

# Zur Eignung des DECT-Systems als öffentliches Zugangsnetz

Bernhard Walke,  
Kommunikationsnetze,  
Rhein. Westfälische Technische Hochschule Aachen, Kopernikusstr.16, 52054 Aachen  
EMail: walke@comnets.rwth-aachen.de  
WWW: <http://www.comnets.rwth-aachen.de/~walke>

10. Oktober 1995

## Zusammenfassung

Zugangsnetze auf DECT-Basis werden zur Umgehung des drahtgebundenen Ortsnetzes bestehender Telekommunikations-Netzbetreiber zur Zeit in Europa mit Interesse diskutiert, weil DECT standardisiert ist und europaweit ein Frequenzband verfügbar ist. Trotz einiger bestehender Feldversuche ist bisher ungeklärt, welche Kapazität das DECT-System für öffentliche Anwendungen in Koexistenz mit den bestehenden privaten Systemen hat und welche gegenseitigen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Dieser Beitrag beruht auf einer umfangreichen Simulationsuntersuchung zu dieser und weiteren Fragen (PCS- und ISDN-Fähigkeit, Eignung von Relais, Koexistenz mehrerer öffentlicher DECT-Netzbetreiber, Dienstgüte usw.), die in [8], [9] beantwortet werden. Neben der Darstellung der Probleme werden Antworten auf einige Fragen vorgestellt.

## 1 Einleitung

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 öffentlichen Netzbetreibers (*Public Telecommunications Operator, PTO*), vgl. Abbildung 1.

Die z.Zt. in Deutschland favorisierte Standardlösung sieht vor, Firmenkunden unter Umgehung des Ortsnetzes der Deutschen Telekom AG über Richtfunknetze mit dem POP zu verbinden und mittlere bzw. kleine 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) gut *auszuleuchten*. Abbildung 2 zeigt das zugehörige Referenzmodell [6]. Die verfügbaren Dienste entsprechen denen des Telefonnetzes (*Public Switched Telephone Network, PSTN*) bzw. des ISDN, je nach Ausführung des RT und Art des Funknetzes.

Der Teilnehmer kann innerhalb seines privaten Gebäudes entweder klassisch über drahtgebundene Endgeräte kommunizieren (dann ist sein Ortsnetzanschluß drahtlos, sein hausinterner Anschluß drahtgebun-

# Drahtlose Zugangnetze

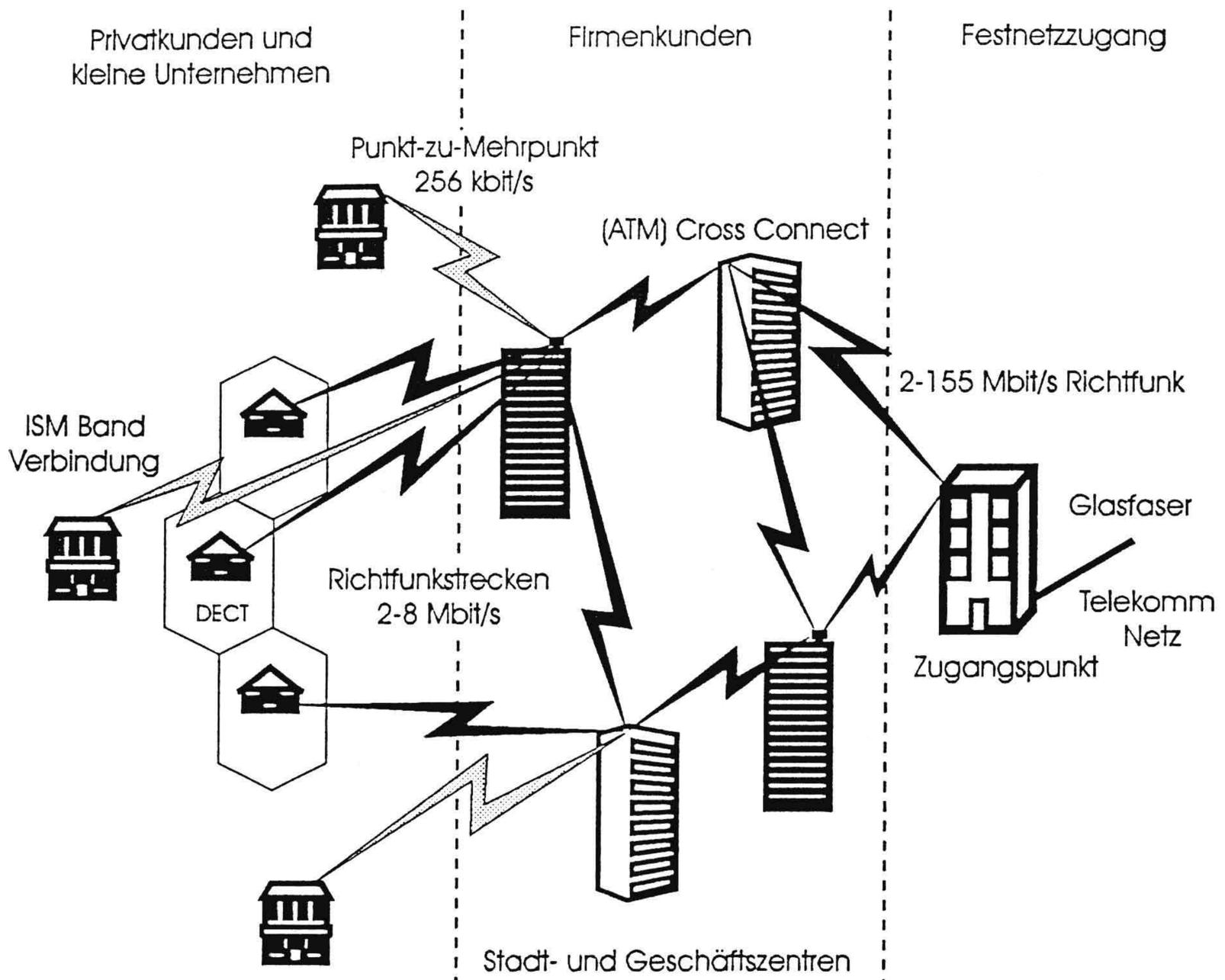


Abbildung 1: RLL Szenario

den), oder er benutzt im Gebäude ebenfalls eine drahtlose Anschlußtechnik, die sich von der im drahtlosen Ortsnetz verwendeten unterscheiden kann.

Steht ein RLL-System zur Verfügung, so liegt es nahe, die 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 und wird dabei zu einem lokalen Mobilfunksystem (*Personal Communication System, PCS*).

Errichtung und Betrieb privater und öffentlicher Funksysteme unterliegen gesetzlichen Regelungen. Der Betrieb von RLL-Systemen in Deutschland setzt eine Lizenzierung durch das Bundesamt für Post und Telekommunikation (BAPT) voraus. Die Richtlinien für die Lizenzierung werden vom Bundesminister für Post und Telekommunikation (BMPT) erlassen.

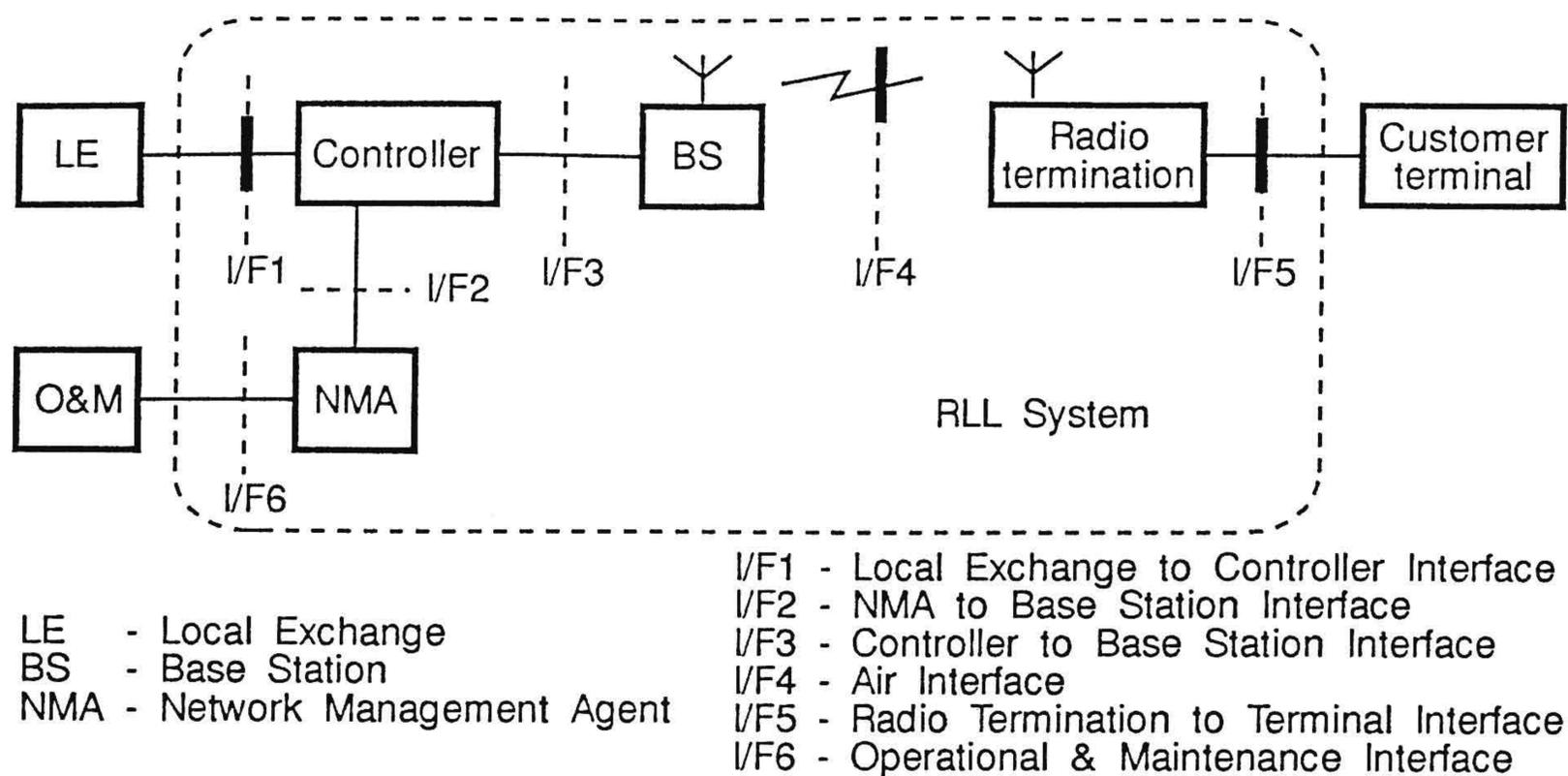


Abbildung 2: RLL Referenzsystem

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 bis zu zwei ISDN-Basisanschlüsse abgedeckt werden kann
2. Sprach- und Datenanwendungen *mittlerer bis großer* Anwender mit einem Verkehrsaufkommen, das einen oder mehrere ISDN-Primärratenanschlüsse 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 (LE), Sicherheit des Funksystems, Elektromagnetischer Kompatibilität, Sicherheit gegen Blitzschlag, Eignung für Relaisbetrieb und elektrischer Sicherheit teilweise unterscheiden. Ihre jeweiligen Stärken und Schwächen sind in [6] beschrieben.

