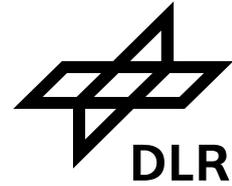


Universität Karlsruhe (TH),
Institut für Nachrichtentechnik
DLR Oberpfaffenhofen,
Institut für Kommunikation und Navigation



TAKOKO

Techniken, Algorithmen und Konzepte für
COFDM Systeme zur Koexistenz
mit autorisierten Systemen
im selben Frequenzband

Technischer Bericht 1:

Definition der Szenarien

Autoren:

Dipl.-Ing. Sinja Brandes, DLR
Dipl.-Ing. Ulrich Berthold, Uni-Karlsruhe

Berichtszeitraum:

1. Juli 2004 bis 31. März 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	3
2	Szenario bei 100 MHz	5
2.1	Hauptsystem: DSB-AM	5
2.1.1	Systemüberblick	6
2.1.2	Frequenzbelegung des VHF-Bands	7
2.2	Overlay-System: Luftfahrtkommunikation am Flughafen	10
2.2.1	Systemarchitektur	12
2.2.2	Basis-Parameter des PHY	14
2.3	Simulationsszenarien	16
2.3.1	Modellierung des PHY	17
2.3.2	Modellierung der gegenseitigen Interferenzen	18
2.3.2.1	Interferenz <i>durch</i> das Hauptsystem	18
2.3.2.2	Interferenz <i>auf</i> das Hauptsystem	18
2.4	Zu untersuchende Aspekte	19
3	Szenario bei 1000 MHz	21
3.1	Hauptsystem	21
3.1.1	Überblick über das DME-System	22
3.1.2	Belegung des Frequenzbandes von 960-1215 MHz	25
3.2	Overlay-System	27
3.2.1	Systemarchitektur	28
3.2.2	Design der physikalischen (PHY) Schicht	29
3.3	Simulationsszenarien	29
3.3.1	Interferenz <i>durch</i> das Hauptsystem	30
3.3.2	Interferenz <i>auf</i> das Hauptsystem	31
3.4	Zu untersuchende Aspekte	31

Inhaltsverzeichnis

4	Szenario bei 1800 MHz	33
4.1	Eigenschaften des Hauptsystems	33
4.1.1	Zugriffsmodell des Hauptsystems	34
4.1.1.1	Ein GSM-Kanal ($n = 1$)	35
4.1.1.2	Mehrere GSM-Kanäle ($n > 1$)	37
4.2	Overlay-System	38
4.2.1	Systemarchitektur	39
4.2.2	Kanalmodelle	40
4.2.3	Design der physikalischen (PHY) Schicht	40
4.3	Simulationsszenarien und zu untersuchende Aspekte	42
5	Besondere Aspekte des MAC-Layers in einem Overlay-System	45
5.1	Einführung	45
5.2	Belegungslückendetektion	46
5.2.1	Verteilte Detektion	48
5.2.2	Herausforderungen in einem Ad-Hoc Szenario	49
5.3	Belegungsvektor	50
6	Zusammenfassung	53

Verwendete Abkürzungen

ACARS Aircraft Communications Addressing and Reporting System

ADS-B Automatic Dependent Surveillance - Broadcast

ATC Air Traffic Control

AP Arbeitspaket

BOS Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

BPSK Binary Phase-Shift Keying

CDMA Code-Division Multiple-Access

CSMA Carrier-Sense Multiple-Access

CTS Clear-to-send

DL Downlink

DME Distance Measuring Equipment

DSB-AM Double Sideband Amplitude Modulation

DSL Digital Subscriber Line

FDD Frequency-Division Duplex

FDMA Frequency-Division Multiple-Access

FFT Fast Fourier Transform

GMSK Gaußsches Minimum-Shift Keying

GSM Global System for Mobile Communications

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers

Verwendete Abkürzungen

- ILS** Instrumentenlandesystem
- MAC** Medium Access Control
- MAN** Metropolitan Area Network
- NLOS** No Line Of Sight
- OFDM** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
- PHY** Physical Layer
- PSK** Phase-Shift Keying
- PTT** Push To Talk
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation
- QPSK** Quadrature Phase-Shift Keying
- RTS** Request-to-send
- SAR** Search and Rescue
- SSR** Secondary Surveillance Radar
- SUI** Modified Stanford University (SUI) Channel Models
- TACAN** Tactical Air Navigation
- TAKOKO** Techniken, Algorithmen und **K**onzepte für COFDM Systeme zur **K**oexistenz mit autorisierten Systemen im selben Frequenzband
- TDD** Time-Division Duplex
- TDMA** Time-Division Multiple-Access
- UAT** Universal Access Transceiver
- UL** Uplink
- VDL** VHF Digital Link
- VHF** Very High Frequency
- VOR** VHF Omnidirectional Radio Range
- WLAN** Wireless Local Area Network

1 Einleitung

1.1 Motivation

Information hat in unserer heutigen Gesellschaft einen sehr großen Stellenwert, und der Bedarf an Informationsaustausch nimmt ständig zu. Die richtige Information soll möglichst jederzeit an jedem Ort zur Verfügung stehen. Dies stellt wachsende Anforderungen an die Kommunikationstechnik, insbesondere an die Mobilfunktechnik, da durch sie die geforderte Ortsunabhängigkeit erst möglich wird.

Allerdings gibt es nicht beliebig viele Frequenzbereiche, die für eine Kommunikation geeignet sind, die Ressource “nutzbares Spektrum” ist begrenzt. Um dem steigenden Kommunikationsaufkommen gerecht zu werden, müssen die verfügbaren Frequenzbereiche möglichst effizient genutzt werden. Bislang wurden von den Regulierungsbehörden die meisten Bereiche des Spektrums fest an Organisationen / Firmen (Mobilfunkbetreiber, Militär, Rettungsdienst, Polizei, Rundfunk etc.) mit einem exklusiven Nutzungsrecht vergeben. Daher ist die Effizienz der Spektrumsnutzung sehr eng an den Kommunikationsbedarf eines speziellen Betreibers gekoppelt und somit starken Schwankungen ausgesetzt.

Messungen haben ergeben [Wei04b], daß weite Bereiche des Spektrums oft ungenutzt bleiben, wobei die Belegung des Spektrums orts- und zeitabhängig ist. Abbildung 1.1 zeigt die Ergebnisse einer Belegungsmessung an einem bestimmten Ort über 24 Stunden, an denen die Unterschiede in der Spektrumsbelegung deutlich zu erkennen sind.

Eine Steigerung der spektralen Effizienz läßt sich durch verschiedene Ansätze erreichen, unter anderem:

- Ultra Wide Band (UWB) [WS02], eine Technik basierend auf Bandspreizung mit extrem hohen Spreizfaktoren, die bereits von der amerikanischen “Federal Communications Commission” (FCC) zugelassen wurde,

1 Einleitung

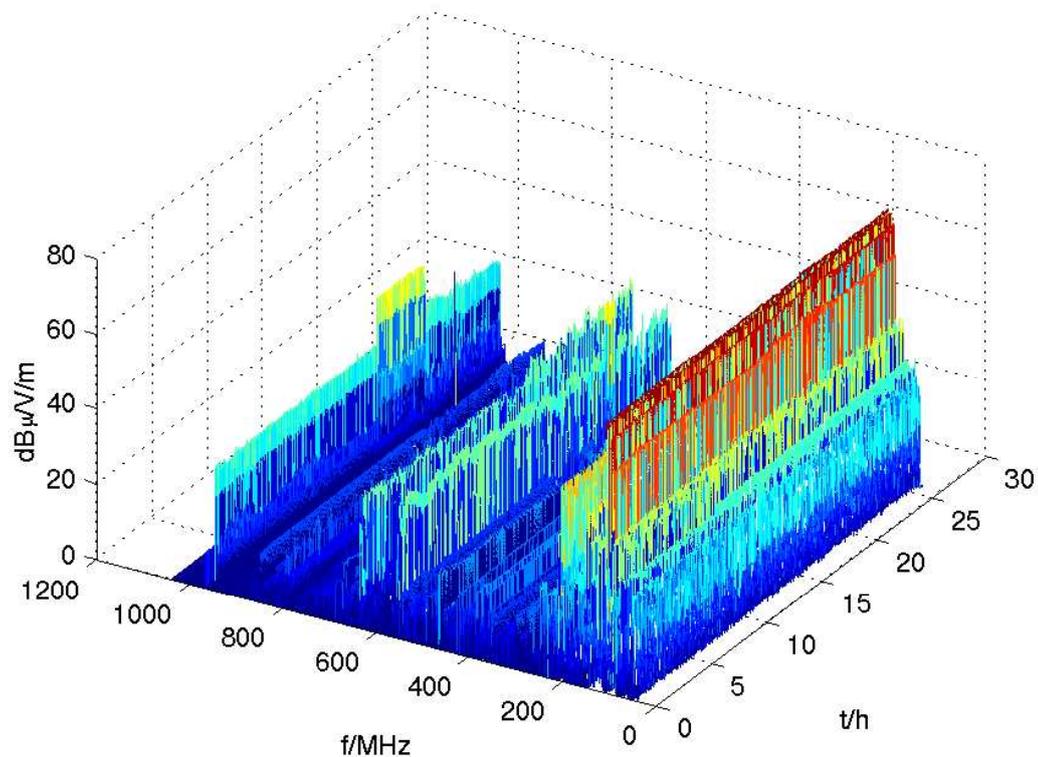


Abbildung 1.1: Messung der elektromagnetischen Feldstärke über 24 Stunden im Bereich von 50 MHz bis 1 GHz in Lichtenau, Baden [Wei04b]

- General Packet Radio Service (GPRS) [BA02], eine Paketdatenübertragungstechnik in GSM und
- Spectrum Pooling [Mit99, Zan97].

Der allgemeinste Ansatz ist das sogenannte *Spectrum Pooling*. Hierbei werden die Lücken in der Belegung durch ein koexistierendes System im gleichen Frequenzband gezielt genutzt. In diesem Zusammenhang werden einige Begriffe eingeführt, die im folgenden immer wieder verwendet werden:

- Als *Hauptsystem* wird das System bezeichnet, das ursprünglich die exklusiven Nutzungsrechte für ein bestimmtes Frequenzband zugewiesen bekommen hat und sich in der Regel bereits im laufenden Betrieb befindet.
- Ein *Overlay-System* / *Füllsystem* wird im Frequenzbereich eines Hauptsystems betrieben und nutzt dessen Belegungslücken.

- Die Koexistenz von Haupt- und Overlay-System wird *Overlay-Szenario* genannt.

Eine wichtige Anforderung an ein Overlay-System ist die dynamische Anpassung an das Belegungsverhalten des Hauptsystems. Weiterhin darf der Betrieb des Hauptsystems durch das Füllsystem nicht gestört werden - optimalerweise kann das Hauptsystem nicht wahrnehmen, daß zusätzlich ein Overlay-System betrieben wird.

Im Forschungsvorhaben “**T**echniken, **A**lgorithmen und **K**onzepte für COFDM Systeme zur **K**oexistenz mit autorisierten Systemen im selben Frequenzband“ (TAKOKO) wird untersucht, inwieweit Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) für den Einsatz in Overlay-Systemen geeignet ist. OFDM ist ein vielversprechender Ansatz, da der zur Verfügung stehende Frequenzbereich in OFDM-Unterträger aufgeteilt wird, welche einzeln an- oder ausgeschaltet werden können. Dadurch ist eine dynamische Anpassung an die aktuell bestehenden Belegungslücken möglich.

1.2 Aufgabenstellung

Arbeitspunkt (AP) 1 sieht die Definition von drei Szenarien vor, die im weiteren Projektverlauf näher untersucht werden sollen. Für jedes Szenario muß zunächst ein Hauptsystem ausgewählt werden, das den Frequenzbereich festlegt, in dem die Untersuchungen stattfinden. Zweitens muß pro Szenario ein Füllsystem definiert werden, das im Frequenzband des Hauptsystems operieren soll. Als Hauptsystem kommen prinzipiell alle Systeme in Frage, die einem Füllsystem genügend freie Ressourcen zur Verfügung stellen können. Systeme mit FDMA oder TDMA (Frequency-/Time-Division Multiple-Access) als Zugriffsverfahren sind von Vorteil; CDMA (Code-Division Multiple-Access) ist aufgrund der Spreizung der Symbole über den gesamten Kanal nicht für ein Overlay-System geeignet. Darüberhinaus eignen sich Systeme, die CSMA (Carrier-Sense Multiple-Access) als Kanalzugriffsverfahren verwenden, nur bedingt als Hauptsysteme, da das Füllsystem die Übertragung im Hauptsystem behindern kann. Auch bei der Auswahl des Füllsystems müssen einige Parameter berücksichtigt werden. Da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausschließlich OFDM basierte Overlay-Systeme untersucht werden, ist es aufgrund der bereits existierenden zahlreichen Anwendungen von OFDM sinnvoll, standardisierte Systeme als Ausgangspunkt zur Füllsystemdefinition zu verwenden und diese an die Anforderungen des Overlay-Systems anzupassen.

1 Einleitung

Nach einer ausführlichen Recherche haben sich die in Tabelle 6.1 aufgelisteten Szenarien ergeben.

Frequenzbereich	Hauptsystem	Füllsystem
VHF ¹ -Band	Flugfunk (DSB-AM ²)	WLAN ³ -ähnliches System zur Kommunikation am Flughafen
960-1215 MHz	DME ⁴	Flexibles, mobiles Kommunikationssystem
1800 MHz	GSM ⁵	MAN ⁶

Tabelle 1.1: Übersicht der Szenarien.

Mit der Definition dieser drei Szenarien wird eine Basis für Untersuchungen an realistischen Systemen geschaffen, die auch in der Praxis implementiert werden können. Im weiteren Verlauf werden die drei Szenarien detaillierter betrachtet. Wie in AP 1.1 vorgesehen, müssen zunächst die Hauptsysteme im Hinblick auf den Ausnutzungsgrad des Spektrums, das Duplex- und Kanalzugriffsverfahren sowie das Verhalten von physikalischer und Medium Access Control (MAC) Schicht untersucht werden. Ausgehend von den Eigenschaften des Hauptsystems werden dann in AP 1.2 die wesentlichen Parameter des Overlay-Systems festgelegt. Dazu gehören vor allem Bandbreite, Unterträgerabstand, Symbollänge und die Datenrate. In AP 1.3 werden basierend auf den Eigenschaften von Haupt- und Overlay-System Simulationsszenarien entworfen, anhand derer die besonderen Aspekte des jeweiligen Szenarios untersucht werden können.

In den folgenden drei Kapiteln dieses Berichts werden für jedes Szenario einzeln Haupt- und Overlay-System sowie die Simulationsszenarien beschrieben. Jedes Kapitel wird mit einer Auflistung der zu untersuchenden Aspekte abgeschlossen. Während sich die Beschreibung der drei Szenarien auf die PHY-Schicht konzentriert, werden die besonderen Aspekte der MAC-Schicht in Overlay-Systemen in Kapitel 5 separat betrachtet.

¹Very High Frequency

²Double Sideband Amplitude Modulation

³Wireless Local Area Networks

⁴Distance Measuring Equipment

⁵Global System for Mobile Communications

⁶Metropolitan Area Networks

2 Szenario bei 100 MHz

Im ersten Szenario wird das Very High Frequency (VHF)-Band von 117,975-137 MHz untersucht. Dieser Frequenzbereich ist für den Flugfunk vorgesehen, also für den Funkverkehr zwischen Bodenstationen und Flugzeugen. Die Ressourcen in diesem geschützten Frequenzband können nur von einem Overlay-System verwendet werden, das für hoheitliche Zwecke eingesetzt wird. Daher bietet sich als Overlay-System ein Wireless Local Area Network (WLAN) an, das ebenfalls in der Luftfahrt, z.B. für die Kommunikation am Flughafen, verwendet wird. Die Eckdaten dieses Szenarios sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden zunächst das Hauptsystem und vor allem die Belegungsdichte des VHF-Bands näher untersucht. Die Eigenschaften des Hauptsystems bilden dann die Grundlage für die Dimensionierung des Overlay-Systems in Kapitel 2.2. Um sich bei der Untersuchung dieses Szenarios auf die wesentlichen Aspekte konzentrieren zu können, werden im dritten Unterpunkt Simulationsszenarien entworfen. Zum Abschluß dieses Kapitels werden die Schwerpunkte dieses Szenarios zusammengefaßt.

Hauptsystem	Flugfunk
Overlay-System	WLAN-ähnliches System zur Kommunikation am Flughafen
Frequenzband	117,975-137 MHz

Tabelle 2.1: Eckdaten des ersten Szenarios.

2.1 Hauptsystem: DSB-AM

Das VHF-Band ist in 760 25 kHz breite Kanäle aufgeteilt, die in Europa zum Teil jeweils in drei 8,33 kHz breite Teilkanäle unterteilt werden. Die meisten Kanäle werden vom analogen Flugfunk, dem DSB-AM (Double Sideband Amplitude Modulation) System, zur Sprachkommunikation verwendet. Als Ergänzung zur ana-

before push-to-talk” (PTT) auf diesen Kanal zu. Piloten und Fluglotsen teilen sich also einen physikalischen Kanal im Zeit-Duplex. Im Hinblick auf ein Overlay-System bedeutet dieses Kanalzugriffsverfahren, daß die Suche nach freien Lücken im Frequenzband nicht funktioniert. Der Kanal wird ständig abgehört, auch wenn nicht übertragen wird. Ein Overlay-System erkennt also unter Umständen freie Kanäle, die vom Hauptsystem zum Abhören genutzt werden. Überträgt das Füllsystem dann auf diesen fälschlicherweise als frei erkannten Kanälen, kommt es zu Störungen im analogen Flugfunk. Das Füllsystem muß daher die Kanalbelegung des DSB-AM Systems kennen, was eine Kommunikation zwischen Haupt- und Füllsystem erforderlich macht. Daher bietet es sich an, eine Anwendung ebenfalls im Bereich des Luftverkehrsmanagements bzw. der Luftverkehrskontrolle als Füllsystem zu betrachten.

