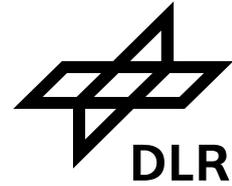


Universität Karlsruhe (TH),
Institut für Nachrichtentechnik
DLR Oberpfaffenhofen,
Institut für Kommunikation und Navigation



TAKOKO

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

Zwischenbericht zum Arbeitsfortschritt 2

Autoren:

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

Berichtszeitraum:

1. Juli 2005 bis 30. Juni 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	2
2	PHY Design Sender	4
2.1	Detektion von Frequenzlücken	4
2.1.1	Verallgemeinertes Modell einer Overlay-Umgebung	4
2.1.2	Overlay-Umgebung	5
2.1.3	Verallgemeinertes System-Modell	6
2.1.4	Belegungsmodell für Spectrum Pools	7
2.1.4.1	Einzelner Kanal ($n = 1$)	8
2.1.4.2	Mehrere Kanäle ($n > 1$)	8
2.1.5	Beobachtung und Prädiktion	10
2.1.5.1	Beobachtung	10
2.1.5.2	Parameter	10
2.1.5.3	Prädiktion	10
2.1.6	Bewertung und Entscheidung	12
2.2	Störminimierung auf das Hauptsystem	14
2.2.1	Subcarrier Weighting	14
2.2.2	Cancellation Carrier	15
2.3	Adaptiver COFDM Sender	17
2.3.1	Flexible Rahmenstruktur	18
2.3.2	Einfluss von Verfahren zur Störminimierung auf das Gesamtsystem	20
2.3.3	Vergleich MC-CDMA und OFDM	20
3	PHY Design Empfänger	22
3.1	Notch-Filterung	24
3.2	Fensterung im digitalen Zeitbereich	25
3.3	Kompensation des Leakage-Effekts im digitalen Frequenzbereich	26
3.3.1	Subtraktion des Störsignals	27

Inhaltsverzeichnis

3.3.2	Matrix-basierte Leakage-Kompensation	29
3.4	Kombination von Verfahren im Zeit- und Frequenzbereich	31
3.5	Ausblick	31
4	MAC Design und Hidden Station Problem	33
4.1	Anforderungen an ein Ad-Hoc-Overlay-System	33
4.1.1	Ad-Hoc-Szenario	33
4.2	Detektion des Hauptsystems	35
4.3	Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung	36
4.3.1	Initiale Koordination der verwendeten Unterträger	37
4.3.2	Koordination der Belegungsmessung durch TDMA-basierte Zugriffsverfahren	38
4.3.2.1	Rahmenstruktur der MAC-Schicht	38
4.3.2.2	Prinzipieller Ablauf des Verbindungsaufbaus	39
4.3.3	Rahmensynchronisation	40
4.3.3.1	Synchronisation einer Station im Einzugsgebiet zweier SYNC-Master	41
4.3.3.2	Synchronisation einer einzelnen Station bei 2-hop Entfernung eines neuen Masters	42
4.3.4	Verbindungsaufbau und Koordination der gemeinsam ver- wendeten Unterträger	45
4.4	Simulationsergebnisse	46
4.4.1	Fünf Stationen in einer Belegungszone	46
4.4.2	Zehn Stationen in zwei Belegungszone	49
5	Zusammenfassung	51
6	Veröffentlichungen	53

1 Einleitung

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms Nr. 1163 TakeOFDM werden im Teilprojekt TAKOKO Techniken, Algorithmen und Konzepte für COFDM Systeme zur Koexistenz mit autorisierten Systemen im selben Frequenzband bearbeitet.

1.1 Motivation

Aufgrund von immer knapper und teurer werdenden Frequenzbereichen auf der einen Seite und einem erhöhten Bedarf an Datenrate und Bandbreite auf der anderen Seite müssen die vorhandenen Frequenzbereiche immer effizienter genutzt werden. Ein viel versprechender Ansatz hierzu ist das Spectrum Pooling [1], [2]. Hierbei werden die Belegungslücken eines existierenden Systems (im Folgenden als Hauptsystem bezeichnet) durch ein koexistierendes System (Overlay-System) im gleichen Frequenzband gezielt genutzt. Eine wichtige Anforderung an ein Overlay-System ist die dynamische Anpassung an das Belegungsverhalten des Hauptsystems. Weiterhin darf der Betrieb des Hauptsystems durch das Overlay-System nicht gestört werden, im optimalen Fall merkt das Hauptsystem von dem zusätzlich betriebenen Overlay-System nichts.

Im Forschungsvorhaben TAKOKO wird ein Overlay-System basierend auf Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) untersucht. OFDM ist ein viel versprechender Ansatz, da der zur Verfügung stehende Frequenzbereich in OFDM-Unterträger aufgeteilt wird, die wie in Abb. 1.1 schematisch dargestellt einzeln an- oder ausgeschaltet werden können. Welche Unterträger aktuell benutzt werden dürfen, wird durch spektrale Messungen in regelmäßigen Zeitabständen ermittelt und in Form eines Belegungsvektors festgehalten. Eine '1' im binären Belegungsvektor bedeutet, dass der entsprechende Unterträger vom Overlay-System verwendet werden darf, eine '0' besagt, dass der entsprechende Unterträger gerade nicht benutzt werden darf. Das Sendesignal wird entsprechend dem Belegungsvektor dynamisch an die aktuell bestehenden Belegungslücken angepasst.

1 Einleitung

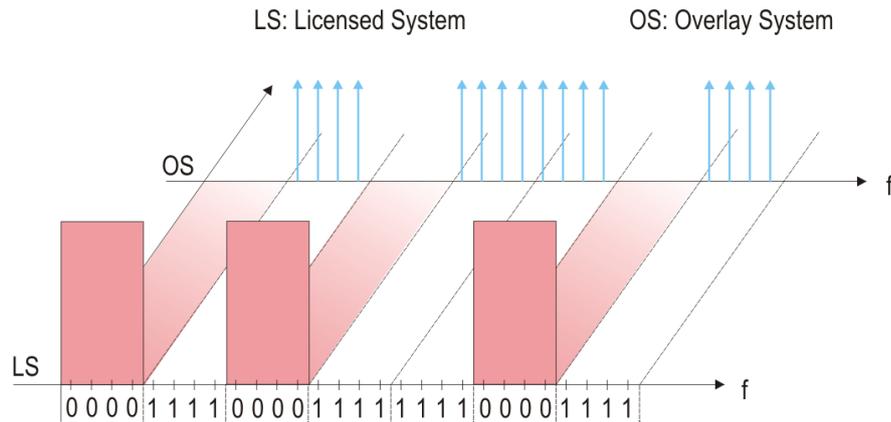


Abbildung 1.1: Overlay-System mit Belegungsvektor.

1.2 Aufgabenstellung

Der hier vorliegende Bericht fasst die Forschungsergebnisse des zweiten Projektjahres vom 1. Juli 2005 bis 30. Juni 2006 zusammen. In diesem Zeitraum wurden entsprechend dem Projektplan folgende Arbeitspakete (AP) behandelt:

- AP 2: PHY Design Sender
 - Detektion von Frequenzlücken
 - Störminimierung auf das Hauptsystem
 - Adaptiver COFDM Sender
- AP 3: PHY Design Empfänger
 - Störunterdrückung
- AP 4: MAC Design
 - Grundstruktur MAC-Protokoll
 - Hidden Station Problem

Im zweiten Projektjahr wurden die Teilarbeitspakete “Detektion von Frequenzlücken” und “Störminimierung auf das Hauptsystem” des zweiten APs fortgesetzt und fertig gestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein adaptiver COFDM Sender entworfen, in den die in den ersten beiden Punkten entwickelten Algorithmen integriert sind. In zweiten Kapitel dieses Jahresberichts werden die Ergebnisse des AP 2 nur kurz dargestellt. Eine vollständige Übersicht über AP 2 ist im Technischen Bericht 2 [3] zu finden, der dieses AP abschließt.

1.2 Aufgabenstellung

Zu AP 3 wurde anders als im Projektplan vorgesehen zunächst die Unterdrückung von Störungen durch die Hauptsysteme untersucht. Der Entwurf eines adaptiven COFDM Empfängers erfolgt im Anschluss daran. Auf diese Weise können die entwickelten Verfahren zur Störunterdrückung mit in den Empfänger integriert werden und die erforderlichen Veränderungen und Parameter von Anfang an berücksichtigt werden. Im bisherigen Projektverlauf wurden drei prinzipielle Ansätze zur Störunterdrückung im Empfänger untersucht, die sich durch ihre Position im Empfänger des Overlay-Systems unterscheiden. Dabei wurde hauptsächlich auf Verfahren, die schon bei leitungsgebundenen DMT-Systemen angewendet werden, zurückgegriffen. Diese Verfahren wurden an Overlay-Systeme angepasst und ihre Leistungsfähigkeit unter Interferenzbedingungen eines realistischen Hauptsystems untersucht. Die aktuellen Zwischenergebnisse werden in Kapitel 3 präsentiert.

Für die Weiterentwicklung des MAC-Protokolls und die Bearbeitung des Hidden Station Problems wird ein Ad-Hoc Overlay-System betrachtet. Eine besondere Problematik bei einem Ad-Hoc Overlay-System besteht in der Detektion der Belegungslücken auf Grund der Tatsache, dass eine Basisstation zur Koordination der Messungen zwischen den einzelnen Stationen fehlt. Ein weiteres Problem ist die Synchronisation der einzelnen Stationen. In Kapitel 4 wird gezeigt, wie diese Problematik durch ein geschickt ausgelegtes MAC-Protokoll gelöst werden kann.

2 PHY Design Sender

Das Arbeitspaket 2 “PHY Design Sender” besteht aus den Teilpaketen “Detektion von Frequenzlücken”, “Störminimierung auf das Hauptsystem” und “Adaptiver COFDM Sender”, deren Ergebnisse in diesem Kapitel erläutert werden. Eine ausführlichere Darstellung ist im Technischen Bericht 2 [3] zu finden.

2.1 Detektion von Frequenzlücken

Im “Zwischenbericht zum Arbeitsfortschritt 1” [4] der ersten Projektphase von TAKOKO wurden bereits wesentliche Ergebnisse zur Detektion von Belegungs-lücken dargestellt. Insbesondere wurde zunächst untersucht, welche grundlegenden Eigenschaften und Parameter Hauptsysteme und OFDM-basierte Overlay-Systeme unabhängig von ihrer genauen Definition haben [5].

Verfahren zur verteilten Detektion mit Hilfe des Neyman-Pearson Kriteriums wurden in [6] untersucht.

Weiterhin wurden bereits Möglichkeiten zur gemeinsamen Optimierung von physikalischer und MAC-Schicht untersucht, insbesondere in Bezug auf eine mögliche Reduktion des Signalisierungsaufwands durch eine ungenaue Kenntnis der Belegungslücken im Empfänger des Overlay-Systems [7].

In diesem Kapitel wird nun die Detektion von Belegungslücken auf einer abstrakteren Ebene bzw. auf höheren Schichten untersucht und ein Framework vorgestellt, das einem Overlay-System die Möglichkeit gibt, verschiedene Spectrum Pools zu beobachten und bei Bedarf in ein geeigneteres Frequenzband zu wechseln.

2.1.1 Verallgemeinertes Modell einer Overlay-Umgebung

Betrachtet man die tatsächliche Belegung von Hauptsystemen, so stellt man fest, dass sie sich im Allgemeinen in Abhängigkeit von Ort und Zeit dynamisch ändert.

Es gibt Zeiten, in denen das Hauptssystem einen sehr hohen Kommunikationsbedarf hat, und solche, in denen das zugeteilte Frequenzband fast nicht benutzt wird. Damit ändern sich auch die ungenutzten Ressourcen, die einem Overlay-System zur Verfügung gestellt werden können. Eine hohe Auslastung des Hauptsystems führt zu wenig Bandbreite für das Overlay-System, bis hin zu einem Punkt, an dem das Overlay-System nicht mehr sinnvoll arbeiten kann.

Auf der anderen Seite ist es möglich, dass das Hauptsystem eines benachbarten Frequenzbands zur gleichen Zeit deutlich weniger Ressourcen beansprucht. Es würde nun nahe liegen, das blockierte Overlay-System in diesem weniger ausgelasteten Frequenzbereich zu betreiben. Verallgemeinert man diesen Ansatz, erhält man ein Overlay-System, das verschiedene Frequenzbereiche beobachtet, um dann für die momentane Übertragungssituation das optimale Frequenzband auswählen zu können.

2.1.2 Overlay-Umgebung

Im folgenden wird nun ein Overlay-Szenario betrachtet, das aus J verschiedenen Hauptsystemen besteht, die jeweils eine Kombination aus TDMA (time-division multiple-access) und FDMA (frequency-division multiple-access) verwenden. Jedes dieser Hauptsysteme arbeitet in einem anderen Frequenzband, das jeweils als "Spectrum Pool" betrachtet wird. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Hauptsysteme die ihnen zur Verfügung stehende Bandbreite nicht vollständig ausnutzen. Dies führt zu ungenutzten Lücken in der Zeit-Frequenz-Ebene. Zur Erhöhung der spektralen Effizienz werden diese Lücken für Übertragungen eines unabhängigen Overlay-Systems genutzt. Es wird angenommen, dass das Overlay-System zu einem Zeitpunkt nur in einem der Spectrum Pools arbeiten kann, jedoch in Abhängigkeit von bestimmten Regeln den verwendeten Spectrum Pool wechseln kann.

Da der Betrieb des Hauptsystems durch das Overlay-System nicht beeinträchtigt werden darf und es keine direkte Kommunikation zwischen beiden Systemen gibt, muss das Overlay-System in regelmäßigen Abständen Messungen durchführen, um die Belegung durch das Hauptsystem zu bestimmen. Der Abstand zwischen den Belegungsmessungen wird mit τ bezeichnet. Abhängig von der Belegung durch das Hauptsystem verwendet das Overlay-System jeweils eine unterschiedliche Kombination von Unterträgern, die durch den Belegungsvektor $\mathbf{v}_j(t)$ angegeben wird. Seine Länge entspricht der Anzahl der verfügbaren Unterträger. Seine Elemente können entweder 1 oder 0 annehmen, je nachdem ob der entsprechende Unterträger vom Overlay-System verwendet werden darf oder nicht.

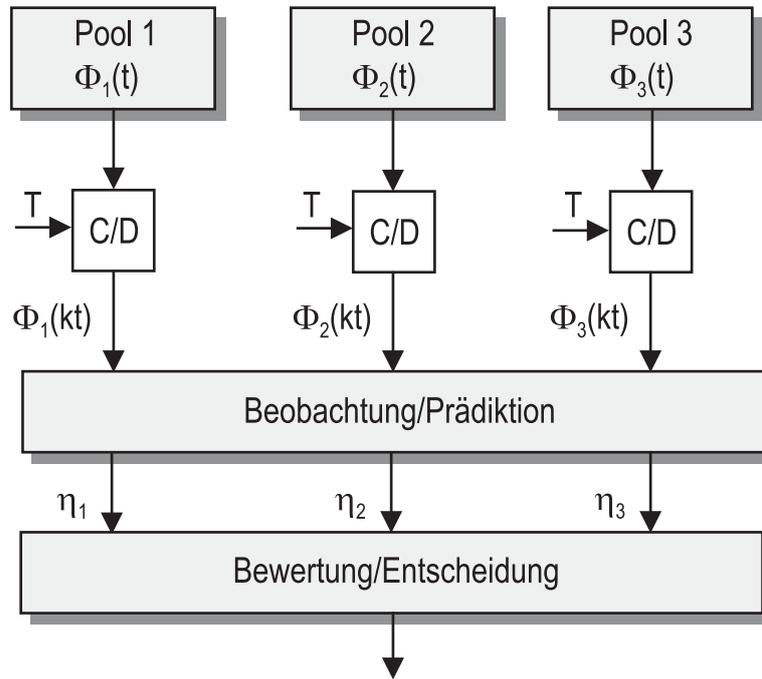


Abbildung 2.1: System-Modell.

Um einen Überblick über die momentane Auslastung der zur Zeit nicht verwendeten Spectrum Pools zu bekommen, muss das Overlay-System im Intervall T mit $T \gg \tau$ zusätzliche Messungen in allen Spectrum Pools durchführen. Dies kann z.B. durch Frequency-Sweeping oder eine Breitband-FFT erfolgen.

