende Aussage der Auswirkungen treffen zu können:

- Der tragbare Verkehr des öffentlichen Systems wurde ohne Berücksichtigung der privaten DECT-Systeme bestimmt, um die Aussagen aus Kapitel 14.1 bezüglich isolierter Plätze zu validieren. Der mittlere RFP des gewählten Szenarios ist zwar nicht vollständig isoliert, jedoch wird durch die Anbringung der übrigen Feststationen am Rand des Szenarios eine geringe Überdeckung der Ausleuchtungszonen erreicht.
- Die Dienstgüte der privaten Systeme (ohne öffentlichen Verkehr) unter der angenommenen Last wird zum Vergleich mit der kombinierten Simulation von öffentlichen und privaten Systemen zunächst isoliert bestimmt.
- In der gemeinsamen Simulation wird bei gegebener Last der privaten Systeme die Kapazität des öffentlichen Netzes bestimmt. Dabei wird die Einschränkung der Dienstgüte und der Kapazität der privaten Systeme ermittelt.

Es wurde aufgrund der großen erforderlichen Rechenzeit darauf verzichtet, zum öffentlichen System asynchrone Privatsysteme zu simulieren. Ergebnisse für *Hot-Spots* hängen immer von den gewählten Bedingungen ab, so daß eine quantitative, allgemein gültige Aussage nicht möglich ist. Die gegenseitigen Beeinträchtigungen lassen sich aber qualitativ, auch ohne Berücksichtigung eines möglichen Synchronisationsfehlers der Systeme, beurteilen, weil bereits Resultate asynchroner Systeme in einem Gebäude und am gleichen Ort außen bekannt sind, vgl. Abschn. 14.4.

Um einen Eindruck zu vermitteln, wo die Ursachen für Beeinträchtigungen zu suchen sind, sind in den Abbildungen 14.1, 14.2 und 14.3 die Ausleuchtungen mit Darstellung der jeweils stärksten RFP gezeigt. Man erkennt deutlich, wie stark in diesem Szenario die öffentlichen Feststationen in einige Gebäudebereiche einstrahlen und dort zusätzlich Kanäle belegen. Die Stärke der Beeinflussung des privaten Systems durch den Verkehr des öffentlichen Betreibers ist deutlich aus Tabelle 14.2 zu erkennen.

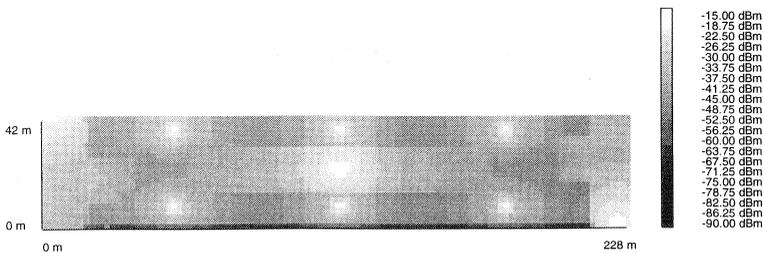


Abbildung 14.1: Erdgeschoß

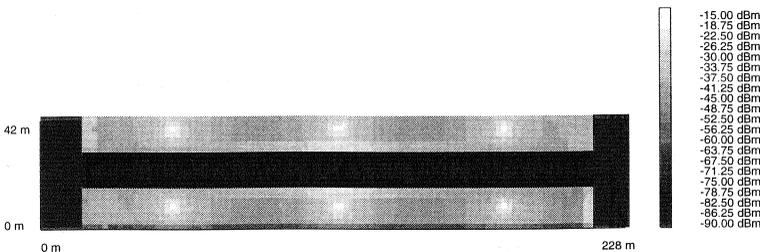


Abbildung 14.2: 1.Etage

## 14.1 Tragbarer Verkehr im öffentlichen System

Wie die Ergebnisse für den tragbaren Verkehr im öffentlichen System zeigen (s. Abb. 14.4), kann an einem isolierten Platz die gesamte Kapazität des DECT-Systems bei entsprechender Ausstattung der RFPs genutzt werden. Der zentrale RFP ist in diesem Szenario mit 10 Transceivern bestückt, von denen jeder etwa 8,5 Erlang Verkehr bei 1% GOS tragen kann. Der Gesamtverkehr liegt damit bei etwa 85 Erlang an diesem RFP. Der theoretisch tragbare Verkehr im Falle einer optimal isolierten RFP läge bei 103

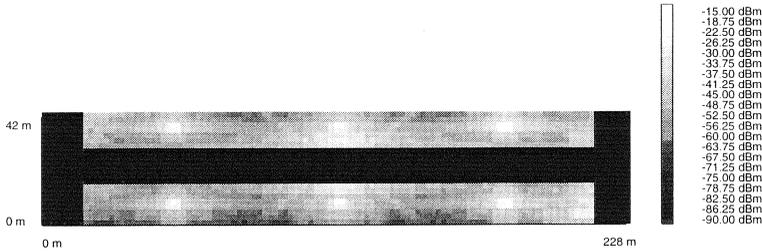


Abbildung 14.3: 2.Etage

Erlang (s. Abb. 10.5), wird hier aber nicht ausgeschöpft, da es an den Enden der Fußgängerzone zu Zellüberlappungen mit den anderen RFPs des öffentlichen Systems und somit zu Interferenzen kommt. Deutlich wird dies an den Positionen von aufgetretenen Setup-Fehler (Abb. 14.5). Sie liegen ausschließlich in den Bereichen, in denen durch die Nachbar-RFPs schon Kanäle besetzt werden und der zentralen RFP nicht das komplette Kanalbündel zur Verfügung steht. In Realität wird diese Beeinträchtigung wegen der Beugung der Funkwellen um die Gebäudeecken nicht auszuschließen sein, selbst wenn die RFPs, wie in diesem Fall sehr günstig, positioniert werden.

## 14.2 Beeinflussung des öffentlichen Betreibers durch die privaten Systeme

Schaltet man die privaten DECT-Systeme in den beiden Gebäuden an, so verringert sich der tragbare Verkehr am zentralen öffentlichen RFP deutlich um ca. 25% von ca. 85 auf ca. 63 Erlang (s. Abb. 14.6).