Wird ein Overlay-System im VHF-Band untersucht, müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden: Aufgrund des Kanalzugriffs von DSB-AM können keine Messungen zur Detektion von Frequenzlücken durchgeführt und damit keine Algorithmen zur dynamischen Bestimmung und Verwendung freier Kanäle untersucht werden. Es muß vorausgesetzt werden, daß das Overlay-System die Kanalbelegung kennt oder durch das VHF-System mitgeteilt bekommt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt daher vielmehr auf der Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Haupt- und Füllsystem. Besonders zu berücksichtigen ist dabei, die Störung des Hauptsystems durch das Füllsystem zu minimieren, da der analoge Flugfunk unter keinen Umständen gestört werden darf.

2.1.2 Frequenzbelegung des VHF-Bands

Bevor mit der Konzeption des Overlay-Systems begonnen werden kann, muß die genaue Belegung des VHF-Bands untersucht werden, um die für das Füllsystem freien Kapazitäten abschätzen zu können.

Der Frequenzbereich 117,975-137 MHz läßt sich in die in Tabelle 2.2 aufgelisteten Bereiche unterteilen, die jeweils für bestimmte Dienste und Anwendungen reserviert sind [Mar00]. Die in Tabelle 2.2 fett gedruckten Bereiche stehen prinzipiell für ein Füllsystem zur Verfügung. Es muß aber im folgenden die genaue Belegung dieser Bereiche analysiert werden. Dabei sind zunächst die Kanäle zu berücksichtigen, die deutschland-, europa- oder weltweit für bestimmte Anwendungen reserviert sind. Aus Sicherheitsgründen können die Notfrequenzen sowie die militärisch genutzten Kanäle nicht für ein Overlay-System verwendet werden. Auch andere Systeme wie z. B. VDL Mode 2 und VDL Mode 4 können

2 Szenario bei 100 MHz

Frequenz	Verwendung
117,975 - 121,600 MHz	Beweglicher Flugfunkdienst
119,700 MHz	Allgemeine Tower Wach-Frequenz
121,500 MHz (121,425-121,575 MHz)	Internationale Notfrequenz
121,600 - 121,975 MHz	Bewegungslenkung am Boden
122,000 - 122,050 MHz	Beweglicher Flugfunkdienst (national)
122,100 MHz	Militärische Flugplätze
122,150 - 123,250 MHz	Beweglicher Flugfunkdienst (national)
123,100 MHz (123,075 - 123,125 MHz)	Hilfsfrequenz SAR
123,300 MHz	NATO-Flugplätze
123,350 - 123,650 MHz	Segelflug und kleine Flugplätze
123,775 - 129,675 MHz	Verkehrsflugplätze
129,750 - 131,925 MHz	Betriebsfunk Fluggesellschaften / Bodendienste
132,000 - 136,775 MHz	Beweglicher Flugfunkdienst (international)
136,950 MHz	VDL Mode 4 (noch in der Testphase)
136,975 MHz	VDL Mode 2

Tabelle 2.2: Unterteilung des VHF-Bands.

aufgrund ihrer Systemarchitektur nicht mit einem Overlay-System koexistieren. Für ACARS sind in Europa die fünf 25 kHz-Kanäle bei 131,525 / 131,725 / 131,825 / 136,750 und 136,900 MHz vorgesehen. Desweiteren sind die in Tabelle 2.3 aufgelisteten Frequenzen deutschlandweit, z.B. für Segelflug, Fallschirmsprung oder Helikopter, vergeben und müssen bei der Betrachtung eines Overlay-Systems ebenfalls ausgespart werden.

Damit können von den insgesamt 760 VHF-Kanälen 33 Kanäle generell nicht für ein Overlay-System verwendet werden. Alle übrigen Kanäle sind nur regional oder lokal vergeben und können prinzipiell durch ein Füllsystem genutzt werden. Die gesamte Belegung des VHF-Bands und die mögliche Nutzung durch ein Overlay-System werden im folgenden beispielhaft anhand des Münchener Flughafens untersucht.

Abbildung 2.2 zeigt eine Abschätzung der am Flughafen München am Boden verwendeten VHF-Kanäle [Mar00]. Bei der Erstellung der Grafik wurden folgende Umstände berücksichtigt:

Frequenz	Dienst
120,975 MHz	Hängegleiter- und Ultraleicht
122,250 MHz	Allgemeine Ballonsport-Frequenz
122,300 MHz	Motorflug-Ausbildung am Platz
122,550 MHz	Segelflug-Streckenflug
122,800 MHz	BORD-BORD AIR (Privatflieger)
123,150 MHz	Ausbildung Segelflug
123,350 MHz	Allgemeine Segelflugbetriebs-Frequenz
123,400 MHz	Segelflug-Rückholer
123,425 MHz	Ultra-Leicht-Schulung
123,450 MHz	Bord zu Bord (weltweit)
123,500 MHz	Segelflug Ausbildung am Platz
126,725 MHz	Allgemeine Fallschirmsprungbetriebsfrequenz
130,700 MHz	BOS & SAR-Helikopter
130,800 MHz	BOS Polizei Helikopter

Tabelle 2.3: Dienste im VHF-Band.

- Zunächst werden die 33 für bestimmte Dienste reservierten Kanäle als dauerhaft belegt angenommen (graue Balken).
- Die 25 für die Kommunikation innerhalb der Fluglinien verwendeten Kanäle im Bereich 129,750-131,925 MHz werden ebenfalls als dauerhaft belegt angenommen, da ohne Messungen keine zuverlässige Aussage über die Verwendung dieser Frequenzen getroffen werden kann (rote Balken).
- Besonders wichtig ist es, die am Münchener Flughafen verwendeten Frequenzen zu berücksichtigen (dunkelgrüne Balken). Dazu zählen zum einen die Kanäle, die direkt im Flughafenbereich verwendet werden, um z.B. mit startenden und landenden Flugzeugen zu kommunizieren. Zum anderen müssen auch die Kanäle zur Überwachung des Luftverkehrs, der den Flughafen in großen Höhen überfliegt, ausgespart werden, da sowohl die Bodenstationen als auch Flugzeuge in großen Höhen ein Overlay-System stören können bzw. das Overlay-System diese stören kann.
- Schließlich müssen auch die an benachbarten Flughäfen verwendeten Kanäle bei der Betrachtung eines Overlay-Systems ausgeschlossen werden (hellgrüne Balken). Hierbei werden nicht nur die Stationen am Boden, sondern vor allem die in der Luft befindlichen Flugzeuge berücksichtigt. Ein Flughafen kann zwar außerhalb der Reichweite des betrachteten Standorts sein,

2 Szenario bei 100 MHz

dennoch können Flugzeuge aus einer geringeren Entfernung zum Standort mit den Bodenstationen kommunizieren und so Interferenzen verursachen. Aufgrund einfacher Link Budget-Berechnungen müssen alle Flugzeuge in einem Umkreis von ca. 60 nautischen Meilen ($60 \text{ nm} \hat{=} 111 \text{ km}$) betrachtet werden. Es werden also erstens die Kanäle aller Bodenstationen, die sich in einem Umkreis von 60 nm befinden, ausgelassen. Zweitens müssen auch die Bodenstationen außerhalb des 60 nm-Bereichs berücksichtigt werden, mit denen Flugzeuge kommunizieren können, die sich noch innerhalb des 60 nm-Bereichs aufhalten. Die Leistung auf den Kanälen der hier betrachteten benachbarten Flughäfen ist allerdings geringer als die auf direkt am Flughafen verwendeten Kanälen, was in Abbildung 2.2 durch die niedrigeren Balken dargestellt ist.

Am Münchener Flughafen ergeben sich mit diesen Annahmen maximal 169 belegte Kanäle, was einer Belegungsdichte von 22% entspricht. Einem Overlay-System stehen damit max. 14,775 MHz Bandbreite zur Verfügung. Dabei gibt es sowohl Bereiche, in denen die Lücken zwischen zwei Kanälen einige 100 kHz groß sind, als auch Bereiche, in denen nur 25 kHz zwischen zwei Kanälen frei sind.

Abschließend ist noch anzumerken, daß dies lediglich eine Abschätzung der Belegung des VHF-Bands ist. In der Realität werden einerseits nicht alle als belegt angenommenen Kanäle tatsächlich dauerhaft verwendet. Andererseits sind aber auch die freien Kanäle nicht immer unbenutzt. Da auf diesen Kanälen in großer Entfernung gesendet wird, ist hier mit Störungen bis zu einem bestimmten Pegel zu rechnen. Bei der Auslegung des Overlay-Systems muß sichergestellt werden, daß die Verwendung dieser Kanäle das DSB-AM-System nicht stört und das Overlay-System mit diesen Störungen zurecht kommt.

2.2 Overlay-System: Luftfahrtkommunikation am Flughafen

Mit dem Füllsystem wird ein Kommunikationssystem am Flughafen realisiert, mit dem einerseits die Kapazität bereits verwendeter Systeme und gleichzeitig die Sicherheit am Boden durch neue Funktionen erhöht werden kann. Beispielsweise kann das System zum Rollverkehrsmanagement eingesetzt werden und eine aktuelle Flughafenkarte mit Landebahnen, Rollwegen und Parkpositionen sowie der eingezeichneten freigegebenen Taxi-Route und den Positionen anderer Verkehrsteilnehmer an den Piloten übermitteln. Das Füllsystem kann aber auch Airlines

2.2 Overlay-System: Luftfahrtkommunikation am Flughafen

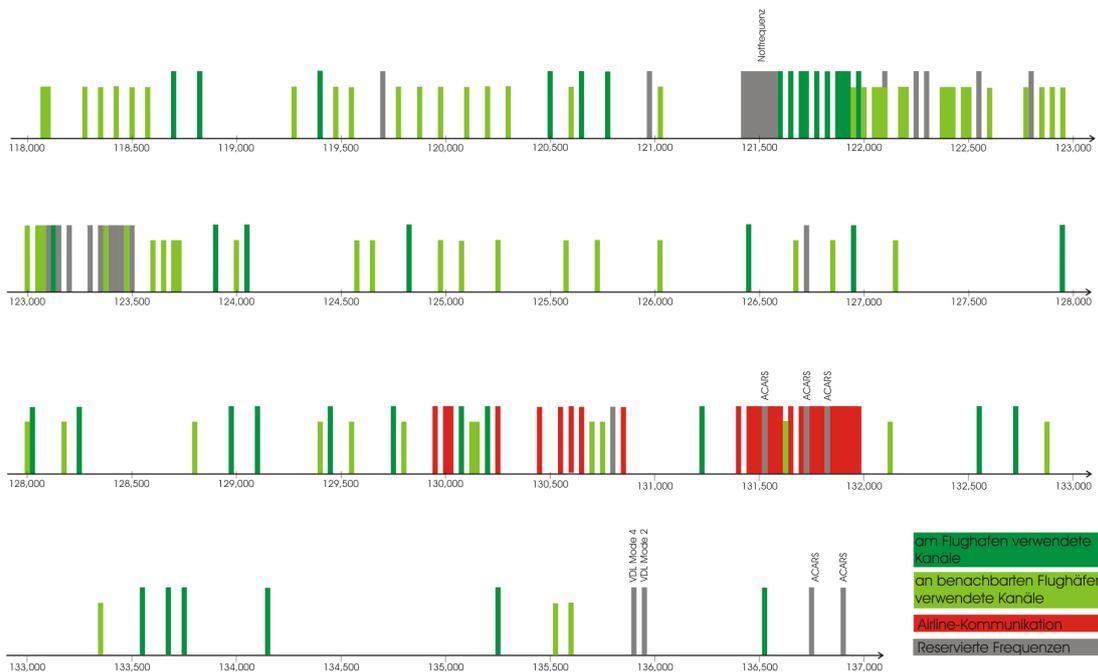


Abbildung 2.2: Belegung des VHF-Bands am Münchener Flughafen.

für die interne Kommunikation zwischen Boden- und Bordpersonal angeboten werden. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Koordination der Logistik am Flughafen.

Das Overlay-System muß unabhängig davon, für welches Einsatzgebiet man sich entscheidet, bestimmte Rahmenvorgaben erfüllen: Soll das Overlay-System in Flugzeugen verwendet werden, ist es aus Kostengründen sinnvoll, es so zu gestalten, daß die bereits vorhandene VHF-Antenne des Flugzeugs auch für das Overlay-System verwendet werden kann. Es müssen nicht nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen möglich sein, sondern vor allem auch Broadcast-Dienste unterstützt werden. Eine weitere Anforderung wird an die Datenrate gestellt. Um den Nutzern an einem Flughafen die erforderlichen Daten zur Verfügung stellen zu können, sind Datenraten im Bereich von einigen 100 kbit/s bis zu wenigen Mbit/s notwendig.

Aufgrund der zahlreichen Broadcast-Anwendungen bietet es sich an, das Overlay-System an WLAN (Wireless Local Area Networks) anzulehnen. Die Architektur wird ähnlich wie bei WLAN aufgebaut: Es gibt einen oder mehrere zentrale Access Points, auf die die Nutzer, also Piloten und Lotsen, zugreifen und über die Daten an andere Nutzer übertragen werden. Als Grundlage für die Implementie-

2 Szenario bei 100 MHz

Die Realisierung dieses Systems dienen die IEEE¹ WLAN-Standards 802.11a [IEE99a] und 802.11g [IEE03b]. Dabei müssen aber einige Parameter vor allem der physikalischen Schicht (PHY) an das Hauptsystem angepasst werden: Zunächst muß ein geeigneter Unterträgerabstand gewählt werden, der sich am 25 kHz-Raster des DSB-AM orientiert. Aufgrund der neuen Unterträgeranzahl und -breite muß beispielsweise auch die Länge der Fast Fourier Transformation (FFT) verändert werden. Die standardisierte Reichweite von wenigen hundert Metern muß ebenfalls den Anforderungen eines Rollverkehrsmanagements unter Berücksichtigung der anderen Ausbreitungsbedingungen im VHF-Band angepasst werden. Ein weiterer Unterschied besteht zu den im Standard berücksichtigten Geschwindigkeiten der Teilnehmer. In diesem Szenario soll WLAN nicht als portable, sondern als mobile Anwendung für Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h verwendet werden. Daher müssen Doppler-Effekte insbesondere bei der Wahl des Unterträgerabstands berücksichtigt werden. Schließlich muß das Overlay-System so dimensioniert werden, daß das DSB-AM System und andere Systeme im VHF-Band nicht gestört werden und auch das Füllsystem nicht durch Interferenzen des Hauptsystems gestört wird.

2.2.1 Systemarchitektur

Das Overlay-System soll im gesamten Flughafenbereich, also auch auf den Start- und Landebahnen, verfügbar sein, damit Flugzeuge sich schon während des Landeanflugs im System anmelden können. Das bedeutet zum einen, daß das Overlay-System auf Geschwindigkeiten von 0 bis 300 km/h ausgelegt werden muß. Zum anderen muß das Versorgungsgebiet den gesamten Flughafen sowie den An- und Abflugbereich abdecken, also ein Gebiet von ca. 3 km Breite und ca. 25 km Länge. Es ist sinnvoll, dieses Gebiet in 5-6 Zellen zu unterteilen, um einerseits ca. 100 Nutzer pro Zelle bedienen zu können und andererseits mit geringeren Übertragungsleistungen auszukommen. In Abbildung 2.3 sind beispielhaft am Münchener Flughafen fünf WLAN-Zellen eingezeichnet. Es gibt drei Zellen mit einer Reichweite von ca. 1,5 km, die hauptsächlich die beiden Terminals sowie den Frachtbereich versorgen. Zusätzlich gibt es pro Landebahn eine Zelle, die die gesamte Landebahn sowie den An- und Abflugbereich abdeckt, um den ankommenden Luftverkehr ab einer Entfernung von ca. 10 km zu versorgen. Hierfür bietet es sich an, pro Landebahn jeweils zwei gerichtete Antennen zu verwenden. Die Erweiterung der Reichweite auf das Anfluggebiet bringt eine leichte Veränderung der Belegung des VHF-Bands mit sich, da die Flugzeuge in einer Anflughöhe von

¹Institute of Electrical and Electronic Engineers

2.2 Overlay-System: Luftfahrtkommunikation am Flughafen

fast 1000 m mehr DSB-AM Stationen und Flugzeuge “sehen” als die Bestimmung am Boden ergeben hat. Durch den Einsatz der Richtantennen können die Störungen, die das Overlay-System auf nicht freigelassenen Kanälen verursacht, auf zwei bestimmte Richtungen beschränkt und somit vernachlässigt werden. Es muß aber in der Luft mit zusätzlichen Störungen durch das DSB-AM System gerechnet werden. Dieser Effekt kann aber beispielsweise durch eine leichte Erhöhung der Sendeleistung in diesen beiden Zellen kompensiert werden.