**DECT, Digital European Cordless Telecommunications:** 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. Es ist vorgesehen, RLL-Systeme und öffentliche Mobilfunksysteme (*Telepoint*) im gleichen Frequenzband (20 MHz ab 1880 MHz) zu betreiben. Die gegenseitige Beeinflussung privater und öffentlicher Systeme ist Gegenstand dieser Studie.

**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, ETSI befürwortet den Übergang zu DECT.

**GSM/DCS1800, Global System for Mobile communications:** GSM ist ein Zellularsystem für die großflächige Versorgung, kann aber mit Kleinzellen die erforderliche Kapazität zur Versorgung mobiler und von RLL-Anwendungen für Sprach- und niedrigbitratige Datendienste bereitstellen.

**MPMP, Microwave Point-to-Multipoint systems:** MPMP-Systeme eignen sich für RLL-Anwendungen (mit ISDN-Übertragungsrate), 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.

**Spread Spectrum (SS) Systems:** Es bestehen bisher keine Standards. Angeboten werden Systeme, die mit Codespreizung (*Code Division Multiple Access, CDMA*) nach dem Direct Sequence bzw. nach dem Frequency Hopping Verfahren in Kombination mit TDMA übertragen. Beide Typen von CDMA-Systemen sind erfolgreich in Gebrauch und lassen erwarten, daß sie in Zukunft für RLL- und Mobilfunkanwendungen eine wichtige Rolle spielen werden.

### Für RLL-Anwendungen heute geeignete Funkssysteme

1. **DECT:**  
standardisiert, unterstützt ISDN RLL-Anwendungsklasse 1, deckt auch PCS/Telepoint ab, verfügbar.
2. **GSM/DCS1800:**  
standardisiert, unterstützt RLL-Anwendungsklasse 1 nur eingeschränkt (Sprache), deckt auch PCS/Telepoint ab, verfügbar.
3. **Microwave Point-to-Multipoint:**  
nicht standardisiert, ISDN-kompatibel, unterstützt die RLL-Anwendungsklassen 1 und 2, nicht PCS geeignet, verfügbar.
4. **Spread Spectrum Systeme:**  
nicht standardisiert, ISDN-kompatibel, unterstützt die RLL-Anwendungsklasse 1 (z.T. auch 2), PCS geeignet, verfügbar.

Diese Arbeit konzentriert sich im folgenden allein auf die Untersuchung der Eignung von DECT-Systemen für RLL-Anwendungen. Dabei sollte nicht vergessen werden, daß es auch andere für RLL geeignete Systeme gibt (s.o.).

Die Entwicklung von Relais-Konzepten erhöht die Flexibilität und Leistungsfähigkeit von DECT Systemen speziell für die Funkversorgung schwieriger Indoor- und RLL-Anwendungsformen. Dabei wird der Drahtanschluß der Feststationen durch einen Funkanschluß abgelöst, wobei die betreffende Feststation zum Relais wird. Durch Kombination von Feststationen und Relais können ganze Stadtteile an das Telekommunikationsnetz eines öffentlichen Netzbetreibers angeschlossen werden.

Der Einsatz von Relais ist nur sinnvoll und vertretbar, wenn die Kapazität des DECT-Systems lokal ausreicht, da jedes Relais pro Verbindung einen Funkkanal mehr als die drahtgebundene Feststation belegt. Die verfügbare Systemkapazität (Erlang/km<sup>2</sup>) sinkt also mit zunehmender Zahl eingesetzter Relais.

Um die *technische Realisierbarkeit öffentlicher DECT-Anwendungen im Frequenzband 1880-1900 MHz* untersuchen zu können, wurden spezielle, besonders aussagekräftige Szenarien ausgewählt und durch stochastische Simulation untersucht. Das Interesse konzentriert sich u.a. auf die Fragen, ob der Betrieb mehrerer konkurrierender DECT-Netze im bestehenden Frequenzband am gleichen Ort empfohlen werden kann und unter welchen regulatorischen Vorgaben. Überschlägige Berechnungen von Fachleuten zeigen, daß viele, selbst nicht synchronisierte DECT-Systeme koexistieren können, wenn die Verkehrslast nicht zu groß bzw. die Feststationen genügend dicht angeordnet sind. Eine solche Betriebsart eignet sich zumindest als Einführungsszenarium. In der Fachliteratur wird regelmässig darauf verwiesen, daß ein zum bestehenden Band benachbartes *reguliertes* Frequenzband (von 5 bis 10 MHz Bandbreite) wünschenswert ist, das für lizenzierte Betreiber reserviert werden sollte, damit ein öffentlicher Betreiber die Dienstgüte seines Netzes steuern kann und nicht den quasi zufällig auftretenden Störungen durch private DECT-Systeme

ausgesetzt ist. Die erforderliche Bandbreite des Erweiterungsbandes hängt davon ab, welche Dienste für RLL-Anwendungen angestrebt werden. Bei Unterstützung von ISDN- und Multimediadiensten ist mehr Erweiterungsbandbreite nötig.

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 weil sich private DECT-Systeme einer stark steigenden Akzeptanz bei Privatkunden erfreuen.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Möglichkeit konkurrierender Betreiber, sich durch technische Maßnahmen vom Regulierer nicht vorhergesehene Vorteile im Wettbewerb gegenüber Mitbewerbern zu verschaffen. Die entsprechenden systematische Untersuchungen sind in [8] dargestellt.

Alle quantitativen Aussagen beruhen auf einer konform zum DECT-Standard durchgeführten Implementierung der Protokolle der Funkschnittstelle, vgl. [9] und ihrer simulativen Untersuchung 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 dafür praktikable Möglichkeit, weil eine Untersuchung des Verhaltens eines realisierten Systems durch Messungen z.Zt. 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. Der Simulator ist in der Programmiersprache C++ unter dem Betriebssystem UNIX auf SUN Workstations realisiert.

Erfahrungsgemäß bestehen bei Fachleuten (zu Recht) Bedenken, wenn Simulationsergebnisse ohne eine detaillierte Beschreibung der Modellierungstiefe und Funktionalität eines Simulators präsentiert werden. Es fehlt dann das erforderliche Vertrauen in die Gültigkeit der Resultate; die in [9] enthaltenen Informationen sind in diesem Sinne *vertrauensbildende Maßnahmen*, denn sie erklären im Detail wie das DECT-System und die Funkausbreitung implementiert bzw. berechnet worden sind.

## 2 DECT-RLL als weiteres Mobilfunksystem?

Die Forderung der Lizenzierung von RLL-Systemen wird mit der Einführung von Wettbewerb im Ortsnetz begründet. Für die Umgehung des drahtgebundenen Ortsnetzes ist es **nicht** notwendig, gleichzeitig mit RLL- auch PCS- und Telepointanwendungen zu lizenzieren, obwohl sich das bei Berücksichtigung der Möglichkeiten des DECT-Systems anbietet.

Die zugunsten einer Kombination dieser Dienste in einem RLL-/PCS-/Telepoint-System vorgetragene Argumentation lautet, daß

1. ein Funkzugangnetz als Konkurrenz zum drahtgebundenen Ortsnetz sich nur 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 durch Einrichtung eines DECT-basierten Mobilfunknetzes (PCS) für den Gebrauch in der Umgebung ihrer festen Ortsnetzanschlüsse (außen) als *Zugabe* zur Erleichterung der Einführung des RLL-Dienstes sehr nützlich wäre und sich aus der Natur von DECT ergibt.

Das dritte Argument macht DECT für Anwendungen im Ortsnetz besonders attraktiv. Seine praktische Umsetzung erfordert eine lückenlose Funkausleuchtung der für RLL-/PCS-/Telepoint-Versorgung vorgesehenen Bereiche. Die Annahme des DECT-basierten PCS-Dienstes durch die Teilnehmer als Substitution bestehender zellulärer Mobilfunkdienste erscheint wahrscheinlich, weil RLL-Systeme insbesondere in Ballungsgebieten die für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderliche Basisstationsdichte erreichen könnten und genau dort eine besonders große Nachfrage nach preiswerten Mobilfunkdiensten für Teilnehmer mit geringer Mobilität besteht. Die dafür erforderliche Mobilitätsverwaltung der Teilnehmer kann wie beim GSM im Festnetz erfolgen, ohne oder mit Nutzung der Einrichtungen bestehender Mobilfunknetzbetreiber.

Es 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 präsent, DECT-PCS-Netz bundesweit entstehen.

Der für den PCS-Dienst (incl. Telepoint) erwartete Kommunikationsverkehr wird erwartungsgemäß einen spürbaren Anteil des gesamten, von öffentlichen Betreibern bedienten Verkehrs erreichen und führt zu Spitzenverkehrsbelastungen an Orten hoher Teilnehmersdichte privater und öffentlicher Systeme, sog. *hot spots*.

Nachfolgend wird davon ausgegangen, daß RLL-Systeme auch PCS- und Telepoint-Dienste einschließen werden, und daß DECT PCS-Systeme auch in Zellularnetze integriert sein werden. Die erforderliche Standardisierung ist bei ETSI bereits abgeschlossen. Mögliche Szenarien der Integration werden in [9] beschrieben und spezifiziert.

### 3 Wechselwirkungen konkurrierender (a)synchroner Systeme

DECT kann dank dezentraler dynamischer Kanalwahl (DCS) und der Möglichkeit der dezentralen Initiierung und Ausführung von Handovern auch benachbart betriebene, asynchrone Systeme unterstützen [5]. Diese Fähigkeit macht einen Hauptvorteil 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 Radio Fixed Parts (RFPs), die zur gleichen DECT-Feststation gehören, Slot-, Frame-, und Multiframe-Synchronisation über die bestehende Verkabelung zwischen dem Festnetzanschluß (FP) und den RFPs gewährleistet wird, ist die Synchronisation benachbarter Systeme nicht ohne weiteres gegeben.

Verschiedene Systeme sind asynchron zueinander, so daß ihre TDMA-Rahmen zeitlich verschoben sind. Dadurch wird der tragbare Verkehr verringert. Systeme können sich optional untereinander synchronisieren, falls diese Funktion implementiert ist.

#### 3.1 Gegenseitige Beeinflussung asynchroner Systeme

Der Betrieb asynchroner Systeme in sich überlappenden Funkzonen 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, vgl. Abbildung 3. Es 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.