## 14.3 Beeinflussung der privaten Systeme durch den öffentlichen Betreiber

Für die Beurteilung der Auswirkungen öffentlicher Systeme auf die privaten DECT-Installationen ist eine Abschätzung der tatsächlichen, ungestörten Auslastung der Systeme nötig. Daher wurde die Belastung bei der oben angenommenen Verkehrslast bestimmt und ohne öffentlichen Betreiber jeweils um 15, 30 und 45% erhöht. Die Tabelle 14.1 zeigt den GOS der

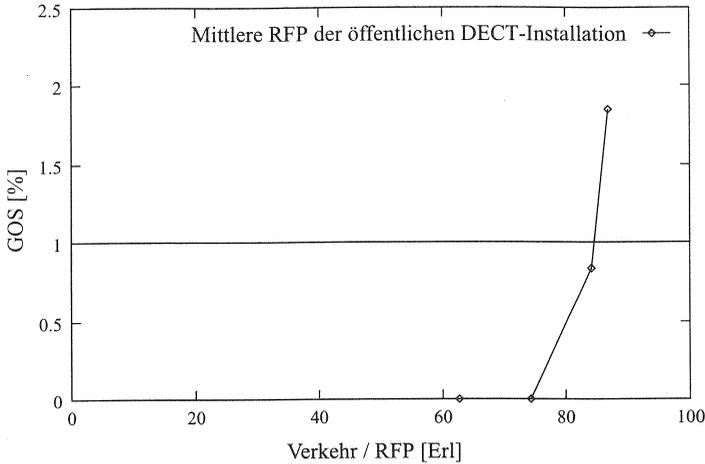


Abbildung 14.4: Tragbarer Verkehr bei nur öffentlichem Betreiber (zentrale RFP)

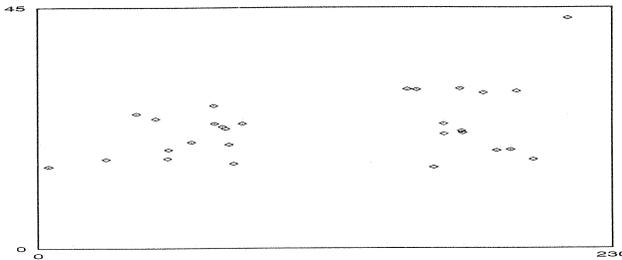


Abbildung 14.5: Positionen der Setup-Fehler des öffentlichen Betreibers

einzelnen privaten Systeme. Erkennbar ist, daß die vorhandene Reserve an zusätzlich tragbarem Verkehr sehr unterschiedlich ist. Dementsprechend sind die Verschlechterungen der Dienstgüte bei zusätzlicher Last durch das öffentliche System unterschiedlich stark, wie die in Tabelle 14.2 zusammengefaßten Ergebnisse zeigen. Dargestellt sind die Last/RFP und der GOS der privaten Systeme unter Einwirkung der Interferenzleistung des öffentlichen Systems. Dabei wurde die Last des öffentlichen Systems schrittweise erhöht

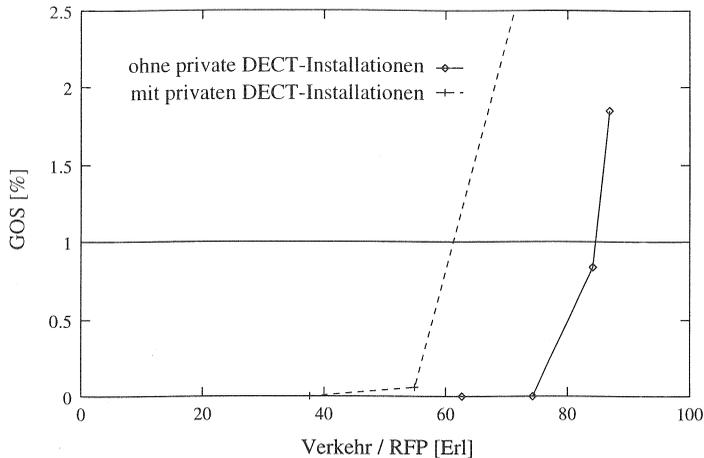


Abbildung 14.6: Tragbarer Verkehr des öffentlichen Betreibers (zentrale RFP) mit privaten Störern

(Zusatzlast), während sie in den privaten Systemen unverändert blieb. Abhängig von der ursprünglich vorhandenen Belastung der Systeme setzt eine rapide Verschlechterung des GOS schon bei 54 Erlang (2.Etage Gebäude 1), oder erst bei 72 Erlang an der mittleren RFP des öffentlichen Systems ein. In Abb. 14.7 sind die Positionen der Setup-Fehler gekennzeichnet. Sie treten in allen Systemen zwischen den RFPs genau dort auf, wo Interferenzleistung von benachbarten RFPs das Bündel der 120 Kanäle stark belastet und ein Nah-Fern-Effekt nicht möglich ist, da keine RFP besonders nahe positioniert ist.

Bezüglich der Relevanz und Problematik von *Hot-Spots* lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Selbst bei äußerst positiver Akzeptanz privater DECT-Systeme wird selten der Fall eintreten, daß in einem großen Bürokomplex 50% der Telefonanschlüsse mit DECT-Systemen versorgt sind, von denen wiederum 50% für ISDN-Dienste gebraucht werden.
- Auch wenn dies der Fall sein sollte, ist eine Beeinflussung durch öffentliche DECT-Systeme selten gegeben, da eine Auslastung der gesamten DECT-Kapazität durch private Systeme und damit eine starke Sensibilität gegenüber zusätzlicher Last selten erreicht wird.

Etage	Grundlast	15% Zusatzlast	30% Zusatzlast	45% Zusatzlast
Erdg 1.Geb.	3.86 Erl 0.0%	4.27 Erl 0.0%	4.34 Erl 0.0%	5.5 Erl 0.0%
Erdg 2.Geb.	3.22 Erl 0.0%	3.75 Erl 0.0%	4.39 Erl 0.0%	5.25 Erl 0.0%
1.Etage 1.Geb.	3.24 Erl 0.0%	4.15 Erl 0.0%	4.61 Erl 0.0%	5.24Erl 0.07%
1.Etage 2.Geb.	3.89 Erl 0.0%	4.02 Erl 0.0%	4.56 Erl 0.0%	5.01 Erl 0.0%
2.Etage 1.Geb.	10.3 Erl 0.0%	11.9 Erl 0.06%	12.1 Erl 3.3%	14.80 Erl 6.06%
2.Etage 2.Geb.	6.60 Erl 0.0%	7.59 Erl 0.0%	8.55 Erl 0.0%	9.55 Erl 1.2%

Tabelle 14.1: Last/RFP und GOS der privaten Systeme bei variiert eigener Last

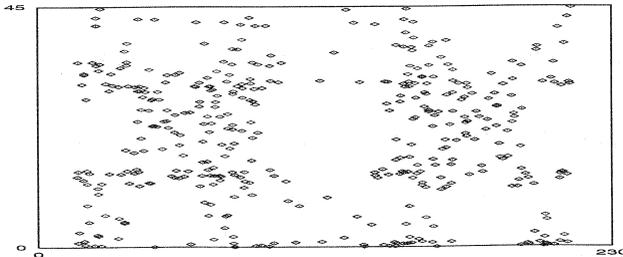


Abbildung 14.7: Setup-Fehler bei gleichzeitigem Betrieb

- Es bedarf in diesem Fall eines sehr hohen Verkehrs in den öffentlichen DECT-Systemen, um nennenswerte Beeinträchtigungen zu bewirken. Bei insgesamt 92 Erl im öffentlichen System (54 Erl an der mittleren RFP) ist nur eines der privaten Systeme nennenswert beeinträchtigt.