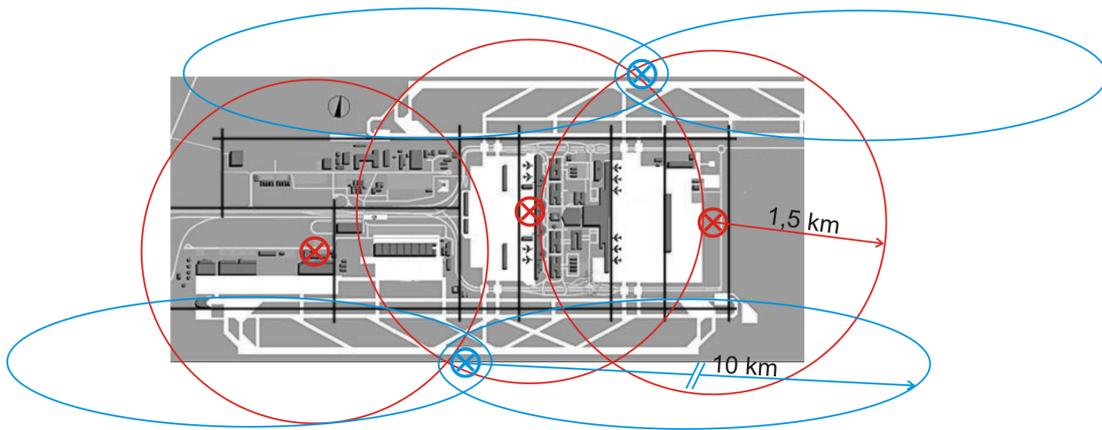


Abbildung 2.3: WLAN-Zellen am Münchener Flughafen.

Die Basisstationen dieser 5 Zellen müssen auch untereinander vernetzt werden, was z.B. über Kabel oder auch über Richtfunkverbindungen realisiert werden kann. Es ist auch denkbar in jeder Zelle mehrere untereinander vernetzte Access Points zu installieren, um eine noch bessere Versorgung bei gleichbleibender oder geringerer Sendeleistung zu gewährleisten.

Um Interferenzen zwischen den verschiedenen Zellen zu vermeiden, wird jeder Zelle ein Frequenzbereich von 1 MHz Bandbreite zugeteilt. Dafür werden 1 MHz breite Abschnitte so aus dem VHF-Band ausgewählt, daß möglichst wenig DSB-AM-Kanäle belegt sind. Der zu verwendende Frequenzbereich kann einem landenden Flugzeug z.B. über einen VHF-Sprachkanal mitgeteilt werden oder ist für jeden Flughafen in einer Tabelle nachzuschlagen. Nach diesem “Einloggen” erfolgt ein automatischer Handover beim Wechsel in eine andere Zelle. Hierfür müssen die bereits standardisierten Prozeduren [IEE03a] an die Anforderungen eines Overlay-Systems angepaßt werden. Beispielsweise müssen der WLAN-Station bei einem Wechsel in eine andere Zelle neben der Mittenfrequenz auch die Anzahl und Positionen der freien Träger übermittelt werden.

2.2.2 Basis-Parameter des PHY

Für eine Zelle des Overlay-Systems wird ein 1 MHz breiter Abschnitt des VHF-Bands verwendet. Zunächst werden der Unterträgerabstand und daraus resultierend die FFT-Länge festgelegt. Dabei muß einerseits das Overlay-System auf eine hohe Effizienz ausgelegt werden, d.h. es müssen in einem 25 kHz-Kanal des DSA-AM Systems möglichst viele OFDM-Unterträger liegen. Andererseits muß der Unterträgerabstand deutlich größer als die auftretende Doppler-Verbreiterung sein, damit keine Interferenzen mit Nachbarträgern auftreten. Es wird also ein Kanalabstand von 2,0833 kHz gewählt, so daß jeder 8,33 kHz-Kanal in 4, bzw. jeder 25 kHz Kanal in 12 OFDM-Unterträger unterteilt wird. In dem betrachteten Teilband von 1 MHz Breite liegen somit 480 Träger, woraus eine FFT-Länge von 512 resultiert. Die Länge der FFT-Periode ergibt sich aus dem inversen Unterträgerabstand und beträgt hier $480\mu s$. Mit einem an die zu erwartenden Ausbreitungsbedingungen angepaßten Guard Interval von $20\mu s$ ist ein OFDM-Symbol $500\mu s$ lang. Für Coderate und Modulationsverfahren werden die in [IEE03b] standardisierten 8 Modi übernommen. Es können nicht alle 480 Träger zur Datenübertragung verwendet werden, da direkt an von DSB-AM genutzte Kanäle angrenzende Träger freigelassen werden müssen, um die spektralen Einflüsse des Overlay-Systems auf das Hauptsystem zu verringern. Geht man entsprechend einer mittleren Belegungsichte von 22% von 9 belegten DSB-AM Kanälen pro 1 MHz und je zwei Schutzträgern an jeder Grenze zwischen Haupt- und Overlay-System aus, müssen $9 \cdot 2 \cdot 2 = 36$ Schutzträger vorgesehen werden. Mit den von DSB-AM belegten $9 \cdot 12 = 108$ Trägern ergeben sich 336 für die Datenübertragung nutzbare Träger. Daraus resultieren mit einer Coderate $R_c = 1/2$ und BPSK² eine Datenrate von 336 kbit/s und mit $R_c = 3/4$ und 64-QAM³ die maximale Datenrate von 3,024 Mbit/s. Diese Basis-Parameter des Overlay-Systems sind in Tabelle 2.4 zusammengefaßt.

Das Kanalzugriffsverfahren, entsprechend der Managementpakete bezeichnet mit RTS/CTS (Request-to-Send / Clear-to-Send), wird ebenfalls aus dem Standard IEEE 802.11 [IEE99b] übernommen. Eine Station, die senden möchte, schickt zunächst ein RTS-Paket mit Daten wie Ziel, Quelle und Dauer der Übertragung inklusive Empfangsbestätigung aus. Ist der Kanal frei, antwortet die Empfangsstation darauf mit einem CTS-Paket. Das bedeutet für die Sendestation, daß sie nun ihr Paket senden kann. Alle anderen Stationen, die entweder das RTS- oder das CTS-Paket empfangen haben, warten die in den Managementpaketen ange-

²Binary Phase-Shift Keying

³Quadrature Amplitude Modulation

2.2 Overlay-System: Luftfahrtkommunikation am Flughafen

Parameter	Wert
Bandbreite	1 MHz
Kanalabstand	$\Delta f = 8,33\text{kHz}/4 = 2,0833 \text{ kHz}$
FFT-Länge	512
Anzahl der Unterträger	$512 = 480 + 2 \cdot 16$
Anzahl der von DSB-AM belegten Träger	$108 = 9 \cdot 12$
Anzahl der freien Träger	372
Träger zur Nebenzipfelunterdrückung	ca. 36
Nutzbare Träger	336
IFFT/FFT Periode T_{FFT}	$480\mu\text{s} (1/\Delta f)$
Länge des Guard Intervals T_{GI}	$20\mu\text{s}$
OFDM Symboldauer T_S	$500\mu\text{s} (= T_{FFT} + T_{GI})$
Modulationsverfahren	BPSK, QPSK ⁴ , 16-QAM, 64-QAM
Coderate	$R_c = 1/2, 2/3, 3/4$
Datenrate	$0,336 \dots 3,024 \text{ Mbit/s}$
Kanalzugriff	RTS/CTS wie bei WLAN

Tabelle 2.4: Basis-Parameter des Füllsystems.

gebene Übertragungszeit ab und versuchen erst danach wieder, auf den Kanal zuzugreifen. Es wird hier also ein Zeitduplex-Verfahren angewandt.

Schließlich muß noch die erforderliche Sendeleistung so festgelegt werden, daß einerseits das Overlay-System keinen Einfluß auf das DSB-AM System hat und andererseits die Empfangsleistung des Overlay-Systems über der Störleistung des Hauptsystems liegt. Die Berechnungen werden zunächst für einen 25 kHz-Kanal durchgeführt und die resultierende Sendeleistung dann auf die 1 MHz Bandbreite des Overlay-Systems umgerechnet. Um die maximale Störleistung des DSB-AM Systems berücksichtigen zu können, wird ein Flugzeug mit einer Sendeleistung von 25 W in einer Entfernung von 60 nm angenommen. Diese 60 nm entsprechen nach den Überlegungen zur Belegung des VHF-Bands der minimalen Entfernung, in der ein Flugzeug auf einem vom Overlay-System verwendeten Kanal senden kann. Zur Ermittlung der maximalen Störleistung auf das Hauptsystem wird eine Station des Overlay-Systems an den Punkt einer Zelle mit einem Radius von 5 nm (9,3 km) gesetzt, der dem Flugzeug am nächsten ist. In Abbildung 2.4 sind die Störleistungen dargestellt, die verursacht werden, wenn eine WLAN-Station am Rand der Zelle und der Access Point im Zellmittelpunkt mit einer

⁴Quadrature Phase-Shift Keying

2 Szenario bei 100 MHz

Leistung von 26 dBm (400 mW) senden. Das Flugzeug in 55 nm Entfernung erreicht in beiden Fällen das Signal des Overlay-Systems mit -94,7 dBm bzw. -95,5 dBm Leistung, was zu keiner Beeinträchtigung des DSB-AM Systems führt. Die Leistung, die der Access Point bzw. die WLAN-Station empfängt, beträgt -73,9 dBm. Die Störleistung des DSB-AM Systems ist am Zellrand -77,3 dBm, in der Zellmitte -78,1 dBm und liegt damit 3-4 dB unterhalb der Empfangsleistung des Overlay-Systems. Damit ist gewährleistet, daß das Signal des Overlay-Systems zwar stark gestört wird, es aber noch vom Störsignal unterschieden und damit detektiert werden kann. Diese Betrachtungen sind auf einen 25 kHz breiten Kanal bezogen; auf die Gesamtbandbreite des Overlay-Systems übertragen, beträgt die Sendeleistung eines Access Points oder einer WLAN-Station 42 dBm.

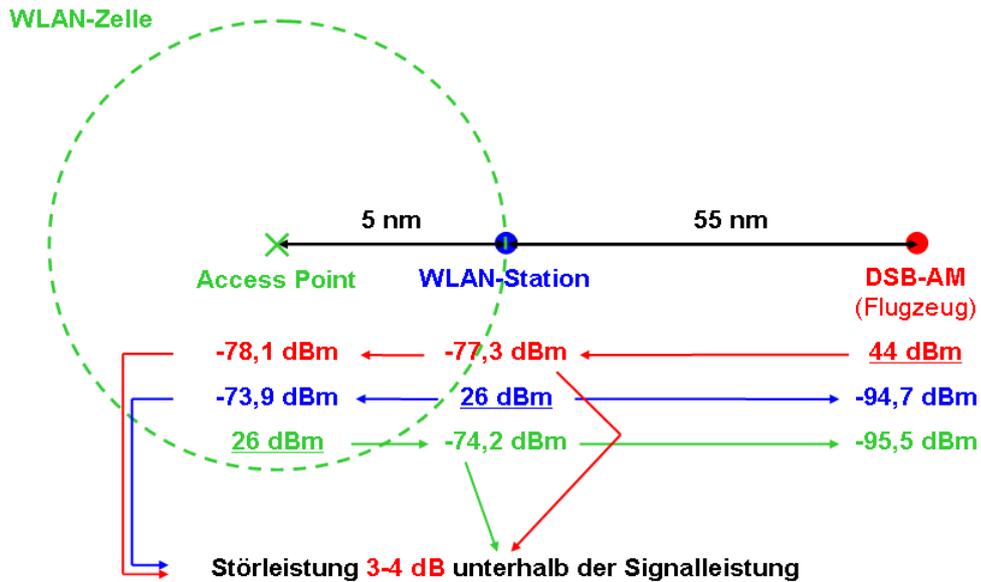


Abbildung 2.4: Empfangs- und Störleistungen des Overlay-Systems.

2.3 Simulationsszenarien

Um die Vielfalt der Freiheitsgrade der beiden Systeme einzuschränken und geeignete Grundlagen für die Untersuchung der wesentlichen Aspekte zu schaffen,

werden im folgenden Simulationsszenarien definiert, in denen einige Parameter festgelegt und bestimmte Annahmen getroffen werden.

2.3.1 Modellierung des PHY

Es wird zunächst nur eine Zelle mit einer Bandbreite von 1 MHz entsprechend 40 VHF-Kanälen oder 480 OFDM-Unterträgern mit der in Abbildung 2.5 dargestellten Kanalbelegung mit 9 belegten VHF-Kanälen entsprechend der mittleren Belegungsdichte von 22 % betrachtet. Da die 1 MHz breiten Abschnitte, die den Zellen zugeteilt werden, so ausgewählt werden, daß möglichst wenige Störer vorhanden sind, repräsentieren 9 VHF-Kanäle die maximal zu erwartende Belegungsdichte. Die DSB-AM Kanäle sind so verteilt, daß es sowohl Bereiche gibt, in denen nur 12 Träger zwischen zwei DSB-AM Kanälen benutzt werden können, als auch Bereiche, in denen mehr Träger zur Verfügung stehen. Außerdem kann anhand dieser Belegung der Einfluß von zwei nebeneinanderliegenden VHF-Kanälen sowie von VHF-Kanälen mit unterschiedlich starker Leistung untersucht werden, so daß hiermit viele mögliche Belegungszustände des Hauptsystems dargestellt werden.

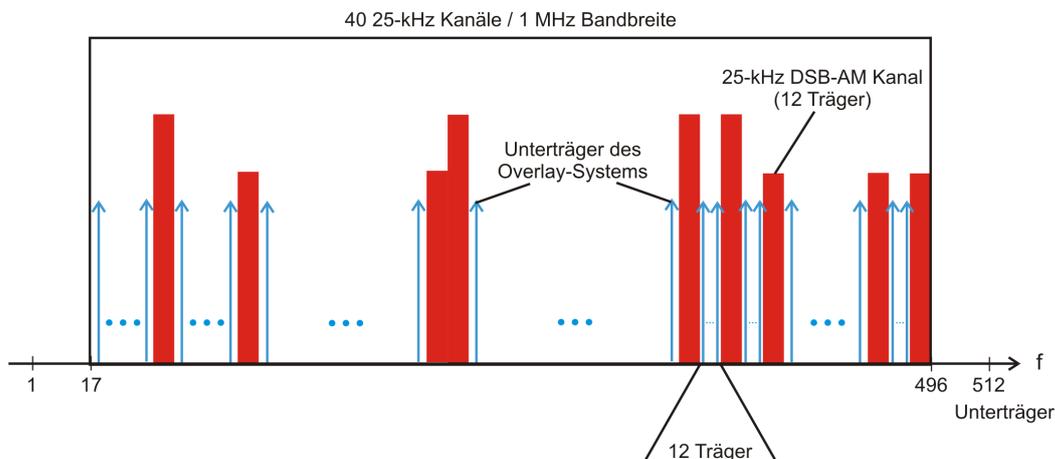


Abbildung 2.5: Betrachtete Kanalbelegung.

Die unterschiedlichen Bedingungen in den WLAN-Zellen mit 1,5 bzw. 10 km Reichweite werden durch verschiedene Kanalmodelle, in denen z.B. verschiedene Geschwindigkeiten auf dem Rollfeld und beim Anflug berücksichtigt werden [Haa02], oder durch Veränderung der Interferenzleistung simuliert. Aufgrund des Kanalzugriffsverfahrens des Füllsystems können Interferenzen zwischen den Nutzern des WLAN-Systems vernachlässigt werden.

2.3.2 Modellierung der gegenseitigen Interferenzen

Prinzipiell sind zwei Arten von Störungen zu unterscheiden: Zum einen verursacht das Hauptsystem Störungen im Füllsystem und zum anderen kann das Overlay-System das Hauptsystem stören. Weiter ist in beiden Fällen zwischen den Interferenzen auf den vom Overlay-System benutzten und auf den freigelassenen Kanälen zu differenzieren.

2.3.2.1 Interferenz *durch* das Hauptsystem

Zunächst soll an dieser Stelle noch einmal angemerkt werden, daß als Hauptsystem nur DSB-AM betrachtet wird und andere Systeme wie ACARS und VDL Mode 2 und 4 außer acht gelassen werden. Die von DSB-AM verursachten Störungen werden anhand von Statistiken über die Dauer und die Häufigkeit der Verbindungen modelliert. Zur Erzeugung der Störungen, die das DSB-AM System auf vom Overlay-System benutzten Kanälen verursacht, muß das Sprachsignal im Zeitbereich nachgebildet werden. Hierzu wird vereinfacht ein fester Signalpegel angenommen. Wie in Abschnitt 2.2.2 für die stärkste anzunehmende Störung gezeigt, liegen diese Interferenzen etwa 3-4 dB unterhalb des Signalpegels des Overlay-Systems. Auch auf den nicht vom Overlay-System benutzten Trägern muß das DSB-AM Signal modelliert werden, um die am Empfänger bei der FFT-Operation auftretenden Leakage-Effekte berücksichtigen zu können.