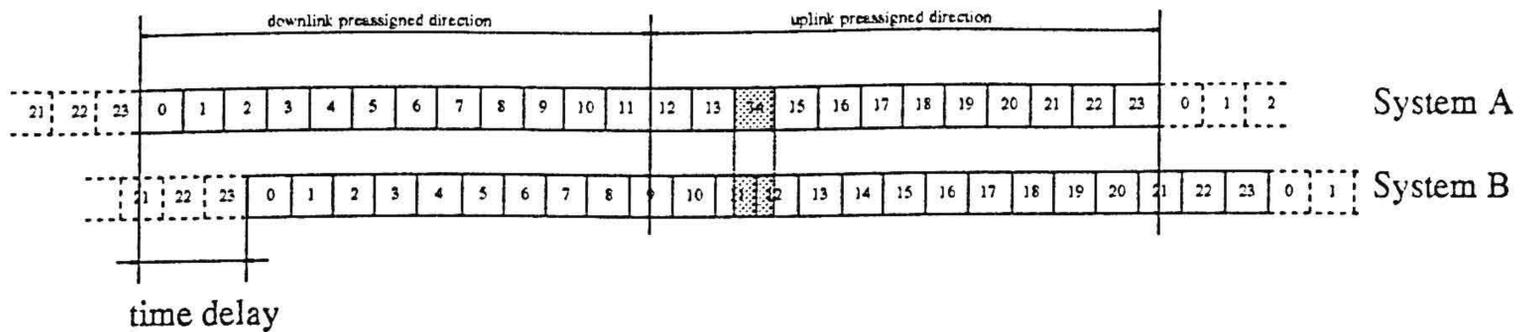


Abbildung 3: Frameverschiebung bei Asynchronität

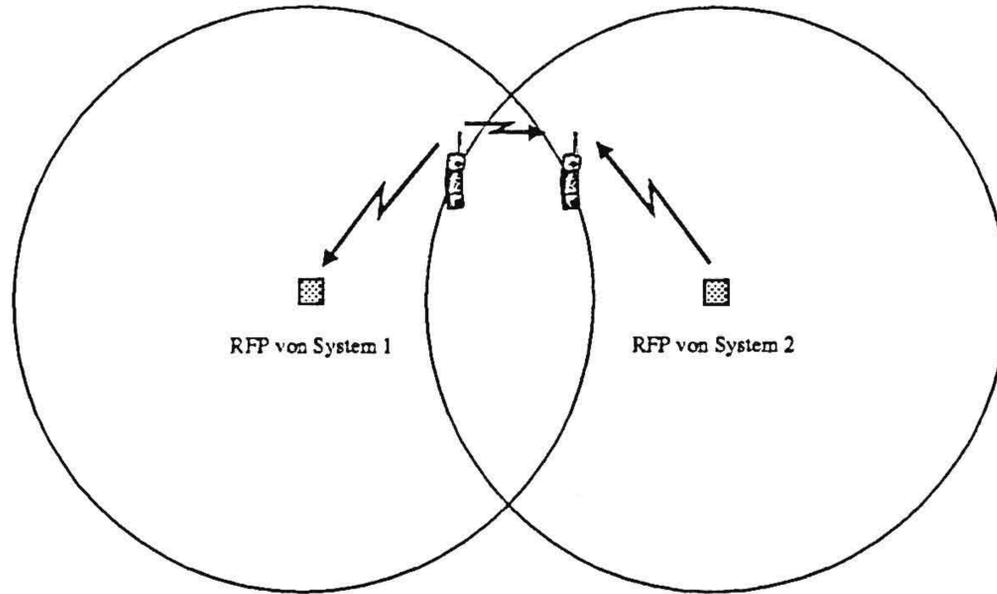


Abbildung 4: Portable-Portable Interferenz durch Aufhebung der Up-/Downlinktrennung

### 3.1.1 Aufhebung der Up-/Downlinktrennung

Die im Multiplexrahmen des DECT-Systems definierte Zeitlagentrennung zwischen Up- und Downlinkübertragung verhindert gegenseitige Interferenzen. Bei synchronen Systemen können Störungen am Empfänger des Mobilteils nur von Sendesignalen anderer RFPs verursacht sein. Da die Mobilstation (PP) in der Regel der stärksten bzw. der am nächsten gelegenen Basisstation 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. Dabei geht die Up-/Downlink-Trennung verloren. Downlink-Übertragungen eines Systems stören den Uplink des anderen Systems und umgekehrt. Neben RFPs des eigenen Systems tragen dann PPs asynchroner Fremdsysteme zu Gleichkanalstörungen beim Empfänger eines PPs bei, vgl. Abb. 4. Ebenso stören RFPs asynchroner Fremdsysteme den Empfang (im PP) der eigenen Basisstation.

## 3.2 Parameter zur Leistungsbewertung

Der Betrieb (a)synchroner Systeme in gemeinsamen oder sich überlappenden Versorgungsbereichen bewirkt eine erhöhte Systembelastung der Einzelsysteme. Für eine simulative Bewertung eignet sich die Anzahl blockierter Setup-Versuche bzw. Anzahl abgebrochener Handovervorgänge.

Diese zwei Parameter bestimmen die Dienstgüte (*Grade of Service, GOS*) des Systems.

$$GOS = \frac{\text{blockierte Setup Versuche} + 10 \cdot \text{abgebrochene Verbindungen}}{\text{Gesamtanzahl der Verbindungen}} \quad (1)$$

Ein niedriger Wert des Grade of Service bedeutet eine hohe Dienstgüte im System, da nur wenige Verbindungsaufbaufehler und nahezu keine Verbindungsabbrüche auftreten.

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

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über den maximal auftretenden Verkehr ("busy hour traffic") in verschiedenen Anwendungen, wie sie aus Drahtnetzen bekannt sind.

Anwendungen	Verkehrslast
Residential	
Suburban	150 Erl/km <sup>2</sup>
Multi Storey Buildings	250 Erl/km <sup>2</sup> /floor
Telepoint Systeme	5.500 Erl/km <sup>2</sup>
sehr große PBX Systeme	10.000 Erl/km <sup>2</sup>

Tabelle 1: Maximale Verkehrslasten in verschiedenen Anwendungsbereichen

Die größten Verkehrsdichten fallen in Gebäuden bei PBX-Anwendungen (Büro) und außen bei PCS-/Telepoint in sog. *hot spots* an. Bei *hot spots* handelt es sich meist um relativ kleine Flächen mit den angegebenen Spitzenverkehren, die von Gebieten mit deutlich kleinerer Verkehrsdichte umgeben sind.

In Abb. 5, Teilbild 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.

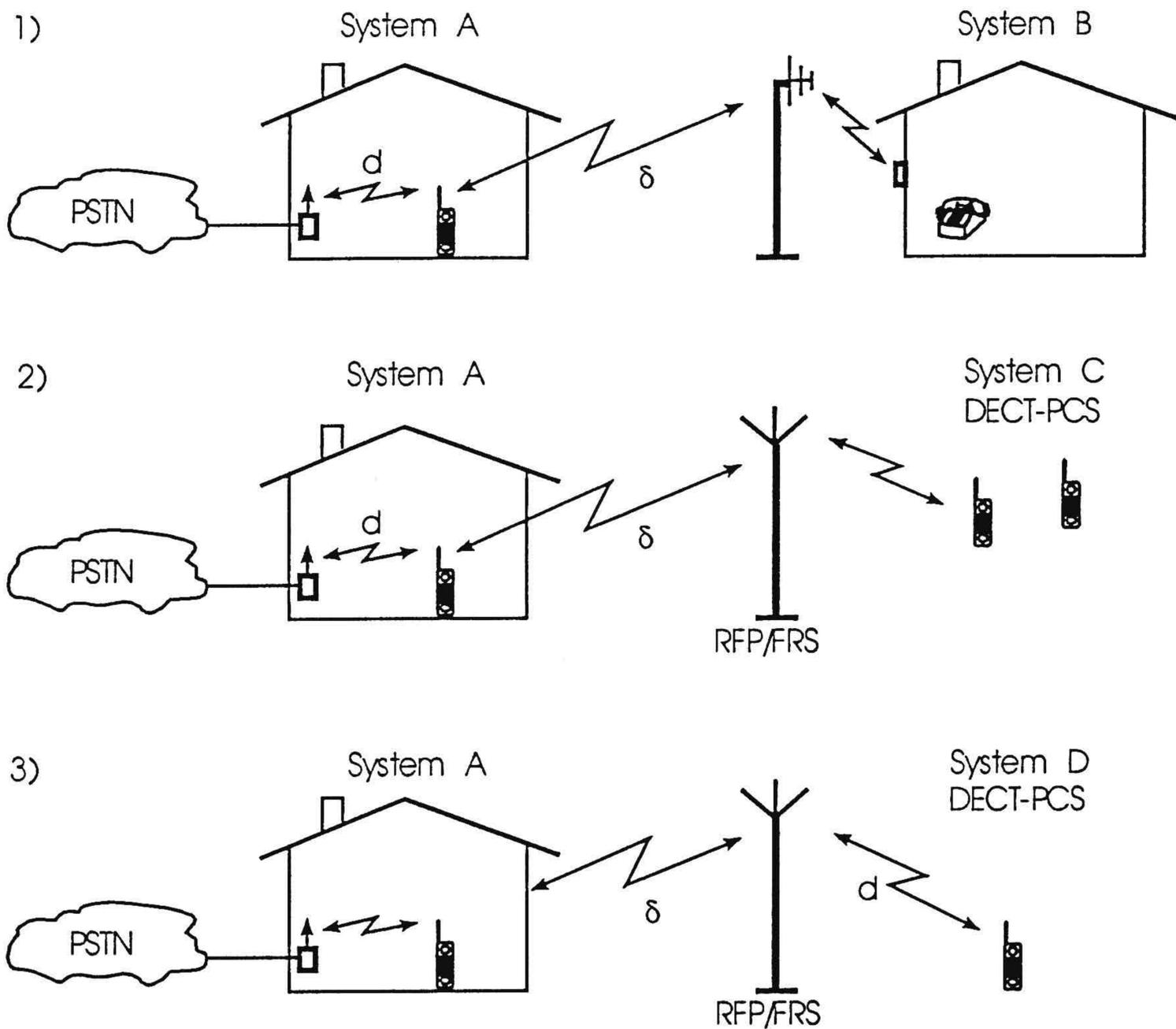
Betreiben konkurrierende Netzanbieter asynchrone Systeme im gleichen Gebiet, so resultiert eine maximale gegenseitige Störung, weil die Überlappung der Systeme vollständig ist.

### 3.4 Maßnahmen zur Verbesserung von Kapazität und Dienstgüte

Synchronismus von Systemen kann durch mehrere Maßnahmen erreicht werden:

**Synchronisation Port** Der dafür erforderliche zusätzliche Anschluß ist nicht immer realisierbar, da RLL-Systeme ihre Berechtigung aus der Vermeidung von Kabeln ableiten.

**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 [5] beschrieben.



- System A: Festnetzteilnehmer mit privater DECT-Hausanwendung (privat/Büro)
- System B: Ortsnetzversorgung durch DECT-RLL
- System C: DECT-PCS System das eine Hausanwendung (privat/Büro) stört
- System D: DECT-PCS System das von einer Hausanwendung (privat/Büro) gestört wird

Abbildung 5: Beeinflussung von residential und RLL-Systemen (RFP=radio fixed part, FRS=fixed relais station)

#### 4 Kenntnisse und Vermutungen über die gegenseitige Beeinflussung von DECT-Systemen in verschiedenen Szenarien nach ETSI/RES-3R(Juli 1995)

	Szenario: gegenseitige Störung von:	Belastung des Spektrums und Erkenntnisse bzw. Vermutungen
1	Privat - Privat	Spektrumsbelastung gering, verglichen mit Büroanwendung. Apartmenthaus entspricht Büroanwendung mit geringer Teilnehmerdichte
2	Privat-Büro/PCS <sup>0</sup> /RLL	Die mögliche Störung durch Privatsysteme ist viel geringer als durch Bürosysteme; die mögliche Störung von Privatsystemen liegt in der Größenordnung wie die Störung von Bürosystemen, vgl. 4.
3	Büro-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-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-RLL (RLL über Dächer, PCS lamp post)	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-RLL	Kritisches Szenario, bei dem die Synchronisation der Systeme für den Betrieb als nötig erachtet wird <sup>5</sup> .