Die Untersuchungen lassen die Aussage zu, daß in absehbarer Zeit keine *Hot-Spot* Problematik in dem Sinne gibt, daß es zu örtlichen Kapazitätsengpässen bei einer gleichzeitigen Nutzung der DECT-Frequenzen

Etage	öffentlicher Verkehr an mittlerer RFP/gesamt [Erl]			
	ohne	34Erl/63Erl	54Erl/92Erl	72Erl/125Erl
Erdg.	3.68 Erl	3.52 Erl	3.29 Erl	3.21 Erl
1.Geb.	0.0%	0.0%	0.22%	14.3%
Erdg.	3.75 Erl	3.68 Erl	3.33 Erl	3.70 Erl
2.Geb.	0.0%	0.0%	0.0%	3.9%
1.Etg.	3.84 Erl	3.70 Erl	3.07 Erl	3.02 Erl
1.Geb.	0.0%	0.0%	0.12%	13.8%
1.Etg.	3.89 Erl	3.36 Erl	3.45 Erl	3.52 Erl
2.Geb.	0.0%	0.0%	1.32%	15.41%
2.Etg.	10.3 Erl	6.48 Erl	5.94 Erl	5.86 Erl
1.Geb.	0.0%	0.14%	1.20%	27.4%
2.Etg.	6.60 Erl	4.1 Erl	4.0 Erl	3.8 Erl
2.Geb.	0.0%	0.07%	0.14%	25.4%

Tabelle 14.2: Last/RFP und GOS der privaten Systeme bei Störung durch das öffentliche System

durch private und öffentliche DECT-Systemen kommt.

## 14.4 Asynchrone Systeme innerhalb eines Gebäudes

Zur Ermittlung möglicher gegenseitiger Beeinflussungen asynchroner Systeme innerhalb von Gebäuden wird das Szenario aus den Abb. 11.5 und 11.6 verwendet. Wie die berechneten Ausleuchtungen (Abb. 14.8 und 14.9) zeigen, gibt es auch bei hoher Deckendämpfung, 15 dB pro Decke, Bereiche, in denen das jeweils andere Stockwerk stark einstrahlt, denn man sieht die jeweiligen RFPs durchschimmern. Hier kann es zu Einbußen in der Versorgungsqualität bzw. zu Verbindungsabbrüchen kommen. Dies ist störend, wenn die eine Etage z.B. durch das RLL System eines öffentl. Betreibers versorgt wird und durch die private PBX in der anderen Etage gestört wird.

Die Ergebnisse für den tragbaren Verkehr in diesem Szenario sind in den Abbildungen 14.10 und 14.11 dargestellt. Sie zeigen, daß durch die Asynchronität der Systeme der tragbare Verkehr um ca. 20 - 25% verringert wird. Die Kapazitätsreduktion liegt damit in der gleichen Größenordnung wie bei

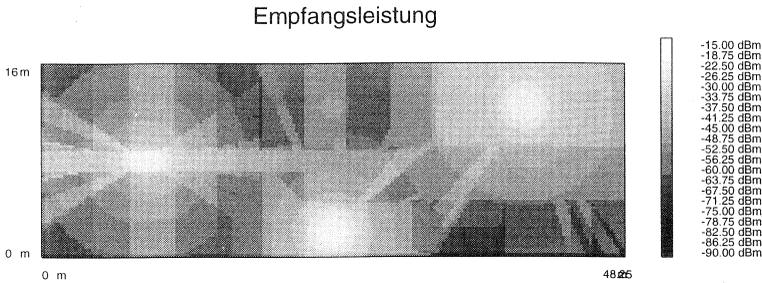


Abbildung 14.8: Ausleuchtung in der 1. Etage

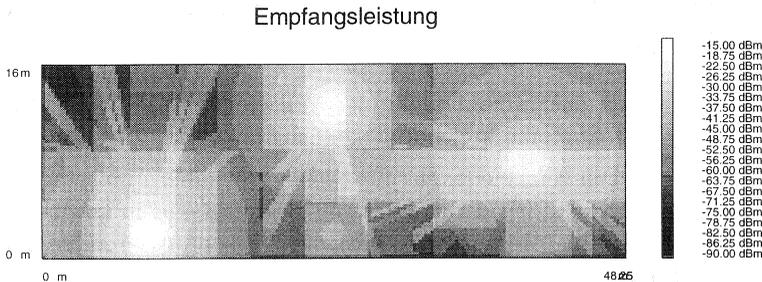


Abbildung 14.9: Ausleuchtung in der 2. Etage

großflächigen Systemen.

In beiden untersuchten Szenarien liegt eine komplette Überlappung der Systeme vor, so daß die asynchrone Störung überall zum Tragen kommt. Bei Systemen, die aneinander angrenzen, ohne stark zu überlappen, wird die Reduktion der Kapazität geringer ausfallen.

Bei synchronen Systemen liegt die tragbare Last mit ca. 6.4 Erl/RFP leicht oberhalb der Last von 6 Erl/RFP, die in vergleichbaren Untersuchungen als maximale Last festgestellt wurde. Im vorliegenden Szenario sind nur 2 Etagen modelliert, so daß es nicht zu Interferenzen aus jeweils zwei benachbarten Etagen kommt und damit mehr Kanäle zur Verfügung stehen als bei

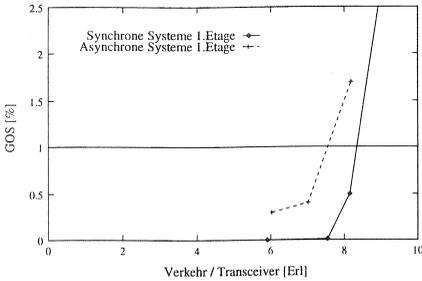


Abbildung 14.10: 1. Etage

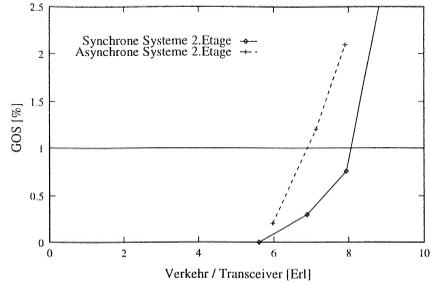


Abbildung 14.11: 2. Etage

DECT-Systemen in einem mehrstöckigen Gebäude.

## 14.5 Fazit der Untersuchungen zu konkurrierenden DECT-Systemen

Festzuhalten sind als Zusammenfassung der zahlreichen Ergebnisse zu konkurrierenden DECT-Systeme folgende Erkenntnisse:

- Es wird zwischen verschiedenen öffentlichen Betreibern im selben Versorgungsgebiet zu starken gegenseitigen Beeinflussungen kommen, da es keine identische technische Ausrüstung der konkurrierenden Systeme geben kann.
- Ein Betreiber, der höhere Investitionen in Standorte und Technologie akzeptiert und tätig als ein Konkurrent, wird auf Kosten dieses Mitbewerbers einen besseren Versorgungsgrad seiner Kunden erreichen.
- Die insgesamt zur Verfügung stehende Kapazität von DECT als RLL-System wird bei nicht optimaler Wahl der Standorte, etwa durch den Aufbau mehrerer Systeme, nicht erreicht.
- Eine Beeinträchtigung privater DECT-Systeme ist zwar möglich, aber die Bedingungen dafür als sehr unwahrscheinlich erscheinen.
- Der asynchrone Betrieb von DECT-Netzen verringert die Gesamtkapazität stark.