2.3.2.2 Interferenz *auf* das Hauptsystem

Wie in Abschnitt 2.2.2 gezeigt, verursacht das Overlay-System keine störenden Interferenzen auf das Hauptsystem, wenn es in ausreichender Entfernung Kanäle des DSB-AM Systems wiederverwendet. Aufgrund der recht hohen Energie in den Sidelobes des OFDM-Signals kann das Overlay-System aber angrenzende Kanäle, also die Kanäle, die am Flughafen von DSB-AM belegt sind, stören. Diese Störungen müssen durch geeignete Verfahren zur Unterdrückung der Nebenzipfel oder durch Freilassen von unmittelbar an DSB-AM Kanäle angrenzende Träger vermieden werden. Die Einflüsse des Overlay-Systems auf das Hauptsystem werden anhand des Sendespektrums des Overlay-Systems untersucht.

2.4 Zu untersuchende Aspekte

Der Schwerpunkt dieses Szenarios liegt in der Untersuchung der gegenseitigen Interferenzen zwischen Haupt- und Overlay-System. Da das DSB-AM-System aus Sicherheitsgründen unter keinen Umständen gestört werden darf und für das Overlay-System teilweise nur Abschnitte von 12 Trägern zur Verfügung stehen, sind die Anforderungen an die Störminimierung im Sender des Overlay-Systems besonders hoch. Zur Unterdrückung der Nebenzipfel des OFDM-Spektrums wurden im Rahmen von TAKOKO (AP 2) neue Verfahren entwickelt, die im Abschlußbericht des zweiten Arbeitspakets vorgestellt werden. Dabei müssen auch die Effekte nicht-linearer Verstärker und insbesondere in diesem Szenario der Einfluß der Verwendung von Richtantennen berücksichtigt werden. Empfängerseitig müssen die durch das Hauptsystem verursachten Störungen untersucht und geeignete Verfahren zur Unterdrückung dieser Interferenzen entwickelt werden. Ein weiterer Aspekt in Overlay-Systemen ist die dynamische Benutzung der Frequenzlücken. Da hier davon ausgegangen wird, daß das WLAN-System die Belegung des Frequenzbandes kennt, muß nur die Übermittlung der freien Träger an alle Stationen untersucht werden. Dabei müssen vor allem die Besonderheiten bei der Anmeldung im WLAN-System und beim Zell-Handover berücksichtigt werden. Da diese Untersuchungen nicht nur die physikalische Schicht, sondern vor allem die MAC-Schicht betreffen, wird auf diese Aspekte in Kapitel 5 näher eingegangen.

2 Szenario bei 100 MHz

3 Szenario bei 1000 MHz

In diesem Kapitel wird ein Overlay-Szenario im Frequenzbereich zwischen 960 und 1215 MHz untersucht. Dieses Frequenzband ist für Flugnavigationssysteme reserviert und wird unter anderem vom Distance Measuring Equipment (DME), einer Entfernungsmeßeinrichtung verwendet, die hier als Hauptsystem betrachtet werden soll. Aufgrund seiner großen Bandbreite erscheint dieser Frequenzbereich für Füllsysteme besonders geeignet. In diesem Projekt wird untersucht, wie in diesem Frequenzband zusätzlich ein flexibles, terrestrisches Mobilfunksystem beispielsweise für den Katastrophenschutz betrieben werden kann. Die Eckdaten dieses Szenarios sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt.

Hauptsystem	Distance Measuring Equipment (DME)
Overlay-System	Mobiles Kommunikationssystem
Frequenzband	960-1215 MHz

Tabelle 3.1: Eckdaten des zweiten Szenarios.

Im folgenden wird zunächst das Hauptsystem näher betrachtet. Insbesondere wird die Belegung des Frequenzbandes und die für ein Overlay-System zur Verfügung stehende Bandbreite analysiert. In einem zweiten Unterkapitel wird das zu untersuchende Füllsystem vorgestellt und schließlich werden Simulationsszenarien entworfen, anhand derer die wichtigsten Aspekte dieses Szenarios untersucht werden können.

3.1 Hauptsystem

Der Frequenzbereich 960-1215 MHz wird hauptsächlich für DME (Distance Measuring Equipment) bzw. TACAN (Tactical Air Navigation) im militärischen Bereich verwendet. Darüber hinaus werden in diesem Frequenzband Sekundärradar-systeme wie z.B. Secondary Surveillance Radar (SSR) und seine Erweiterungen

3 Szenario bei 1000 MHz

Mode S, Mode S Extended Squitter sowie das Kollisionsschutzsystem ACAS (Airborne Collision Avoidance System) betrieben. Diese beiden Systeme verwenden jedoch nur zwei schmale Frequenzbereiche um 1025-1035 MHz und 1085-1095 MHz, die bei der Betrachtung eines Overlay-Systems ausgespart werden. Außerdem wird zur Zeit die Einführung von Universal Access Transceiver (UAT), einem System zur Datenübertragung im Rahmen von ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast), in diesem Frequenzband untersucht. Hierfür sind aber nur die beiden je 1 MHz breiten Testkanäle bei 978 und 979 MHz vorgesehen, die in einem Overlay-System ebenfalls nicht betrachtet werden. Die genaue Belegung des Frequenzbandes wird in einem separaten Unterpunkt untersucht.

3.1.1 Überblick über das DME-System

Bei DME wird die Schrägentfernung zwischen Bodenstation und Flugzeug mittels einer Signallaufzeitmessung bestimmt [Men04]. Die Funktionsweise ist ähnlich wie die des Sekundärradars jedoch mit vertauschten Signalendeinrichtungen: Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, erzeugt ein Sender an Bord des Flugzeugs Doppelimpulse, die eine Bodenstation mit einer bestimmten Verzögerung Δt beantwortet. Die Zeit, nach der das Flugzeug die Antwortimpulse empfängt, abzüglich der Verzögerung in der Bodenstation Δt entspricht der Laufzeit des Signals und ist äquivalent zum Abstand zur Bodenstation.

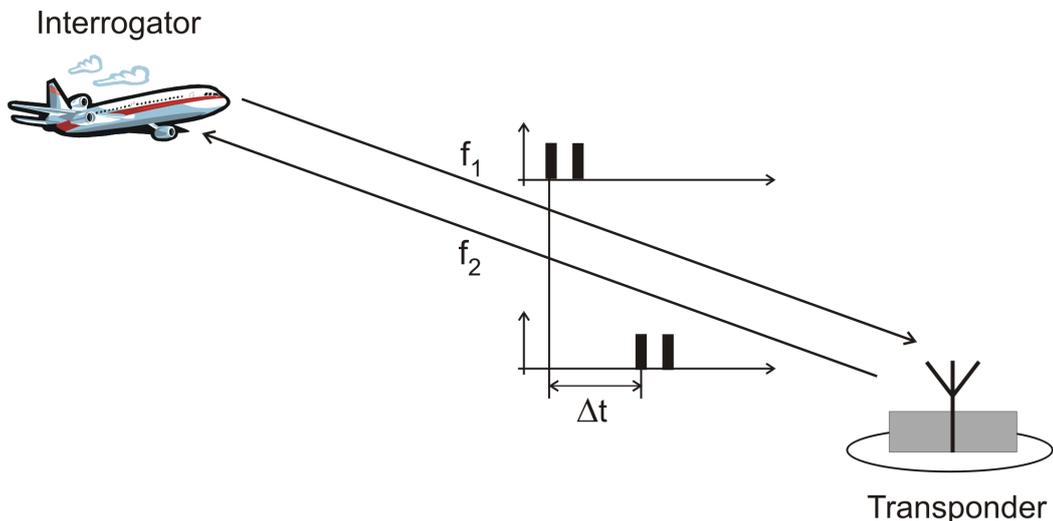


Abbildung 3.1: Prinzip der DME Entfernungsmessung.

Das Bordgerät arbeitet im Frequenzbereich 1025-1150 MHz, in dem 126 Kanäle mit einer Bandbreite von 1 MHz liegen. Der Transponder am Boden antwortet

	Impulsabstand im Bordgerät	Impulsabstand in der Bodenanlage	Verzögerung der Bodenanlage
X-Mode	$12\mu s$	$12\mu s$	$50\mu s$
Y-Mode	$36\mu s$	$30\mu s$	$56\mu s$

Tabelle 3.2: Betriebsmodi des DME.

auf einer von der Senderfrequenz abhängigen Frequenz im Bereich von 962 bis 1213 MHz. Eine Abfrage des Bordgeräts besteht aus zwei aufeinanderfolgenden $3,5\mu s$ langen Pulsen, die je nach Betriebsmodus einen Abstand von $12\mu s$ bzw. $36\mu s$ haben. Pro Sekunde werden bis zu 150 Abfrageimpulse gesendet, die zu zufällig bestimmten Zeitpunkten abgestrahlt werden. Empfängt nun der Transponder in der Bodenstation eine Folge von Doppelimpulsen, antwortet er nach einer bestimmten Verzögerung ebenfalls mit Doppelimpulsen. Die Sendeleistung der Transponder beträgt bis zu 1 kW, woraus sich eine Reichweite von bis zu 300 nautischen Meilen ($300 \text{ nm} \hat{=} 555 \text{ km}$) ergibt. Da die Bodenstation die Impulse von mehreren Flugzeugen verarbeiten muß, senden die Flugzeuge ihre Abfragen in zufälligen Abständen. Damit erzeugt jedes Flugzeug eine eigene, einmalige Folge von Doppelimpulsen, die eine Art "Signatur" darstellen. Empfängt ein Flugzeug dann Antwortimpulse mit der gleichen "Signatur", ist sichergestellt, daß die Bodenstation wirklich die Abfrage dieses Flugzeugs beantwortet. Um die zur Verfügung stehenden Frequenzen effektiver zu nutzen, gibt es zwei Betriebsarten, den sogenannten X- und Y-Mode, die sich wie in Tabelle 3.2 dargestellt durch Impulsabstand und Verzögerung in der Bodenstation unterscheiden.

Der Kanal, in dem das DME arbeitet, hängt von der gerade verwendeten Frequenz des VHF Omnidirectional Radio Range (VOR), einem UKW-Drehfunkfeuer zur Standortbestimmung in Flugzeugen, das im Frequenzbereich 112-117.975 MHz arbeitet, bzw. der Frequenz des Landekurssenders des Instrumentenlandesystems (ILS) ab. Jeder VOR-Frequenz ist ein DME-Kanal für den Interrogator im Flugzeug im Bereich von 1025-1150 MHz zugeordnet. Der Kanal der Bodenstation liegt je nach Betriebsmodus 63 MHz ober- oder unterhalb dieser Frequenz. Tabelle 3.3 zeigt einen Ausschnitt aus der Zuordnungstabelle [Fed82]. Insgesamt gibt es 126 Interrogator-Frequenzen, denen im X- bzw. Y-Mode Transponder-Frequenzen zugeordnet sind, so daß sich 252 Kanäle ergeben. Die zivile Luftfahrt darf 200 dieser DME-Kanäle benutzen.

Wird DME als Hauptsystem in einem Overlay-Szenario untersucht, sind folgende Aspekte zu berücksichtigen: Problematisch für ein Overlay-System sind die hohe Leistung sowie die variable Abfragerate des Bordsenders. Der Bordsender

3 Szenario bei 1000 MHz

Kanal-Nr.	VHF		DME-TACAN	
	Frequenz MHz		Interrogator-Freq. MHz	Transponder-Freq. MHz
34X	109.70	ILS	1058	995
34Y	109.75	ILS	1058	1121
35X	109.80	VOR	1059	996
35Y	109.85	VOR	1059	1122
36X	109.90	ILS	1060	997
36Y	109.95	ILS	1060	1123
37X	110.00	VOR	1061	998
37Y	110.05	VOR	1061	1124
38X	110.10	ILS	1062	999
38Y	110.15	ILS	1062	1125
39X	110.20	VOR	1063	1000
39Y	110.25	VOR	1063	1126
40X	110.30	ILS	1064	1001
40Y	110.35	ILS	1064	1127
41X	110.40	VOR	1065	1002
41Y	110.45	VOR	1065	1128
42X	110.50	ILS	1066	1003
42Y	110.55	ILS	1066	1129

Tabelle 3.3: Auszug aus der Zuordnungstabelle für DME-Kanäle [Fed82].

belegt zwar einen Kanal nur für sehr kurze Zeit, trotzdem ist es aufgrund der zufälligen Bestimmung des Abfragezeitpunktes kaum möglich, die freie Zeit mit einem Overlay-System zu nutzen. Allerdings können im Frequenzbereich nicht belegte Kanäle verwendet werden, so daß immer ausreichend Bandbreite für das Füllsystem zur Verfügung steht. Vorteilhaft ist außerdem, daß dem Füllsystem recht breite Kanäle mit einer Bandbreite von 1 MHz zur Verfügung stehen. Die Frequenzbelegung ist ortsabhängig aber an einem bestimmten Ort kaum zeitvariant, so daß das Overlay-System die Spektrumsbelegung des Hauptsystems nur bei der Initialisierung und dann in größeren zeitlichen Abständen bestimmen muß. Ist das Füllsystem mobil, müssen diese Messungen jedoch häufiger durchgeführt werden. Damit können in diesem Szenario Verfahren zur Detektion und dynamischen Belegung freier Frequenzbereiche untersucht werden.

3.1.2 *Belegung des Frequenzbandes von 960-1215 MHz*

Im folgenden wird die Belegung des Frequenzbandes von 960-1215 MHz genauer analysiert und anhand eines Modells die an einem konkreten Punkt verwendeten DME-Kanäle bestimmt. Daraus werden dann beispielhaft für den Münchener Raum die Kanäle bestimmt, die dort einem Overlay-System zur Verfügung stehen.

Von den insgesamt 255 1 MHz breiten Kanälen werden nicht alle für DME verwendet. Je 2 Kanäle sind als Schutzbänder an den beiden Rändern des Frequenzbandes vorgesehen und 16 sind für militärische Zwecke reserviert. Darüber hinaus sind die Frequenzen 978 und 979 MHz zum Test von UAT vergeben. Die 20 Kanäle bei 1025–1035 MHz und 1085–1095 MHz, auf denen Radaranlagen (SSR) betrieben werden, werden bei der Untersuchung eines Overlay-Systems als dauerhaft belegt angenommen. Damit bleiben 213 Kanäle übrig, die von einem Füllsystem verwendet werden können, sofern sie nicht durch DME belegt sind.

In Deutschland werden 94 DME- bzw. TACAN-Bodenstationen betrieben, die nach internationalen Standards entsprechend ihrer Reichweite und Flughöhe, aus der sie erreicht werden können, klassifiziert sind. Wie in Tabelle 3.4 dargestellt gibt es 36 Stationen mit einer Reichweite von 25 nm, die beim Anflug eines Flughafens zur Messung der Entfernung zur Landebahn dienen (Klasse T). Die 17 Stationen der Klasse L mit einer Reichweite von 40 nm werden ebenfalls beim Anflug von Flughäfen verwendet. Die übrigen 41 Bodenstationen haben in Deutschland eine maximale Reichweite von 100 nm und können aus größeren Flughöhen angepeilt werden (Klasse H).

Klasse	Höhe	Reichweite	Sendeleistung	Stationen
T (Terminal)	bis 305 m	25 nm	100 W	36
L (Low Altitude)	305-5486 m	40 nm	1000 W	17
H (High Altitude)	305-4206 m	40 nm	1000 W	41
	4420-18288m	100 nm		
	5486-13716m	130 nm		

Tabelle 3.4: Klassifizierung der Bodenstationen.

Um ohne Messungen an einem bestimmten Ort die Belegung der DME-Kanäle abschätzen zu können, müssen sowohl alle Bodenstationen als auch alle Flugzeuge in einem gewissen Umkreis berücksichtigt werden.

Da sich sowohl die DME-Stationen als auch die Stationen des Overlay-Systems am Boden befinden, ist aufgrund der Erdkrümmung nur in einer Entfernung von

3 Szenario bei 1000 MHz

ca. 23 nm eine direkte Sichtverbindung möglich, so daß es normalerweise ausreichen würde, die Kanäle aller DME-Stationen in diesem Umkreis auszuschließen. Wegen der hohen Sendeleistungen von 100 bzw. 1000 Watt reicht der Einfluß der Bodenstationen über den Radiohorizont hinaus und kann auf 80 bzw. 100 nm bestimmt werden [LWJ00]. In diesem Umkreis werden also die Interrogator- und Transponder-Frequenzen aller vorhandenen DME-Stationen als belegt angenommen. Außerhalb dieses in Abbildung 3.2 gelb markierten Bereichs werden die von den Bodenstationen verwendeten Transponder-Frequenzen nicht mehr berücksichtigt, da weder das Overlay-System diese Stationen beeinflusst noch diese Stationen das Overlay-System stören. Stationen der Klasse T können aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Sendeleistung in diesem Bereich ganz außer acht gelassen werden. Die Interrogator-Frequenzen, die Flugzeuge außerhalb der 100 nm-Grenze verwenden, müssen jedoch berücksichtigt werden. Im schlimmsten Fall peilt ein 100 nm entferntes Flugzeug eine DME-Bodenstation in 200 nm Entfernung an. Die Störleistung am betrachteten Standort ist dann genauso groß wie die empfangene Leistung an der angepeilten DME-Station. Da die Sendeleistung des Bordsenders bis zu 2000 Watt beträgt, kann die so verursachte Störung nicht vernachlässigt werden und es müssen die Interrogator-Frequenzen aller Stationen in einem Umkreis von 200 nm ausgelassen werden. Flugzeuge und DME-Stationen außerhalb dieses Bereichs haben zwar immer noch einen Einfluß auf das Overlay-System, diese Störung kann aber zugunsten einer größeren Anzahl freier Kanäle in Kauf genommen werden und durch eine geschickte Auslegung des Overlay-Systems minimiert werden.