2.1.3 Verallgemeinertes System-Modell

Der insgesamt zur Verfügung stehende Frequenzbereich wird in verschiedene Spectrum Pools unterteilt. Das Ziel ist, denjenigen Spectrum Pool zu bestimmen, der am besten zu den momentanen Anforderungen des Overlay-Systems passt. Dazu wird im folgenden ein verallgemeinertes System-Modell vorgestellt, das als Rahmenkonzept dient und an spezifische Situationen angepasst werden kann. Die einzelnen Komponenten werden anhand von Beispielen erläutert.

Abbildung 2.1 veranschaulicht das grundlegende Konzept anhand von $J = 3$ Spectrum Pools mit zeitvarianter Belegung. Prinzipiell können jedoch beliebig viele Pools berücksichtigt werden. Die ungenutzte Kapazität des j -ten Pools kann als zeitkontinuierlicher stochastischer Prozess $\Phi_j(t)$ modelliert werden. Dabei kann jeder Prozess je nach verwendetem Hauptsystem unterschiedliche Eigenschaften haben.

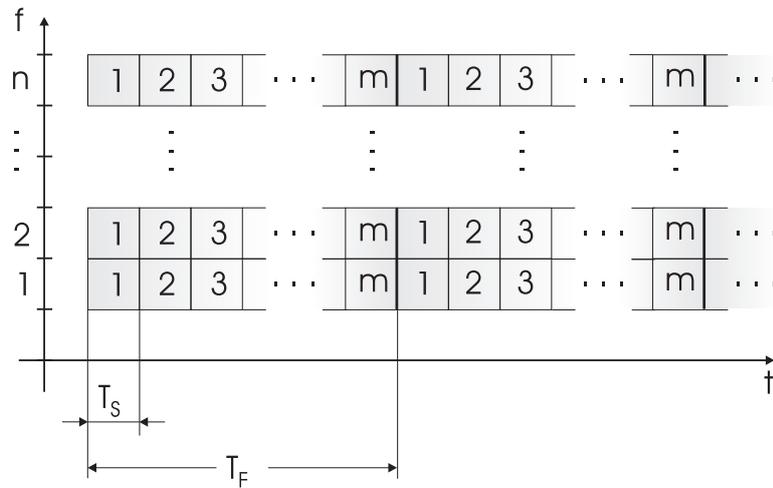


Abbildung 2.2: Spectrum Pool basierend auf FDMA und TDMA.

Da das Overlay-System nicht in mehreren Spectrum Pools gleichzeitig betrieben werden kann und deswegen nur im Abstand von T eine Aktualisierung des systemweiten Belegungsvektors vorgenommen wird, kann $\Phi_j(t)$ als diskrete Funktion $\Phi_j(kT)$ betrachtet werden. Anhand der Beobachtung von $\Phi_j(kT)$ kann das Overlay-System nun charakteristische Parameter, die die spektrale Nutzung im j -ten Spectrum Pool beschreiben, schätzen. Dafür können verschiedene Verfahren, wie z.B. ein Kalman-Filter, zum Einsatz kommen.

Die daraus resultierenden Parameter werden im Vektor $\boldsymbol{\eta}_j$ zusammengefasst und entsprechend der Anforderungen einer anstehenden Übertragung bewertet. Anhand der evaluierten Parameter kann das Overlay-System nun den optimalen Spectrum Pool für die Übertragung auswählen.

2.1.4 Belegungsmodell für Spectrum Pools

Prinzipiell kann in diesem Framework die Belegung durch das Hauptsystem beliebig sein. Für die folgenden Betrachtungen und Simulationen wurde das Belegungsmodell gewählt, das bereits im “Technischen Bericht 1: Definition der Szenarien” [8] für das dritte Szenario vorgestellt wurde. Die wesentlichen Aspekte sollen an dieser Stelle noch einmal kurz zusammengefasst werden.

Jeder Spectrum Pool besteht aus n Kanälen, die jeweils in Rahmen mit m Zeitschlitzen der Länge T_S unterteilt werden. T_F ist die Länge eines Rahmens. Die resultierende Struktur ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Es wird weiterhin

2 PHY Design Sender

angenommen, dass das Hauptsystem zur Übertragung von Sprache verwendet wird. Damit lassen sich die ankommenden Gespräche durch einen Poisson-Prozess

$$P\{X(t) = i\} = \frac{(\lambda_P t)^i}{i!} e^{-\lambda_P t} \quad (2.1)$$

beschreiben, wobei λ_P die Ankunftsrate und $X(t)$ die Anzahl der ankommenden Gespräche im Intervall t darstellt. Zunächst wird der Fall für $n = 1$ Kanal betrachtet, anschließend wird das Modell auf mehrere Kanäle erweitert.

2.1.4.1 Einzelner Kanal ($n = 1$)

Ein Kanal mit m Zeitschlitzen pro Rahmen kann als $M/M/m/m$ Warteschlange modelliert werden, da es bis zu m Gespräche gleichzeitig bedienen kann. Ausgehend von den stationären Zustandswahrscheinlichkeiten und unter der Annahme, dass der verwendete Zeitschlitz innerhalb eines Rahmens zufällig ausgewählt wird, ergibt sich für $\frac{1}{\mu} \gg T_F$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Zeitschlitz für eine Übertragung des Overlay-Systems zur Verfügung steht zu [9]

$$p_f = \frac{\sum_{i=0}^m \binom{m-i}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}{\sum_{i=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}. \quad (2.2)$$

Dabei ist λ die Ankunftsrate und μ die Bedienrate.

2.1.4.2 Mehrere Kanäle ($n > 1$)

Betrachtet man mehrere Kanäle, wird die Gesamtzahl aller im Pool ankommenden Gespräche auf die einzelnen Kanäle verteilt. Die Ankunftsrate an einem Kanal ist also

$$\lambda = \frac{\lambda_G}{n}. \quad (2.3)$$

Für die Anzahl der gleichzeitig freien Zeitschlitze Y ergibt sich die Binomialverteilung

$$P(Y = l) = \binom{n}{l} p_f^l (1 - p_f)^{n-l} \quad (2.4)$$

2.1 Detektion von Frequenzlücken

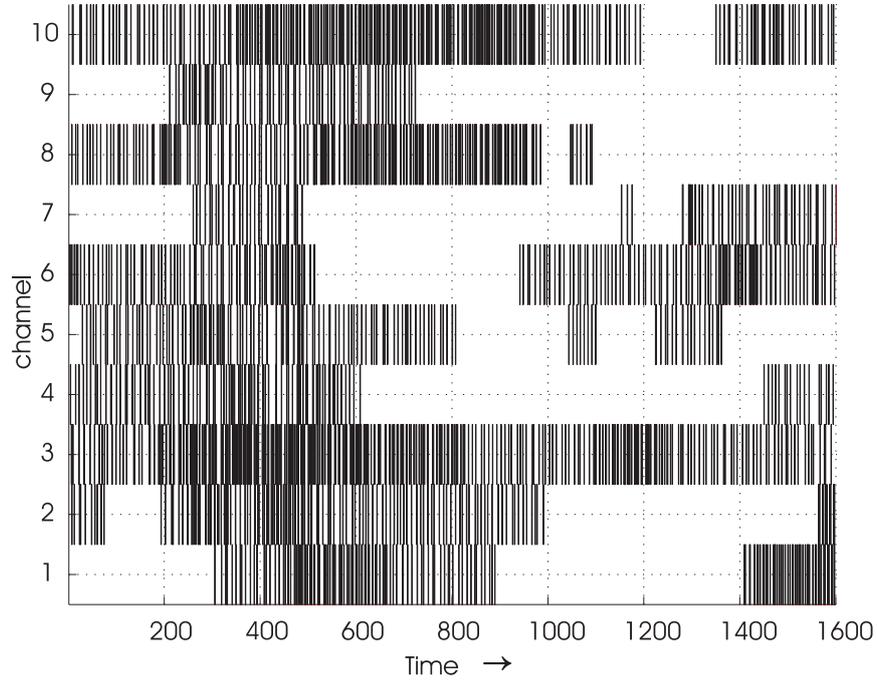


Abbildung 2.3: Belegung eines Spectrum Pools mit $n = 10$, $m = 8$, $\mu = 0.025$, $\lambda = 0.0225$.

mit dem Erwartungswert

$$E(Y) = np_f = n \frac{\sum_{i=0}^m \frac{m-i}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}{\sum_{i=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}} \quad (2.5)$$

und der Varianz

$$D^2(Y) = np_f(1 - p_f) = n \frac{\sum_{i=0}^m \frac{m-i}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}{\sum_{i=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}} \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=0}^m \frac{m-i}{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}{\sum_{i=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \frac{1}{i!}}\right). \quad (2.6)$$

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

Ein Beispiel für die Belegung des Hauptsystems mit $n = 10$ Kanälen und $m = 8$ Zeitschlitzten ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

2 PHY Design Sender

2.1.5 Beobachtung und Prädiktion

Die Hauptaufgabe dieses Blocks ist die Beobachtung aller Pools im gesamten System, um die notwendigen Parameter für den Entscheidungsblock schätzen zu können.

2.1.5.1 Beobachtung

Da in dem angenommenen Modell das Overlay-System nur in einem einzigen Pool zu einer bestimmten Zeit betrieben werden kann, ist es notwendig in regelmäßigen Abständen Messungen in den anderen Pools durchzuführen, beispielsweise durch Frequency-Sweeping oder eine Breitband-FFT. Die breitbandigen Messungen werden alle T Sekunden durchgeführt und lassen sich als zeitdiskrete Funktion der Belegung der einzelnen Pools auffassen. Die einzelnen Messungen können dabei auch als kurze Messphasen interpretiert werden, die aus einer direkten Hintereinanderreihung mehrerer Einzelmessungen bestehen. Dadurch können weitere Parameter wie z.B. die Kohärenzzeit der Belegung bestimmt werden.

2.1.5.2 Parameter

Anhand der gewonnenen Messungen wird nun für jeden Spectrum Pool j ein Vektor von Parametern $\boldsymbol{\eta}$ erstellt. Als Beispiel wird hier die Anzahl der verfügbaren Unterträger $b(kT)$ aus dem vorigen Abschnitt sowie die durchschnittliche Kohärenzzeit der Belegung verwendet.

Die Kohärenzzeit ist die Zeit, während der sich die Belegung des Hauptsystems nicht ändert. Das bedeutet, dass das Overlay-System innerhalb dieser Zeit seinen Belegungsvektor nicht aktualisieren muss. Zu beachten ist, dass sich der Belegungsvektor ändern kann, selbst wenn $b(kT)$ konstant bleibt. Abbildung 2.4 zeigt die durchschnittliche Kohärenzzeit und Abbildung 2.5 die mittlere Anzahl der freien Kanäle für verschiedene Kombinationen von n und m in Abhängigkeit von $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$.

2.1.5.3 Prädiktion

Im nächsten Schritt wird nun auf Grundlage der gemessenen Parametervektoren eine Prädiktion des Parametervektors für den nächsten Zeitpunkt durchgeführt. Dafür können verschiedene Verfahren verwendet werden, als Beispiel wurde hier

2.1 Detektion von Frequenzlücken

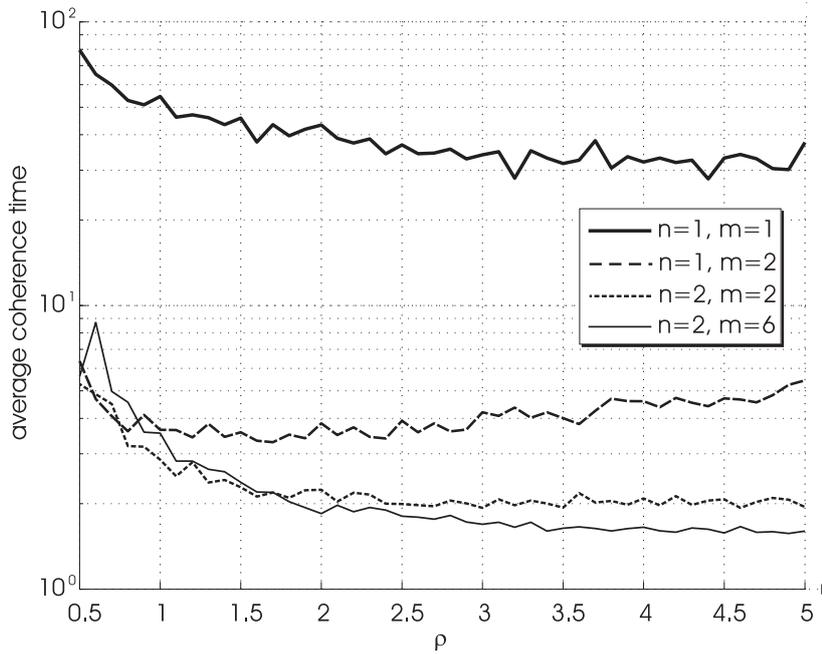


Abbildung 2.4: Durchschnittliche Kohärenzzeit in Abhängigkeit von ρ .

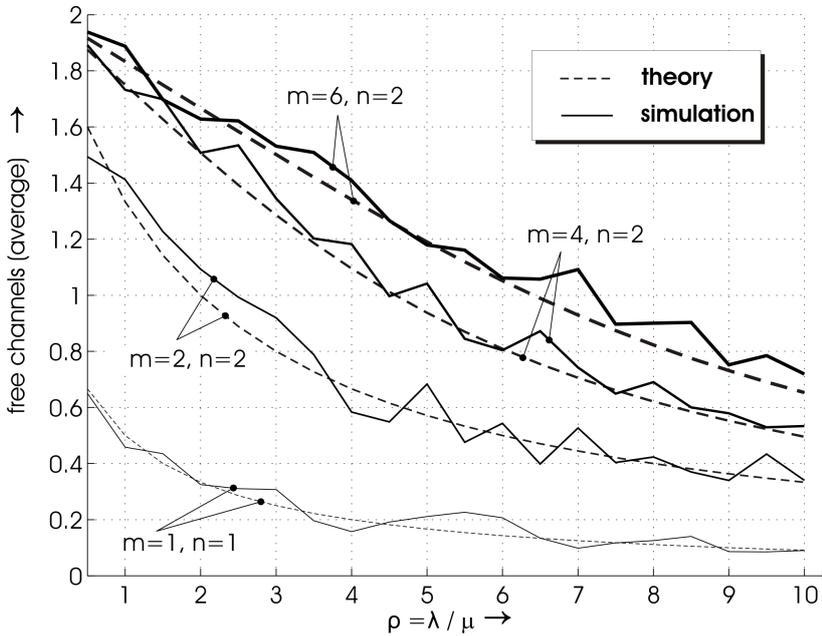


Abbildung 2.5: Durchschnittliche Anzahl der freien Kanäle in Abhängigkeit von ρ .

ein Kalman-Filter verwendet. In den Abbildungen 2.6 bis 2.8 sind drei Spectrum Pools mit jeweils $n = 100$ Kanälen zu sehen. Jeder Pool hat eine konstante Bedi-

2 PHY Design Sender

enrate μ , jedoch eine unterschiedliche zeitabhängige Ankunftsrate λ . Die grauen Punkte stellen die Messungen der freien Kanäle dar. Jede zehnte Messung wird als breitbandige Messung interpretiert und dem Kalman-Filter übergeben. Die daraus folgenden Prädiktionen werden als schwarze Linie dargestellt.

2.1.6 Bewertung und Entscheidung

Die geschätzten Pool-Parameter dienen als Grundlage für den Bewertungs- und Entscheidungsblock. Abhängig von den Anforderungen der höheren Schichten können verschiedene Parameter unterschiedlich wichtig sein. Bevor nun entschieden wird, welcher Pool die günstigsten Bedingungen für die anstehende Übertragung liefert, ist es wichtig die Parameter zunächst mit einem Gewichtungsfaktor w zu gewichten. Anhand der gewichteten Parameter kann das Overlay-System letztendlich entscheiden, ob es sinnvoll ist, den momentanen Spectrum Pool zu wechseln oder nicht.

In dem Beispiel aus dem vorigen Abschnitt würde das Overlay-System zunächst in Pool 2 betrieben werden. Da hier jedoch die Zahl der freien Unterträger mit der Zeit sinkt, wechselt das System für eine relativ kurze Zeit in den Pool 1 um dann nach Abklingen des dortigen Peaks letztlich den Rest der Übertragung in Pool 3 fortzusetzen.