---

## Bewertung eines Relais-Netzes im Freien

Eine Bewertung von DECT-Relais im Freien ist von großer Bedeutung, da aus ökonomischen Gesichtspunkten beim Aufbau von RLL-Systemen DECT-Relais eine große Rolle zur Erzielung einer vollständigen Funkausleuchtung spielen werden. Beispielhaft wird hier eine RLL-Versorgung über den Dächern untersucht. Die dazu notwendigen Simulationen werden für eine innerstädtische Umgebung mit mittlerer Bebauung durchgeführt. Die festverkabelte Feststation in der Mitte der Abb. 15.1 (0) wird auf dem Dach eines hohen Gebäudes (hier ist es das Bahnhofsgebäude) plaziert. In einer hexagonalen Struktur mit einem Abstand von 300 m werden sechs Relaisstationen (1-6) um die verkabelte Feststation gruppiert. Durch diese Anordnung besteht zwischen allen Feststationen der gleiche Abstand. Es werden 3 Simulationsreihen durchgeführt:

**1. 1 RFP mit 3 Transceivern, 6 Relais mit je 1 Transceiver**

Die Relaisstationen werden in einem Abstand von 300 m zu einem festverkabelten RFP in einer hexagonalen Struktur positioniert.

**2. 1 RFP mit 6 Transceivern, 6 Relais mit je 2 Transceivern**

In dem Szenario aus (1) werden die Relais mit einer zweiten Send-/Empfangeinrichtung ausgestattet, um die Down- und Uplink-Strecken trennen zu können. Der RFP in der Mitte erhält ebenfalls die doppelte Transceiveranzahl.

**3. 7 RFP mit 1 Transceiver**

Alle Feststationen sind am Festnetz angeschlossen. Diese Konfiguration dient als Referenz zur Beurteilung der Ergebnisse aus 1. und 2.

Abb. 15.2 zeigt den GOS für die verschiedenen untersuchten Konfigurationen. Alle Ergebnisse weisen den Einfluß der Kapazitätsbegrenzung auf. Es wird deutlich, wie stark Relais den tragbaren Verkehr bei gegebener Dienstgüte (z.B. GOS=1%) verringern. Ist jeweils nur ein Transceiver pro Relais installiert, so bewirkt die verdoppelte Anzahl an belegten Kanälen pro Verbindung im Relais einen drastischen Abfall des tragbaren Verkehrs

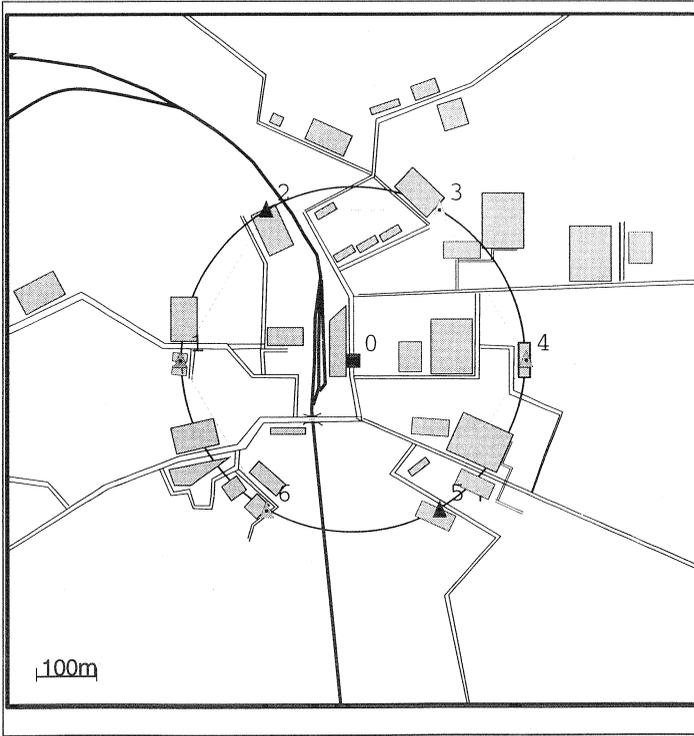


Abbildung 15.1: Outdoor-Szenario

auf 30% des Wertes, der mit 7 Relais erreicht wird. Wird die "installierte" Kapazität durch die Verdopplung der Transceiverzahl an den gesteigerten Verkehr angepaßt, so führt die Interferenzleistung der zusätzlich belegten Kanäle zur Begrenzung des tragbaren Verkehrs auf 67% der Referenzkonfiguration.

Diese Ergebnisse zeigen, daß bei geringem Verkehrsaufkommen der Einsatz von Relais möglich ist, bei höheren Verkehren erreicht das System jedoch sehr schnell seine Kapazitätsgrenzen. Der Einsatz von zusätzlichen Transceivern in den Feststationen (Versuchsreihe 2) ist im betrachteten Szenario dafür verantwortlich, daß der doppelte Verkehr getragen werden kann. Die erhöhte Interferenzleistung begrenzt den tragbaren Verkehr und kann nur

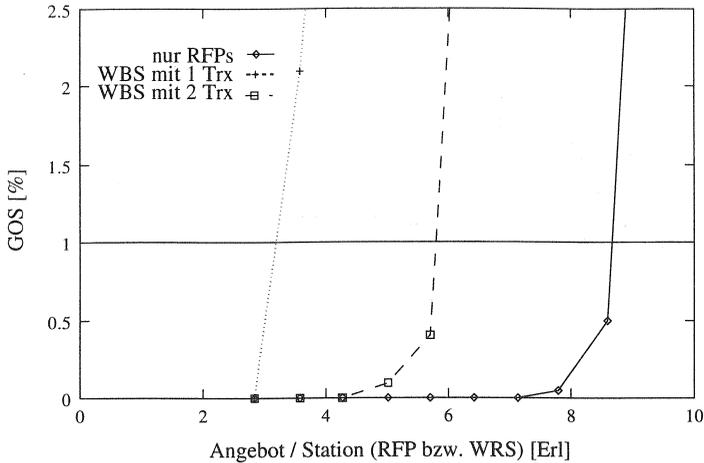


Abbildung 15.2: Tragbarer Verkehr der Anordnungen

durch gerichtete Antennen verringert werden, die eine Isolierung der Interferenzleistung wie bei gerichteten Antennen am WLL-Teilnehmeranschluß ermöglichen.

Relais werden in DECT-Zugangsnetzen auch andere Aufgaben erfüllen als in dieser Konfiguration dargestellt. Die Untersuchungen bzgl. konkurrierender Betreiber in Abschnitt 13 unterstreichen vor allem für kleinzellige PCS Anwendungen mit hoher Verkehrsbelastung die Notwendigkeit, viele Feststationen einzusetzen. Relais können hier die Feststationen teilweise ersetzen. Dort wo ein Betreiber einen RFP bzw. ein Relais installiert, ist die Versorgung seiner Kunden gesichert.