Um aus diesem Modell eine reale Kanalbelegung ableiten zu können, wurde als Standort München ausgewählt. Abbildung 3.2 zeigt schematisch die in Deutschland betriebenen DME-Stationen in einem Umkreis von 200 nm um München [Mar00]. Über die DME-Stationen in den Nachbarländern liegen leider keine Informationen vor. Es ist aber vor allem aufgrund der geographischen Gegebenheiten im Süden des Gebiets von nur wenigen zusätzlichen DME-Stationen auszugehen. Zudem ist die Dichte der DME-Stationen im Großraum München eher höher als in anderen Teilen Deutschlands, so daß sich insgesamt trotz nicht berücksichtigter DME-Stationen eine realistische Abschätzung der mittleren Belegungsichte ergibt.

Für dieses Beispiel ergeben sich 48 Kanäle, die von DME verwendet werden und damit nicht für ein Overlay-System zur Verfügung stehen. Daraus resultiert bei 213 Kanälen eine Belegungsichte von von ca. 22,5%, die in anderen Teilen Deutschlands ähnlich oder niedriger ist. In Abbildung 3.3 ist die aus Abbildung 3.2 resultierende Belegung des Frequenzbandes dargestellt. Aufgrund der Aus-

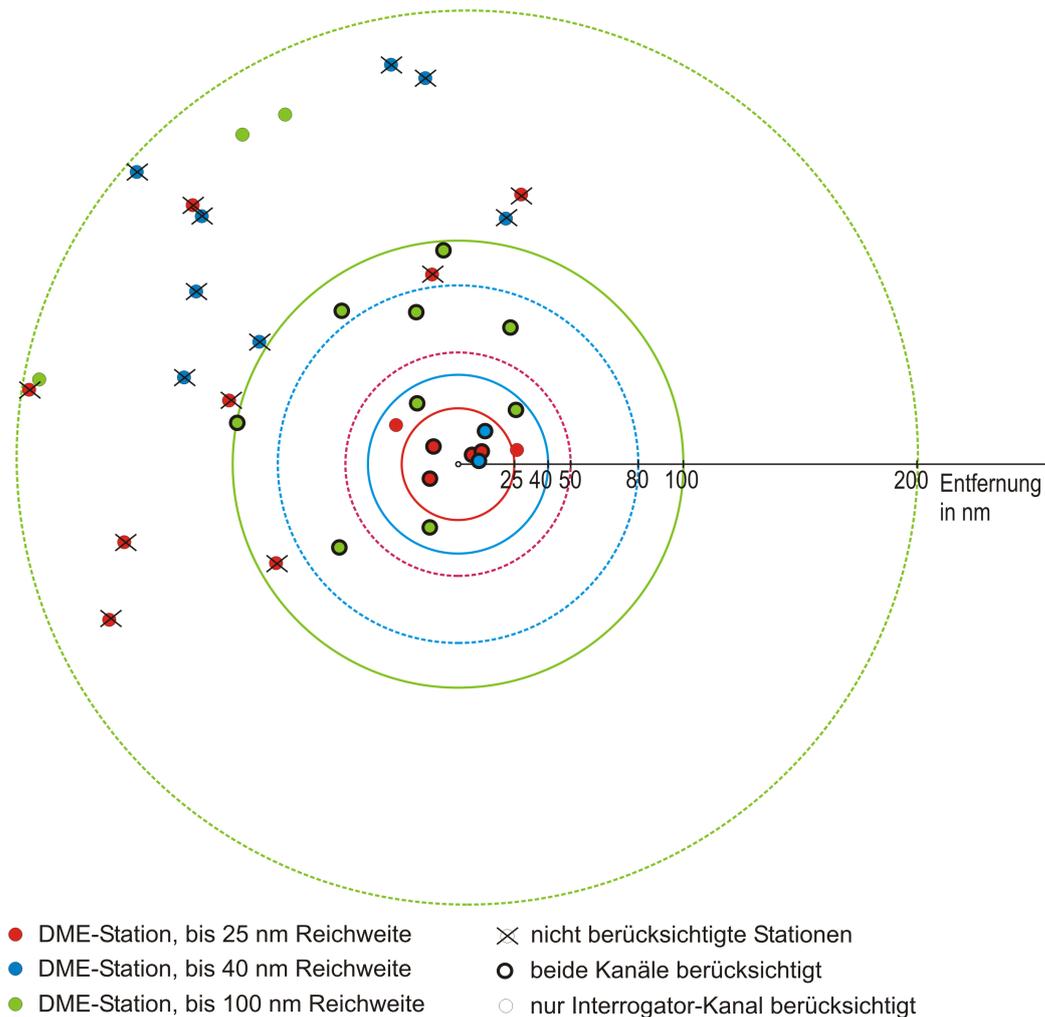


Abbildung 3.2: Modell zur Ermittlung der belegten DME-Kanäle.

sparung der Frequenzen für Radar und andere Anwendungen ergibt sich eine Unterteilung des Frequenzbandes in 3 Abschnitte, die als Pools bezeichnet werden. Es gibt zwei kleinere Abschnitte mit Bandbreiten von 45 bzw. 50 MHz und einen größeren Bereich mit 118 MHz Bandbreite. Einem Overlay-System stehen hiervon ca. 150 MHz zur Verfügung, die möglichst effizient genutzt werden sollen.

3.2 Overlay-System

In das im vorherigen Unterpunkt untersuchte Frequenzband soll nun ein flexibles, mobiles Kommunikationssystem integriert werden, das am Boden betrieben wird. Da das Frequenzband von 960-1215 MHz für Anwendungen in der Luftfahrt re-

3 Szenario bei 1000 MHz

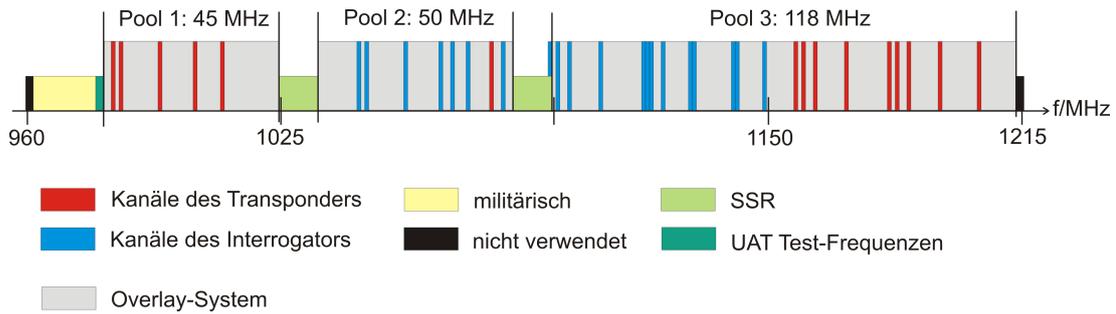


Abbildung 3.3: Belegung der DME-Kanäle in München.

serviert ist, kann das Overlay-System nicht als kommerzielles System betrieben werden, sondern muß hoheitlichen Zwecken dienen. Ein Overlay-System könnte dann beispielsweise als Notsystem für den Katastrophenschutz eingesetzt werden.

3.2.1 Systemarchitektur

Es soll ein sehr flexibles Kommunikationssystem entworfen werden, das jederzeit ohne großen Aufwand in Betrieb genommen werden kann. Dabei sind sowohl portable als auch mobile Daten- und Sprachdienste vorgesehen, so daß Architekturen wie bei WLAN mit Access Points oder wie bei zellularen Mobilfunksystemen möglich sein müssen, aber auch dezentrale Strukturen wie bei ad-hoc Netzwerken sind denkbar. Die Basisstationen einer zentralen Infrastruktur sind nicht fest installiert, sondern werden z.B. auf LKWs montiert und in das Einsatzgebiet transportiert. Um ein zellulares Netz aufzubauen, kann die dann notwendige Kommunikation zwischen den Basisstationen über Richtfunkverbindungen realisiert werden. Hieraus ergeben sich einige Anforderungen an das Overlay-System: Es muß aufgrund der geforderten Mobilität für Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h ausgelegt werden. Zweitens müssen viele Nutzer mit einer hohen Datenrate bedient werden können, d.h. die freie Bandbreite von ca. 150 MHz muß möglichst effizient genutzt werden. Außerdem müssen die Sendeleistungen so gewählt werden, daß erstens das Füllsystem das Hauptsystem nicht beeinträchtigt und es zweitens in Gebieten mit schlechter Infrastruktur ohne aufwändige Gerätschaften, die viel Energie benötigen, realisiert werden kann. Nach Berechnung des Link Budgets [LWJ00] erscheinen 1-5 W für die Basisstation und 300 mW-1 W Sendeleistung für die Mobilstationen sinnvoll. Mit diesen Sendeleistungen lassen sich Zellgrößen von ca. 4 km realisieren.

3.2.2 Design der physikalischen (PHY) Schicht

Die zur Verfügung stehende Bandbreite von ca. 150 MHz wird in Teilbänder von je 10 MHz unterteilt. Damit besteht die Möglichkeit, eine Zellstruktur aufzubauen, in der jeder Zelle eine bestimmte Mittenfrequenz zugewiesen wird und benachbarte Zellen interferenzfrei verschiedene Mittenfrequenzen benutzen können.

Bei der Auslegung der physikalischen Schicht müssen zunächst das Kanalraster bzw. die OFDM-Symbollänge und damit die Länge der FFT festgelegt werden. Hierbei ist einerseits Frequenzverschiebung durch den Doppler-Effekt zu berücksichtigen, andererseits sollte die OFDM-Symboldauer so gewählt werden, daß eine Kollision mit dem Hauptsystem möglichst wenige OFDM-Symbole zerstört. Die längste Störung durch das Hauptsystem wird verursacht, wenn ein Flugzeug im Y-Mode sendet. Hier beträgt die Stördauer $43\mu s$, was sich aus der Dauer der Doppelimpulse von $2 \cdot 3,5\mu s$ und dem Impulsabstand ($36\mu s$) zusammensetzt. Bei der Festsetzung der FFT-Periode auf $100\mu s$ werden bei einer Kollision maximal 2 OFDM-Symbole zerstört. Damit ergibt sich ein Kanalraster von 10 kHz, das auch für die auftretenden Doppler-Frequenzen geeignet ist. In jedem 10 MHz-Kanal liegen damit 1000 Träger, woraus eine FFT-Länge von 1024 resultiert. Jedes OFDM-Symbol muß um ein Guard Intervall erweitert werden, das größer ist als die maximale Verzögerung des Kanals. In diesem Fall ergeben sich ein Guard Interval von $10\mu s$ und eine OFDM-Symboldauer von $110\mu s$. Die wichtigsten Parameter der PHY-Schicht sind in Tabelle 3.5 aufgelistet.

Es können nicht alle 1000 Träger zur Datenübertragung verwendet werden, da im Mittel 225 Träger durch das DME-System belegt sind und da innerhalb der Bandbreite des Overlay-Systems Pilot-Symbole und Schutzträger zu benachbarten DME-Kanälen erforderlich sind. Insgesamt ergibt sich bei einer Coderate $R_c = 1/2$ und 16-QAM als Modulationsverfahren eine Datenrate von ca. 10 Mbit/s.

3.3 Simulationsszenarien

Um die Koexistenz von Haupt- und Overlay-System untersuchen zu können, ist es ausreichend nur eine Zelle des Gesamtsystems zu betrachten. In der zur Verfügung stehenden Bandbreite von 10 MHz werden 3 Kanäle als vom DME-System belegt angenommen. Damit bleiben für die Übertragung im Overlay-System max. 700 OFDM-Träger übrig, von denen allerdings nicht alle zur Datenübertragung verwendet werden können. Als Kanalmodell wird ein für GSM 900 entwickeltes Mo-

3 Szenario bei 1000 MHz

Parameter	Wert
Bandbreite	10 MHz
Kanalabstand	10 kHz
Länge der FFT	1024
IFFT/FFT Periode T_{FFT}	100 μs
Länge des Guard Intervalls T_{GI}	10 μs
OFDM-Symboldauer T_S	110 μs
von DME belegte Träger	225
Anzahl der Schutzträger am Rand	$2 \cdot 50 = 100$
Anzahl der freien Träger	675
Modulationsverfahren	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Coderate	z.B. $R_c = 1/2$
Datenrate für 16-QAM und $R_c = 1/2$	ca. 10 Mbit/s

Tabelle 3.5: Parameter des PHY Layers.

dell verwendet, da in diesem Szenario ähnliche Frequenzen und Umgebungen vorliegen [COS86, Fai89].

Die Modellierung der Interferenzen, die das Hauptsystem im Overlay-System verursacht, bzw. der Störungen des Overlay-Systems im Hauptsystem wird in den folgenden beiden Unterpunkten beschrieben.

3.3.1 Interferenz *durch* das Hauptsystem

Bei der Modellierung der Interferenz, die das DME-System im Overlay-System verursacht, werden zwei Arten von Störungen unterschieden: Zunächst werden die Einflüsse des DME-Systems auf benachbarte DME-Kanäle untersucht. Sollen diese Nachbarkanäle vom Overlay-System verwendet werden, ist es sinnvoll, nicht alle Träger zu benutzen, sondern eine bestimmte Anzahl als Schutzträger freizulassen, um Störungen zu vermeiden. Die Belegung eines 10 MHz breiten Frequenzbandes durch DME und das Overlay-System ist in Abbildung 3.4 schematisch dargestellt. Auch am Empfänger muß der Einfluß des DME-Systems berücksichtigt werden, da die Überlagerung der Signale des DME- und des Overlay-Systems bei der FFT-Operation im Empfänger des Overlay-Systems zu Leakage-Effekten führt, die untersucht und durch geeignete Verfahren minimiert werden müssen. Daher ist es für diese Untersuchungen sinnvoll, das DME-System sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich nachzubilden.

3.4 Zu untersuchende Aspekte

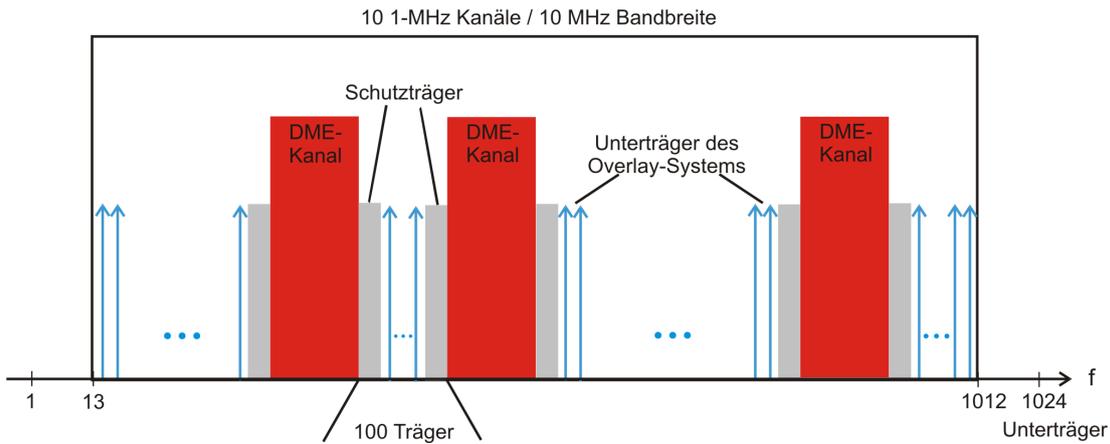


Abbildung 3.4: Untersuchte Kanalbelegung.

Eine andere Art von Störung tritt auf, wenn Haupt- und Overlay-System gleichzeitig auf einem Kanal senden, beispielsweise verursacht durch einen Fehler in der Detektion der Frequenzlücken. Diese Kollision führt aufgrund der OFDM-Symbollänge und der Dauer der Störung zu einem Verlust von maximal 2 OFDM-Symbolen. Diese Interferenz wird durch einen Zufallsprozeß simuliert, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ein oder zwei OFDM-Symbole zerstört.

3.3.2 Interferenz auf das Hauptsystem

In diesem Szenario können die Störungen, die das Overlay-System im DME-System verursacht, vernachlässigt werden, da einerseits aufgrund der geringen Reichweiten und Sendeleistungen des Overlay-Systems kaum Störungen im Hauptsystem verursacht werden. Andererseits unterscheidet sich das kontinuierliche Signal des Overlay-Systems stark von den Doppelimpulsen des DME-Systems, so daß das DME-System das Overlay-System nicht fälschlicherweise als Nutzer identifiziert. Die quantitative Untersuchung dieser Einflüsse ist für das AP 2.3 vorgesehen.

3.4 Zu untersuchende Aspekte

Da im Gegensatz zum ersten Szenario in diesem die Belegung des Frequenzbandes nicht bekannt ist, müssen hier die Detektion der Frequenzlücken und die Signalisierung der benutzbaren Träger zwischen den Stationen untersucht werden. Ein weiterer Aspekt liegt in der Unterdrückung der gegenseitigen Störungen.