2.1 Detektion von Frequenzlücken

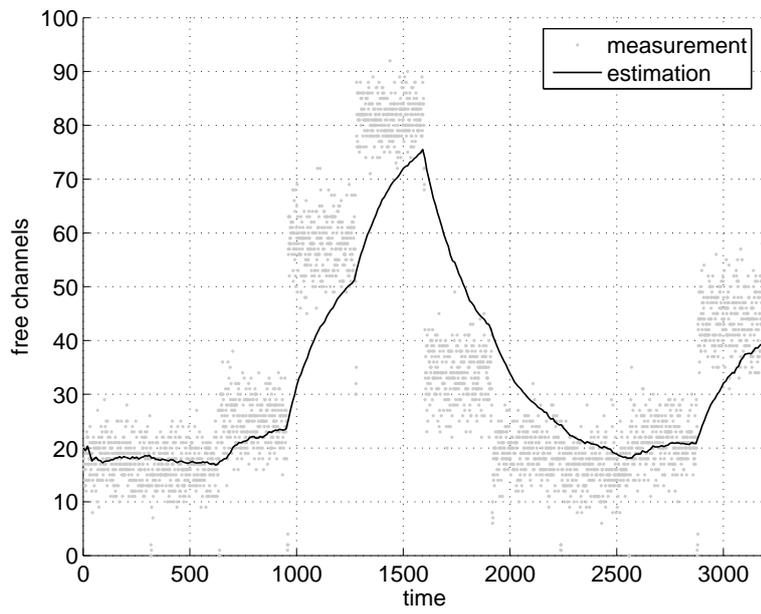


Abbildung 2.6: Pool 1.

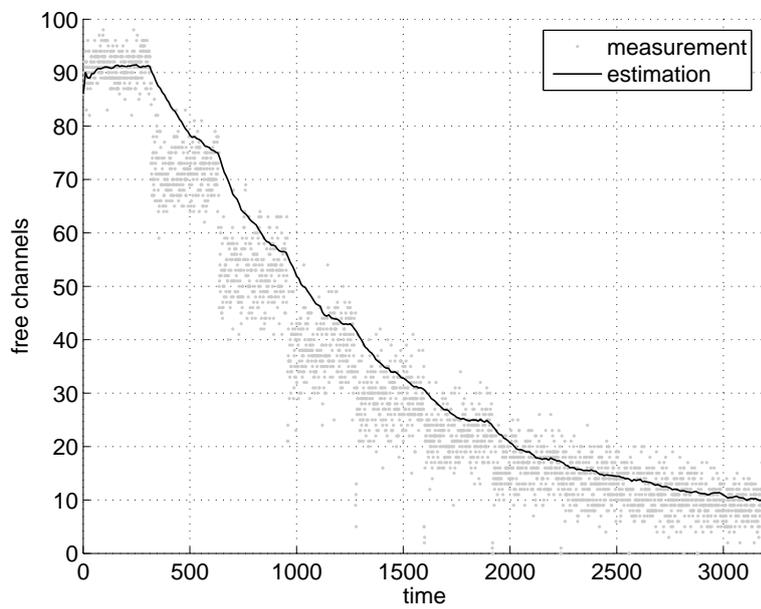


Abbildung 2.7: Pool 2.

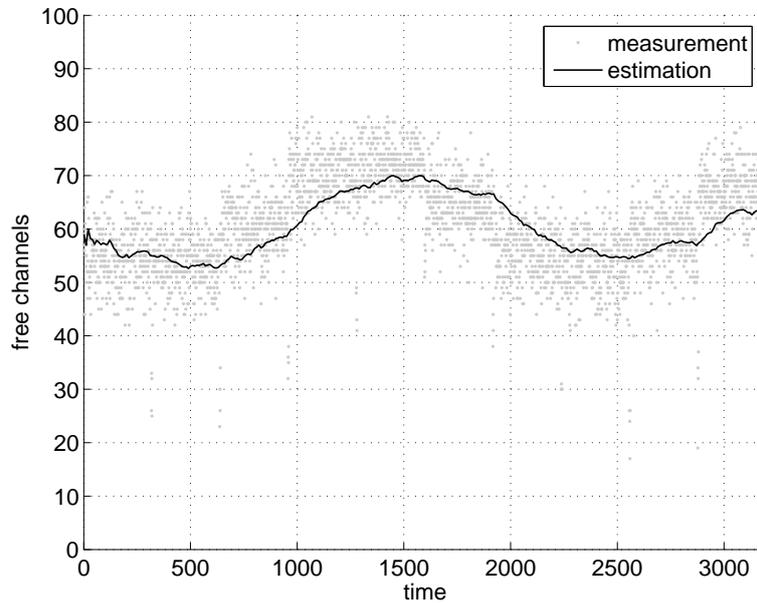


Abbildung 2.8: Pool 3.

2.2 Störminimierung auf das Hauptsystem

Ein Nachteil von OFDM sind die starken Nebenaussendungen, die in einem Overlay-Szenario Störungen in den bestehenden Hauptsystemen verursachen. Ein bekannter Ansatz zur Reduzierung der Nebenaussendungen ist die Fensterung des Sendesignals im Zeitbereich. Die Flanken der Fensterfunktion sind weniger steil als die des normalerweise verwendeten Rechteck-Fensters, so dass die harten Phasensprünge zwischen benachbarten OFDM-Symbolen geglättet werden. Im Frequenzbereich wird damit eine Reduzierung der Außerbandstrahlung erzielt, da die Spektren der einzelnen Unterträger günstigere spektrale Eigenschaften bekommen. Ein Nachteil der Fensterung ist die zeitliche Verlängerung der OFDM-Symbole, die zu einem verringerten Durchsatz führt. Man kann die Außerbandstrahlung jedoch schon mit relativ kleinen Roll-Off Faktoren wie z.B. $\beta = 0.2$ erheblich reduzieren.

2.2.1 Subcarrier Weighting

In [10] wurde das Subcarrier Weighting (SW) vorgeschlagen, bei dem alle Unterträger mit reellen Gewichtungsfaktoren multipliziert werden, um die Sidelobes des OFDM-Signals zu reduzieren. Die Gewichtungsfaktoren werden so optimiert, dass

2.2 Störminimierung auf das Hauptsystem

sich die Sidelobes der einzelnen Unterträger gegenseitig auslöschen und so das resultierende Gesamtsignal geringere Nebenaussendungen aufweist. Dabei muss für die Gewichtungsfaktoren eine obere Grenze $g_{\max} \in \mathbb{R}^+$ und eine untere Grenze $g_{\min} \in \mathbb{R}^+$ eingehalten werden, damit die gewichteten Symbole nicht in einen benachbarten Entscheidungsbereich verfälscht werden. Am Empfänger kann das Signal also ohne Übertragung von Seiteninformation detektiert werden, solange nur Phasen- und keine Amplituden-Modulationsverfahren verwendet werden.

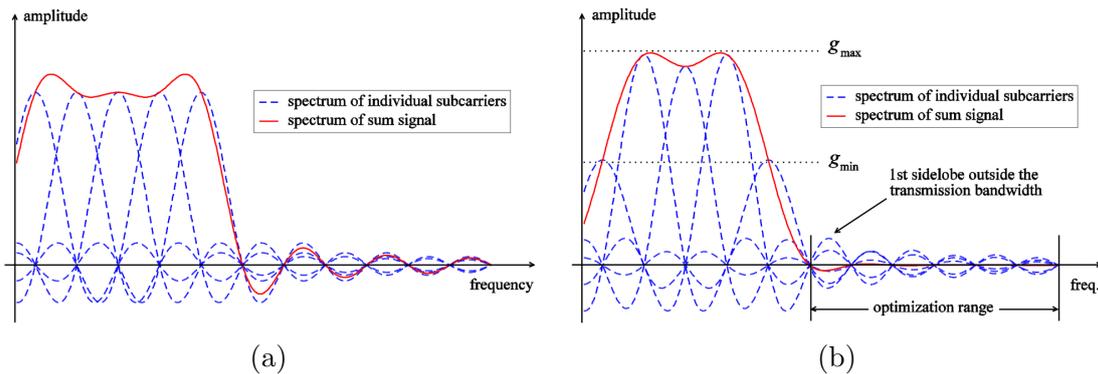


Abbildung 2.9: Vergleich der Spektren mit und ohne SW.

In Abb. 2.9 wird das Prinzip des Subcarrier Weighting anhand eines OFDM-Systems mit $N = 5$ Unterträgern demonstriert. Im oberen Teil der Abbildung sind die Spektren der einzelnen Unterträger ohne Gewichtung sowie das Spektrum des Gesamtsignals dargestellt. In der unteren Abbildung sind die Spektren der gewichteten Träger gezeigt. Die Optimierung der gewichteten Träger wird über die ersten 6 Sidelobes außerhalb der Übertragungsbandbreite durchgeführt. Das resultierende Spektrum des Gesamtsignals weist wesentlich geringere Sidelobes als das ursprüngliche auf.

Simulationsergebnisse in [10] zeigen, dass die Nebenaussendungen bei einer geeigneten Wahl von g_{\min} und g_{\max} um 10 dB reduziert werden können. Damit verbunden ist jedoch eine leicht erhöhte Bitfehlerwahrscheinlichkeit und der Rechenaufwand für die Optimierung der Gewichtungsfaktoren.

2.2.2 Cancellation Carrier

Ein anderer Ansatz zur Unterdrückung der Sidelobes basiert auf so genannten Cancellation Carrier (CC), die am linken und rechten Rand des Spektrums eingefügt werden [11]. Diese speziellen Unterträger werden nicht zur Übertragung von Daten verwendet, sondern tragen vielmehr komplexe Gewichtungsfaktoren,

2 PHY Design Sender

die so bestimmt werden, dass die Sidelobes der CC die Sidelobes des ursprünglichen Sendesignals auslöschen. Bei der Optimierung der Gewichtungsfaktoren wird eine Nebenbedingung eingeführt, um den Anteil der CC an der gesamten Sendeenergie zu kontrollieren. Abb. 2.10 zeigt die Anwendung von CC in einem vereinfachten Overlay-System. Bereits im linearen Maßstab ist zu erkennen, dass die Sidelobes des Summensignals bestehend aus dem ursprünglichen Sendesignal und den gewichteten CC deutlich niedriger sind als die des ursprünglichen Sendesignals. Genauere Untersuchungen in [11, 12] haben gezeigt, dass mit nur je zwei CC an den Rändern des Spektrums im Mittel eine Unterdrückung von etwa 20 dB erzielt werden kann. Dieser Gewinn ist jedoch mit zusätzlichem Rechenaufwand für die Optimierung sowie einer leichten Verschlechterung der Bitfehlerrate verbunden.

Da die Außerbandstrahlung mit den bisher vorgestellten Verfahren zur Stör-

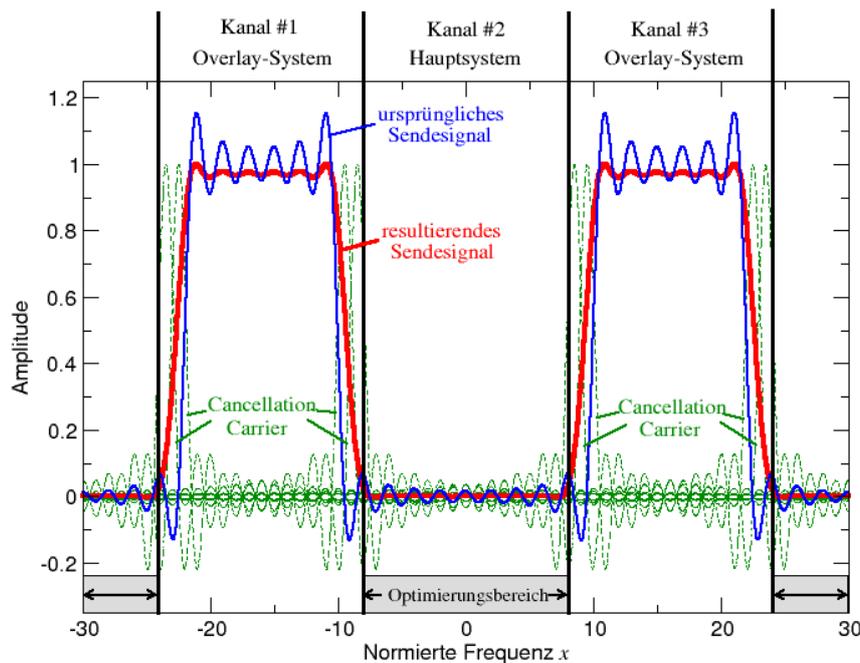


Abbildung 2.10: Einfügen von CC in ein Overlay-System; $N = 2 \cdot 12 = 24$ Unterträger, $4 \cdot 2 = 8$ CC, Symbolvektor $(1, 1, \dots, 1)^T$.

minimierung zwar deutlich, aber noch nicht ausreichend reduziert werden kann, wurde in [13] die Kombination von Fensterung und CC untersucht. Anhand eines Overlay-Systems im VHF-Band (Szenario 1) wurde gezeigt, dass die Sidelobe-Energie mit diesem Ansatz auf einen Pegel reduziert werden kann, der ungefähr 50 dB unterhalb des OFDM-Signalpegels liegt [13, 4]. Um eine möglichst realis-

2.3 Adaptiver COFDM Sender

tische Abschätzung der nach der Störminimierung verbleibenden Nebenaussendungen zu bekommen, wurde auch der Einfluss des GI auf das emittierte Spektrum berücksichtigt. Mit diesen Ergebnissen kann gewährleistet werden, dass das Overlay-System parallel zu den bestehenden Hauptsystemen betrieben werden, ohne diese zu stören.

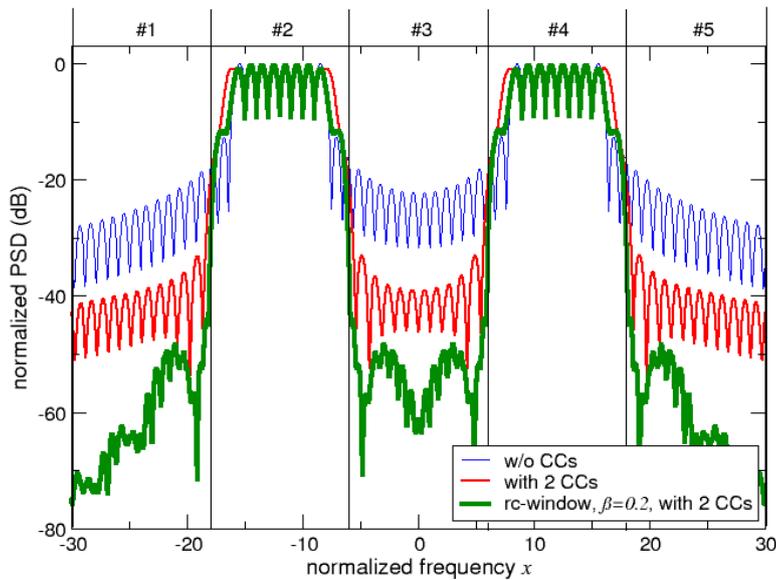


Abbildung 2.11: OFDM-Spektrum mit 2 CC und Raised-Cosine Fensterung, $\beta = 0.2$, $N = 2 \cdot 8 = 16$ Unterträger, $2 \cdot 4 = 8$ CCs, Leistung der CC auf 25% der Gesamtleistung begrenzt, $T_{GI} = 0.04 T_S$.

2.3 Adaptiver COFDM Sender

In Arbeitspaket 2.2 ist ein COFDM-basierter Sender für ein Overlay-System entwickelt worden. Anders als bei konventionellen OFDM-Systemen müssen hierbei einige Besonderheiten berücksichtigt werden, die speziell für Overlay-Systeme relevant sind:

1. Der Sender muss in der Lage sein, sich flexibel an die detektierten Frequenzlücken anzupassen. Aus diesem Grund ist eine flexible OFDM-Rahmenstruktur erforderlich, in der die benutzbaren Unterträger entsprechend dem Belegungsvektor festgelegt werden.