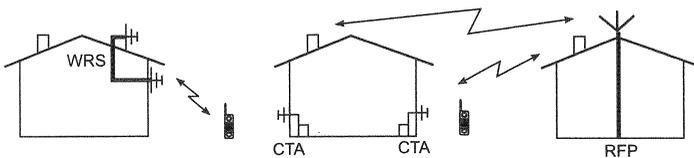


Abbildung 15.3: Outdoor-Szenario

Werden für eine mobile Versorgung die Antennen unterhalb der Dachkanten montiert, können Relais eingesetzt werden (s. Abb. 15.3). Falls an den Dachkanten keine Sichtverbindung zur nächstgelegenen RFP besteht, kann ihr Anschluß mit gesonderten Antennen oberhalb der Dächer geschehen, so daß die geforderte Entkoppelung der Verbindungen gewährleistet ist. So ist es möglich, in bestehenden RLL-Netze die für Mobilität notwendige Funkversorgung zu garantieren und einen kombinierten Dienst anzubieten, ohne auf Kabel zurückgreifen zu müssen.

# Zusammenfassung und Ausblick

Es wird in absehbarer Zukunft auf der ganzen Welt zum Aufbau öffentlicher DECT-Systeme kommen. In einigen Ländern stehen gleichzeitig mehrere neue Telekommunikationsanbieter bereit, mit DECT oder vergleichbaren Technologien alternative Ortsnetze zu erstellen. Da DECT als Standard für drahtlose Telefonie bisher für diese Anwendungsform nicht vorgesehen war, besteht sowohl bei Herstellern als auch bei Betreibern Ungewißheit über die Eignung und Leistungsfähigkeit von öffentlichen DECT-Systemen.

Diese Arbeit trägt durch die Vielzahl untersuchter Konfigurationen maßgeblich dazu bei, die Möglichkeiten und Probleme öffentlicher DECT-Systeme aufzuzeigen. Die wesentlichen Fragestellungen nach der möglichen Gesamtkapazität der DECT-Systeme im Freien (Kapitel 12), nach der Beeinflussung unterschiedlicher DECT-Betreiber (Kapitel 13) und nach der Auswirkung öffentlicher auf private DECT-Systeme (Kapitel 14) werden beantwortet.

Die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse wurden durch stochastische Simulation in relevanten Szenarien ermittelt und dienen der Validierung von verkehrstheoretischen Modelle (Kapitel 10), die Aussagen auch für andere Situationen und Szenarien zulassen. Dabei wurden für die Simulationen erstmals ausreichend große Szenarien verwendet, so daß die Ergebnisse auf reale Systeme übertragbar sind, da Randeffekte weitgehend vermieden wurden. Die gute Übereinstimmung der simulativ und analytisch ermittelten Ergebnisse stützt diese Aussage. Simulation und Analytik ergeben zusammen ein mächtiges Werkzeug zur Beschreibung und Analyse derartig komplexer Systeme.

Die hohe Flexibilität von DECT-Systemen ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungsformen in der öffentlichen Versorgung mit Telekommunikationsdiensten. Die Gesamtkapazität hängt dabei stark von der gewählten Systemkonfiguration (RFP-Dichte, Antennentechnologie) und der Struktur der Umgebung ab. Gemessen an den angenommenen Verkehren bei der Versorgung von Kleinkunden können DECT-Systeme als gut geeignet angesehen

werden, da für alle untersuchten Konfigurationen der tragbare Verkehr deutlich über dem geforderten Wert von 200 Erl/km<sup>2</sup> lag.

Die Leistungsgrenze eines DECT-Systems kann durch eine zu geringe Anzahl installierter Transceiver (kapazitätsbegrenzt) oder durch die Belegung aller DECT-Kanäle hervorgerufen werden (interferenzbegrenzt). Für Interferenzbegrenzung sind die Ausbreitungsbedingungen und die Empfängerqualität ausschlaggebend. Liegt eine RLL-Versorgung über den Dächern vor, so kann bei Verwendung von rundstrahlenden Antennen bei GOS=1% ein Verkehr von 4.8 Erl/RFP getragen werden, während in einem PCS-System in den Straßen 13.1 Erl/RFP möglich sind. Der Einsatz sektorisierter Antennen an den RFPs verringert die Interferenzleistung im System. So erhöht sich der tragbare Verkehr durch den Einsatz von drei 120° Antennen pro RFP auf 10.8 Erl/RFP im Vergleich zu 4.8 Erl/RFP bei rundstrahlenden Antennen.

Nimmt man einen deutlichen Anteil (10% bzw. 20%) an ISDN-Verkehr im RLL-Netz an, so verringert sich die Zahl der tragbaren Verbindungen bei Rundstrahlantennen um 13% bzw. 21%.

Diese tragbaren Verkehre sind begrenzt durch die vorhandene Interferenzleistung im DECT-System. Hohe Signaldämpfung zu anderen Teilnehmern und Nachbar-RFPs bewirkt durch die verringerte Interferenzleistung eine starke Kapazitätserhöhung im Gesamtsystem. Durch den Einsatz gerichteter Antennen am Hausanschluß läßt sich ein DECT-System dagegen so konfigurieren, daß es hauptsächlich von der installierten Kapazität an Transceivern der RFP begrenzt wird.

Bei mehreren DECT-Betreibern im gleichen Versorgungsgebiet muß mit Beeinträchtigung durch die konkurrierenden Netze gerechnet werden, solange nicht eine exakt gleiche technische Ausstattung vorhanden ist. Unterschiedlich dicht installierte Basistationen und verschiedene Empfängerqualitäten der Betreiber bewirken eine Benachteiligung des schlechter ausgerüsteten Betreibers.

Die maximal zur Verfügung stehende DECT-Kapazität kann nur ausgeschöpft werden, wenn für Abschattung benachbarter Standorte gesorgt wird. Dies kann nur erreicht werden, wenn alle RFP Standorte so geplant werden, daß wenig Überlappungszonen existieren. Für den Aufbau mehrerer DECT-Ortsnetze in einem Gebiet würde dies eine koordinierte Planung der Betreiber bedeuten und kann somit nicht gewährleistet werden.

Asynchroner Betrieb verschiedener DECT-Systeme verringert die Leistungsfähigkeit deutlich (um bis zu 30%), so daß im Falle mehrerer Betreiber

eine externe Synchronisation vorgesehen werden sollte.

Eine gegenseitige Störung von privaten und öffentlichen Systemen wird im Falle einer hohen Marktdurchdringung öffentlicher Anbieter und bei der gleichzeitigen Ausweitung des Dienstangebotes auf PCS örtlich begrenzt spürbar sein. Betroffen sind davon große private Systeme wie drahtlose Nebenstellenanlagen. Vor allem bei hoher Akzeptanz von ISDN-Diensten und der damit verbundenen starken Auslastung der Systeme werden Private durch besondere Vorkehrungen, wie z.B. exklusive Frequenzzuweisung im DECT-Band, Interessenschutz benötigen. Gleichzeitig muß für die öffentlichen Betreiber ein Erweiterungsband zur Verfügung stehen.