3 Szenario bei 1000 MHz

gen von Haupt- und Overlay-System. Dabei müssen weniger die Interferenzen des Overlay-Systems auf das Hauptsystem, sondern vielmehr die Störungen des DME-Systems im Overlay-System untersucht werden. Senderseitig ist dabei interessant, wie die Störungen durch Einfügen von Schutzträgern reduziert werden können; am Empfänger müssen Verfahren zur Unterdrückung der Leakage-Effekte entwickelt werden. Da die Störungen des Hauptsystems nur begrenzt minimiert werden können, müssen leistungsfähige Protokolle zur Übertragungswiederholung untersucht und an die Anforderungen eines Overlay-Systems angepaßt werden. Auf die in der MAC-Schicht relevanten Aspekte wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

4 Szenario bei 1800 MHz

In diesem Kapitel soll ein Overlay-Szenario im Frequenzbereich von 1800 MHz vorgestellt werden. Als Hauptsystem wird dabei ein auf GSM¹ basierendes Mobilfunksystem betrachtet. Die ungenutzten Ressourcen sollen durch ein Fixed-Wireless-Radio System möglichst effizient genutzt werden. Tabelle 4.1 gibt die Eckdaten des dritten Szenarios wieder

Hauptsystem	GSM
Overlay-System	MAN ²
Frequenzband	1710-1880 MHz

Tabelle 4.1: Eckdaten des dritten Szenarios.

Im folgenden werden zunächst die Eigenschaften des angenommenen Hauptsystems beschrieben, um dann im Anschluß darauf aufbauend die Parameter des Overlay-Systems festzulegen.

4.1 Eigenschaften des Hauptsystems

Der Frequenzbereich um 1800 MHz ist in Europa für den Einsatz von Mobilfunk-Anwendungen vorgesehen. Als Standard wird hier GSM verwendet. In diesem Zusammenhang werden nur die wesentlichen Eigenschaften kurz dargestellt, eine ausführliche Beschreibung des Standards findet sich z.B. in [Jon01]. GSM besitzt eine zellulare Netzstruktur mit Basisstationen und Mobilgeräten und insgesamt stehen für den Up- und Downlink jeweils 75 MHz Bandbreite zur Verfügung, die in 200 kHz-Kanäle unterteilt werden. Diese Kanäle sollen hier als *GSM-Kanäle* bezeichnet werden, um eine klarere begriffliche Abgrenzung zu den Kanälen des Overlay-Systems zu erreichen. Um Interferenzen zu vermeiden, werden jedoch

¹Global System for Mobile Communications

²Metropolitan Area Network

4 Szenario bei 1800 MHz

Frequenzband	1710 - 1785 MHz (UL ⁵) 1805 - 1880 MHz (DL ⁶)
Bandbreite	2 x 75 MHz
Zugriffsverfahren	FDMA / TDMA
Kanalraster	200 kHz
Anzahl der GSM-Kanäle	374
Slotlänge	576,9 μ s

Tabelle 4.2: Übersicht der Hauptsystemparameter.

nicht in jeder Zelle alle verfügbaren Kanäle verwendet. Die Kanäle werden den Zellen so zugewiesen, daß benachbarte Zellen nicht die gleichen Kanäle verwenden.

Neben dem eben beschriebenen FDMA-Zugriff wird zusätzlich eine TDMA-Komponente eingesetzt: Jeder Kanal wird in Rahmen mit acht Zeitschlitzen unterteilt, die jeweils eine Länge von ungefähr 576,9 μ s haben. Als Modulation kann entweder GMSK³ oder 8-PSK⁴ verwendet werden, die verwendete Bruttodatenrate beträgt 270,833 kbit/s.

Die für ein Füllsystem zur Verfügung stehende Bandbreite hängt sehr stark von der Nutzung des Hauptsystems durch dessen Kunden ab und ist damit unter anderem tageszeitabhängig. Durch den kombinierten Einsatz von TDMA und FDMA im Hauptsystem entsteht bei der Belegungslückendetektion die interessante Herausforderung, sehr schnell und relativ häufig die entstehenden Lücken zu erkennen. Im ungünstigsten Fall haben die Lücken dabei die Länge eines einzelnen Timeslots, also 576,9 μ s.

4.1.1 Zugriffsmodell des Hauptsystems

Die für das Füllsystem zur Verfügung stehende Übertragungskapazität ist direkt abhängig von der Spektrumnutzung durch das Hauptsystem. Deswegen soll hier nun ein Modell für die Zugriffe des Hauptsystems angegeben werden, um daraus Aussagen über das freie Spektrum treffen zu können.

Zunächst sollen einige Annahmen gemacht werden. Wie in Abschnitt 4.1 ausführlich beschrieben wurde, gehen wir hier von einem GSM-System mit sowohl

³Gaußsches Minimum-Shift Keying

⁴Phase-Shift Keying

⁷Uplink

⁸Downlink

4.1 Eigenschaften des Hauptsystems

einer TDMA- als auch FDMA-Komponente aus. Im allgemeinen Fall hat das System n GSM-Kanäle und ist in Rahmen mit jeweils m Zeitschlitz aufgeteilt. Die Länge eines Rahmens wird mit T_F bezeichnet. Es ergibt sich also die in Abbildung 4.1 gezeigte Struktur, wobei in diesem Zusammenhang der Einfachheit halber nur der Downlink betrachtet wird.

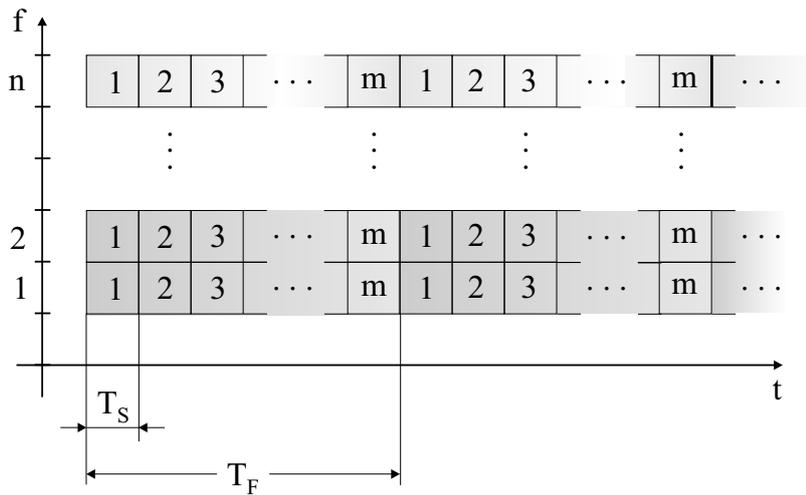


Abbildung 4.1: Aufteilung des Spektrums in Frequenz- und Zeitrichtung.

Weiterhin beschränken wir uns hier auf die Annahme, daß das Hauptsystem im Wesentlichen zur Übertragung von Sprache genutzt wird. Die Dauer der Verbindungen sei exponentialverteilt und die Ankünfte der Gespräche nehmen wir als Poissonprozess an

$$P\{X(t) = k\} = \frac{(\lambda_G t)^k}{k!} e^{-\lambda_G t}. \quad (4.1)$$

λ_G ist dabei die Ankunftsrate der Verbindungen in das Gesamtsystem. $P\{X(t)$ gibt die Anzahl der ankommenden Gespräche im Intervall t an, und $P\{X(t) = k\}$ ist damit die Wahrscheinlichkeit, daß während t k Gespräche begonnen werden. Unter diesen Randbedingungen läßt sich das System als Markovkette modellieren.

4.1.1.1 Ein GSM-Kanal ($n = 1$)

Dazu soll zunächst ein System mit nur einem GSM-Kanal ($n = 1$) betrachtet werden. Prinzipiell können neue Verbindungen zu jedem beliebigen Zeitpunkt eintreffen. Jede Verbindung belegt jedoch nur einen Zeitschlitz pro Rahmen, so daß

4 Szenario bei 1800 MHz

eine zeitdiskrete Markovkette resultiert: Die Zustände geben die Anzahl der aktiven Verbindungen an und werden nur im Abstand T_F gewechselt. Dieses System kann m Verbindungen gleichzeitig bedienen, jede weitere ankommende Anfrage geht verloren. Damit ergeben sich ähnlich wie in [BG92] für die Übergangswahrscheinlichkeiten der Zustände

$$\begin{aligned}
 p_{00} &= 1 - \lambda T_F + o(T_F) \\
 p_{mm} &= 1 - m\mu T_F \\
 p_{kk} &= 1 - \lambda T_F - k\mu T_F + o(T_F) & k = 1, \dots, m-1 \\
 p_{k,k+1} &= \lambda T_F + o(T_F) & k = 0, \dots, m-1 \\
 p_{k,k-1} &= k\mu T_F + o(T_F) & k = 1, \dots, m \\
 p_{kj} &= o(T_F) & k \text{ und } j \neq k, k+1, k-1.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

p_{ji} gibt dabei die Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand j nach Zustand i an. Die Ankunftsrate ist $\lambda = \lambda_G$ und μ ist die Bedienrate. Die Wahrscheinlichkeit, daß mehr als eine Verbindung in der Zeit T_F dazukommt oder wegfällt, ist in einem GSM-System sehr gering. Man kann also $o(T_F)$ vernachlässigen und hat somit ein zeitdiskretes M/M/m/m-Verlustsystem mit der Übergangsmatrix

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda T_F & \lambda T_F & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu T_F & 1 - \lambda T_F - \mu T_F & \lambda T_F & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\mu T_F & 1 - \lambda T_F - 2\mu T_F & \lambda T_F & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k\mu T_F & 1 - \lambda T_F - k\mu T_F & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \lambda T_F \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m\mu T_F & 1 - m\mu T_F \end{pmatrix}. \tag{4.3}$$

Die dazugehörige Markovkette zeigt Abbildung 4.2.

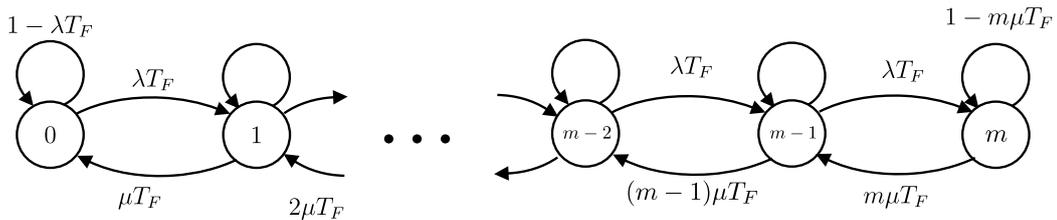


Abbildung 4.2: Markovkette des M/M/m/m-Verlustsystem.

Uns interessieren nun vor allem die Wahrscheinlichkeiten, mit denen eine bestimmte Anzahl von gleichzeitigen Verbindungen im System vorhanden sind. Diese stationären Zustandswahrscheinlichkeiten werden mit

$$\boldsymbol{\pi} = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_m] \tag{4.4}$$

4.1 Eigenschaften des Hauptsystems

bezeichnet. Es ist bekannt, daß für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten eines M/M/m/m-Systems gilt [BG92]

$$\pi_k = \pi_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}, k = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

mit

$$\pi_0 = \left[\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \right]^{-1}. \quad (4.6)$$

π_1 gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß genau ein Gespräch stattfindet - bei einem GSM-System ist demzufolge also von den acht Zeitschlitzten nur einer belegt. Allgemein ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, daß ein Zeitschlitz belegt ist

$$P(\text{slot} = \text{belegt}) = \sum_{k=0}^m \frac{k}{m} \pi_k, \quad (4.7)$$

bzw. frei ist

$$P(\text{slot} = \text{frei}) = \sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \pi_k, \quad (4.8)$$

wobei m die Anzahl der Zeitschlitzte der Länge T_S in einem Rahmen darstellt. Ersetzt man π_k mit Hilfe von Gleichung 4.5, erhält man

$$P(\text{slot} = \text{frei}) = \sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \pi_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \quad (4.9)$$

und zusammen mit 4.6 folgt schließlich

$$P(\text{slot} = \text{frei}) = p_f = \frac{\sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}}{\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}}. \quad (4.10)$$

Gleichung 4.10 gibt also in Abhängigkeit der Ankunfts- und Bedienrate die Wahrscheinlichkeit an, daß in einem TDMA-Rahmen mit m Zeitschlitzten ein Zeitschlitz unbelegt ist. Dabei wird vorausgesetzt, daß eingehende Verbindungen gleichmäßig und zufällig auf die Zeitschlitzte verteilt werden.

4.1.1.2 Mehrere GSM-Kanäle ($n > 1$)

Durch das Zulassen mehrerer GSM-Kanäle ($n > 1$) soll in diesem Abschnitt die FDMA-Komponente eines GSM-Systems berücksichtigt werden. Ein Poissonprozess mit der Ankunftsrate λ_G kann in mehrere unabhängige Poissonprozesse aufgeteilt werden [JW00]. Teilt man die ankommenden Verbindungen gleichmäßig

4 Szenario bei 1800 MHz

auf die einzelnen Kanäle auf, so ergibt sich pro GSM-Kanal folgende Ankunftsrate:

$$\lambda = \frac{\lambda_G}{n}, \quad (4.11)$$

d. h. wir betrachten nun n unabhängige Poissonprozesse mit der Ankunftsrate λ . Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Zeitschlitz eines GSM-Kanals unbelegt ist, berechnet sich aus Gleichung 4.10. Interessant ist nun, mit welcher Wahrscheinlichkeit von den n Kanälen l gleichzeitig frei sind, was zu einer Binomialverteilung führt:

$$P(Y_n = l) = \binom{n}{l} p_f^l (1 - p_f)^{n-l} \quad (4.12)$$

mit dem Erwartungswert

$$E(Y_n) = np_f = n \frac{\sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}{\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}} \quad (4.13)$$

und der Varianz

$$D^2(Y_n) = np_f(1 - p_f) = n \frac{\sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}{\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}} \cdot \left(1 - \frac{\sum_{k=0}^m \frac{m-k}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}{\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{1}{k!}}\right). \quad (4.14)$$

Nach dem Satz von Moivre-Laplace nähert sich für große n diese Verteilung einer Normalverteilung.

4.2 Overlay-System

Um die vorhandenen Lücken in der Belegung durch das Hauptssystem zu nutzen, soll in diesem Szenario ein Fixed-Wireless-Radio-System verwendet werden. Unter diesem Begriff versteht man Funkssysteme, deren Teilnehmerstationen in der Regel an einem bestimmten Ort fest installiert sind. Als Beispiele lassen sich Richtfunkstrecken oder Metropolitan Area Networks (MAN) nennen, wobei hier die MANs von größerem Interesse sind. Solche Systeme stellen einen Netzzugang für Gebäude zur Verfügung, wobei die Antennen normalerweise auf der Außenseite fest installiert sind. Im Gebäude selbst werden dann konventionelle Netze wie z.B. WLAN oder Ethernet verwendet. MANs stellen also eine Alternative zu leitungsgebundenen Netzanschlüssen wie z.B. DSL⁷ dar und sind für den Nutzer transparent.

⁷Digital Subscriber Line

Aus Sicht des Hauptsystembetreibers bietet es sich an, dieses Overlay-System als zusätzlichen Dienst für die eigenen Kunden anzubieten und so das teure Mieten der drahtgebundenen Leitungen zu umgehen. Aber auch ein Vermieten der freien Ressourcen des Hauptsystems an einen unabhängigen Betreiber wäre denkbar. Ist im ersten Fall noch eine Signalisierung zwischen Haupt- und Overlay-System und einer Verwendung der bereits installierten Infrastruktur unter Umständen möglich, bedarf es im Fall eines unabhängigen Betreibers auch eines unabhängigen Overlay-Systems.

Es existieren bereits verschiedene Standards für Fixed-Radio-Systeme, so daß es nahe liegt, sich beim Entwurf des Overlay-Systems so nahe wie möglich an einem Standard zu orientieren und nur die Modifikationen vorzunehmen, die in einem Overlay-Szenario nötig werden. Durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist eine direkte Kompatibilität des modifizierten Standards mit dem ursprünglichen dennoch nicht zu erreichen.

4.2.1 Systemarchitektur

Die IEEE 802.16 Working Group beschäftigt sich mit der Entwicklung von Standards für breitbandige, drahtlose Metropolitan Area Networks, die hier näher betrachtet werden sollen. Innerhalb des IEEE Standards [IEE04] existieren verschiedene Varianten der physikalischen Schicht:

- **WirelessMAN-SC** ist eine Single-Channel Variante und wurde für einen Frequenzbereich von 10 bis 66 GHz unter Voraussetzung von Sichtverbindungen entworfen.
- **WirelessMAN-SCa** ist ähnlich wie WirelessMAN-SC, jedoch für Frequenzbänder zwischen 2 GHz und 11 GHz unter Annahme von NLOS⁸-Verbindungen mit Mehrwegeausbreitung entworfen worden. Der Duplexbetrieb kann wahlweise mit TDD⁹ oder FDD¹⁰ realisiert werden. Als Modulationsarten sind BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM sowie 256-QAM erlaubt. Die Kanalbandbreite hängt von der durch die Regulierungsbehörde vorgegebenen Gesamtbandbreite ab und beträgt mindestens 1,25 MHz.
- **WirelessMAN-OFDM** basiert auf OFDM mit 256 Unterträgern, von denen effektiv jedoch nur 200 genutzt werden. Moduliert werden die Träger

⁸No Line Of Sight

⁹Time-Division Duplex

¹⁰Frequency-Division Duplex

4 Szenario bei 1800 MHz

mit QPSK oder 16-QAM, optional auch mit 64-QAM. Auch hier kann der Duplexbetrieb wahlweise mit TDD oder FDD realisiert werden.