2 PHY Design Sender

2. In einem zweiten Schritt müssen die im vorherigen Kapitel untersuchten Verfahren zur Störminimierung in den Sender integriert werden. Außerdem muss die Auswirkung der Verfahren auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems untersucht werden.
3. Schließlich müssen Vielfachzugriffsverfahren analysiert werden, die es mehreren Nutzern des Overlay-Systems ermöglichen, gleichzeitig auf die Ressourcen des Overlay-Systems zuzugreifen. Hierzu wird untersucht, inwieweit sich Multi-Carrier Code-Division Multiple-Access (MC-CDMA) an die variable Spektrumsbelegung anpassbar ist und wie die Leistungsfähigkeit von MC-CDMA durch die Interferenz von den Hauptsystemen beeinflusst wird.

Das vereinfachte Blockschaltbild eines OFDM-basierten Senders für ein Overlay-System ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Wie in einem konventionellen OFDM-System auch, werden zunächst komplexe Datensymbole durch seriell-parallel Wandlung (S/P) den einzelnen Unterträgern zugewiesen. Bei einem Overlay-System dürfen hierbei nur die Träger belegt werden, die entsprechend dem Belegungsvektor benutzt werden dürfen. Anschließend wird das OFDM-Symbol in einem Block zur Störminimierung so modifiziert, dass die Nebenaussendungen reduziert werden. Beim Subcarrier Weighting werden in diesem Block die einzelnen belegten Unterträger gewichtet oder es werden in diesem Block an den vorgesehenen Stellen Cancellation Carrier eingefügt. Nach diesem Block werden die komplexen Symbole wie in einem konventionellen OFDM-System verarbeitet: die komplexen Symbole werden mittels der inversen diskreten Fourier Transformation (IDFT) in den Zeitbereich transformiert und um ein Guard-Intervall zyklisch erweitert. Um eine weitere Unterdrückung der Nebenaussendungen zu erzielen, wird das Zeitbereichssignal mit einer Fensterfunktion multipliziert, die eine Verlängerung des OFDM-Symbols um eine Prä- und Postfix erfordert. Insgesamt zeigt Abbildung 2.12, dass die Struktur eines konventionellen OFDM-Senders in einem Overlay-System weitgehend erhalten bleibt und wichtige Komponenten wie beispielsweise die DFT/IDFT nicht verändert werden müssen.

2.3.1 Flexible Rahmenstruktur

Beim Entwurf einer Rahmenstruktur für ein Overlay-System müssen zusätzlich die Lücken in der Zeit-Frequenzebene berücksichtigt werden. Ein Beispiel für eine flexible Rahmenstruktur für ein Overlay-System ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Der Einfachheit halber werden hier nur Frequenzlücken betrachtet. Der

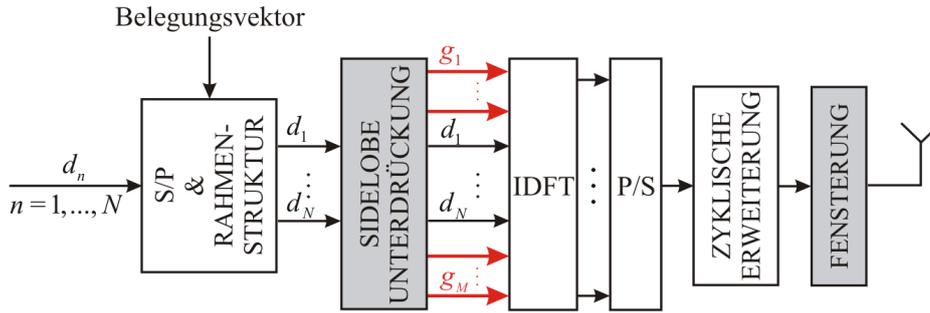


Abbildung 2.12: OFDM-Sender erweitert um Blöcke zur Störminimierung.

Rahmen besteht aus 30 OFDM-Symbolen mit jeweils 128 Unterträgern, wobei jeweils 12 Unterträger in einem Kanal des Hauptsystems liegen. Entsprechend dem Belegungsvektor werden die 48 Unterträger, die in den vier Kanälen liegen, die das Hauptsystem verwendet, deaktiviert. An den Rändern der Kanäle, die vom Overlay-System benutzt werden, werden jeweils zwei Unterträger für Cancellation Carrier zur Sidelobe-Unterdrückung reserviert. Die Synchronisations- und Pilotsymbole müssen ebenfalls an die Spektrumsbelegung angepasst werden, da auch bei diesen Symbolen die Unterträger freigelassen werden müssen, in denen das Hauptsystem liegt. Bei den in Abbildung 2.13 dargestellten Pilotsymbolen wird angenommen, dass in einem Pilotsymbol auf jedem Unterträger ein Piloton übertragen wird, so dass nur eine Interpolation der Kanalkoeffizienten in Zeitrichtung notwendig ist. Aus diesem Grund haben die Lücken im Pilotsymbol keinen negativen Einfluss auf die Kanalschätzung. Die Struktur der Synchronisationssymbole wird ebenfalls durch die Lücken beeinflusst. Bei dem Entwurf des Empfängers in AP 3 ist zu untersuchen, inwieweit sich Interferenz und die veränderte Struktur der Pilot- und Synchronisationssymbole auf die Kanalschätzung und Synchronisation auswirken.

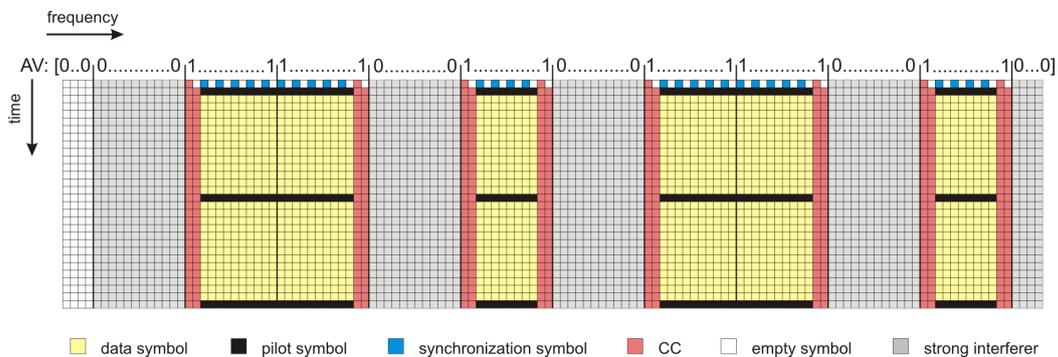


Abbildung 2.13: Flexible OFDM-Rahmenstruktur für ein Overlay-System.

2.3.2 Einfluss von Verfahren zur Störminimierung auf das Gesamtsystem

Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, können die Verfahren zur Störunterdrückung auf einfache Weise in die Senderstruktur integriert werden. Dies hat jedoch nicht nur Auswirkungen auf den Sender selbst, sondern auch auf das gesamte System.

Durch die Fensterung reduziert sich der Durchsatz linear mit dem Roll-Off Faktor [3], da eine Verlängerung des OFDM-Symbols in Zeitbereich erforderlich ist. Ein sinnvoller Kompromiss zwischen der erreichbaren Unterdrückung und dem Datenratenverlust sind Roll-Off Faktoren im Bereich 10 - 20%, abhängig von der im jeweiligen Overlay-Szenario erforderlichen Sidelobe-Unterdrückung.

Werden CC zur Sidelobe-Unterdrückung eingefügt, erhöht sich die BER leicht, da ein bestimmter Teil der Sendeenergie in die CC investiert wird und damit nicht mehr für die Datenübertragung zur Verfügung steht. Untersuchungen in [3] haben gezeigt, dass sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um 1.2 dB erhöht, wenn der Anteil der CC an der gesamten Sendeenergie auf 25% beschränkt wird. Außerdem vergrößert sich das Peak-to-Average-Power Ratio (PAPR) bei einer Clipping-Rate von 10^{-2} um 0,6 dB, wenn maximal 25% der Sendeenergie in CC investiert werden. Gründe hierfür sind die erhöhte Anzahl von Unterträgern und die Werte der CC selbst, die zum Teil höher sind als die Werte auf den Datenträgern.

Insgesamt verursachen die Verfahren zur Störunterdrückung geringe Einbußen in der Leistungsfähigkeit, die im Hinblick auf die starke erreichbare Unterdrückung akzeptabel sind.

2.3.3 Vergleich MC-CDMA und OFDM

Prinzipiell sind sowohl OFDM als auch MC-CDMA für die Übertragung in einem Overlay-System geeignet. Bei MC-CDMA muss lediglich berücksichtigt werden, dass immer nur eine Anzahl von Unterträgern verwendet werden kann, die einem Vielfachen der Spreizungslänge entspricht, so dass unter Umständen nicht alle verfügbaren Unterträger benutzt werden können. Die nicht benutzten Unterträger können aber so im Spektrum positioniert werden, dass sie zur Reduzierung der Sidelobes beitragen.

Um den Einfluss der Interferenz auf beide Übertragungsverfahren zu bewerten, wurde die BER für ein Overlay-System mit nur einem Störer mit variabler Leistung entsprechend dem Szenario im VHF-Band [8, 3] simuliert. Bei starker Interferenz, also bei niedrigem Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis (SIR), ist OFDM

besser als MC-CDMA, da bei MC-CDMA Chips eines Datensymbols in der Nähe des Störers so stark verfälscht werden, dass sie dominant sind und auch die anderen Chips des Datensymbols beeinflussen. Nimmt der Einfluss der Interferenz ab, kommen die Vorteile der Spreizung zum Tragen und MC-CDMA hat eine niedrigere BER im Vergleich zu OFDM. Bei der Auslegung eines Overlay-System muss also zunächst die zu erwartende Interferenz analysiert werden. Anhand dieser Informationen über die Stärke und Häufigkeit der Interferenz kann dann entschieden werden, ob der Einsatz von MC-CDMA sinnvoll ist oder nicht.

Generell sind die BER für ein SNR von 18 dB und bei nur einem Störer bei beiden Modulationsverfahren sehr schlecht. Die Interferenz hat also einen sehr starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Overlay-Systems und muss am Empfänger so weit wie möglich unterdrückt werden. Verfahren hierzu werden zur Zeit in AP 3 untersucht.

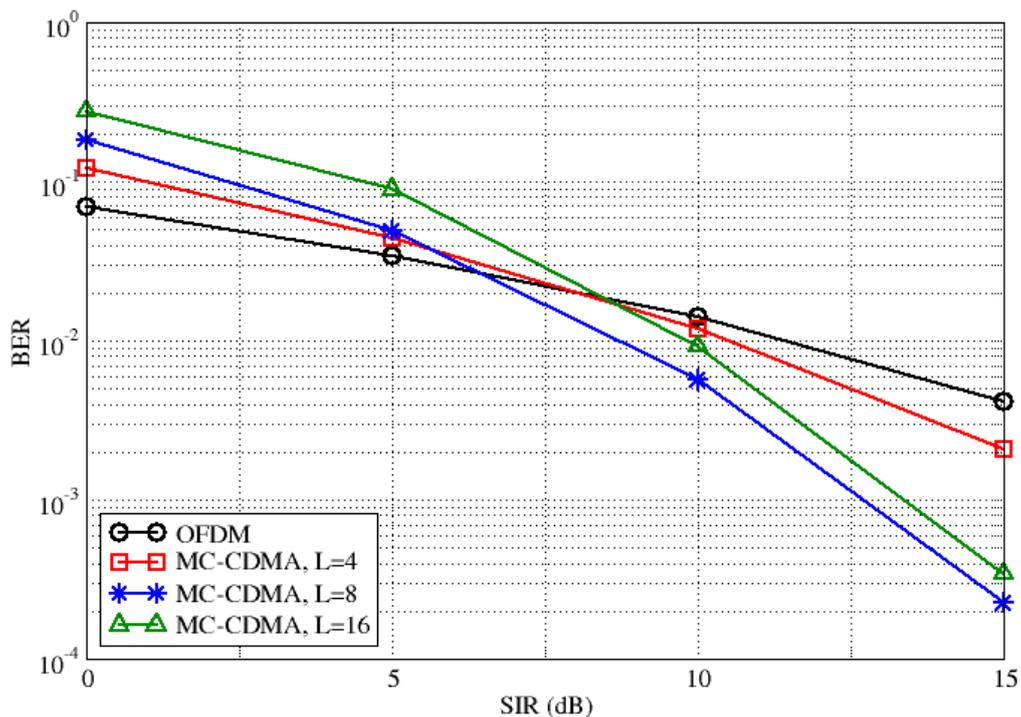


Abbildung 2.14: BER vs SIR für OFDM und MC-CDMA mit verschiedenen Spreizungslängen, SNR=18 dB.

3 PHY Design Empfänger

In AP 3 wird ein Empfänger für ein Overlay-System entwickelt. Anders als im Projektplan vorgesehen, wurden zunächst Algorithmen zur Unterdrückung der Störungen von Hauptsystemen untersucht. Diese Algorithmen werden dann später in das Gesamtkonzept des Empfängers für ein Overlay-System integriert, wobei eventuell notwendige Veränderungen der Empfängerstruktur von Anfang an berücksichtigt werden können.

In Overlay-Systemen verursachen die Hauptsysteme zum Teil starke Interferenz. Dabei ist zwischen zwei Arten von Interferenz zu unterscheiden:

1. *Starke Störer* liegen in Kanälen, die nicht vom Overlay-System verwendet werden. Die Leistung dieser Störer ist meistens sehr hoch, da die entsprechenden Stationen des Hauptsystems sehr nah an den Stationen des Overlay-Systems sind.
2. *Schwache Störer* liegen in den Frequenzbereichen, die auch vom Overlay-System verwendet werden. Die entsprechenden Stationen des Hauptsystems sind zwar so weit entfernt, dass das Overlay-System sie nicht stören kann, umgekehrt kann das Hauptsystem aber Interferenzen im Overlay-System verursachen.

Die Interferenzen sind in der Regel nur schmalbandig, so dass sie eigentlich nur wenige Unterträger des Overlay-Systems beeinträchtigen. Da die Störungen aber meist nicht genau auf den Abtastwerten der FFT im Empfänger des Overlay-Systems liegen, tritt bei der FFT der Leakage-Effekt auf. Dadurch wird das Spektrum eines schmalbandigen Störers auf die gesamte Bandbreite verteilt, so dass alle Unterträger von der Interferenz betroffen sind.

In Abbildung 3.1 ist die Interferenzsituation im VHF-Band für ein vereinfachtes Overlay-System schematisch dargestellt. Die Bandbreite des Overlay-Systems entspricht genau drei VHF-Kanälen, wobei das Overlay-System nur den 1. und 3. Kanal verwenden darf. Alle drei Kanäle werden jeweils von einem DSB-AM

System benutzt, wobei das DSB-AM System im 1. und 3. Kanal eine wesentlich geringere Leistung hat. Die Spektren des DSB-AM Signals bestehen aus einem Träger und zwei Seitenbändern, die insgesamt eine Bandbreite von 5,4 kHz haben. Bei einem Unterträgerabstand von 2,083 kHz sind also nur 2-4 Unterträger von diesem Störsignal betroffen. Aufgrund des Leakage-Effekts wird bei der FFT im Empfänger des Overlay-Systems aus dem cosinus-förmigen DSB-AM Trägersignal im Frequenzbereich eine Exponentialfunktion, die einen Einfluss auf alle Unterträger hat. Der Beitrag der Seitenbänder spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

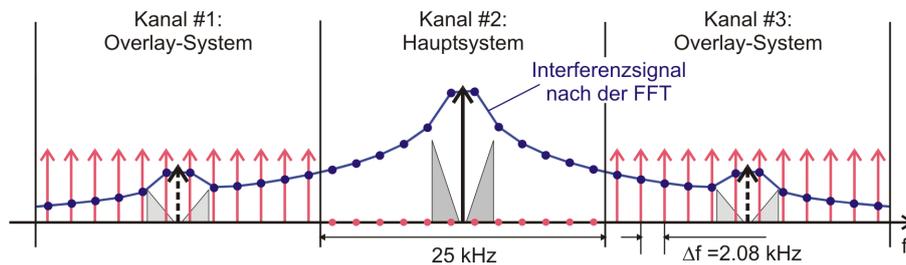


Abbildung 3.1: Leakage-Effekt

Um die Interferenz am Empfänger des Overlay-Systems zu reduzieren, gibt es im Wesentlichen drei verschiedene Ansätze:

- analoge Notch-Filter vor dem A/D-Wandler,
- Fensterung im digitalen Zeitbereich,
- Kompensation des Leakage-Effekts im digitalen Frequenzbereich.