Tabelle 2: Gegenwärtige Einschätzung verschiedener Szenarien bei ETSI/RES-3R [2], [1], [3], [4], [7]

Laut [1] benötigen die bestehenden Modelle und Szenarien Ergänzungen 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
- Notwendigkeit und Einfluß möglicher Frequenzzuweisungen für DECT im europäischen und/oder nationalen Bereich.

Folgende Ergebnisse gelten aus Berechnungen als gesichert [7]:

1. In PCS-Systemen (*neighbourhood access*) mit Ausleuchtung der Häuser von außen, vgl. Abbildung 5, Teilbild 3 liegt bei 70 mErl pro Teilnehmer die typische Reichweite der RFPs bei 70 m. Üblicherweise werden ortsfeste Relais (FRS) benutzt, weil diese Anwendung durch den Pfadverlust des

<sup>0</sup> Personal Communication Service, z.B. Mobilfunk und Telepoint

<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

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 20m (Kaufhaus) und 90m (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 stören sich sehr wahrscheinlich gegenseitig. Wenn der Abstand einer 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 im Abstand  $\delta$  benachbarten Gebäuden untergebracht, dann werden RFPs in nach außen zum Nachbargebäude angrenzenden Räumen 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, vgl. Abbildung 5, Teilbild 2 ergeben, daß alle Kanäle, die von einem 20m 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, vgl. Abbildung 5, Teilbild 3 aus [7] ergeben, daß alle innen in den an die Außenwand des Gebäudes angrenzenden Räume 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: Angenommen, 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 gelten unter Vorbehalt und müssen durch Simulation validiert werden. Sie zeigen jedoch die Tendenz, wie sich Systeme in den jeweiligen Szenarien beeinflussen werden.

## 5 Tragbarer Verkehr und Bündelungsgewinn

Aus der Verkehrstheorie ist bekannt, daß man für die vorliegende Anwendung die Erlang-B Formel zur Berechnung der Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  anwenden darf. Die Verbindungsdauer der Kanäle darf beliebig verteilt sein und wird dabei nur durch ihren Mittelwert erfaßt. Die Verbindungsanforderungen der PPs werden durch einen Poisson-Ankunftsprozeß mit der Rate  $\lambda$  (Rufe pro Zeiteinheit) modelliert; das Produkt aus mittlerer Verbindungsdauer und Ankunftsrate heißt Angebot  $\rho$  und beschreibt den angebotenen Verkehr. Der übernommene Verkehr  $\rho_C$  ist i.d.R. kleiner als  $\rho$ , weil es sich hier um ein Verlustsystem handelt, bei dem ankommende Verbindungswünsche, die keinen freien Kanal antreffen, verlorengehen. Der übernommene Verkehr  $\rho_C$  kann auch durch das Produkt von Verbindungsdauer und Durchsatz  $\lambda_C$  [Verbindungen pro Zeiteinheit] charakterisiert werden.

Abbildung 6 (oben) zeigt das Verlustsystem als Wartemodell. In Abbildung 6 (unten) ist die Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B$  über der Zahl Kanäle  $N$  im Bündel mit dem Angebot pro Kanal  $\rho/N$  als Kurvenparameter allgemein dargestellt.

Beispielsweise würde bei  $N=20$  Kanälen eine Verlustwahrscheinlichkeit  $p_B=0.01$  auftreten, wenn man jeden Kanal im Mittel zu 62% auslastet.

Simulationsuntersuchungen bestätigen, daß man mit dem Erlang-Modell in manchen Szenarien sehr gute Vorhersagen der Verkehrskapazität bei gegebener Dienstgüte machen kann. Das einzige Problem dabei ist die richtige Annahme der im betrachteten Szenario zutreffenden Clustergröße, welche die mittlere Zahl  $N$  verfügbarer Kanäle pro Funkzelle bestimmt.

### 5.1 Berechnungen der Kapazität des DECT-Systems mit der Erlang-B Formel

Im DECT-System stehen insgesamt 120 Kanalpaare zur Verfügung. Jeder Funkkanal erzeugt bei seiner Belegung ein Störfeld, das seine örtliche Wiederverwendung erst nach einer ausreichenden Ausbreitungsdämpfung gestattet. Die anzuwendenden Pfadverlustmodelle hängen vom jeweiligen Szenario ab und führen dazu, daß man in Stadtgebieten im statistischen Mittel mit Clustergrößen von 7 und darunter rechnen darf<sup>6</sup>[7], wenn die RFPs nicht in Sichtweite aufgestellt sind.

Vereinfachend wird nachfolgend  $p_B=0.01$  einer Dienstgüte (grade of service, GOS) von GOS=1% gleichgesetzt, vgl. Gl. (1). Um mit der Dienstgüte des drahtgebundenen Ortsnetzes garantiert gleichzuziehen, wird man u.U. einen Wert GOS=0.5% anstreben.

Unterstellt man eine Funkausleuchtung durch RFPs in der Ebene derart, daß die Versorgungsbereiche benachbarter Zellen nur knapp (bzw. gar nicht) überlappen und stattet jeden RFP mit zehn Transceivern aus (damit garantiert jeder Frequenz-/Zeitkanal an jedem RFP verfügbar ist), dann ergeben sich, je nach unterstellter Clustergröße bzw. daraus resultierender mittlerer verfügbarer Kanalzahl  $N$  je RFP, folgende Auslastungen je Kanal bei gegebenem Wert  $p_B$ , die man auch aus Abb. 6 entnehmen kann, vgl. Tabelle 3:

Cluster	Kanäle/RFP	$\rho/N (p_B = 1\%)$	Erl/RFP	$\rho/N (p_B = 0.5\%)$	Erl/RFP
4	30	0.68	20.4	0.63	18.9
5 <sup>7</sup>	24	0.64	15.36	0.6	14.4
6 <sup>7</sup>	20	0.62	12.4	0.56	11.2
7	17	0.58	9.86	0.53	9.01
9	13	0.525	6.8	0.46	6.0
12	10	0.455	4.55	0.39	3.9
15	8	0.39	3.1	0.32	2.5

Tabelle 3: Tragbarer Verkehr pro RFP, je nach Clustergröße bei 10 Transceivern/RFP

Anstelle der Ausstattung jedes RFPs mit 10 Transceivern reichen deutlich weniger, z.B. nur ein oder zwei Transceiver je RFP aus, wenn die Versorgungszonen benachbarter RFPs sich ausreichend überlappen,

<sup>6</sup>Ein Cluster beschreibt bei Zellularsystemen die Anzahl benachbarter Zellen, in denen jeder Frequenzkanal nur einmal auftreten darf. Bei DECT liegt zwar kein Zellularsystem vor, jedoch gelten vergleichbare Funkausbreitungsgesetze, so daß man für jeden Zeitkanal eines Frequenzbandes ebenfalls eine, dem Cluster entsprechende, sich dynamisch ergebende örtliche Wiederverwendung beobachten kann. Diese Cluster sind zu unterscheiden von der Gruppe von RFPs/FRSs, die am gleichen Zugangspunkt zum Festnetz angeschlossen sind und im Standard Cluster genannt werden.

<sup>7</sup>Die Clustergrößen 5 und 6 sind als Mittelwerte zu verstehen, die in Zellularsystemen nicht möglich sind, im DECT-System aber auftreten können.

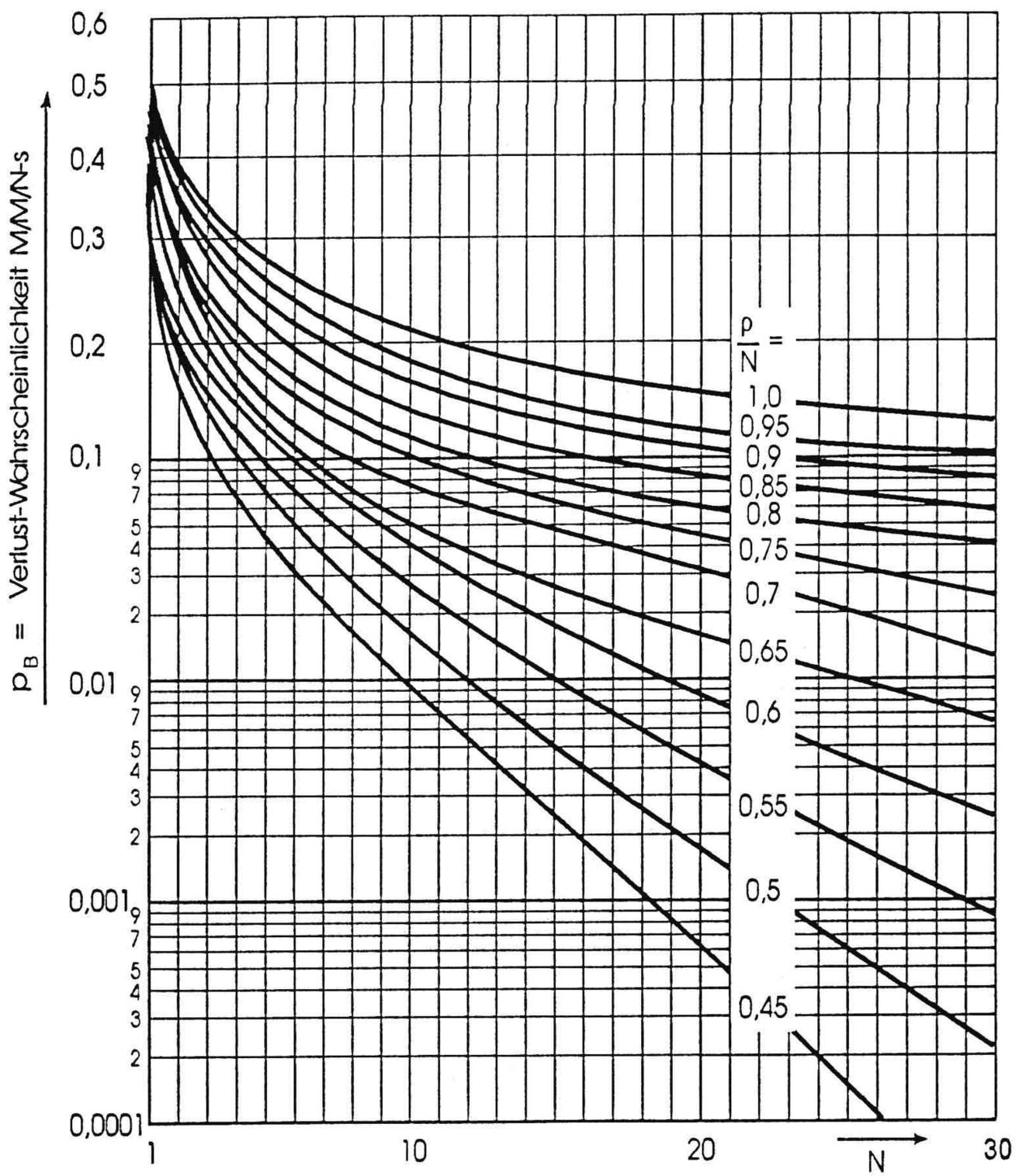
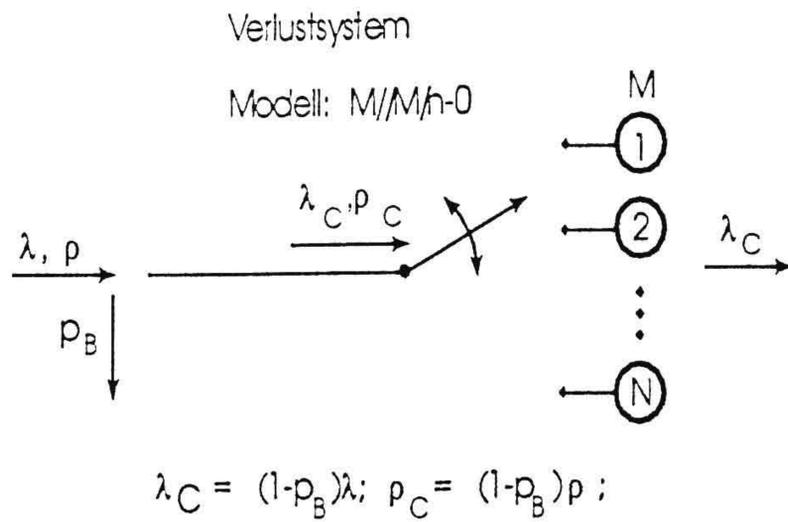