Es bleibt anzumerken, daß gewisse Unsicherheiten bezüglich der verwendeten Ausbreitungsmodelle und deren Gültigkeit in realen Umgebungen eine Überprüfung der Ergebnisse in Feldversuchen wünschenswert erscheinen lassen.

Diese Arbeit behandelt noch nicht die Fragestellung, wie sich RLL- und PCS-Systeme gegenseitig beeinflussen, da abgesicherte Modelle für die Funkausbreitung zwischen den beiden "Systemebenen" z.Zt. erst entwickelt werden. Erste Ergebnisse hierzu werden in [45] veröffentlicht.

## ANHANG A

---

### Liste der Abkürzungen

<b>ADPCM</b>	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
<b>ARQ</b>	Automatic Repeat reQuest
<b>BCCH</b>	Broadcast Control CHannel
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BMC</b>	Broadcast Message Control
<b>BS</b>	BasisStation
<b>BCB</b>	Connectionless Bearer Control
<b>CCITT</b>	International Telegraph and Telephone Consultative Committee
<b>CEP</b>	Connection End Point
<b>CI</b>	Common Interface
<b>CMC</b>	Connectionless Message Control
<b>CNCL</b>	Communication Networks Class Library
<b>C-PLANE</b>	Control Plane
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>C/I</b>	Carrier to Interferer Ratio
<b>C/L</b>	ConnectionLess mode
<b>C/O</b>	Connection Orientated mode
<b>DBC</b>	Dummy Bearer Control
<b>dbm</b>	db relativ zu 1 Milliwatt
<b>DECT</b>	Digital Enhanced Cordless Telecommunications <sup>1</sup>
<b>DLC</b>	Data Link Control
<b>ERP</b>	Effective Radiated Power
<b>ETS</b>	European Telecommunication Standard

---

<sup>1</sup>Seit Beginn 1996 steht DECT nicht mehr für *Digital European Cordless Telecommunications*

<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FP</b>	Fixed Part
<b>FT</b>	Fixed radio Termination
<b>GIST</b>	Graphical Interactive Simulation result Tool
<b>GFSK</b>	Gaussian Frequency Shift Keying
<b>GOS</b>	Grade of Service
<b>IBC</b>	Idle Receiver Control
<b>ISDN</b>	Integrated Services Digital Network
<b>IWU</b>	InterWorking Unit
<b>LLME</b>	Lower Layer Management Entity
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MBC</b>	Multi Bearer Control
<b>MS</b>	MobilStation
<b>NWL</b>	NetWork Layer
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PABX</b>	Private Automatic Branch eXchange (Nebenstellenanlage)
<b>PCS</b>	Personal Communication Service
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>PHL</b>	PHysical Layer
<b>PP</b>	Portable Part
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network
<b>PT</b>	Portable radio Termination
<b>PTN</b>	Private Telecommunication Network
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RES</b>	Radio Equipment and Systems
<b>RLL</b>	Radio in the Local Loop
<b>RFP</b>	Radio Fixed Part
<b>RSSI</b>	Radio Signal Strength Indicator
<b>SAP</b>	Service Access Point
<b>SDU</b>	Service Data Unit

<b>TBC</b>	Traffic Bearer Control
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>U-PLANE</b>	User Plane
<b>WLL</b>	Wireless Local Loop

## ANHANG B

---

### Feste Parameter der Simulationen

Im folgenden werden diejenigen Simulationsparameter vorgestellt, die für die Interpretation der Ergebnisse und eventuelle Vergleiche wichtig sind. Sollten im laufenden Text abweichende Werte genannt werden, so sind sie im jeweiligen Kontext gültig:

#### Timer und Counter aus der DECT-Spezifikation

N202	Maximale Anzahl möglicher Kanalwahlversuche innerhalb von $T210$ Sekunden 10 Versuche
T200	Maximale Dauer eines Verbindungsaufbaus 300 Time Slots = 3 Sekunden
N200	Maximale Anzahl der Versuche zum Verbindungsaufbau 10 Versuche
T210	Zeitintervall für maximal 10 Kanalwahlversuche $N202$ 200 Time Slots = 2 Sekunden
T202	Maximale Dauer eines Handoverprozesses Sperrung für Handoverdurchführung 300 Time Slots = 3 Sekunden
N201	Maximale Anzahl der Versuche eines Verbindungsaufbaus während eines Handover 15 Versuche

#### Parameter zum Radio Resource Management

HO_CHECK_COUNTER	Anzahl der Time-Slots, nach denen bei einem erfolgreichen Handover die Feststation entscheidet, welcher Bearer aufgelöst wird (nach Standard max. 16 Time-Slots) 10 Time-Slots
------------------	---

SETUP_CHECK_COUNTER	Anzahl der Time-Slots beim Bearer-Setup-Check 3 Time-Slots
SELECT_FT_TIMER	Zeit zur Mittelung der RSSI-Werte bei der Auswahl einer Feststation (bei diesem Parameter auf BUFSIZE achten) 10 Time-Slots
SELECT_CHAN_TIMER	Zeit zur Mittelung der RSSI-Werte bei der Kanalwahl 10 Time-Slots
CHECK_LEVEL_TIMER	Anzahl der berücksichtigten RSSI-Werte bei dem Handoveralgorithmus 1 Wert
GET_LEVEL_TIMER	Intervallzeit zwischen zwei RSSI-Messungen für den Handoveralgorithmus 1 Time-Slot
GET_QUALITY_TIMER	Intervallzeit zwischen den CRC-Checks für den Handoveralgorithmus 1 Time-Slot
BUSY	Alle Kanäle, auf denen ein RSSI-Wert oberhalb von <i>BUSY</i> gemessen wird, werden in der Kanalliste als "belegt" markiert -33.0 dBm
QUIET	Alle Kanäle, auf denen ein RSSI-Wert unterhalb von <i>QUIET</i> gemessen wird, werden in der Kanalliste als "frei" markiert -93.0 dBm
SECTION	Auflösung der Kanalliste zwischen den Werten <i>QUIET</i> und <i>BUSY</i> 6 dBm

### Parameter zum Ausbreitungsmodell (Indoor und Outdoor)

ALGORITHMUS	Dieser Schalter steuert die Berechnungsvorschrift. Es stehen mehrere Ausbreitungsmodelle für Outdoor, Indoor und gemischte Szenarien zur Verfügung.
-------------	---

PENET_LOSS_MODELL	Bei Indoor oder Indoor/Outdoor Anwendungen kann zwischen festen Einfügedämpfungen und materialabhängigen unterschieden werden. Bei den Untersuchungen dieser Studie wurden die Einfügedämpfungen entsprechend den Tabellen 7.1 und 7.2 verwendet.
WALLATT	Feste Abschwächung beim Durchdringen einer Wand 7 dB
FLOORATT	Feste Abschwächung beim Durchdringen einer Decke 15 dB
NOISE0	Hintergrundrauschen (in mW) 3.16E-11 mW
IBER	Irreversible Bitfehlerrate 0.0
L_SHD	Mittelwert für Shadowfading (in dB) 1.0 dB
V_SHD	Varianz des Shadowfading (in dB) 1.0 dB
V_RLG	Varianz des Rayleighfading (in dB) 12.0 dB
L_RIC	Mittelwert des Ricefading (in dB) 4.0 dB
V_RIC	Varianz des Ricefading (in dB) 12.0 dB
FADE_MARGIN	Festes Fade-Margin zur beschleunigten Simulation. Es wird entweder das dynamische Fading (s.o.) oder dieses Margin gebraucht. 10.0 dB