Zu diesen Ansätzen gibt es bereits einige Verfahren, die für die drahtgebundene Kommunikation, wie z.B. Digital Subscriber Line (DSL), entwickelt wurden [14, 15]. Da die DSL-Übertragung durch den Amateurfunk gestört wird, der dasselbe Frequenzband verwendet, entsteht eine ähnliche Störsituation wie in einem Overlay-System. Daher ist es nahe liegend, zunächst zu untersuchen, inwiefern sich die bekannten Verfahren in Overlay-Systemen anwenden lassen und wie sie gegebenenfalls modifiziert werden müssen.

Im folgenden werden Verfahren basierend auf diesen drei Ansätzen vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Verfahren im digitalen Zeit- und Frequenzbereich, die in den Unterkapiteln 3.2 bzw. 3.3 vorgestellt werden. Um die Vorteile beider Verfahren auszunutzen, wird ebenfalls eine Kombination der Kompensation des Leakage-Effekts und einer Fensterung in Unterkapitel 3.4 untersucht. Das

Kapitel wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf die weiteren Arbeiten zu diesem Arbeitspaket von TAKOKO abgeschlossen.

3.1 Notch-Filterung

Wird das OFDM-Signal von sehr starken Störern überlagert, führt dies am Empfänger des Overlay-Systems zu einer Sättigung des A/D-Wandlers. Bei der Ausregelung des Empfangsverstärkers wird der Bereich des A/D-Wandlers an den starken Störer angepasst und es stehen nicht mehr genügend Bits zur Verfügung, um das gewünschte OFDM-Signal ausreichend genau aufzulösen. Dies ist unabhängig davon, ob diese Störer in einem Kanal liegen, den das Overlay-System benutzt oder nicht. Aus diesem Grund müssen sehr starke Störer vor der A/D-Wandlung mit Hilfe von Notch-Filtern unterdrückt werden. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, ist die Filtercharakteristik eines Notch-Filters so an das Overlay-System angepasst, dass genau die Signale der starken Störer herausgefiltert werden. Das Konzept der Notch-Filterung ist sehr einfach, hat aber gerade in Overlay-Systemen einige Nachteile. Zum einen führen die steilen Flanken des Filters zu Intersymbol- und Intercarrierinterferenz. Zum anderen sind Notch-Filter nicht einfach an eine wechselnde Spektrumsbelegung anpassbar. Im Idealfall müsste ein solches Filter in der Lage sein, schnell die Anzahl, die Breite und die Position der “Einkerbenungen” zu ändern. Da eine solche Realisierung aber sehr komplex ist, werden Notch-Filter nur für sehr wenige starke Störer verwendet, wenn es unvermeidbar ist. Alternativ kann auch auf digitale Notch-Filter oder andere Methoden zurückgegriffen werden. Bei den folgenden Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die sehr starken Interferenzen bereits unterdrückt worden sind. Die verbleibenden Interferenzen werden mit Hilfe digitaler Verfahren minimiert.

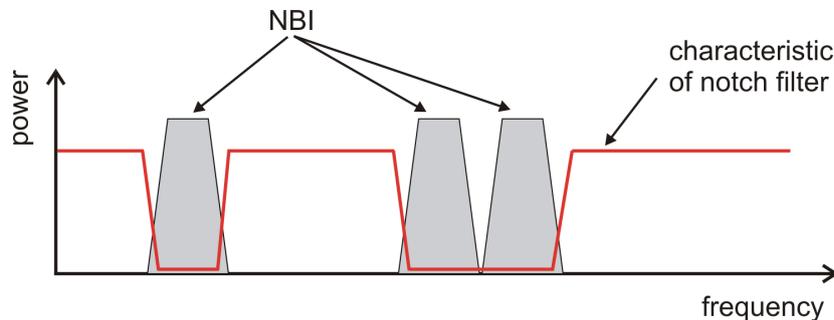


Abbildung 3.2: Notch-Filterung.

3.2 Fensterung im digitalen Zeitbereich

Bei der Fensterung wird das Empfangssignal mit einer Fensterfunktion multipliziert, bevor es in den Frequenzbereich transformiert wird. Die Fensterung ist äquivalent zu einer Faltung mit der Fourier-Transformierten des Fensters im Frequenzbereich. Das Fenster unterscheidet sich von normalerweise implizit angewendeten Rechteckfenster und hat geringere Nebenaussendungen als die entsprechende sinc-Funktion des Rechteckfensters. Die Breite des Fensters wird so gewählt, dass nur die Interferenz, nicht aber die Daten, beeinflusst werden. Außerdem muss gewährleistet sein, dass durch die Fensterung die Länge der FFT nicht vergrößert werden muss. Dazu gibt es verschiedene Ansätze, wobei Untersuchungen gezeigt haben, dass die Methode von Redfern [16] am einfachsten und effizientesten ist. Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, wird aus der empfangenen Datensequenz ein Abschnitt der Länge $N + N_{GI} + \mu$ selektiert. Dabei gibt N die Länge der FFT, N_{GI} die Länge des Guard-Intervalls und μ die Anzahl der zusätzlichen Abtastwerte an, die für die Fensterung notwendig sind. Nachdem der Teil der zyklischen Erweiterung, der als Guard-Intervall dient, entfernt worden ist, werden die verbleibenden $N + \mu$ Abtastwerte mit der Fensterfunktion multipliziert. Um wieder eine Datensequenz der Länge N entsprechend der FFT-Länge zu erhalten, werden die ersten μ Abtastwerte auf die letzten μ Abtastwerte addiert. Dies ist ohne Beeinträchtigung der Daten möglich, da die ersten μ Abtastwerte eine zyklische Wiederholung der letzten μ Abtastwerte sind. Die Fensterfunktion $w[i]$ muß folgende symmetrische Struktur haben

$$w[i] = \begin{cases} w'[i] & i = 0, \dots, \mu - 1 \\ 1 & i = \mu, \dots, N - 1 \\ 1 - w'[i - N] & i = N, \dots, N + \mu - 1, \end{cases} \quad (3.1)$$

wobei $w'[i]$ ein gewöhnliches Fenster der Länge 2μ ist. Um eine verlustfreie Addition der ersten und letzten μ Abtastwerte zu ermöglichen, muß dieses Fenster die Bedingung

$$w'[i] + w'[i + \mu] = 1, \quad i = 0, \dots, 2\mu - 1 \quad (3.2)$$

erfüllen. Diese Bedingung ist für Nyquist-Flanken, wie beispielsweise bei einem Hann- oder einem Dreiecksfenster, erfüllt.

In den Abbildungen 3.4 und 3.5 ist das Spektrum eines DSB-AM Störers, der im 20. VHF-Kanal in der Mitte zwischen zwei Unterträgern des Overlay-Systems liegt [8], gezeigt. Ohne Fensterung hat der Störer einen großen Leistungsanteil außerhalb seines VHF-Kanals. Durch eine Fensterung mit $\mu = 52$ können diese

3 PHY Design Empfänger

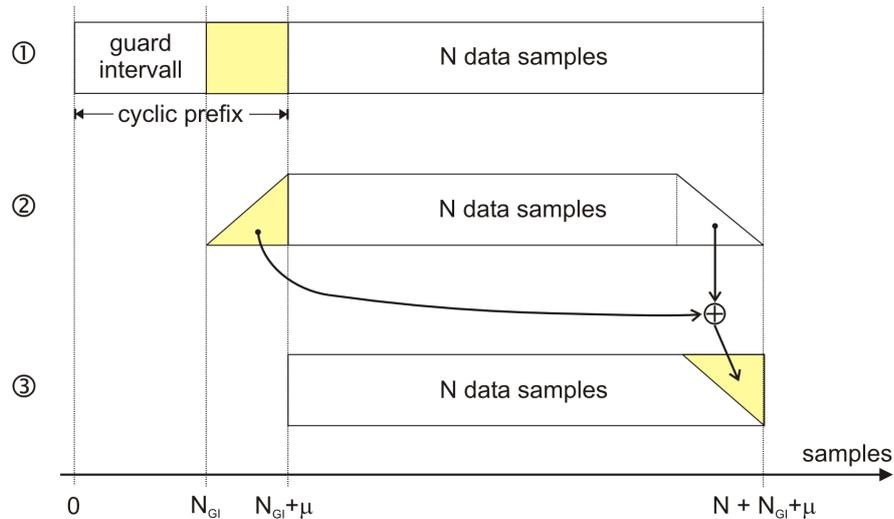


Abbildung 3.3: Prinzip der Fensterung nach Redfern [16].

Leistungsanteile erheblich reduziert werden. Mit einem Hann-Fenster kann die Leistung des Störers außerhalb seines VHF-Kanals um mehr als 66 dB gemittelt über den gesamten benutzten Frequenzbereich und über 1000 OFDM Symbole reduziert werden. Wird die Breite des Fensters vergrößert, kann die Störleistung wie in Abbildung 3.5 dargestellt weiter reduziert werden. Ein guter Kompromiss zwischen der erforderlichen Verlängerung des OFDM-Symbols und der erreichbaren Unterdrückung des Störers liegt bei $\mu = 52$. Bei allen Fenstertypen und -breiten fällt auf, daß die Spitze des Störers im Bereich seines VHF-Kanals und in unmittelbarer Umgebung nicht reduziert werden kann. Dies ist insbesondere für schwache Störer von Nachteil. Ein weiterer Nachteil der Fensterung ist die notwendige Verlängerung des OFDM-Signals im Zeitbereich, die bei $\mu = 52$ und einer FFT-Länge von 512 einem Datenratenverlust von etwa 10% entspricht. Vorteile der Fensterung liegen in der einfachen Implementierung und in der Tatsache, daß keine Kenntnis über die Interferenz erforderlich ist.

3.3 Kompensation des Leakage-Effekts im digitalen Frequenzbereich

Ein naheliegender Ansatz zur Reduzierung der Interferenzen ist es, daß Interferenzsignal zu schätzen und einfach zu subtrahieren. Da dieses Verfahren jedoch empfindlich gegenüber Schätzfehlern ist, wird noch ein zweiter Ansatz basierend auf einer Kompensationsmatrix untersucht, die so optimiert ist, daß der mittlere

3.3 Kompensation des Leakage-Effekts im digitalen Frequenzbereich

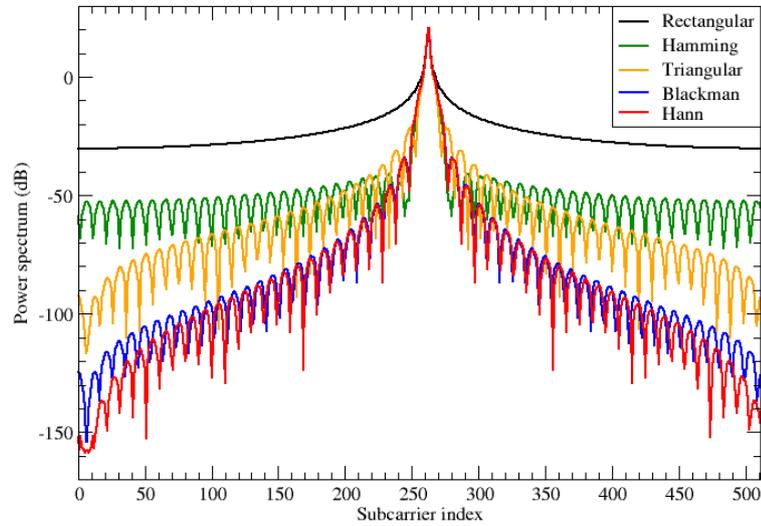


Abbildung 3.4: Verschiedene Fenstertypen, $\mu=52$.

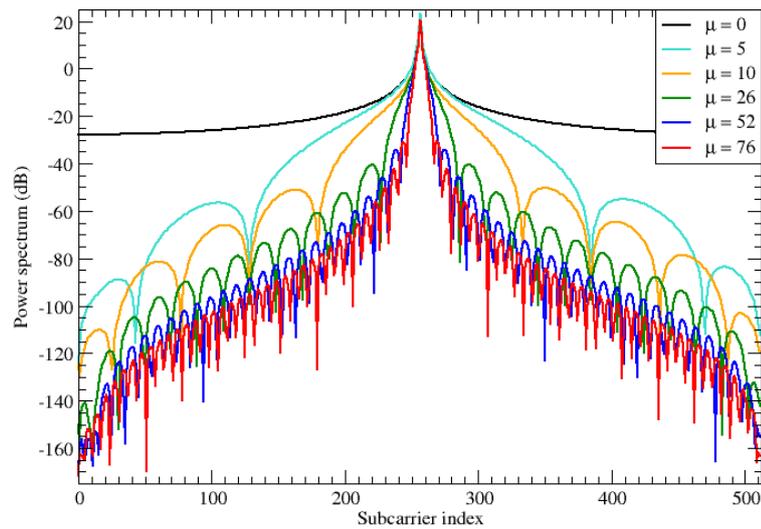


Abbildung 3.5: Verschiedene Fensterbreiten, Hann Fenster.

quadratische Fehler auf jedem Unterträger minimiert wird.

3.3.1 Subtraktion des Störsignals

Als Beispiel wird wieder ein DSB-AM Signal betrachtet, das im Zeitbereich als

$$i(t) = A(1 + m b(t)) \exp(2\pi f_c t + \varphi_0) \quad (3.3)$$

3 PHY Design Empfänger

definiert ist, wobei A die Amplitude des Trägers, m den Modulationsindex, $b(t)$ das übertragene Sprachsignal, f_c die Trägerfrequenz und φ_0 die Phase des DSB-AM Signals bezeichnet. Da der Träger des DSB-AM Signals einen sehr starken Einfluß auf den Leakage-Effekt hat und das Sprachsignal schwer zu schätzen ist, wird im folgenden nur der Träger des DSB-AM Signals geschätzt ein sein Einfluß reduziert. Das Störsignal im diskreten Zeitbereich ist dann

$$i[n] = A[n] \cdot \exp\left(jn \cdot \frac{2\pi k_c}{N} + j\varphi_0\right), \quad n = 0, \dots, M \cdot (N + N_{GI}) - 1, \quad (3.4)$$

wobei k_c die diskrete Trägerfrequenz und M die Anzahl der OFDM-Symbole in einem OFDM-Rahmen angibt.

Vor der FFT werden N_{GI} Abtastwerte des Guard-Intervalls entfernt, so daß sich ein konstanter Phasensprung zwischen den Interferenzsignalen zweier aufeinanderfolgender OFDM-Symbole ergibt. Das Interferenzsignal auf dem m ten OFDM-Symbol kann dann im Zeitbereich als

$$i_m[n] = A_m \cdot \exp\left(jn \cdot \frac{2\pi k_c}{N} + j\left(\varphi_0 + m \cdot \frac{2\pi N_{GI} k_c}{N}\right)\right), \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (3.5)$$

ausgedrückt werden. Nach der FFT ist das m te OFDM-Symbol im Frequenzbereich

$$I_m[k] = A_m/N \cdot \exp(j\varphi[m]) \cdot \exp\left(-j\pi(k - k_c) \frac{N - 1}{N}\right) \cdot \frac{\sin(\pi(k - k_c))}{N \sin(\pi/N(k - k_c))}, \quad (3.6)$$

wobei $\varphi[m] = \varphi_0 + m \frac{2\pi N_{GI} k_c}{N}$ und $k = 0, \dots, N - 1$. Für den Fall, daß die Trägerfrequenz des DSB-AM Signals auf einen Unterträger k_0 fällt, d.h. $k_c = k_0$, ist das Interferenzsignal nur auf diesem Unterträger verschieden von null, auf allen anderen Unterträgern hat die Interferenz keinen Beitrag. Da aber $k - k_c$ in der Regel aufgrund von Schwankungen der Trägerfrequenz und des Doppler-Effekts nicht ganzzahlig ist, tritt der Leakage-Effekt auf, wodurch das Interferenzsignal einen Beitrag auf allen Unterträgern liefert.

Da der Leakage-Effekt eine Eigenschaft der FFT ist, kann das Interferenzsignal mit Informationen über die Amplitude, Phase und die Frequenz des Störsignals rekonstruiert werden und schließlich vom Empfangssignal subtrahiert werden. Diese Informationen können Beobachtungsträgern, die nicht zur Datenübertragung verwendet werden, entnommen werden. Werden mit diesem Verfahren starke Störer unterdrückt, stehen insgesamt pro VHF-Kanal 12 Unterträger für Beobachtungszwecke zur Verfügung, ohne daß Datenträger für das Overlay-System verloren gehen.