Abbildung 6: Verlustwahrscheinlichkeit über der Bündelstärke nach Erlang-B Formel

so daß ein PP grössenordnungsmässig 17 bis 24 Zeitkanäle (der eigenen und aller benachbarten RFP zusammen) erreichen kann, wie sie sich für 7er bis 5er Cluster in Tabelle 3 ergeben.

Unterstellt man eine Funkausleuchtung durch RFPs in der Ebene derart, daß die Versorgungsbereiche benachbarter Zellen nur knapp (bzw. gar nicht) überlappen, wie das für einen festen Hausanschluß zutrifft und stattet jeden RFP mit nur einem Transceiver aus, dann ergeben sich (entsprechend einer Clustergröße von 10) folgende Ergebnisse, die man leicht aus Abb. 6 nachvollziehen kann, vgl. Tabelle 4:

Kanäle/RFP	$\rho/N (p_B = 1\%)$	Erl/RFP	$\rho/N (p_B = 0.5\%)$	Erl/RFP
12	0.5	6.0	0.44	5.3

Tabelle 4: Tragbarer Verkehr pro RFP bei einem Transceiver je RFP

Der tragbare Verkehr je RFP laut Tabelle 4 stellt für ebene Anordnungen eine untere Lastgrenze (bei gegebener Verlustwahrscheinlichkeit) dar.

Überlappen die Funkversorgungsbereiche der mit einem Transceiver bestückten RFPs, so wächst die je PP erreichbare Zahl von Kanälen entsprechend und der tragbare Verkehr je RFP erreicht die Werte aus Tabelle 3, je nach Szenario. Überlappung fördert den Lastausgleich zwischen Orten mit viel bzw. wenig Verkehrsaufkommen und ist deshalb sinnvoll; insbesondere wird Hardwareaufwand für Transceiver eingespart.

Stehen die RFPs/FRSs sehr dicht (Zellradius z.B.  $< 50\text{m}$ , weil ein sehr hoher Verkehr zu tragen ist), dann steigt die Wahrscheinlichkeit für Sichtverbindungen zwischen RFPs stark an und die Clustergröße steigt auf Werte von 20 und mehr (mit entsprechend kleiner verfügbarer Kanalzahl/RFP und entsprechend geringem tragbarem Verkehr je RFP). Unter solchen Umständen stößt das DECT-System dann an die Kapazitätsgrenze.

Für räumliche Anordnungen von RFPs, wie sie sich in mehrstöckigen Gebäuden ergeben, ist erfahrungsgemäß der tragbare Verkehr je RFP ca. 25 bis 30 % geringer als in Tabelle 3 angegeben.

## 5.2 Konkurrierende Betreiber im gleichen Versorgungsgebiet

Diskutiert wird die Lizenzierung mehrerer konkurrierender DECT-Betreiber im selben Versorgungsgebiet. Hier 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 5.1 weiterhin. Unabhängig von der RFP/FRS-Dichte der Betreiber steht dieselbe Gesamtkapazität des DECT-Systems zur Verfügung, wie in den Tabellen 3 und 4 berechnet. Die Betreiber können und müssen sich diese Kapazität teilen.

In Abschnitt 5.1 wurde darauf hingewiesen, daß

- die pro FRP/FRS eingesetzte Sendeleistung und damit die Überlappung der Versorgungsgebiete benachbarter Zellen eines Betreibers
- die Zahl Transceiver pro Feststation

wesentliche Einflüsse auf die von einer PP erreichbare Zahl Kanäle (die Bündelstärke) haben. Die Dienstgüte der Betreiber läßt sich also durch entsprechende Maßnahmen beeinflussen. Unsere Simulationsergebnisse zeigen, daß bei konkurrierenden Betreibern jeder seine RFPs mit mehr Transceivern

ausstatten muß, als ein einzelner Betreiber, um dieselbe Systemkapazität und Dienstgüte zu erreichen. Neben der Ausrüstung mit vielen Transceivern gibt es weitere Möglichkeiten, wie ein Betreiber sich auf Kosten des anderen (bei Bedarf oder ständig) Vorteile verschaffen kann. Die nachfolgende Aufzählung ist sicher unvollständig.

Betreiber im gleichen Frequenzband können sich Kapazitätsvorteile auf Kosten des Mitbewerbers u.a. verschaffen durch (vgl. [8]):

- Einsatz einer höheren Dichte von RFP/FRS-Stationen
- Einsatz mehrerer Transceiver pro RFP/FRS-Basistation
- Einsatz der maximal zulässigen Sendeleistung
- Anwendung technischer Maßnahmen, um Kanäle zu reservieren
- Absichtliche Störung bestehender Verbindungen des Wettbewerbers mit dem Ziel, den gestörten Kanal selbst zu nutzen

## 6 Simulationsergebnisse

Nun werden einige Simulationsergebnisse kurz vorgestellt und interpretiert; die dafür gemachten Annahmen sind in [9] dargestellt.

### 6.1 Kapazitätsabschätzungen großflächiger DECT Systeme

Für die Kapazitätsuntersuchungen wurden große Szenarien mit jeweils 16 RFPs verwendet um Randeffekte durch Fehlen störender Nachbarzellen zu verringern. Es wurden hier alternativ Sendereichweiten von 340 bzw. 170m unterstellt, mit einer Szenariogröße von 2.5km\*2.4km bzw. 1.2km\*1.2km (Abbildungen 7 und 8).

Bei diesen Untersuchungen wurden zur Analyse der Kapazität von DECT Systemen in diesen Szenarien, neben der Verkehrslast, auch die technische Ausstattung der RFPs variiert. Bei den Untersuchungen mit nur einem DECT System die Transceiverzahl von 1 auf 3 erhöht. Außerdem wurde eine Untersuchung mit 1 Transceiver/RFP durchgeführt, bei der Mobilstationen kein Handover zu anderen RFPs durchführen dürfen um die Kapazität abzuschätzen, wenn das "Mobilgerät" mit Richt-Antennen versehen und fest installiert ist. (z.B. an einer Hauswand).

Ferner wurden Untersuchungen mit 2 bzw. 3 Betreibern im gleichen Szenario mit synchronen Systemen vorgenommen, die sich das DECT Band teilen.

Die Szenario-Ausleuchtung ist in den Abbildungen 9 und 10 erkennbar. Die Zellen überlappen um ca. 30%.

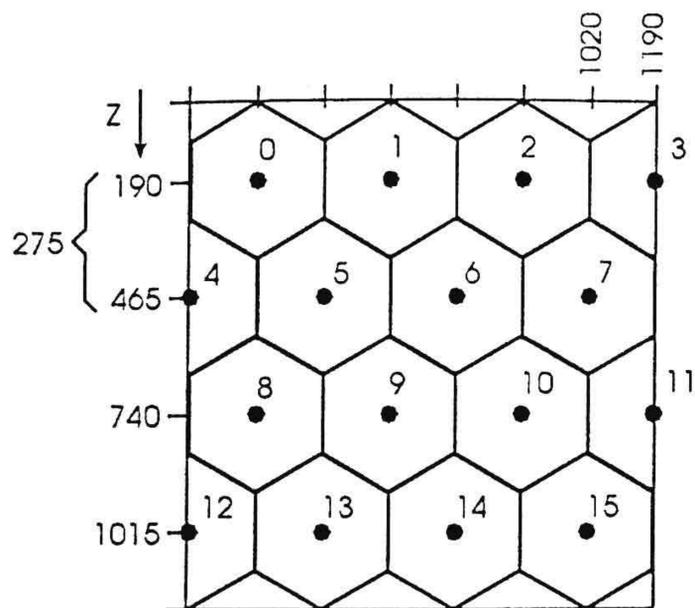


Abbildung 7: Großes Szenario mit 170 m Reichweite

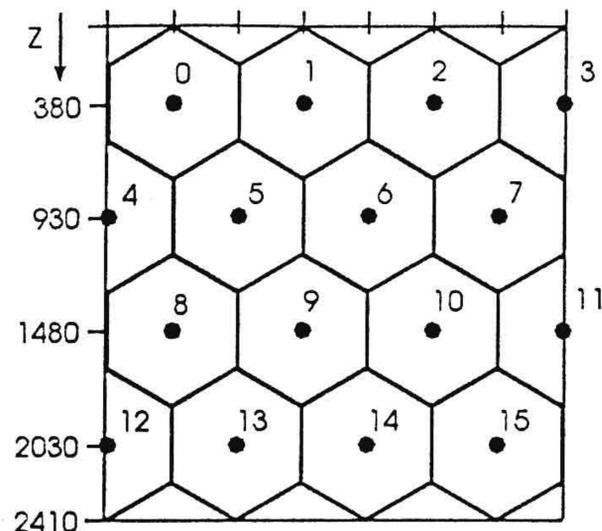


Abbildung 8: Großes Szenario mit 340 m Reichweite

### 6.1.1 Ergebnisse bei einem Betreiber

Der für einen gegebenen Verkehr pro Transceiver resultierende GOS für das Szenario mit 340m Sendereichweite ist in den Abbildungen 11 bis 14 dargestellt. Für 170m Sendereichweite ergeben sich entsprechende Ergebnisse. Sie lassen wichtige Schlussfolgerungen bezüglich des DECT Systemverhaltens und der Kapazität zu.