### Angaben zum Lastgenerator

AVERAGE_TIME_OF_CALL	Durchschnittliche Rufdauer einer Mobilstation (in Sek.) 120 Sekunden
ERL	Durchschnittliche Verkehrslast pro Mobilstation in Erlang 0.1 Erlang

**MAX\_MOBILES** Anzahl der Mobilstationen. Dieser Parameter wird zur Einstellung der gewünschten Verkehrslast benutzt.

### Angaben zum Handover-Algorithmus

**HO\_RSSI\_THRESHOLD** Schwellenwert für einen RSSI-Handover (in dB)  
15 dB

**FT\_FIXED** Feste Zuordnung der Mobilstationen zu jeweils nur einer RFP (RLL Anwendungen)

**CHANGE** Wechsel bei RSSI-Handover zur gleichen FT erlaubt,  
falls **CHANGE = TRUE**

**FT\_CRC\_FOLLOWING** Anteil der korrekten CRC-Checks (downlink)  
0.94

**PT\_CRC\_FOLLOWING** Anteil der korrekten CRC-Checks (uplink)  
0.94

**CRC\_BUFSIZE** Größe des Ringspeichers für den CRC-Check.  
50

**RSSI\_BUFSIZE** Größe des Ringspeichers für die RSSI-Werte  
10

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] D. Akerberg. *Draft simulation scenarios for DECT-multi-system and multi-service applications*. Working Document, ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, July 1995.
- [2] D. Åkerberg, F. Brouwer, P.H.G. van de Berg, J. Jager. *DECT Technology for Radio in the Local Loop*. In *Proceedings of IEEE, 44th Vehicular Technology Conference*, pp. 1069–1073, 1994.
- [3] H. Akimaru, K. Kawashima. *Teletraffic, Theory and Application*. Springer-Verlag, Berlin, GE, 1993.
- [4] J. Becker. *Entwicklung und Bewertung von Realisierungskonzepten für eine Schnittstelle zwischen GSM und DECT*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Juli 1994.
- [5] F. Brouwer. *DECT Capacity*. Working Document, ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, March 1995.
- [6] F. Brouwer. *DECT Capacity in Offices*. Working Document, ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, July 1995.
- [7] F. Brouwer. *Preliminary Simulation Results Concerning RLL-CTM Coexistence*. Working Document, ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, March 1995.
- [8] G.K. Chan. *Effects of Sectorisation on the Spektrum Efficiency of Cellular Radio Systems*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 41, No. 3, pp. 217–225, August 1992.
- [9] S. Dijkstra, F. Owen. *Alles spricht für DECT*. Philips Telecommunication Review, Vol. 51, No. 2, 1993.
- [10] T. L. Doumi, T. N. Kanaropoulos, J. G. Gardiner. *Teletraffic performance of indoor cordless communications with co-existing Voice and*

*Data Services*. In *Proceedings of IEEE, 44th Vehicular Technology Conference*, pp. 659–663, 1994.

- [11] S. M. Elnoubi. *Probability of error analysis of digital partial response continuous phase modulation with differential detection in mobile radio channels*. IEEE, University of Illinois at Chicago, 1987.
- [12] ETSI Technical Committee Radio Equipment, Systems TC-RES. *Radio in the Local Loop (RLL), ETR139*. 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, November 1994.
- [13] H. Eriksson, R. Bownds. *Performance of Dynamic Channel Allocation in the DECT System*. In *Proceedings of IEEE, 41th Vehicular Technology Conference*, pp. 693–698, 1991.
- [14] ETSI. European Telecommunications Standards Institute.
- [15] ETSI. *Digital European Cordless Telecommunications, System Description Document*. European Telecommunications Standards Institute, Juni 1991. ETSI Technical Report ETR 056.
- [16] ETSI. *Digital European Cordless Telecommunications (DECT) Common Interface Part 2: Physical Layer*. European Telecommunications Standards Institute, October 1992. ETSI Telecommunication Standard ETS 300 175-2.
- [17] ETSI. *Digital European Cordless Telecommunications (DECT) Common Interface Part 3: Medium Access Control Layer*. European Telecommunications Standards Institute, October 1992. ESTI European Telecommunication Standard ETS 300 175-3.
- [18] ETSI. *Digital European Cordless Telecommunications (DECT) Common Interface Part 9: Public Access Profile (PAP)*. European Telecommunications Standards Institute, October 1992. ETSI European Telecommunication Standard ETS 300 175-8.
- [19] ETSI. *A Guide to the DECT features that influence the traffic capacity and the maintenance of a high radio link quality, including the results of simulations*. European Telecommunications Standards Institute, July 1992. ETSI Technical Report ETR 042.

- [20] ETSI. *Application of DECT Wireless Relay Stations (WRS)*. European Telecommunications Standards Institute, November 1995. ETSI Technical Report ETR 246.
- [21] ETSI. *Generic Access Profile (GAP)*. European Telecommunications Standards Institute, December 1995. ETSI European Telecommunication Standard ETS 300 700.
- [22] ETSI. *DECT; Radio in the Local Loop (RLL) Access Profile (RAP); Part 1: Basis telephony service*. European Telecommunications Standards Institute, July 1996. ETSI European Telecommunication Draft Standard prETS 300 765-1.
- [23] ETSI. *Wireless Relais Station (WRS)*. European Telecommunications Standards Institute, 1996. ETSI European Telecommunication Draft Standard prETS 300 700.
- [24] A. O. Fapojuwo, A. McGirr, D. Kazeminejad. *A Simulation Study of Speech Traffic Capacity in Digital Cordless Telecommunications Systems*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 41, No. 1, pp. 6–16, February 1992.
- [25] S. Fukumoto, D. Park, K. Okada, S. Yoshimoto, I. Sasase. *Spectrum Efficiency of Sektorization for Distributed Channal Assignment in Cellular Systems*. In *Proceesings of IEEE, PIMRC '95*, pp. 552–555, Toronto, C, September 1995.
- [26] J. Gronewold. *Optimierung der Funkausleuchtung von DECT-Systemen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, März 1994.
- [27] B. Gröters. *Untersuchung der Wechselwirkung konkurrierender DECT Systeme*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, February 1996.
- [28] R. Grundmann. *Entwicklung und Simulation von DECT Handover Algorithmen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Mai 1993.
- [29] M. Hata. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-29, pp. 317–325, August 1980.