3.3.2 Matrix-basierte Leakage-Kompensation

Ein anderer Ansatz zur Reduzierung der Interferenzen im Frequenzbereich ist die Kompensation des Leakage-Effekts mit einer Kompensationsmatrix [17]. Diese Kompensationsmatrix \mathbf{E}_{NBI} ist so konzipiert, daß das Interferenzsignal basierend auf Messungen auf wenigen Beobachtungsträgern aus dem Empfangssignal extrahiert wird. Die Koeffizienten der Matrix sind so optimiert, daß der mittlere quadratische Fehler (MSE) auf jedem Unterträger minimal wird.

Die Kompensationsmatrix ist eine dünn besetzte Matrix mit den Elementen

$$[\mathbf{E}_{\text{NBI}}]_{i,j} = \begin{cases} 1 & i = 0, \dots, N-1; j = i \\ e_{i,j} & i = 0, \dots, N-1; i \notin o_1, \dots, o_{N_o}; j \in o_1, \dots, o_{N_o} \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (3.7)$$

wobei N_o die Anzahl der Beobachtungsträger und o_i die Position des i ten Beobachtungsträgers angibt. Die Koeffizienten von \mathbf{E}_{NBI} werden so bestimmt, daß der MSE auf jedem Träger minimal wird, d.h.

$$\mathbf{e}^{\text{MSE}} = [e_0^{\text{MSE}}, \dots, e_{N-1}^{\text{MSE}}]^T = 1/N^2 \cdot \text{diag} \{ \mathbf{E}_{\text{NBI}} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^H \cdot \mathbf{E}_{\text{NBI}}^H \}. \quad (3.8)$$

Die $(N \times M)$ -dimensionale Matrix \mathbf{I} bezeichnet das rekonstruierte Interferenzsignal aus Gleichung (3.6) inklusive Rauschen auf M OFDM-Symbolen. Schließlich erhält man als Kompensationsmatrix [17]

$$\mathbf{E}_{\text{NBI}} = \mathbf{I}_{\text{N}} - \mathbf{S}_{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^H \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{o}, \text{red}} \cdot (\mathbf{S}_{\mathbf{o}, \text{red}}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{I}^H \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{o}, \text{red}})^{-1} \cdot \mathbf{S}_{\mathbf{o}, \text{red}}^T. \quad (3.9)$$

Die Matrix $\mathbf{S}_{\mathbf{d}}$ ist eine modifizierte $(N \times N)$ Einheitsmatrix, die die N_d Unterträger auswählt, die zur Datenübertragung verwendet werden, also

$$[\mathbf{S}_{\mathbf{d}}]_{i,j} = \begin{cases} 1 & i = j, i \in \{o_1, \dots, N_d\} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Matrix $\mathbf{S}_{\mathbf{o}}$ selektiert auf die gleiche Weise die Beobachtungsträger; $\mathbf{S}_{\mathbf{o}, \text{red}}$ ist $\mathbf{S}_{\mathbf{o}}$ reduziert auf die von 0 verschiedenen Spalten.

Wird das Empfangssignal mit der Kompensationsmatrix \mathbf{E}_{NBI} multipliziert, ist das resultierende Signal eine Linearkombination der empfangenen Werte mit den gewichteten Werten der Beobachtungsträger.

Im Gegensatz zur reinen Subtraktion des geschätzten Interferenzsignals ist dieses Verfahren relativ robust gegenüber Schätzfehlern in der Phase, Trägerfrequenz und Amplitude des Störers. Die Berechnung der Kompensationsmatrix

3 PHY Design Empfänger

erfordert jedoch einen hohen Rechenaufwand. Die Dimensionen der Matrizen können reduziert werden, wenn nur ein oder zwei Beobachtungsträger pro belegtem VHF-Kanal verwendet werden. Außerdem muß die Kompensationsmatrix nicht für jedes OFDM-Symbol neu berechnet werden. Wenn sich die Interferenz nur langsam ändert, kann \mathbf{E}_{NBI} basierend auf der Schätzung der Interferenz auf dem ersten OFDM-Symbol bestimmt werden und dann auf die darauffolgenden OFDM-Symbole angewandt werden. Insgesamt ist damit der Rechenaufwand für die Bestimmung der Kompensationsmatrix akzeptabel, zumal aufwandsgünstige Algorithmen für die Invertierung einer dünn besetzten Matrix in Gleichung (3.9) existieren.

Abbildung 3.6 zeigt das Spektrum eines DSB-AM Störers nach der Interferenzunterdrückung durch Subtraktion und nach der matrix-basierten Kompensation. Durch Subtraktion wird das Interferenzsignal über die gesamte Bandbreite um 25 dB reduziert. Mit der matrix-basierten Kompensation wird das Störsignal um weitere 20 dB reduziert, so daß das Interferenzsignal in weiten Bereichen des Spektrums auf dem Rauschniveau liegt. Damit ist die Interferenz so weit reduziert, daß die Interferenz nur noch einen geringen Einfluß auf die Bitfehlerrate des Overlay-Systems hat. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt in der Robustheit gegenüber Schätzfehlern des Interferenzsignals. Wenn das Interferenzsignal exakt bekannt ist, kann die Interferenz mit beiden Verfahren vollständig reduziert werden.

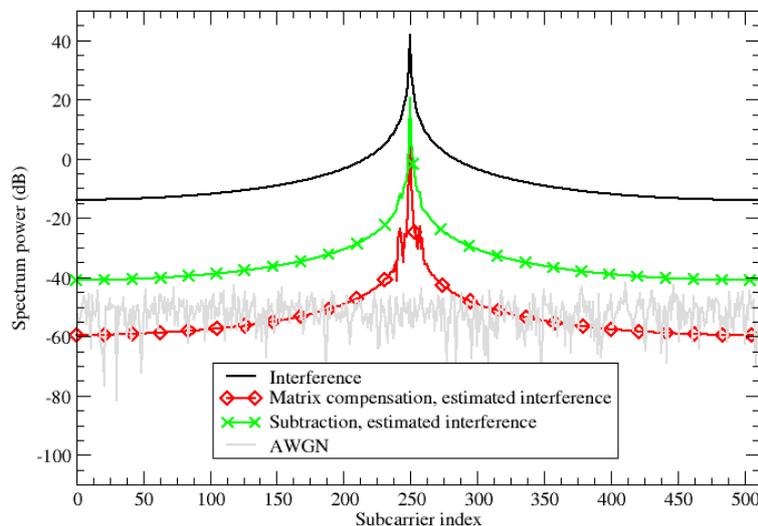


Abbildung 3.6: Spektrum eines DSB-AM Störers nach Subtraktion und matrix-basierter Kompensation, 1 Beobachtungsträger.

3.4 Kombination von Verfahren im Zeit- und Frequenzbereich

Um eine noch stärkere Unterdrückung zu erreichen, können die Fensterung im Zeitbereich und die Leakage-Kompensation im Frequenzbereich miteinander kombiniert werden. Die Fensterung kann wie gewohnt durchgeführt werden. Bei der Leakage-Kompensation hat das rekonstruierte Signal lediglich eine andere Form und wird entsprechend der Faltung der Fourier-Transformierten der Fensterfunktion mit dem Interferenzsignal aus Gleichung (3.6) bestimmt

$$\begin{aligned}
 I'_m[k] &= W[k] * I_m[k] & (3.10) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_m[n + N_{GI}] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \\
 &\quad + \frac{1}{N} \sum_{n=N-\mu}^{N-1} +w[n - N + \mu] (i_m[n + N_{GI} - N] - i_m[n + N_{GI}]) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \\
 &= e^{j2\pi N_{GI} k_c / N} \cdot I_m[k] \\
 &\quad + \frac{1}{N} \sum_{n=N-\mu}^{N-1} w[n - N + \mu] \cdot e^{j2\pi k_c (n + N_{GI} - N) / N} \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \\
 &\quad - \frac{1}{N} \sum_{n=N-\mu}^{N-1} w[n - N + \mu] \cdot e^{j2\pi k_c (n + N_{GI}) / N} \cdot e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}.
 \end{aligned}$$

In Abbildung 3.7 ist das Spektrum eines DSB-AM Störers nach der Unterdrückung durch Fensterung im Zeitbereich und matrix-basierter Leakage-Kompensation im Frequenzbereich dargestellt. Zum Vergleich sind die Spektren nach der Fensterung sowie nach der Leakage-Kompensation gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die beste Unterdrückung mit einer Kombination beider Verfahren erreicht werden kann. Durch die Fensterung wird die Interferenz in den äußeren Bereichen des Spektrums unterdrückt und durch die Leakage-Kompensation in und um den belegten VHF-Kanal.

3.5 Ausblick

Im weiteren Verlauf des Projekts werden die untersuchten Verfahren für den Fall mehrerer Störer mit unterschiedlichen Leistungen erweitert. Außerdem wird ein

3 PHY Design Empfänger

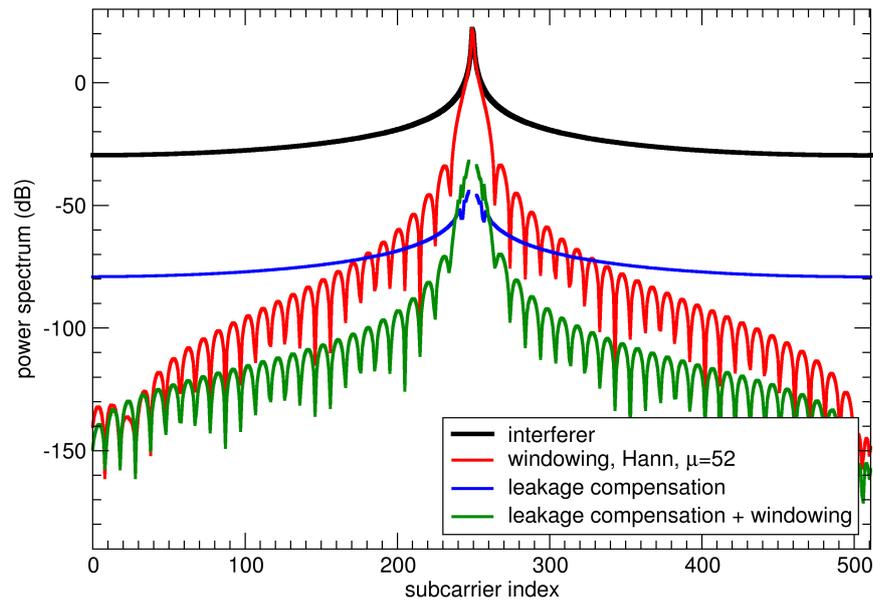


Abbildung 3.7: Spektrum eines DSB-AM Störers nach Unterdrückung durch verschiedene Verfahren.

realistischeres Interferenzmodell mit variabler Leistung und variablem Arbeitszyklus verwendet. Dies stellt eine besondere Herausforderung an die Leakage-Kompensation dar, da die Kompensationsmatrix an diese wechselnde Interferenzsituation angepaßt werden muß. Dabei wird auch untersucht, inwieweit die Häufigkeit der Aktualisierung der Kompensationsmatrix reduziert werden kann, ohne daß signifikante Verluste in der Unterdrückung der Interferenz auftreten. Als besonderer Fall ist das Verhalten zu untersuchen, wenn ein Störer innerhalb eines OFDM-Rahmens wegfällt, aber trotzdem durch die Kompensationsmatrix unterdrückt wird.

In einem weiteren Arbeitspaket werden diese Methoden in den Empfänger integriert und die Leistungsfähigkeit anhand der Bitfehlerrate untersucht.

4 MAC Design und Hidden Station Problem

In diesem Kapitel wird untersucht welche MAC-Strukturen geeignet sind die besonderen Aspekte sowohl von Overlay-Systemen als auch Ad-Hoc Netzen zu berücksichtigen. Insbesondere im Kontext von Ad-Hoc-Systemen ist damit das Hidden-Station-Problem eng verknüpft und wird in der untersuchten MAC-Struktur berücksichtigt. Deswegen wurde mit der Bearbeitung von AP 4.3 (Hidden Station Problem) vor AP 4.2 (Adaptive Ressourcenverteilung) begonnen.

4.1 Anforderungen an ein Ad-Hoc-Overlay-System

Um die Anforderungen an ein Ad-Hoc-Overlay-System genauer bestimmen zu können, sind zunächst Annahmen über das Stammmutzersystem notwendig. In diesem Zusammenhang wird von keinem speziellen System ausgegangen, die einzige Voraussetzung ist die Verwendung von FDMA. Im Folgenden sollen vereinfacht Gebiete betrachtet werden, in denen Hauptsystemnutzer liegen, die alle auf den gleichen Unterträgern kommunizieren. In verschiedenen Gebieten stehen dem Overlay-System also unterschiedliche sowie in der Anzahl variierende Unterträger zur Verfügung. Abbildung 4.1 zeigt ein Beispiel mit drei Hauptsystemzonen mit jeweils unterschiedlichen Belegungsvektoren. Diese Gebiete werden auch Belegungszone genannt.

4.1.1 Ad-Hoc-Szenario

Viele Kommunikationssysteme basieren auf einer Zellstruktur, die einer hierarchischen Struktur gleichkommt. Es gibt übergeordnete Stationen (Master, Basisstationen), die für die Koordination der Kommunikation und der Verwaltung von Strukturinformationen zuständig sind. Die ihr untergeordneten Stationen (Slaves, Mobile Terminals) sind auf Informationen des Masters angewiesen. In einem

4 MAC Design und Hidden Station Problem

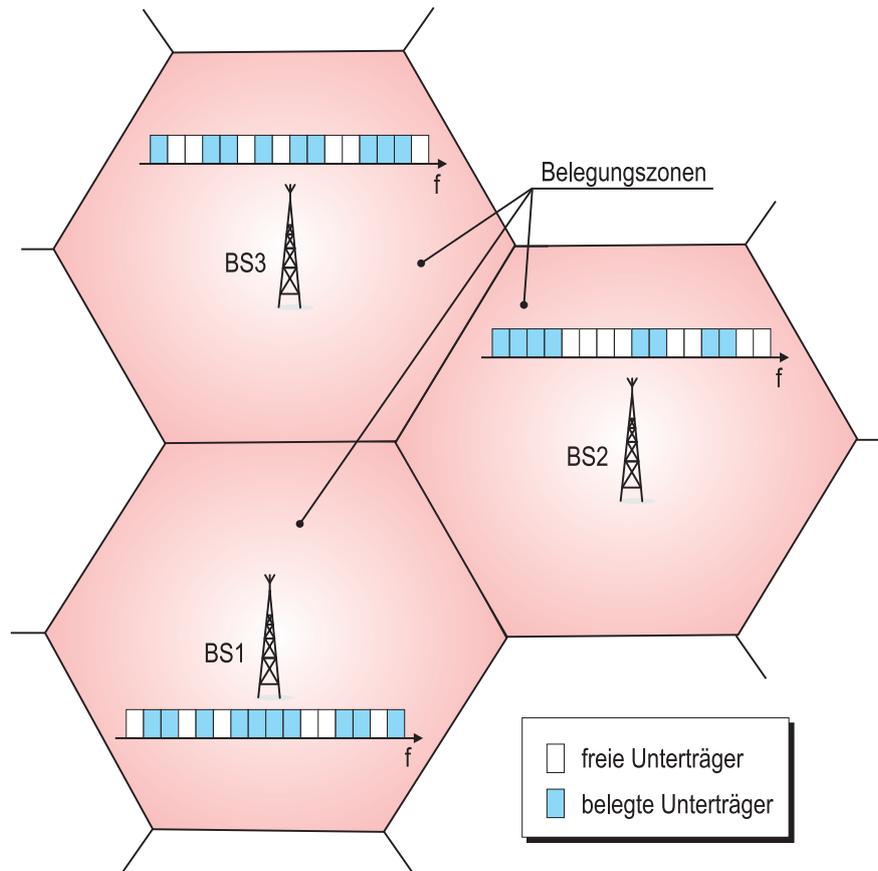


Abbildung 4.1: Drei Hauptsystemgebiete mit unterschiedlichen Belegungen.