- **WirelessMAN-OFDMA** ist ähnlich wie WirelessMAN-OFDM, nur das hier durch die 2048-Punkte-FFT eine größere Anzahl von Unterträgern vorhanden ist, die jeweils zu Unterkanälen zusammengefaßt werden.
- **WirelessHUMAN** spezifiziert für die Varianten im Frequenzbereich von 2-11 GHz weitere Punkte, die für den Betrieb in unlizensierten Bändern notwendig sind, insbesondere zur Aufteilung der Kanäle um z.B. Interferenzen mit 802.11 Systemen im gleichen Frequenzbereich möglichst minimal zu halten. Weiterhin wird der Duplexbetrieb in den lizenzfreien Bänder ausschließlich mit TDD umgesetzt.

Für das hier betrachtete Overlay-Szenario sind nur die Varianten, die für niedrigere Frequenzbereiche spezifiziert sind, interessant. Da für das Overlay-System OFDM verwendet werden soll, bietet sich beispielsweise WirelessMAN-OFDM als Grundlage für die Untersuchungen an.

4.2.2 Kanalmodelle

Neben den eigentlichen 802.16 Standards hat die IEEE 802.16 Working Group auch ein Dokument veröffentlicht, das sich mit Kanalmodellen für Fixed Wireless Applications beschäftigt. Dort werden sechs typische Kanäle definiert, die sogenannten *Modified Stanford University (SUI) Channel Models*. Für die genauen Details und Parameter sei auf [IEE03c] verwiesen.

4.2.3 Design der physikalischen (PHY) Schicht

Bei der Wahl der Parameter für die physikalische Schicht sind einige Randbedingungen zu beachten, die teilweise auf die Koexistenzumgebung zurückzuführen sind und teilweise durch den Standard vorgegeben sind:

- Je kürzer die OFDM-Symbollänge ist, desto kleinere Lücken in Zeitrichtung können ausgenutzt werden.
- Es sollte eine ganzzahlige Anzahl von OFDM-Unterträgern pro GSM-Kanal gewählt werden.

- Die insgesamt zur Verfügung stehende Bandbreite soll so in MAN-Kanäle aufgeteilt werden, daß möglichst viel Bandbreite effektiv genutzt werden kann.

Zunächst soll sich die Wahl der Parameter direkt an IEEE 802.16 WirelessMAN-OFDM orientieren. Demzufolge ist die zur Verfügung stehende Bandbreite (hier 75 MHz) in 2^N MAN-Kanäle zu unterteilen, die jedoch mindestens 1,25 MHz breit sein müssen. Wählt man hier $N = 3$ ergeben sich MAN-Kanäle mit 9,375 MHz. Aufgrund der vorgegebenen 256-Punkte FFT werden diese MAN-Kanäle in 256 OFDM-Unterträger unterteilt, woraus ein Unterträgerabstand von 36,6 kHz resultiert. Im Hauptsystem wird eine Kanalbreite von 200 kHz verwendet, so daß einem GSM-Kanal in diesem Fall ca. 5,5 OFDM-Unterträger gegenüberstehen, gefordert war jedoch eine ganzzahlige Anzahl von Unterträgern pro GSM-Kanal.

Geht man nun von fünf OFDM-Unterträgern aus, erhöht sich der Unterträgerabstand auf 40 kHz und damit die Breite eines MAN-Kanals auf 10.24 MHz. Als Folge davon ist es nun allerdings nicht mehr möglich, acht MAN-Kanäle in der zur Verfügung stehenden Bandbreite unterzubringen. In diesem Punkt wäre die Parameterwahl nicht mehr ganz standardkonform und es werden 3.32 MHz verschenkt. Allerdings kann man ein solches System auch einfach mit acht Kanälen betrachten, von denen ein Kanal abgeschaltet wird, was nur eine relativ kleine Änderung bedeutet. Die ungenutzte Bandbreite kann man entweder aufteilen und als Schutzbänder an den Rand legen - oder evtl. auch als zusätzlichen Kontrollkanal für Overlay-System spezifische Informationen verwenden. Die Verwendung als Kontrollkanal würde aber eine weitere Modifikation des Standards bedeuten.

Mit einem Unterträgerabstand von 40 kHz ergibt sich im Zeitbereich eine Symboldauer von $25\mu s$. Für das Verhältnis von FFT-Periode zu Guard-Intervall sind im Standard folgende Verhältnisse festgelegt:

$$\frac{T_{GI}}{T_{FFT}} = \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}. \quad (4.15)$$

Wählt man die Länge des Guard Intervalls zu $1/4$ der FFT-Periode, so erhält man mit $T_{FFT} = 25\mu s$ eine Länge von $T_{GI} = 6,25\mu s$. Somit ist diese Konfiguration für die Modelle SUI-1, SUI-2, SUI-3 und SUI-4 geeignet, die eine maximale Verzögerung von $4\mu s$ haben. Diese Kanalmodelle entsprechen den Klassen B (hügelig / geringe Baumdichte oder flach / mittlere bis starke Baumdichte) und C (flach / geringe Baumdichte) [EGT⁺99]. SUI-5 und SUI-6 berücksichtigen Verzögerungen bis zu $20\mu s$. Um ein entsprechend langes Guard-Intervall zu erreichen, muß die FFT-Periode mindestens $60\mu s$ betragen, so daß die gewählte Konfiguration für

4 Szenario bei 1800 MHz

dieses beiden Kanalmodelle ungeeignet ist.

Insgesamt ergibt sich also für die OFDM-Symboldauer eine Länge von $31,25\mu s$. Ein Zeitschlitz im Hauptsystem hat eine Länge von ca. $577\mu s$, so daß in dieser Zeit ungefähr 18 OFDM-Symbole des Overlay-Systems gesendet werden können. Eine Übersicht der gewählten Parameter wird in Tabelle 4.3 gegeben:

Parameter	Wert
Bandbreite	10,24 MHz
Kanalabstand	40 kHz
Länge der FFT	256
IFFT/FFT Periode T_{FFT}	$25\mu s$
Länge des Guard Intervalls T_{GI}	$6,25\mu s$
OFDM-Symboldauer T_S	$31,25\mu s$
Modulationsverfahren	QPSK, 16 QAM, optional 64 QAM

Tabelle 4.3: Parameter des PHY Layers.

Die Aufteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite des Hauptsystems zeigt Abbildung 4.3. Man erkennt die sieben MAN-Kanäle mit der restlichen Bandbreite als Schutzband am Rand. Im unteren Teil der Abbildung wird die Zuordnung der OFDM-Unterträger zu den GSM-Kanälen deutlich.

4.3 Simulationsszenarien und zu untersuchende Aspekte

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen in diesem Szenario liegt in der schnellen Detektion der Belegungslücken. Das verwendete Hauptsystem ist durch einen relativ schnellen Wechsel in der Belegung des Spektrums charakterisiert, woraus sehr kleine Belegungslücken resultieren können. Dementsprechend müssen Verfahren untersucht werden, die eine schnelle Detektion des Belegungszustands ermöglichen. Durch die häufigen Änderungen des Belegungsvektors entsteht zusätzlich ein erhöhter Signalisierungsaufwand. Es existiert also ein Bedarf für effiziente Signalisierungsmethoden innerhalb des Overlay-Systems, mit deren Hilfe alle Teilnehmer des Systems über den aktuellen Belegungszustand informiert werden können. Dieser Aspekt betrifft vor allem die MAC-Schicht und wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

In diesem Szenario lassen sich ebenfalls Besonderheiten eines ad-hoc Overlay-Systems untersuchen. Dazu wird angenommen, daß der MAN-Zugang “on de-

4.3 Simulationsszenarien und zu untersuchende Aspekte

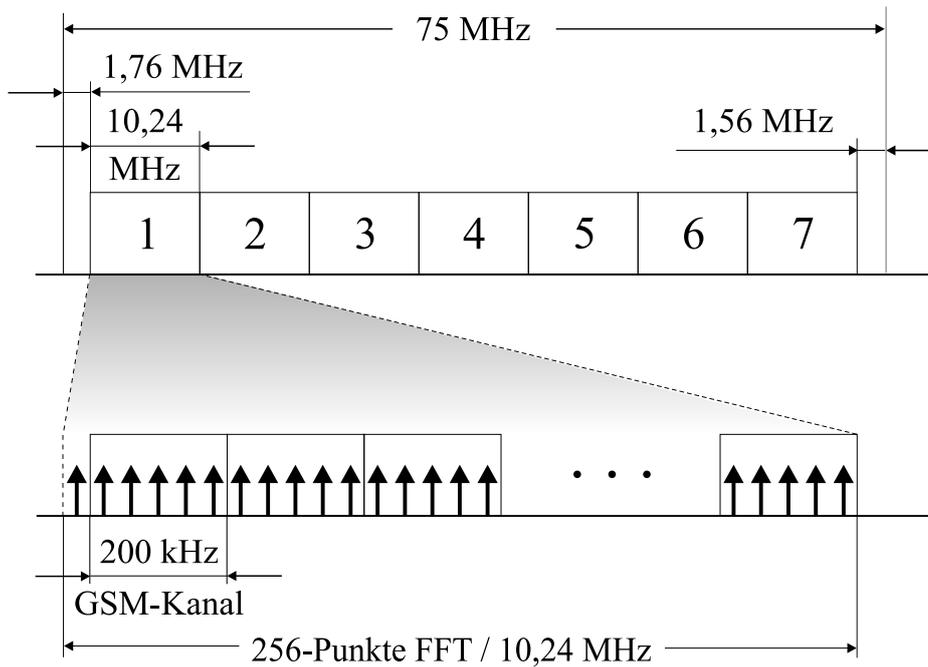


Abbildung 4.3: Aufteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

mand” realisiert wird - d. h. ein Terminal wird für das Netz nur zeitweise “sichtbar”. In Abhängigkeit des betrachteten Zeitpunkts besteht das Overlay-System aus unterschiedlichen Stationen, die sich selbst koordinieren müssen. Der Einsatz eines solchen ad-hoc Systems ist insbesondere in ländlichen Gegenden interessant, in denen sich der Aufbau einer zentralen Infrastruktur nicht lohnt. Abbildung 4.4 [Ern05] zeigt ein dezentral betriebenes Funknetz im dünn besiedelten Djursland, Dänemark. Man erkennt deutlich die einzelnen Stationen und ihre Reichweiten.

4 Szenario bei 1800 MHz

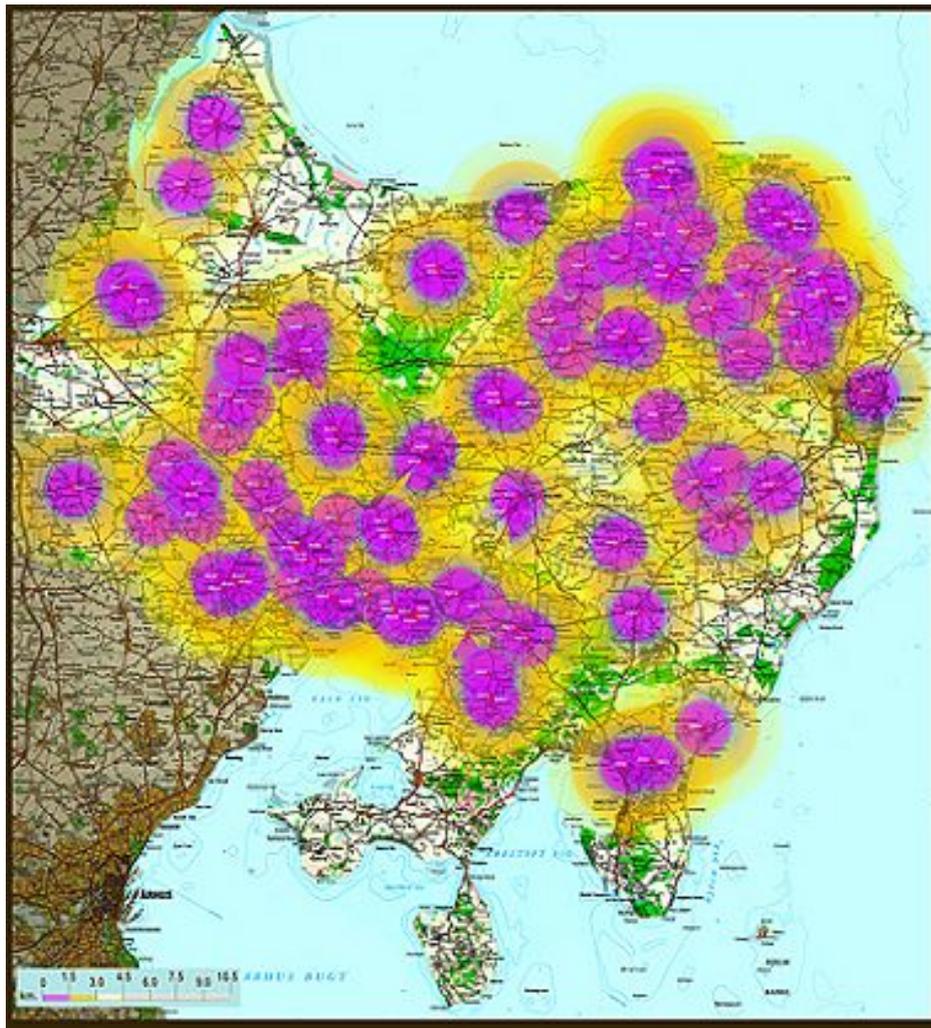


Abbildung 4.4: Dezentral betriebenes Breitband-Funknetz im Djursland.

5 Besondere Aspekte des MAC-Layers in einem Overlay-System

Beim Entwurf von Overlay-Systemen müssen neben den Betrachtungen in der physikalischen Schicht auch einige besondere Aspekte in der MAC-Schicht berücksichtigt werden, die in einem Hauptsystem mit einem fest zugewiesenen Frequenzbereich nicht notwendig sind. Auch wenn nach dem Projektplan von TAKOKO eine Betrachtung der MAC-Schicht erst in einer späteren Phase vorgesehen ist, ist es wichtig, gleich zu Beginn der Überlegungen die möglichen Auswirkungen und Herausforderungen in der MAC-Schicht im Blick zu behalten. Dieses Kapitel soll deswegen dazu dienen, einen Überblick über die zu erwartenden Besonderheiten der MAC-Schicht in einem Overlay-Szenario zu geben.

5.1 Einführung

Modifikationen in der MAC-Schicht sind sehr eng mit den Anforderungen der physikalischen Schicht verknüpft. Abbildung 5.1 zeigt auf abstrakter Ebene die Belegung eines Frequenzbands durch ein Hauptsystem.

Das gezeigte Hauptsystem hat in diesem Beispiel FDMA-Charakter: Der Frequenzbereich ist in mehrere gleichgroße Kanäle aufgeteilt, die jeweils für zufällige Zeitdauern belegt werden. Daraus resultieren die verschieden großen Lücken in der Frequenz-Zeit-Ebene. Das Ziel ist, diese Lücken durch ein Overlay-System zu nutzen. Dabei gibt es zwei wesentliche Punkte, die zum einen die physikalische Schicht, insbesondere aber auch die MAC-Schicht betreffen:

- **Belegungslückendetektion:** Der optimale Fall für ein Overlay-System besteht darin, daß es zu jedem beliebigen Zeitpunkt genau über die Belegung durch das Hauptsystem Bescheid weiß und die bestehenden Belegungslücken vollständig zur Übertragung von Daten verwenden kann. Da wir

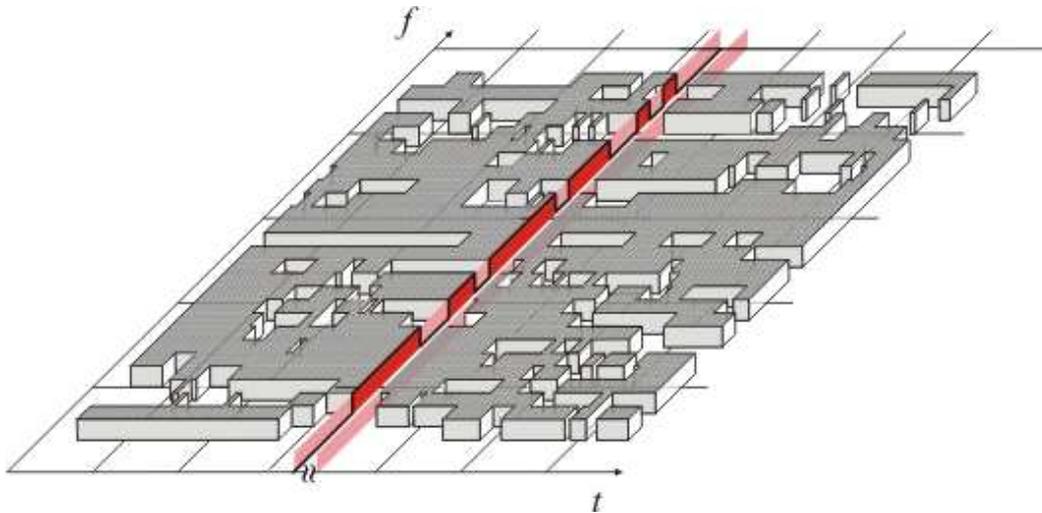


Abbildung 5.1: Schematische Belegung durch ein Hauptsystem.

aber in unseren Untersuchungen davon ausgehen, daß Haupt- und Overlay-System komplett unabhängig voneinander arbeiten müssen und keine Informationen austauschen können, muß das Overlay-System sich selbst einen Überblick über den Belegungszustand verschaffen. Es sei angemerkt, daß Frequenzlücken zunächst einmal nur in Frequenzrichtung auftreten können, aber trotzdem eine Funktion der Zeit sind. Die entstehenden Lücken in der Frequenz-Zeit-Ebene sollen Belegungslücken genannt werden.