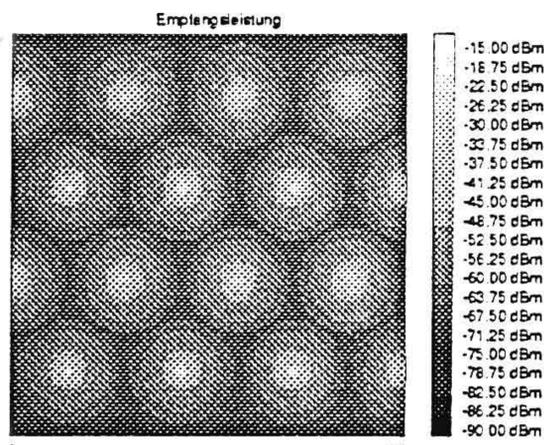


Abbildung 9: Großes Szenario mit 170 m Reichweite

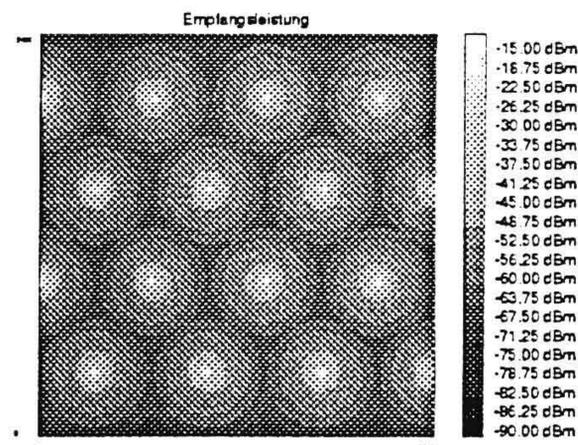


Abbildung 10: Großes Szenario mit 340 m Reichweite

Im Gegensatz zu analytischen Kapazitätsvoraussagen bei Kapazitätsbegrenzung<sup>1</sup> des DECT Systems nach der Erlang-B Formel (6 Erlang bei 12 Kanälen/RFP, siehe Tabelle 4), kann das System mit einem Transceiver bis zu 9.3 Erlang pro RFP bei einem GOS von 1% tragen. Durch die starken Überlappungen der Zellen gibt es große Bereiche, in denen die Mobilstationen zu Nachbarzellen ausweichen können, falls die eigene RFP belegt ist. Dadurch wird die Kapazitätsbegrenzung der lokalen RFP aufgehoben. So ist das System in der Lage, bis zum Erreichen der Interferenzbegrenzung im eigenen Cluster noch freie Kanäle bei Nachbar-RFPs zu finden und es stellt sich ein deutlich höherer tragbarer Verkehr ein, als für 12 Kanäle bei einem Transceiver berechenbar.

<sup>1</sup>Kapazitätsbegrenzung eines Systems liegt dann vor, wenn die Kanäle der RFPs so ausgelastet sind, daß der gegebene GOS überschritten wird, Interferenzbegrenzung bedeutet dagegen, daß durch Interferenzen aus Nachbarzellen kein freier Kanal mehr gefunden wird, obwohl die eigene RFP noch Kanäle frei hätte.

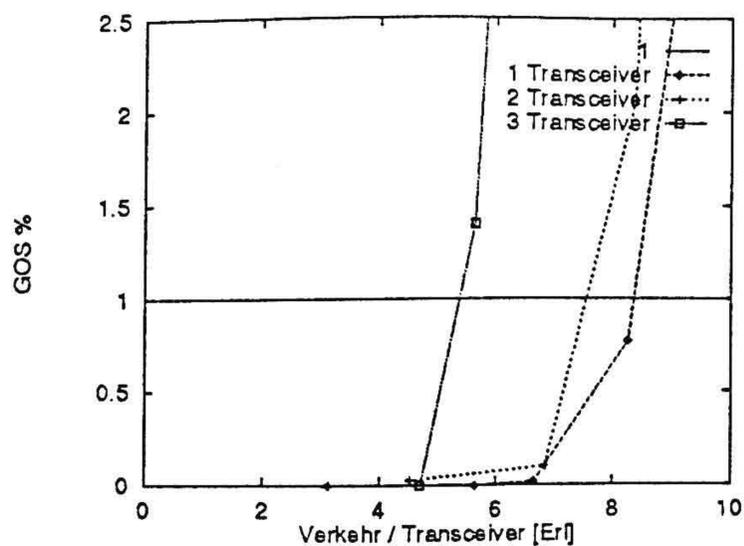


Abbildung 11: 340m: Ein Betreiber

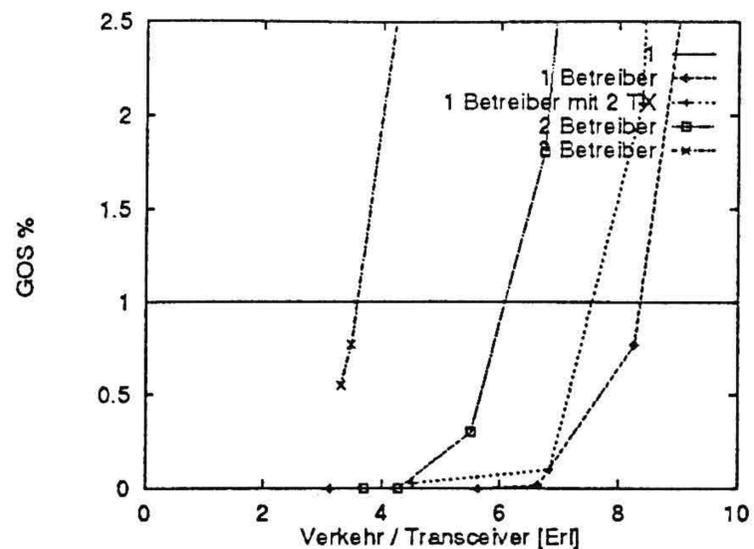


Abbildung 12: 340m: Mehrere Betreiber

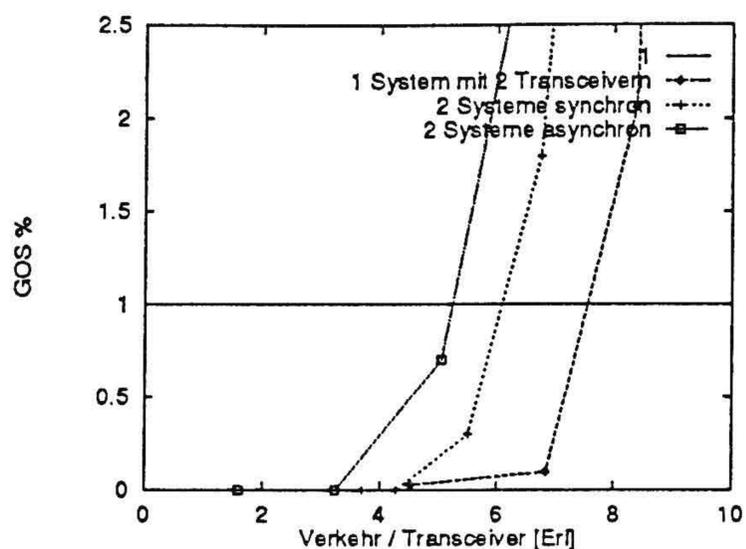


Abbildung 13: 340m: 2 asynchrone Betreiber

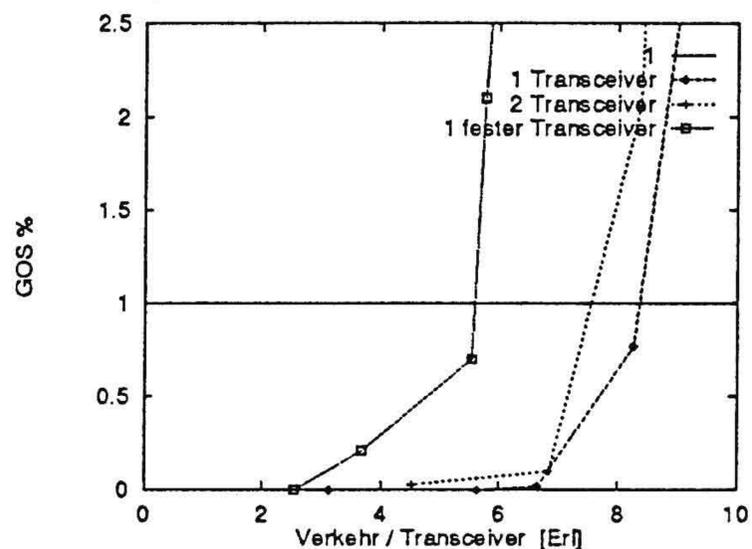


Abbildung 14: 340: Feste Zuordnung der PP zu jeweils einer RFP

Bei mehreren Transceivern pro RFP liegt im Szenario reine Interferenzbegrenzung der Kapazität vor. Jede RFP kann nun bis zu 24 Kanäle gleichzeitig unterstützen (15.3 Erlang im 5er Cluster aus Tabelle 3). Nimmt man ein 7er Cluster an, so ergeben sich im Mittel nur 17 Kanäle pro RFP. Dieses entspricht einer Interferenzbegrenzung des Systems durch Nachbarzellen. Entsprechend den theoretischen Annahmen wären für ein 7er Cluster bis zu 9.86 Erl pro RFP tragbar. Die Ergebnisse aus Abbildung 11 zeigen, daß der tragbare Verkehr pro Transceiver etwa 7.5 Erlang beträgt. Damit ergibt sich pro RFP ein tragbarer Verkehr von 15 Erlang. Nach Tabelle 3 entspricht dies der Clustergröße 5 mit 24 Kanälen. Werden 3 Transceiver pro RFP eingesetzt, so steigt die Kapazität nicht mehr. Der Maximalverkehr entspricht der Clustergröße 5 verteilt auf die 3 Transceiver.

Dieser Verkehr ist nur bei RLL-Anwendungen möglich, die aufgrund gerichteter Antennen durch weniger Interferenzen gekennzeichnet sind, als PCS-Anwendungen. Für PCS-Anwendungen sind nur etwa 75% des angegebenen Verkehrs tragbar, also ca 11 Erl/RFP. Dies entspricht im Mittel 6.5 Zellen/Cluster.

### 6.1.2 Ergebnisse für mehrere konkurrierende Betreiber

Bei konkurrierenden Systemen mit RFPs am gleichen Ort und jeweils einem Transceiver/RFP wird dieselbe Art der Begrenzung deutlich (Abb. 12).

Durch den insgesamt höheren Verkehr bei mehreren Betreibern sind die Interferenzleistungen im System höher, so daß das C/I zur Nachbarstation in weniger Fällen ausreichend ist. Entsprechend liegt die Kurve für zwei Betreiber niedriger als die für 2 Transceiver/RFP bei nur einem System. Werden in jedem System 2 Transceiver pro RFP eingesetzt, tritt Kapazitätsbegrenzung des Systems auf. Das bedeutet bei gleichbleibender Gesamtkapazität (ca. 15 Erlang pro Standort) eine gleichmäßige Aufteilung auf beide Systeme (je 7.5 Erlang) und ihre jeweiligen Transceiver (je 3.5 Erlang).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch mehrere konkurrierende Betreiber die Kapazität von DECT nicht verringert wird, daß jedoch jeder Betreiber, wegen der höheren Interferenz, mehr Transceiver pro RFP vorsehen muß als nötig wären, wenn er das Gebiet allein versorgen würde. Jeder Betreiber kann dabei seinen Verkehrsanteil mit gleicher Dienstgüte tragen wie die anderen.

## 6.2 Ergebnisse für asynchrone Systeme

### 6.2.1 Asynchrone Systeme außerhalb von Gebäuden

Bei asynchronem Betrieb außen (Abb. 13) fällt die Kapazität von DECT um ca. 20%. Es wurden zwei Betreibersysteme untersucht, deren Multiplexrahmen um eine halbe Rahmendauer (5ms) gegeneinander verschoben sind. Damit wird der ungünstigste Fall asynchroner Systeme erfaßt. Mehr als zwei Betreiber wurden nur für den Fall synchroner Systeme untersucht, vgl. Abb. 12.