Ad-Hoc-Netz hingegen ist jede Station unabhängig, d.h. sie ist selbst für den Kommunikationsaufbau und die Sammlung von Informationen über die sie umgebende Topologie verantwortlich. Daraus folgt, dass eine solche Ad-Hoc-Station beim Eintritt in eine neue Umgebung zunächst Informationen über die Topologie sammeln muss, um überhaupt eine Kommunikation aufbauen zu können. In einem Overlay-System kommt erschwerend hinzu, dass das System nur die freien Ressourcen des Hauptsystems nutzen darf, um dort signifikante Beeinträchtigungen zu vermeiden. Um dies zu garantieren, muss - wie prinzipiell bei Overlay-Systemen - eine regelmäßige Feststellung der durch das Hauptsystem belegten Unterträger oberste Priorität haben. Nur so kann auf Veränderungen der Hauptsystembelegung reagiert und relevante Interferenzen vermieden werden.

Zusammengefasst ergeben sich also zwei wesentliche Aufgaben für ein Ad-Hoc-Overlay-System:

- Informationen über die Belegung des Hauptsystems sammeln (Overlay-

Komponente).

- Informationen über die Struktur des Overlay-Systems sammeln (Ad-Hoc-Komponente).

Diese Aspekte müssen beim Entwurf eines MAC-Protokolls berücksichtigt werden und werden im Folgenden betrachtet.

4.2 Detektion des Hauptsystems

Nimmt eine Station den Betrieb auf, muss sie zunächst feststellen, welche Unterträger momentan nicht durch das Hauptsystem belegt sind. Diese Unterträger werden im Folgenden “freie Unterträger” genannt und entsprechen denjenigen, die das Overlay-System verwenden kann, ohne das Hauptsystem zu beeinträchtigen. Da Overlay-System und Hauptsystem vollkommen unabhängig voneinander arbeiten sollen, kann die Belegung nur durch eine Leistungsdichtemessung in der physikalischen Schicht des Overlay-Systems ermittelt werden. In diesem Moment dürfen keine weiteren Overlay-Stationen im Einzugsgebiet der messenden Station miteinander kommunizieren, da die von ihnen verwendeten Unterträger ansonsten fälschlicherweise als durch das Hauptsystem belegt identifiziert würden. Da weiterhin das Overlay-System als Ad-Hoc-System betrachtet wird, muss beachtet werden, dass die Station zum Zeitpunkt des Einschaltens keinerlei Kenntnisse über das Hauptsystem und dessen Belegung sowie die Topologie des Overlay-Netzwerks besitzt. Somit ist in jeder Overlay-Station eine eigenständige Messung nötig. Dies ist durchaus sinnvoll, zumal an jeder Position eine andere Belegung vorhanden sein kann.

In [18] wird ein analytisches Verfahren zur Bestimmung der Empfänger-Arbeitscharakteristiken beschrieben. Dabei wird ein Detektor hergeleitet, der basierend auf einem Schwellwertvergleich das betrachtete Hauptsystemteilband in belegte und unbelegte Teile klassifiziert. Die Herleitung des Algorithmus beruht auf dem Neyman-Pearson Kriterium. Hier soll nun eine erfolgreiche Messung mit Schwellwertvergleich auf physikalischer Schicht angenommen werden, so dass der Overlay-Station bekannt ist, welche Unterträger durch das Hauptsystem belegt sind. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass diese Belegung beliebig lange ihre Gültigkeit behält, muss der Detektionsvorgang zyklisch wiederholt werden. Dabei bleibt zunächst offen, wie häufig der Vorgang ausgeführt, welcher Zeitraum ihm eingeräumt und wodurch er gesteuert wird. Es muss ein Kompromiss

4 MAC Design und Hidden Station Problem

zwischen der Wiederholungsrate und der dafür notwendigen Beobachtungsdauer gefunden werden. Wird der Messvorgang sehr kurz gehalten bzw. nur in sehr großen Abständen wiederholt, verbleibt dem Overlay-System mehr Zeit zur Übertragung von Nutzdaten, da sich der Overhead verringert. Jedoch sinkt dabei die Verlässlichkeit der Detektion und somit erhöhen sich die möglichen wechselseitigen Interferenzen zwischen Overlay- und Hauptsystem. Höchste Priorität muss eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit des Hauptsystems haben, denn nur so kann die Existenz eines Overlay-Systems für das potentielle Hauptsystem attraktiv bzw. akzeptabel werden. Nach [18] sollte deshalb zu Beginn eine Entdeckungswahrscheinlichkeit P_E festgelegt werden, anhand derer versucht werden muss, die Falschalarmwahrscheinlichkeit P_F möglichst gering zu halten, um noch ausreichend freie Unterträger für das Overlay-System zu erhalten. Eine Verbesserung kann durch verteilte Detektion erreicht werden: Hierbei werden die Messungen der einzelnen Stationen kombiniert und ein gemeinsamer Belegungsvektor bestimmt. Es wird jedoch auch ersichtlich, dass im Falle eines Ad-Hoc Systems zumindest in der Initialisierungsphase von einem größerem P_F ausgegangen werden muss, da der vorgeschlagene Diversitätsansatz aufgrund fehlender Topologiekenntnisse und fehlender Infrastruktur scheitert. Es ist also damit zu rechnen, dass fälschlicherweise durch das Hauptsystem belegte Unterträger als freie Unterträger erkannt werden und umgekehrt. Das bedeutet, dass so lange erhöhte Interferenzen auftreten können, bis eine Overlay-Station ihre Nachbarstationen entdeckt hat und durch gegenseitigen Austausch der Belegungsvektoren die Diversität wieder ausgenutzt werden kann.

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

Nachdem eine Overlay-Station ihren Belegungsvektor bestimmt hat, kann sie anfangen mit anderen Stationen Kontakt aufzunehmen. Prinzipiell bedeutet dies, dass zunächst eine Broadcast-Nachricht verschickt wird, um von anderen Overlay-Stationen entdeckt werden zu können. Somit lernen die Stationen nach und nach ihre Nachbarn kennen. Um die Störungen auf das Hauptsystem zu minimieren, darf die Broadcast-Nachricht dabei nur auf den freien Unterträgern gesendet werden. Liegt nun im weiteren Verlauf ein konkreter Kommunikationswunsch einer benachbarten Station vor, müssen zunächst die gemeinsamen freien Unterträger bestimmt werden, da beide Overlay-Stationen in unterschiedlichen Belegungs-zonen liegen können. Nur so können die Interferenzen im Einzugsgebiet beider Stationen minimiert werden.

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

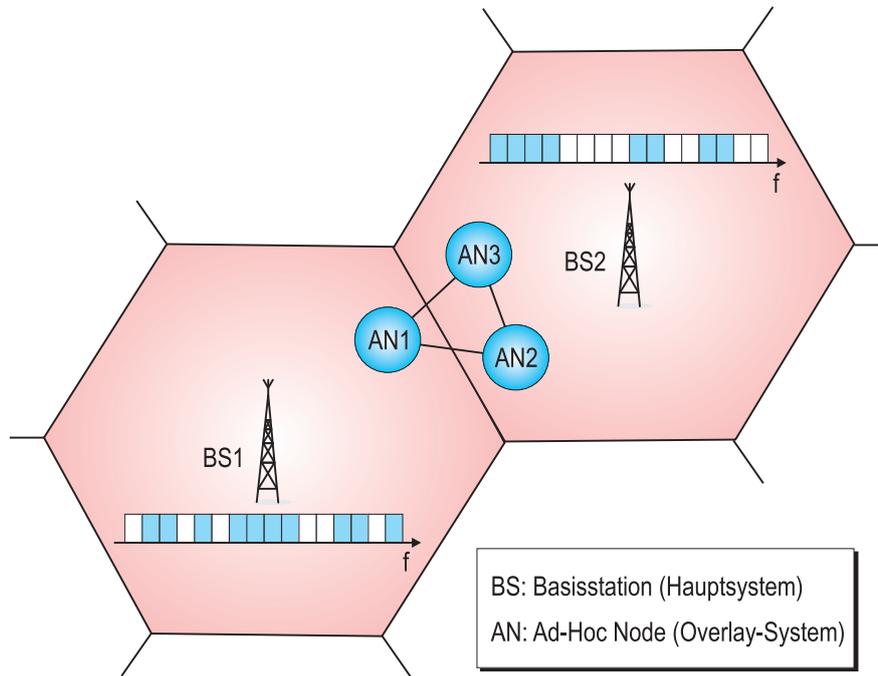


Abbildung 4.2: Drei Overlay-Stationen in zwei verschiedenen Belegungszone.

In Bezug auf die Ad-Hoc-Komponente sind von einer Overlay-Station also im Wesentlichen folgende Aufgaben zu erledigen:

1. Sammlung von Informationen über die Topologie des Overlay-Systems
2. Synchronisation der Belegungsvektormessungen innerhalb des Overlay-Systems
3. Ermittlung der gemeinsam verfügbaren Unterträger zwischen zwei Kommunikationspartnern

4.3.1 Initiale Koordination der verwendeten Unterträger

Zur Betrachtung der Initialisierungsphase soll nun angenommen werden, dass alle Stationen, die aufgrund ihrer Reichweite ein Ad-Hoc-Netz bilden können, zum gleichen Zeitpunkt aktiviert wurden und im ersten Schritt eine Belegungsvektormessung stattgefunden hat. Abbildung 4.2 veranschaulicht die beschriebene Situation.

Die Stationen versuchen nun also Informationen über ihre unmittelbare Umgebung zu sammeln. Dies geschieht durch die Beobachtung des Mediums. Solange jedoch keine der Stationen eine Nachricht aussendet, führt das Abhören zu keinem Erfolg. Es ist also unabdingbar, dass mindestens eine Station, z.B. Station

4 MAC Design und Hidden Station Problem

AN1, einen Broadcast aussendet. Dabei stellt sich die Frage, welche Unterträger für die Übertragung verwendet werden dürfen, da die Reichweite von AN1 bis in die Belegungszone BS2 hineinreicht. Aufgrund der Schwellenbestimmung des Belegungsvektors konnten aber die dort belegten Unterträger nicht ermittelt werden. Selbst wenn AN1 nur auf den gemessenen, freien Unterträgern diesen Broadcast sendet, um Interferenzen in der Belegungszone BS1 zu vermeiden, kann es letztlich zu Störungen in den benachbarten Gebieten, hier BS2, kommen. Dies lässt sich nicht vermeiden, denn aufgrund des Ad-Hoc-Ansatzes liegen den Stationen zu diesem Zeitpunkt keine Informationen vor, durch die diese Interferenzen vermieden werden könnten. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung eines zusätzlichen Kontrollkanals, über den Informationen über belegte Unterträger verteilt werden können.

4.3.2 Koordination der Belegungsmessung durch TDMA-basierte Zugriffsverfahren

Eine der wesentlichen Herausforderungen für ein Ad-Hoc Overlay-System ist, wie im vorigen Abschnitt dargestellt, die Koordination der Belegungslückendetektion in der physikalischen Schicht. Bereits existierende OFDM-basierte Standards, wie z.B. IEEE 802.11, verwenden häufig CSMA/CA. Ohne eine zentrale Instanz zur Koordination der Belegungslückendetektion ist dieses Zugriffsverfahren für Overlay-Systeme jedoch nicht geeignet. Deswegen soll nun ein Verfahren mit TDMA-Komponente betrachtet werden, da hier durch die vorgegebene Rahmenstruktur eine zeitliche Koordination des Zugriffs aller beteiligten Stationen gegeben ist.

4.3.2.1 Rahmenstruktur der MAC-Schicht

Wie für jedes TDMA-Zugriffsverfahren ist es zunächst notwendig einen TDMA-Rahmen zu bilden. Abbildung 4.3 zeigt die Struktur eines modifizierten Reservation-TDMA Rahmens. Reservation-TDMA verwendet im Gegensatz zu anderen TDMA-Verfahren nicht gleich lange Zeitschlitzze. Der Rahmen wird in zwei Blöcke unterteilt, die jeweils aus der gleichen Anzahl von Zeitschlitzzen bestehen. Die Zeitschlitzze im ersten Block sind jedoch deutlich kürzer als die des zweiten Blocks und werden deswegen Minislots genannt. Dabei ist jeder Minislot einem Datenslot zugeordnet und dient Reservierungs- und Bestätigungszwecken. Die Unterteilung in Minislots und Datenslots wird für die Rahmenstruktur des Ad-Hoc-Overlay-MAC-Protokolls übernommen. Jeweils der erste Zeitschlitz eines Blocks wird für

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

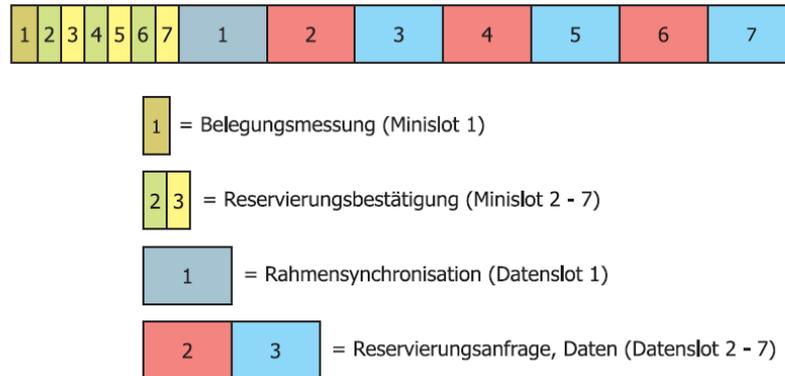


Abbildung 4.3: Aufbau eines MAC-Rahmens.

spezielle Zwecke verwendet: Die Belegungsmessung wird im ersten Minislot durchgeführt, während der erste Datenslot für Synchronisationszwecke genutzt wird.

4.3.2.2 Prinzipieller Ablauf des Verbindungsaufbaus

Basierend auf der erwähnten Rahmenstruktur folgt der Aufbau einer Verbindung zwischen mehreren Stationen prinzipiell folgendem Ablauf:

1. Alle Stationen messen ihren Belegungsvektor während des 1. Minislots.
2. Die Stationen überprüfen nun ihre Rahmensynchronisation und führen ggf. eine erste Synchronisation im 1. Datenslot (SYNC-Slot) durch.
3. Durch den Synchronisationsprozess ist jeder Station mindestens ein direkter Nachbar bekannt. Zu diesem wird anschließend versucht eine Verbindung aufzubauen, d.h. es soll ein Datenpaket z.B. für erste Routinginformationen o.ä. an ihn versendet werden. Dadurch entsteht der positive Nebeneffekt, dass alle benachbarten Knoten grundlegende Kenntnis über ihre direkte Umgebung erlangen. Bevor jedoch die gewünschten Daten übertragen werden können, müssen zunächst die gemeinsam verfügbaren Unterträger ermittelt werden. Der erste Schritt hierzu ist eine Reservierungsanfrage. Dazu wählt die Station zufällig einen freien Datenslot (Datenslots 2 - 7) aus.
4. Ist der gewählte Slot erreicht, wird versucht in einer Wettbewerbsphase auf den Slot zuzugreifen. Ist die Wettbewerbsphase erfolgreich, sendet die

4 MAC Design und Hidden Station Problem

Station auf allen freien Unterträgern (US = freie Unterträger des Senders) jeweils eine Reservierungsanfrage mit Sender- und Empfängeradresse aus.

5. Die Nachbarstationen im Leerlauf empfangen die Anfrage auf den Schnittmengen der jeweils freien Unterträger.
6. Die Empfänger-Station reserviert nun den entsprechenden Datenslot für eine exklusive Übertragung durch eine Bestätigungsnachricht im dazugehörigen Minislot auf den gemeinsam verfügbaren Unterträgern des nächsten Rahmens.
7. Alle direkten Nachbarstationen sehen die Reservierungsbestätigung auf den gemeinsamen Unterträgern.
8. Der Sender kann nun im reservierten Datenslot mit der eigentlichen Datenübertragung beginnen. Er besitzt ein exklusives Zugriffsrecht. Alle anderen Nachbarn sperren den Datenslot für ihre Kommunikation.