- **Verteilung des Belegungsvektors:** Liegen die Ergebnisse der Belegungsmessungen in Form von sogenannten Belegungsvektoren in den einzelnen Terminals vor, müssen die miteinander kommunizierenden Terminals festlegen, welche OFDM-Unterträger für eine gemeinsame Kommunikation genutzt werden können.

5.2 Belegungslückendetektion

Um Belegungslücken des Hauptsystems detektieren zu können, müssen in regelmäßigen Abständen spektrale Messungen durchgeführt werden. Um diesen Aspekt zu veranschaulichen, soll zunächst einmal ein relativ einfaches Szenario betrachtet werden.

Abbildung 5.2 zeigt ein Hauptsystem mit Zellstruktur. Das Overlay-System befindet sich als Hot-Spot in einer Zelle des Hauptsystems und besitzt einen zentralen Access-Point sowie mehrere Mobile-Terminals (MT). Das bedeutet zunächst,

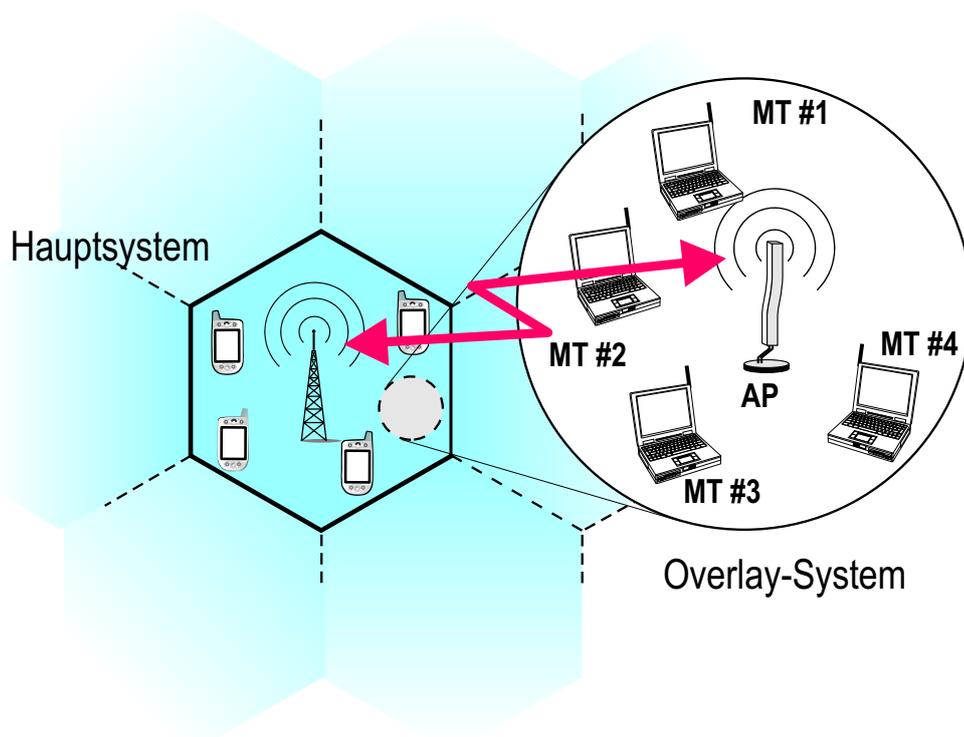


Abbildung 5.2: Hauptsystem mit Zellstruktur, Overlay-System als Hot-Spot.

daß grundsätzlich gesehen alle Mobile-Terminals des Overlay-Systems einer gleichen Störung durch das Hauptsystem ausgesetzt sind, wenn man von Effekten wie z.B. Fadingeinbrüchen einmal absieht.

Während der Belegungsmessungen darf das Overlay-System keine Daten übertragen bzw. auf den Kanal zugreifen. Das bedeutet, daß in irgendeiner Form eine Koordination der Meßphasen stattfinden muß. Dies kann z.B. dadurch geschehen, daß in der MAC-Schicht ein spezieller Rahmen für die Messungen verwendet wird, wie in Abbildung 5.3 gezeigt.

Anstatt Daten zu übertragen, nutzen die Mobile-Terminals bei diesem MAC-Rahmen die Zeit, um eine Messung der Spektrumsbelegung durchzuführen. Dieser MAC-Rahmen soll *Detection-Frame* genannt werden. In unserem einfachen Szenario liegt es nahe, daß der Access-Point die Koordination übernimmt und im Broadcast-Mode durch Senden eines Detection-Frames eine Meßphase initiiert. Jedes Mobile-Terminal kann sich nun ein Bild von der Belegung durch das Hauptsystem machen und die als belegt detektierten OFDM-Unterträger für die Datenübertragung auslassen.

5 Besondere Aspekte des MAC-Layers in einem Overlay-System

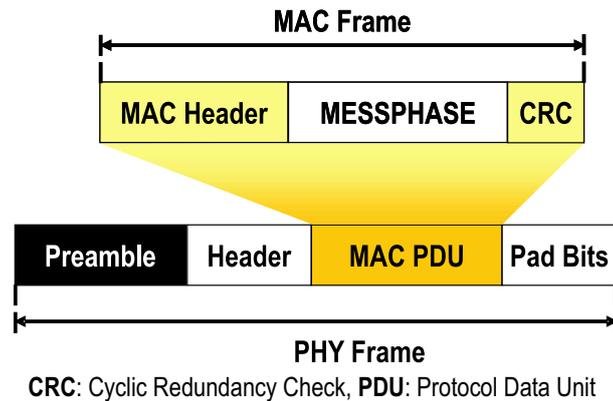


Abbildung 5.3: Spezieller MAC-Rahmen für die Meßphasen.

5.2.1 Verteilte Detektion

Das eben beschriebene Verfahren der Einzeldetektion stellt sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Detektion. Dies kann zur Notwendigkeit von relativ langen Meßphasen führen.

Wie bereits erwähnt, können zudem Störungen der Messung durch Fadingeffekte auftreten. In diesem Fall detektiert das Mobile Terminal auf einem oder mehreren OFDM-Unterträgern kein Signal, obwohl das Hauptsystem momentan diesen Unterträger benutzt. Lockert man die Voraussetzungen für das angenommene Szenario ein wenig und betrachtet z.B. einen Hot-Spot am Rand der Hauptsystemzelle, so kann es auch vorkommen, daß einige Mobile Terminals des Overlay-Systems mit Stationen in einer Nachbarzelle des Hauptsystems interferieren.

Abbildung 5.4 veranschaulicht eine solche Konstellation von Terminals. Um dieser Problematik zu begegnen, liegt es nahe, innerhalb des Overlay-Systems die Meßergebnisse der einzelnen Terminals gemeinsam auszuwerten, also eine sogenannte verteilte Detektion durchzuführen. Hierbei sendet jedes Terminal seine Ergebnisse in Form eines *Belegungsvektors* (siehe Abschnitt 5.3) an den Access-Point. Dieser bekommt so einen allgemeineren Überblick über die freien und belegten OFDM-Unterträger und kann festlegen, welche Unterträger zur Kommunikation innerhalb des Overlay-Systems benutzt werden.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der verteilten Detektion besteht darin, daß die Anforderung an die Genauigkeit der Einzelmessungen deutlich niedriger ist [Wei04a]. Somit können kürzere Meßphasen verwendet werden und es steht mehr Zeit für die Datenübertragung zur Verfügung. Allerdings entsteht natürlich zusätzlicher Overhead durch die Übertragung der Belegungsvektoren.

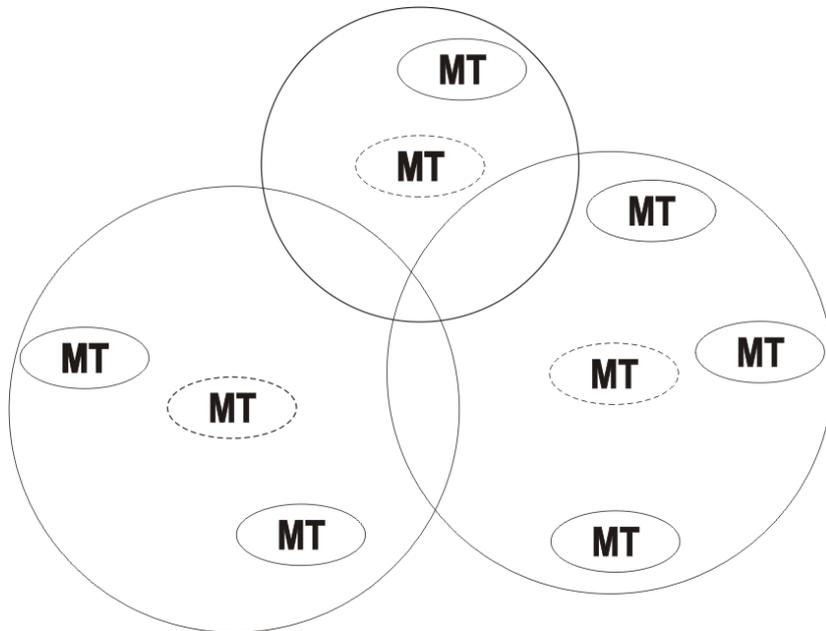


Abbildung 5.5: Bildung von Domains in einem ad-hoc Szenario.

- Die dynamische Bildung von Domains erfordert einiges an Signalisierung. Wie kann der Signalisierungsaufwand möglichst gering gehalten werden, welche effizienten Signalisierungsmethoden gibt es? Ist evtl. ein getrennter Kontrollkanal notwendig?

5.3 Belegungsvektor

Betrachten wir nun noch einmal Abbildung 5.1. In der Mitte erkennt man einen Schnitt entlang der Frequenzachse, der einer Betrachtung der Frequenzbelegung zu einem bestimmten Zeitpunkt entspricht. Ein solcher Schnitt wird in Abbildung 5.6 etwas genauer dargestellt.

Die einzelnen Kanäle des Hauptsystems sind auf der Frequenzachse aufgetragen. Zusätzlich sind auch die OFDM-Unterträger des Overlay-Systems eingezeichnet - in diesem Beispiel werden pro Hauptsystem-Kanal fünf Unterträger verwendet. Die grau eingefärbten Bereiche stellen momentan belegte Kanäle des Hauptsystems dar. Die entsprechenden OFDM-Unterträger dürfen für eine Übertragung innerhalb des Overlay-Systems nicht verwendet werden und müssen abgeschaltet werden solange das Hauptsystem diese Frequenzbereiche belegt. Die Zustände der

5 Besondere Aspekte des MAC-Layers in einem Overlay-System

Abbildung 5.6 ist dazu ein Beispiel eingezeichnet. Hier werden benachbarte OFDM-Unterträger, die durch das gleiche Band des Hauptsystems beinflusst werden, zu einem einzelnen Bit zusammengefaßt.

6 Zusammenfassung

In diesem Technischen Bericht sind die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets (AP 1) von TAKOKO zusammengestellt. Es sind drei Szenarien definiert worden, anhand derer die Koexistenz zwischen einem Hauptsystem und einem im selben Frequenzband operierenden Overlay-System mit OFDM als Übertragungsverfahren untersucht wird. In AP 1.1 sind Frequenzbereiche und Systeme bestimmt worden, die für die zusätzliche Nutzung durch ein Overlay-System geeignet sind. Basierend auf den Parametern dieser Systeme sind in AP 1.2 Füllsysteme entworfen worden, für die so weit wie möglich auf bereits existierende Standards zurückgegriffen worden ist. Aufgrund der anderen Frequenzbereiche und Bandbreiten mußten aber wesentliche Parameter vor allem der physikalischen Schicht an das Overlay-Szenario angepaßt werden. Im letzten Arbeitspaket 1.3 sind Simulationsszenarien entworfen worden, die die Grundlage für die Untersuchung der wesentlichen Aspekte des jeweiligen Szenarios bilden. In Tabelle 6.1 sind die drei Szenarien sowie die Untersuchungsschwerpunkte aufgelistet.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Frequenz	VHF-Band	960-1215 MHz	1800 MHz
Hauptsystem	Flugfunk	DME	GSM
Füllsystem	WLAN-ähnliches System zur Kommunikation am Flughafen	Flexibles, mobiles Kommunikationssystem	MAN
Besondere Aspekte	Interferenzunterdrückung	Detektion von Frequenzlücken, Algorithmen zur Störunterdrückung	Verwendung von Lücken in Zeit- <u>und</u> Frequenzbereich

Tabelle 6.1: Übersicht der Szenarien.

Zudem wurden bereits vorausgreifend einige besondere Aspekte der MAC-Schicht im Zusammenhang von Overlay-Systemen betrachtet. Eine gemeinsame

6 Zusammenfassung

Betrachtung der physikalischen und MAC-Schicht ist durch die enge Verknüpfung beider Schichten von Anfang an notwendig.

Insgesamt werden damit in TAKOKO drei realistische Overlay-Szenarien untersucht, die auch in der Praxis implementiert werden können. Darüberhinaus kann anhand der Szenarien eine große Bandbreite von Problemstellungen untersucht werden, die speziell in Overlay-Systemen von Bedeutung sind. Die Aspekte betreffen sowohl die physikalische als auch die MAC-Schicht und können nicht unabhängig voneinander untersucht werden, was eine enge Zusammenarbeit beider Projektpartner erforderlich macht.

Literaturverzeichnis

- [BA02] BRAND, ALEX und HAMID AGHVAMI: *Multiple Access Protocols for Mobile Communications*. John Wiley, 2002.
- [BG92] BERTSEKAS, DIMITRI und ROBERT GALLAGER: *Data Networks*. Prentice Hall, 1992.
- [COS86] COST 207 WG1: *Proposal on Channel Transfer Functions to be Used in GSM Tests Late 1986*. Paris: CEPT, 1986.
- [EGT⁺99] ERCEG, VINKO, LARRY J. GREENSTEIN, SONY Y. TJANDRA, SETH R. PARKOFF, AJAY GUPTA, BORIS KULIC, ARTHUR A. JULIUS und RENEE BIANCHI: *An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments*. IEEE Journal On Selected Areas In Communications, 17(7):1205–1211, July 1999.
- [Ern05] ERNST, SONJA: *Freie Netze - Breitband zwischen Deich und Düne*. <http://www.spiegel.de/netzwelt/netzkultur/0,1518,344502,00.html>, März 2005.
- [Fai89] FAILLI, M.: *Digital Land Mobile Radio Communications*. Abschlußbericht Cost 207, Luxemburg: Cost 207, 1989.
- [Fed82] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *United States National Aviation Standard for the Very High Frequency Omnidirectional Radio Range (VOR) / Distance Measuring Equipment (DME) / Tactical Air Navigation (TACAN) Systems*, 1982. AC No. 00-31A.
- [Haa02] HAAS, ERIK: *Aeronautical Channel Modeling*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 51(2), März 2002.
- [IEE99a] IEEE: *802.11a standard, ISO/IEC 8802-11:1999/Amd 1:2000(E), High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 1999.

Literaturverzeichnis

- [IEE99b] IEEE: *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications ANSI/IEEE Std 802.11*, 1999.
- [IEE03a] IEEE: *802.11f, Trial-Use Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability Via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation*, Juli 2003.
- [IEE03b] IEEE: *802.11g standard, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band*, Juni 2003.
- [IEE03c] IEEE 802.16 BROADBAND WIRELESS ACCESS WORKING GROUP: *Channel Models for Fixed Wireless Applications*, 2003.
- [IEE04] *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks — Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Std 802.16-2004 Auflage, 2004.
- [Jon01] JONDRAL, FRIEDRICH: *Nachrichtensysteme*. J. Schlembach Fachverlag, 2001.
- [JW00] JONDRAL, FRIEDRICH und ANNE WIESLER: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und stochastische Prozesse*. Teubner, 2000.
- [LWJ00] LUTZ, E., M. WERNER und A. JAHN: *Satellite Systems for Personal and Broadband Communications*. Springer Verlag, 2000.
- [Mar00] MARTEN, MICHAEL: *Flugfunk - Kommunikation und Navigation in der Luftfahrt - Grundlagen, Technik, Funkverkehr, Frequenzlisten*. Siebel Verlag, Meckenheim, 2000.
- [Men04] MENSEN, HEINRICH: *Moderne Flugsicherung - Organisation, Verfahren, Technik*. 3., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, 2004.
- [Mit99] MITOLA, JOSEPH: *Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications*. In: *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, Seiten 3–10, San Diego, CA, USA, November 1999.
- [Wei04a] WEISS, TIMO: *OFDM-basiertes Spectrum Pooling*. Doktorarbeit, Institut für Nachrichtentechnik, Universität Karlsruhe, 2004.
- [Wei04b] WEISS, TIMO: *Spectrum Pooling - An Innovative Strategy for the Enhancement of Spectrum Efficiency*. IEEE Communications Magazine, 42(3):8–14, März 2004.

- [WS02] WIN, M. und R. SCHOLZ: *Ultra-Wide Bandwidth Time-Hopping Spread-Spectrum Impulse Radio for Wireless Multiple-Access Communications*. IEEE Transactions on Communications, 48(4):679–689, April 2002.
- [Zan97] ZANDER, JENS: *Radio resource management in future wireless networks: requirements and limitations*. IEEE Communications Magazine, 35(8), August 1997.

Literaturverzeichnis