Ohne weitere Untersuchungen zum asynchronen Betrieb öffentlicher Betreiber kann man folgern, daß diese Betriebsart kapazitätsschädlich ist und daraus die Forderung nach Synchronisation der Systeme verschiedener Betreiber ableiten.

### 6.2.2 Asynchrone Systeme innerhalb eines Gebäudes

Zur Ermittlung möglicher gegenseitiger Beeinflussungen asynchroner Systeme innerhalb von Gebäuden wird das Szenario aus den Abb. 15 und 16 verwendet. Wie die berechneten Ausleuchtungen (Abb. 17 und 18) zeigen, gibt es auch bei hoher Deckendämpfung (15dB 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. Die 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.

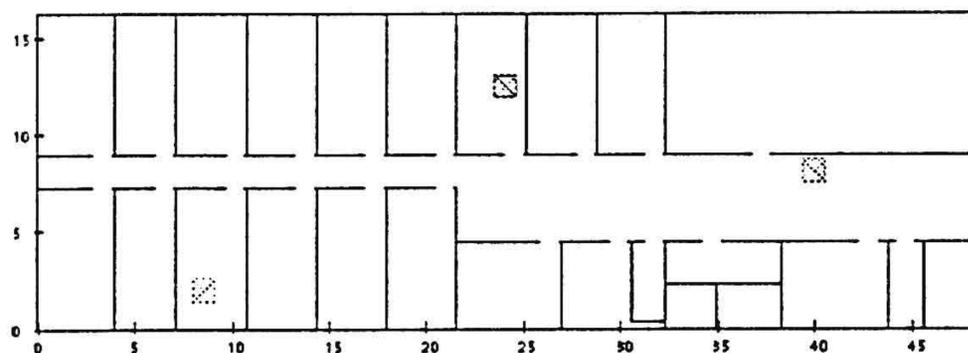


Abbildung 15: Szenario mit asynchronen DECT-Installationen: obere Etage

Die Ergebnisse für den tragbaren Verkehr in diesem Szenario sind in den Abbildungen 19 und 20 dargestellt und zeigen, daß **durch die Asynchronität der Systeme die tragbare Last um ca. 20-25 % verringert wird.** Die Kapazitätsreduktion liegt damit in der gleichen Größenordnung wie bei großflächigen Systemen außen.

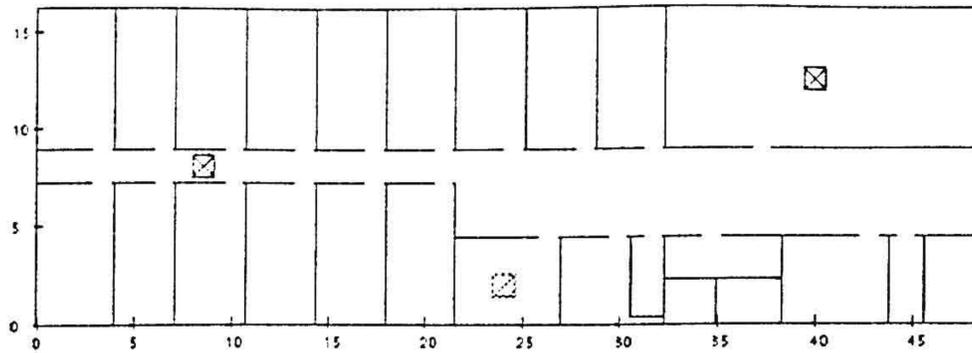


Abbildung 16: Szenario mit asynchronen DECT-Installationen: untere Etage  
Empfangsleistung

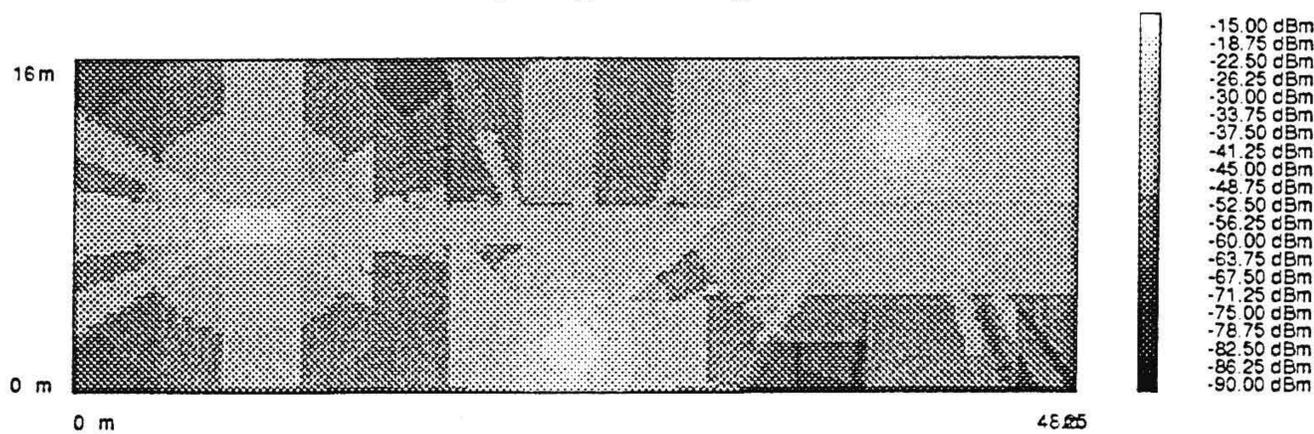


Abbildung 17: Ausleuchtung in 1. Etage

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 maximaler 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 DECT Systemen in einem mehrstöckigen Gebäude.

### 6.3 Ergebnisse für ortsfeste Mobilstationen

Besonders aufschlußreich hinsichtlich der Leistungsfähigkeit realer RLL Installationen sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit fest zugeordneten Mobilstationen (Abb. 14). Werden Mobilstationen für RLL Installationen fest installiert, z.B. an den Hauswänden der oberen Etagen, so ist kein Wechsel zu Nachbar-RFPs möglich, wenn die eigene RFP keinen freien Kanal mehr bietet. Ein solches System ist durch die installierte Kapazität der zugeordneten RFP kapazitätsbegrenzt.

Die Simulationsergebnisse bestätigen diese Überlegung. Es wird jeweils nur ein Verkehrswert von unter 6 Erl/RFP erreicht, was dem theoretischen Grenzwert entspricht. Die verfügbare Kapazität läßt sich erhöhen, wenn mehrere Transceiver pro RFP eingesetzt werden, um die Kapazitätsbegrenzung aufzuheben.

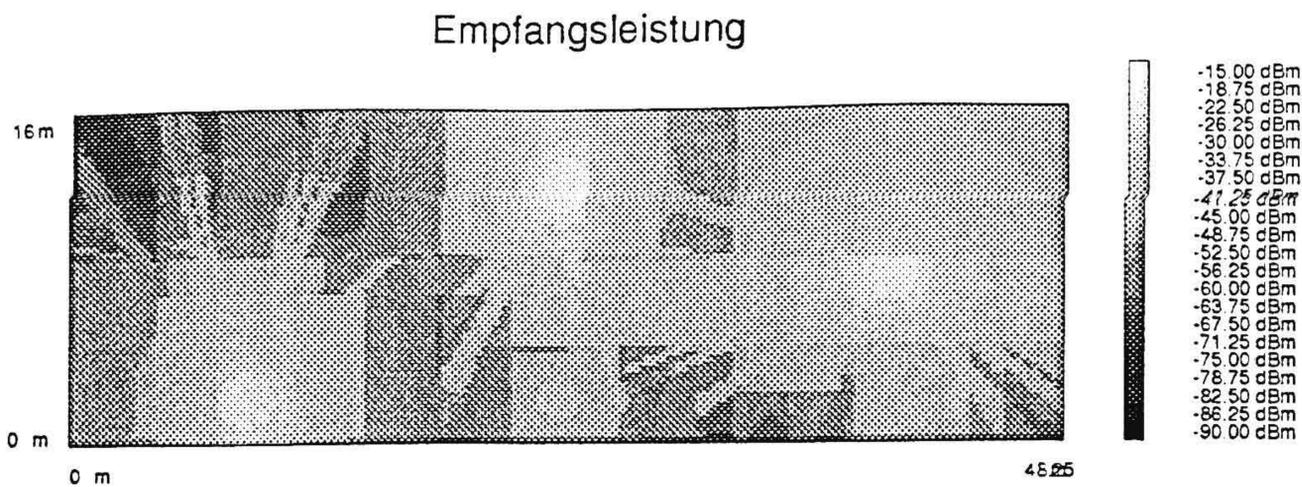


Abbildung 18: Ausleuchtung in 2.Etage

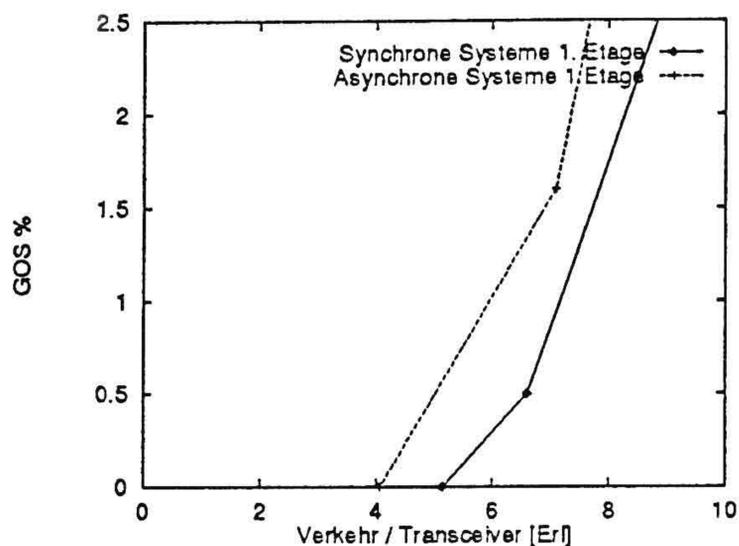


Abbildung 19: Tragbarer Verkehr in der 1. Etage

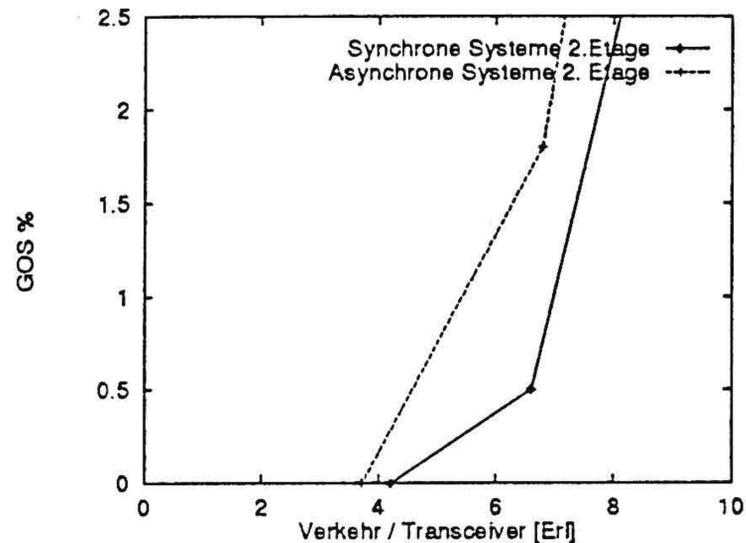


Abbildung 20: Tragbarer Verkehr in der 2. Etage

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

Eine wichtige Erkenntnis aus den Ergebnissen für RFPs mit 170m und 340m Reichweite ist die Skalierbarkeit der Systeme bzgl. des tragbaren Verkehrs. Die Kapazität hängt im wesentlichen vom Verhältnis der Interferenz- zur Empfangsleistung ab. Das bedeutet, daß bei Anpassung der Sendeleistungen auf die gewünschte Zellgröße die Kapazität der Zelle unverändert bleibt. Sieht man z.B. eine Reichweite von 50m vor und stellt die Leistung auf der Zellgrenze wieder auf -65dBm ein, so ist die Verkehrslast pro Transceiver praktisch dieselbe wie in den untersuchten Szenarien mit anderen Zellradien. Dadurch lassen sich die Kapazitäten von Systemen mit anderen RFP-Dichten aus den bekannten Simulationsergebnissen ableiten.