- [30] A. Henriksson. *Multiapplication scenarios in DECT*. Working Document, ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, June 1995.
- [31] H. Hußmann. *Ein Simulationswerkzeug zur Leistungsanalyse des Radio Resource Managements des DECT Systems*. In *ITG Fachbericht 124 'Mobile Kommunikation'*, pp. 331–343, September 1993.
- [32] IEEE. *Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile-Radio Service*, Vol. 16. Review of The Electrical Communication Laboratory, 1968.
- [33] A. Jagoda, M. de Villepin. *Mobile Communications*. John Wiley and Sons, 1993.
- [34] H.-J. Johnen. *Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Funkausleuchtung im Freien für DECT Systemen*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Dezember 1995.
- [35] J. M. Keenan, A. J. Motley. *Radio Coverage in Buildings*. British Telecom Technology Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 19–24, 1990.
- [36] H. Kerner. *Rechnernetze nach OSI*. Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, Bonn, 1992.
- [37] D. E. Knuth. *The T<sub>E</sub>Xbook*. Addison-Wesley, 1984.
- [38] H. Kopka. *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X — Eine Einführung*. Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, Bonn, 1988.
- [39] L Lamport. *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X: A Document Preparation System*. Addison-Wesley, 1986.
- [40] I. Lenzen. *Entwicklung und Bewertung eines Relais-Konzeptes als Erweiterung des DECT-Standards*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, April 1995.
- [41] P. Olanders. *DECT Standardization – Status Quo and future Activities*. In *Proceedings of IEEE, PIMRC '94/WCN*, pp. 1064–1069, 1994.
- [42] F. Ostrowski. *Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung asynchroner DECT-Systeme*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Juni 1995.

- [43] J. Paradells, A. Calveras, C. Carpintero, V. Casares. *DECT Multibearer Channels*. In *Proceedings of IEEE, 44th Vehicular Technology Conference*, pp. 696–700, 1994.
- [44] J. Paradells, C. Rossignani, C. Carpintero. *Access and Handover Methods in a DECT like System*. In *Proceedings of IEEE, PIMRC '93*, pp. 710–714, 1993.
- [45] C. Plenge, M. Scheibenbogen. *Suitability of DECT for outdoor applications*. In *to be published in Proceedings Seventh Nordic Conference in Digital Mobile Radio Communications '96*, Copenhagen, DK, October 1996.
- [46] Microsoft Press. *Richtig einsteigen in C++*. Microsoft Press Deutschland, München, 1992.
- [47] M. Richter. *Ein Rauschgenerator zur Gewinnung von quasi-idealen Zufallszahlen für die stochastische Simulation*. Dissertation, RWTH Aachen, 1992.
- [48] R. Roth. *Untersuchung der Kapazität von DECT-Systemen bei der Anwendung im Freien*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Januar 1996.
- [49] A. Schain. *Entwicklung von Handoveralgorithmen für Sprach- und Datenübertragung im DECT-System*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Juni 1994.
- [50] B. Sklar. *Digital Communications, Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [51] B. Stroustrup. *Die C++ Programmiersprache*. Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, Bonn, 1992. (2. Auflage).
- [52] COST 231 'Propagation Models' Subgroup. *Building Penetration Losses*. COST 231 TD (90) 116, Darmstadt, December 1990.
- [53] COST 231 'Propagation Models' Subgroup. *Building Penetration Losses*. COST 231 TD (91) 1, 1991.
- [54] COST 231 'Propagation Models' Subgroup. *Multi-Slope Model*. Technical report, COST 231, 1994.
- [55] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall International Editions, 1988.

- [56] RACE 2020 CODIT UMTS Code Division Testbed. *Final Propagation Model*. R2020/TDE/PS/DS/P/040/b1, Juni 1994.
- [57] M. Tonscheidt. *Untersuchung kooperativer Algorithmen für das DECT Radio Resource Management*. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, Juni 1995.
- [58] K.S. Trivedi. *Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, Frankfurt am Main, Berlin, München, 1982.
- [59] W. Tuttlebee. *Cordless Telecommunications in Europe*. Springer-Verlag, 1990.
- [60] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie I/II*. Vorlesungsskript, 1995.
- [61] B. Walke. *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. Vorlesungsskript, 1996.
- [62] B. Walke, C. Plenge, M. Scheibenbogen. *Technische Realisierbarkeit öffentlicher DECT-Anwendungen im Frequenzband 1880 -1900 MHz*. Studie, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, August 1995.
- [63] J. Wiart, A. Marquis, M. Juy, G. Benoit-Guyod. *Analytical Microcell Path Loss Model at 2.2 GHz*. Technical report, COST 231, 1993.

NACHWORT

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke für die Betreuung und Förderung der Arbeit, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Rembold für die Übernahme des Korreferats.

Herzlich danken möchte ich meinen Diplomanden, Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften, ohne deren Ideen und Fleiß diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Meinen Arbeitskollegen danke ich für die harmonische Zusammenarbeit, die inhaltliche Unterstützung dieser Arbeit und die fruchtbaren Diskussionen über den Tellerrand dieser Arbeit hinaus.

Aachen, im Februar 1997



## AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

### **ABMT Band 1**

**Herrmann, C.**

Stochastische Modelle für ATM-Konzepte.

1. Auflage 1995, 138 Seiten;  
ISBN 3-86073-380-X

### **ABMT Band 2**

**Lawniczak, D. R.**

Modellierung und Bewertung der Datenverwaltungskonzepte in UMTS,

1. Auflage 1995, 230 Seiten;  
ISBN 3-86073-381-8

### **ABMT Band 3**

**Junius, M.**

Leistungsbewertung intelligenter Hand-over-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme.

1. Auflage 1995, 208 Seiten;  
ISBN 3-86073-382-6

### **ABMT Band 4**

**Steffan, H.**

Stochastische Modelle für den Funkkanal und deren Anwendung.

1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-383-4

### **ABMT Band 5**

**Böhmer, S.**

Entwurf eines ATM-basierten Funknetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung.

1. Auflage 1996, 172 Seiten;  
ISBN 3-86073-384-2

### **ABMT Band 6**

**Guntermann, M.**

Universelle Benutzermobilität auf der Basis des Intelligenznetzes - Entwurf, Bewertung und Implementierung -

1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-385-0

### **ABMT Band 7**

**Kleier, S.**

Neue Konzepte zur Unterstützung von Mobilität in Telekommunikationsnetzen.

1. Auflage 1996, 204 Seiten;  
ISBN 3-86073-386-9

### **ABMT Band 8**

**Decker, P.**

Entwurf und Leistungsbewertung hybrider Fehlersicherungsprotokolle für paketierte Sprach- und Datendienste im GSM-Mobilfunksystem.

1. Auflage 1997, 208 Seiten;  
ISBN 3-86073-387-7

### **ABMT Band 9**

**Hußmann, H.**

Algorithmen zur Kapazitätsoptimierung schnurloser Mobilfunksysteme nach DECT-Standard.

1. Auflage 1997, 180 Seiten;  
ISBN 3-86073-388-5

### **ABMT Band 10**

**Plenge, C.**

Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme.

1. Auflage 1997, 258 Seiten;  
ISBN 3-86073-389-3