Da in realen Szenarien weder mit einer vollständigen Isolierung noch mit einer vollständigen Funkvernetzung der RFPs zu rechnen ist, wird der maximal tragbare Verkehr pro RFP bei ausreichender Zahl Transceiver pro RFP für RLL-Anwendungen im Mittel bei 15 Erlang liegen.

Berechnet man z.B. die Kapazität bei 50 m Sendereichweite bei 15 Erl pro RFP, so ergibt sich für GOS=1% aus

$$\text{Fläche des Sechsecks eines RFP} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 = 6495 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl RFP pro km}^2 = 154$$

$$\text{Kapazität pro km}^2 = 154 * 15 \text{ Erl} = 2.310 \text{ Erl}$$

Ein System mit 2310 Erl Kapazität kann ca. 33.000 private RLL-Hausanschlüsse/ $km^2$  (bei 70mErl Aktivität/Tln.) oder etwa 15.400 RLL-Büroanschlüsse/ $km^2$  (bei 150mErl Aktivität/Tln.) versorgen. In Gebieten mit gemischten Privat- und Büroanschlüssen können etwa 23.100 RLL-Anschlüsse versorgt werden.

Vergleicht man den von DECT für RLL-Anwendungen tragbaren Verkehr mit dem bei 100%-iger Versorgung im Ortsnetz auftretenden Verkehr (140 Erl/ $km^2$  im Stadtkern), dann ist offensichtlich genügend Kapazität für RLL-Anwendungen im DECT-System verfügbar.

Für PCS-/Telepoint-Anwendungen stehen wegen des Wegfalls des Richtantennengewinns nur etwa 75% dieser Kapazität zur Verfügung. Laut Tabelle 1, reichen die verbleibenden 1.733 Erl/ $km^2$  für *hot spots* nicht aus; der Zellradius muß deshalb unter 50 m verkleinert werden.

### 6.5 Sonderfall sehr kleine RFP-Dichten mit Freiraumausbreitung

Die Skalierung des tragbaren Verkehrs bei verkleinerten Zellen im gleichen Szenario ist nur bis zu bestimmten Grenzen des Zellradius möglich. Zielt z.B. die angestrebte Versorgung auf Verkehrswerte wie bei Telepoint Anwendungen ( $5.500\text{Erl}/km^2$ ), so berechnet man die maximal zulässige Sendereichweite zu etwa 28m. Sind die RFPs so dicht angeordnet, liegt jedoch überwiegend Sichtverbindung benachbarter RFPs und PPs vor und es muß Freiraumausbreitung angenommen werden. Dadurch vergrößert sich die äquivalente Clustergröße erheblich, denn die Signalabschwächung mit der Entfernung ist mit

$$L = 53 + 20\log(d) \tag{2}$$

geringer als für die Morphostruktur *Vorstadt* angenommen. Der Zellradius muß also noch deutlich kleiner sein. Zur Bestimmung des unter solchen Umständen tragbaren Verkehrs wurden Simulationen mit 50m Sendereichweite und Freiraumausbreitung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen (Abb. 21) sind ebenfalls für andere Sendereichweiten mit Freiraumausbreitung umrechenbar.

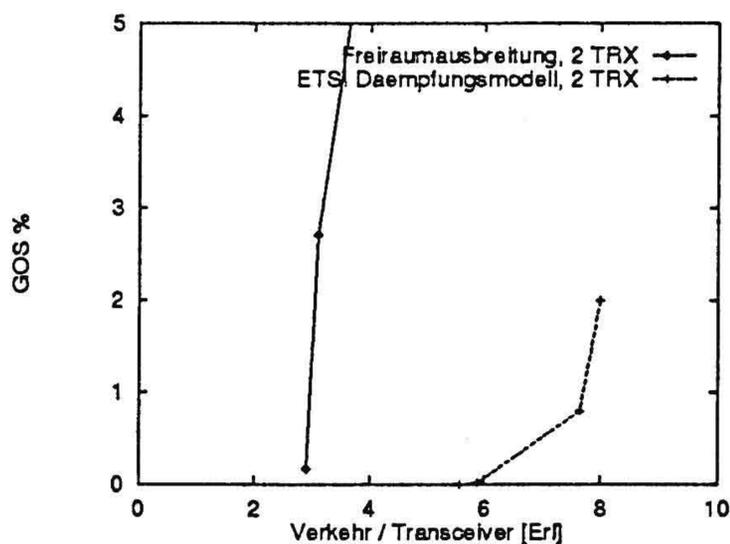


Abbildung 21: Tragbarer Verkehr bei Freiraumausbreitung und RLL-Anwendungen

Die Sichtverbindungen zwischen den RFPs, modelliert durch die Freiraumausbreitung, bewirkt einen starken Abfall des tragbaren Verkehrs. Durch die geringe Dämpfung ist der Wiederverwendungsradius und damit das sich einstellende Cluster sehr viel größer als bei den Simulationen mit dem ETSI Pfadverlustmodell für das Vorstadtgebiet

$$L = 58 + 35(\log d - 1). \tag{3}$$

Es wird deutlich, daß eine weitere Kapazitäts-Obergrenze für das DECT System existiert, die erreicht wird, wenn Sichtverbindung zwischen den RFPs besteht. Man kann davon ausgehen, daß Sichtverbindungen bei Radien unterhalb 50m häufig auftreten werden.

Führt man die obige Rechnung für den tragbaren Verkehr für den Extremfall der Freiraumausbreitung mit den Resultaten aus Abbildung 21 bei 50m Zellradius durch (3 Erl/TRX bzw. ca. 6 Erl/RFP), so ergibt sich folgender tragbarer Verkehr bei GOS=1% (zwischen RLL und PCS muß nicht unterschieden werden, weil Mehrwegeausbreitung entfällt):

$$\text{Fläche des Sechsecks eines RFP} = \frac{3\sqrt{3}}{2}R^2 = 6495 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl RFP pro km}^2 = 154$$

$$\text{Kapazität pro km}^2 = 154 * 6\text{Erl} = 924\text{Erl}$$

Der tragbare Verkehr beträgt nur etwa 40% des Verkehrs, der ohne Sichtverbindung der RFPs bei 50 m Zellradius möglich ist.

Es bleibt festzuhalten, daß ein solcher Fall überall geltender Sichtverbindung in der Realität auf langen geraden Straßenzügen und auf Plätzen auftritt und deshalb für Kapazitätsbetrachtungen berücksichtigt werden muß. Bei einem Zellradius von 28m berechnet man aus 2.000 m<sup>2</sup>/RFP, 500 RFPs/km<sup>2</sup> eine tragbaren Verkehr von 3.000 Erl/km<sup>2</sup>.

Die für PCS/Telepointanwendungen in *hot spots* erforderlichen 5.500 Erl/km<sup>2</sup> sind also bei 28m Radius noch nicht möglich. Die Kapazität/RFP steigt also bei Verkleinerung der Zellradien nicht beliebig weiter, weil die Dämpfung zu gering ist und die Interferenz zunimmt!

**Mehrere konkurrierende Betreiber müssen koordiniert planen**, 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. Flächig 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. 60 Erlang auf 0.01 km<sup>2</sup>, wie durch Simulationsuntersuchungen für konkrete Morphostrukturen in [8] gezeigt wird.

## 6.6 Ausblick

Die in [8] dokumentierte Untersuchung enthält auch Simulationsergebnisse zu folgenden Fragestellungen:

- Wirkung von anteiligem ISDN-Verkehr auf die Kapazität.
- Wechselwirkungen öffentlicher Betreiber am selben Ort mit (un)gleicher RFP-Ausstattung
- Sichere Versorgungsbereiche eines Betreibers im Wettbewerb
- Vergrößerung der sicheren Bereiche durch Parameterwahl eines Betreibers
- Untersuchungen mit konkreter Morphostruktur
- Gegenseitige Beeinflussung öffentlicher und privater DECT-Systeme, insbesondere Ermittlung von
  1. tragbarem Verkehr im öffentlichen System
  2. Beeinflussung des öffentlichen Betreibers durch die privaten Systeme
  3. Beeinflussung der privaten Systeme durch den öffentlichen Betreiber.

Die Resultate können hier aus Platzgründen nicht wiedergegeben werden.

Danksagung: Die Durchführung der Simulationsexperimente verdanke ich meinen wiss. Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Plenge und Dipl.-Ing. Markus Scheibenbogen; an der Erstellung des Simulators DESI haben viele Diplomanden des Lehrstuhls mitgearbeitet, die in [9] mit ihren Beiträgen zitiert sind.

## Literatur

- [1] Dag Akerberg. *Draft simulation scenarios for DECT-multi-system and multi-service applications*. Working Document, submitted to ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, July 1995.
- [2] Frank Brouwer. *DECT Capacity*. Working Document, submitted to ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, March 1995.
- [3] Frank Brouwer. *DECT Capacity in Offices*. Working Document, submitted to ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, July 1995.
- [4] Frank Brouwer. *Preliminary Simulation Results Concerning RLL-CTM Coexistence*. Working Document, submitted to ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, March 1995.
- [5] ETSI Technical Committee Radio Equipment, Systems TC-RES. *ETR042, 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*. 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, August 1992.
- [6] ETSI Technical Committee Radio Equipment, Systems TC-RES. *ETR139, Radio in the Local Loop (RLL)*. 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, November 1994.
- [7] Anders Henriksson. *Multiapplication scenarios in DECT*. Working Document, submitted to ETSI Technical Committee Radio Equipment and Systems TC-RES-3R, 06921 Sophia Antipolis Cedex - France, June 1995.
- [8] B. Walke, C. Plenge, M. Scheibenbogen. *Studie Teil I (gekürzte Fassung), Technische Realisierbarkeit öffentlicher DECT-Anwendungen im Frequenzband 1880-1900 MHz*. Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, Kopernikusstr. 16, 52054 Aachen, Oktober 1995.
- [9] B. Walke, C. Plenge, M. Scheibenbogen. *Studie Teil II (vollständige Fassung), Technische Realisierbarkeit öffentlicher DECT-Anwendungen im Frequenzband 1880-1900 MHz*. Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, Kopernikusstr. 16, 52054 Aachen, Oktober 1995.