4.3.3 Rahmensynchronisation

Eine wesentliche Voraussetzung für TDMA-basierte Verfahren ist die zeitliche Synchronisation der Rahmen. Lässt sie sich in Systemen mit einer Infrastruktur relativ einfach durch die vorhandene Basisstation erfüllen, stellt im Gegensatz dazu die Rahmensynchronisation in Ad-Hoc-Systemen eine größere Herausforderung dar. Prinzipiell gibt es für ein solches Szenario zwei verschiedene Ansätze: Eine Möglichkeit besteht darin, von den vorhandenen Ad-Hoc-Stationen temporär und dynamisch einzelne Stationen auszuwählen und ihnen die Rolle eines Masters zuzuweisen, der die Rahmensynchronisation koordiniert. Beim zweiten Ansatz gibt es zwischen den Stationen auch temporär keine Unterschiede in deren Verhalten. Alle Stationen haben ein identisches Verhalten und die Rahmensynchronisation erfolgt implizit durch das angewandte Protokoll. In diesem Bericht wird insbesondere auf den ersten Ansatz eingegangen mit einer dynamischen Master / Slave Konfiguration eingegangen. Der zweite Ansatz wird zur Zeit untersucht und im 3. technischen Bericht präsentiert.

Die Stationen hören alle freien Unterträger nach Synchronisationsbursts zur Rahmensynchronisation ab und synchronisieren sich mit bereits aktiven Stationen. Wird bis zum Erreichen des SYNC-Slots kein Synchronisationsburst empfangen, nimmt die Station an, dass keine weiteren Stationen in der Umgebung aktiv sind. Die Station sendet deshalb von diesem Zeitpunkt an in jedem SYNC-Slot

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

einen Synchronisationsburst aus. Verfahren für eine Synchronisation bei einer nur teilweisen Verfügbarkeit von Unterträgern werden zur Zeit untersucht.

Das eben beschriebene Verfahren zur Rahmensynchronisation ist allerdings nur möglich, wenn die einzelnen Stationen bisher noch nicht synchronisiert waren, wovon im Allgemeinen jedoch nicht ausgegangen werden kann. Viel wahrscheinlicher ist es, dass eine Station aufgrund ihrer Bewegung den Einzugsbereich einer anderen Station verlässt, mit der sie zuvor synchronisiert war, und in den Bereich einer weiteren Station eintritt. Dabei ist es möglich, dass in beiden Stationen der Rahmen zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt beginnt. Um nun eine Rahmensynchronisation zwischen beiden Stationen durchzuführen, soll das in [19] beschriebene Verfahren angewandt werden. Hier wird ein Synchronisationsgeber (SYNC-Master) bestimmt, der den Rahmentakt vorgibt. Dieser SYNC-Master soll in regelmäßigen Abständen einen Synchronisationsburst auf den gemeinsamen Unterträgern aussenden, der zur Bestimmung des Rahmenbeginns dient. Abweichend zu [19] kann hier allerdings nicht davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Knoten im Netz bekannt ist. Vielmehr soll jeder Synchronisationsburst des Masters Informationen zur Anzahl seiner bekannten Nachbarn enthalten. Bei der Synchronisation können verschiedene Situationen auftreten, die in den folgenden Unterabschnitten betrachtet werden.

4.3.3.1 Synchronisation einer Station im Einzugsgebiet zweier SYNC-Master

Eine einfache Overlay-Station kann aufgrund der Bewegungen im Overlay-System zusätzlich in den Einzugsbereich eines bereits existierenden SYNC-Masters gelangen. Dabei empfängt sie nach einer gewissen Zeit den Synchronisationsburst des Masters. War die Station zuvor mit einem anderen Synchronisationsgebiet synchron, so kennt sie die Anzahl der in diesem Gebiet vorhandenen Stationen. Nun wird anhand der größeren Anzahl von Stationen entschieden, welches Synchronisationsgebiet sich anpassen soll. Bei einer identischen Größe der Gebiete wird eine zufällige Entscheidung getroffen.

Die Resynchronisation des kleineren Gebiets gestaltet sich folgendermaßen:

1. Die Station teilt dem SYNC-Master mit, dass seine Synchronisation angepasst werden muss und sendet dazu eine zum SYNC-Master asynchrone Nachricht (ASYNC), die eine entsprechende Aufforderung mit der Anzahl der seiner SYNC-Master Nachbarn, folgend auch kurz Nachbarzahl genannt, enthält. Bei der Übertragung wird mittels Carrier Sense versucht, eine Kollision mit anderen Nachrichten zu vermeiden.

4 MAC Design und Hidden Station Problem

2. Der Master teilt nun im nächsten SYNC-Burst seinerseits seinen Slaves mit, dass der Rahmenbeginn neu synchronisiert werden muss. Weiterhin hält er jede Kommunikation in seinem Gebiet an.
3. Die Slaves empfangen diese Nachricht und halten ebenfalls ihre Kommunikation an. Somit befinden sich alle Stationen in direkter Umgebung des Masters in einem Ruhezustand.
4. Nun sendet die neue Station bei Erreichen des SYNC-Slot eine Synchronisationsnachricht.
5. Im nächsten Schritt passt sich der Master an die neue Synchronisation an.
6. Anschließend verschickt er im ersten neuen SYNC-Slot einen Synchronisationsburst.
7. Nachdem sich auch die Slaves des Masters synchronisiert haben, sind beide Synchronisationsgebiete synchron und die Stationen können miteinander kommunizieren.

Der Ablauf einer solchen Resynchronisation ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

4.3.3.2 Synchronisation einer einzelnen Station bei 2-hop Entfernung eines neuen Masters

Hier soll nun die Situation betrachtet werden, in der zwei Slaves aus unterschiedlichen Synchronisationsgebieten in Folge von Bewegung aufeinander treffen und sich somit in gegenseitiger Sendereichweite befinden. Diese Stationen können nun eine Nachricht der neuen direkten Nachbarstation asynchron empfangen, d.h. hier versendet eine der beiden Stationen eine Nachricht an einen synchronen Nachbarn. Diese erreicht nun auch den neuen asynchronen Nachbarn, sofern sich dieser nicht auch gerade im Sendezustand befindet und sofern es gemeinsam genutzte Unterträger gibt. Bei der Ankunft der Nachricht kann der neue Nachbar feststellen, dass die Nachricht nicht synchron gesendet wurde, wenn

- das Paket über das Ende eines Slots hinausreicht. Dies ist bei Datennachrichten oder Reservierungsanfragen, die in einem Minislot ankommen immer der Fall. Aber auch Überhänge in Datenslots sind möglich.
- das Paket in einem Datenslot ankommt, jedoch eine Reservierungsnachricht ist.

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

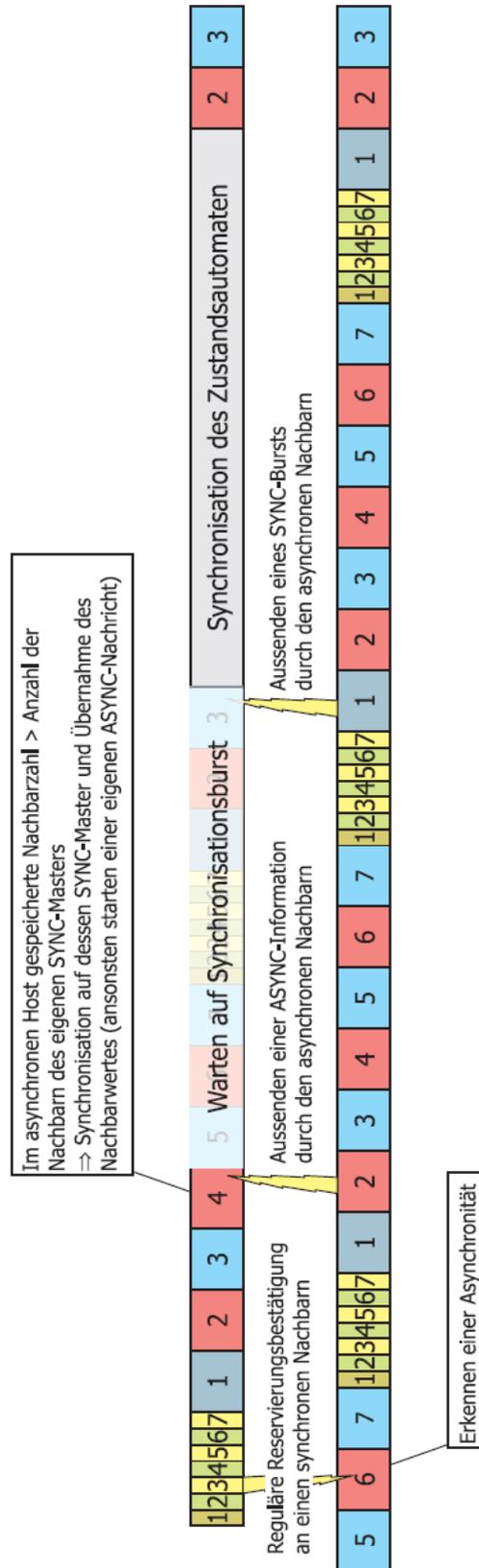


Abbildung 4.4: Ablauf einer Resynchronisation

4 MAC Design und Hidden Station Problem

Die Station versucht nun in einem zufällig gewählten freien Datenslot ihrerseits den asynchronen Partner mittels einer Nachricht über den Wert ihrer Nachbarzahl zu informieren. Bei der Wahl des Datenslots werden auch Slots als belegt betrachtet, für die eine Asynchronität festgestellt wurde. Somit können Kollisionen mit möglichen Datenübertragungen des neuen Nachbarn ebenfalls reduziert werden. Bei erfolgreichem Empfang der ASYNC-Informationsnachricht in der Gegenstelle kann diese nun wieder anhand der Nachbarzahl einen Mehrheitsentscheid durchführen. Bei Gleichheit wird wieder zufällig entscheiden.

Ist der Wert des asynchronen Nachbarn größer, so unterbricht die Station alle Übertragungen und wartet eine bestimmte Anzahl von Rahmen entsprechend der Nachbarzahl der ASYNC-Nachricht auf einen Synchronisationsburst durch die Gegenstelle. Diese hat gleichzeitig mit dem Versand der ASYNC-Information zufällig einen Folgerahmen ermittelt, in dem im Datenslot 1 eine SYNC-Nachricht übertragen wird. Die Verzögerung hat den Sinn, dass Kollisionen der Synchronisationsnachricht mehrerer asynchroner Partner vermieden werden sollen. Dies kann der Fall sein, wenn nicht nur eine Station die Asynchronität festgestellt hat, sondern mehrere Stationen im benachbarten bzw. neuen Synchronisationsgebiet zugleich. Dann ist es möglich, dass mehrere ASYNC-Nachrichten innerhalb eines Rahmens an diese Station versandt wurden. Somit wollen diese Stationen auch alle eine SYNC-Nachricht an die Station senden. Bei einem sofortigen Versand der SYNC-Nachricht im nächsten Datenslot 1 durch alle Stationen gleichzeitig würden alle Nachrichten kollidieren und die Synchronisation würde fehlschlagen.

1. Erreicht die Station nun ein solcher SYNC-Burst innerhalb der Wartezeit, so wird eine Neusynchronisation eingeleitet und weitere Nachrichten zunächst ignoriert. Ist die Synchronisation abgeschlossen, muss die Station, falls sie sich in einem bestehenden Synchronisationsgebiet befindet, eine Synchronisation des Masters einleiten.
2. Erreicht die Station in diesem Zeitraum keine SYNC-nachricht eines der neuen Nachbarn, geht sie wieder in die alte Synchronisation über. Kurz darauf wird in einem der neuen Nachbarn oder in der Station selbst wieder eine Asynchronität festgestellt und eine neuer Synchronisationsversuch eingeleitet.

Ist der Nachbarschaftswert in der asynchronen Informationsnachricht (ASYNC) kleiner, werden zwar auch in den folgenden Rahmen Synchronisationsnachrichten der asynchronen Nachbarn empfangen, diese werden jedoch nur dazu verwendet eine Synchronisation durch eine ASYNC-Nachricht entsprechend dieses Abschnitts auszulösen.

4.3 Detektion weiterer Overlay-Stationen in der Umgebung

Da bei diesem Verfahren viele Stationen (Master und Slaves) in Ruhezustände versetzt werden, ist es wichtig, dass diese nach einer gewissen Zeit der Inaktivität und einem Ausbleiben der neuen Synchronisationsnachricht wieder in einen normalen Betrieb übergehen.

4.3.4 Verbindungsaufbau und Koordination der gemeinsam verwendeten Unterträger

In diesem Abschnitt wird nun davon ausgegangen, dass die Rahmensynchronisation erfolgreich abgeschlossen ist und jede Station ihren eigenen Belegungsvektor kennt. Für den Verbindungsaufbau zwischen zwei Stationen wird eine modifizierte Variante von Reservation-TDMA verwendet. Folgende Schritte werden durchgeführt:

1. Der Sender bestimmt durch Beobachtung der MiniSlots und Datenslots die momentan zur Verfügung stehenden Datenslots und wählt einen aus.
2. Ähnlich wie bei CSMA/CA wird innerhalb des gewählten Datenslots jeweils auf den freien Unterträgern ein RTS (Request-to-Send) mit einem zufälligen Offset gesendet. Auf jedem Unterträger wird zusätzlich der Belegungsvektor des Senders übertragen. Der Offset wird so gewählt, dass das RTS-Paket innerhalb des Datenslots vollständig ankommt. Versuchen mehrere Stationen gleichzeitig auf den Datenslot zuzugreifen kann es zu Kollisionen kommen. In diesem Fall wird der Vorgang im nächsten Rahmen wiederholt.
3. Der Empfänger empfängt nun den RTS auf der Schnittmenge aus US und den eigenen freien Unterträgern UE und erhält so ebenfalls den Belegungsvektor des Senders. Auf den gemeinsamen freien Unterträgern und in dem zugehörigen Minislot wird schließlich ein CTS (Clear-to-Send) als Reservierungsbestätigung gesendet. Damit wissen alle umliegenden Stationen, dass dieser Slot zur Zeit für eine Übertragung reserviert ist.

Durch das Zusammenspiel von RTS und CTS können alle benachbarten Stationen die Übertragung wahrnehmen und ihrerseits die verwendeten Unterträger und Slots für eine eigene Übertragung auslassen.

4.4 Simulationsergebnisse

Die Simulationen wurden mit der zeitdiskreten Ereignis-Simulationssoftware OM-NeT++ [20] durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter angenommen:

Dauer eines Minislots	64 μ s
Dauer eines Datenslots	320 μ s
Datenslots pro Zeitrahmen	7
Dauer eines Rahmens	2.688 ms

Im Folgenden werden erste Ergebnisse für zwei verschiedene Szenarien dargestellt. Im ersten Szenario wird eine einfache Belegungszone mit fünf Overlay-Stationen betrachtet, im zweiten Szenario zwei Belegungszone mit insgesamt zehn Overlay-Stationen. Dabei versucht jede Station zu einer Nachbarstation eine Verbindung aufzubauen. Für die Simulationen wurde im ersten Schritt die mittlere Anzahl der belegten Unterträger variiert, eine Erweiterung der Implementierung bzw. Modellierung durch eine Markov-Kette wird zur Zeit durchgeführt. Des weiteren wurde für die Simulationen angenommen, dass die Overlay-Stationen sich nicht bewegen um ihre Komplexität zu reduzieren. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen sollen Bewegungsmodelle implementiert werden.

4.4.1 Fünf Stationen in einer Belegungszone

Abbildungen 4.5 und 4.6 zeigen die Paketverzögerung für das Szenario mit fünf Overlay-Stationen in einer Belegungszone, jeweils für unterschiedliche Datenraten sowie unterschiedliche mittlere Belegungen durch das Hauptsystem. Dabei wurden folgende Einstellungen verwendet:

Anzahl der Belegungszone	1
mittlere Anzahl der belegten Unterträger	25%,50%,75% und 82%
Wiederholungsrate der Belegungswechsel	1s
Anzahl der Overlay-Stationen	5
Geschwindigkeit der Stationen	0 m/s
Paketgröße	500 Bit
Anzahl der Unterträger	64

Man erkennt, dass generell die häufigste Verzögerungszeit bei ungefähr 5ms liegt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für den Aufbau einer Verbindung zwei Rahmen benötigt werden, die in diesem Fall eine Länge von ungefähr 1,6 ms haben. Um eine faire Verteilung der Ressourcen zu gewährleisten, wird eine Verbindung nach 25 Rahmen beendet und muss dann wieder neu aufgebaut

4.4 Simulationsergebnisse

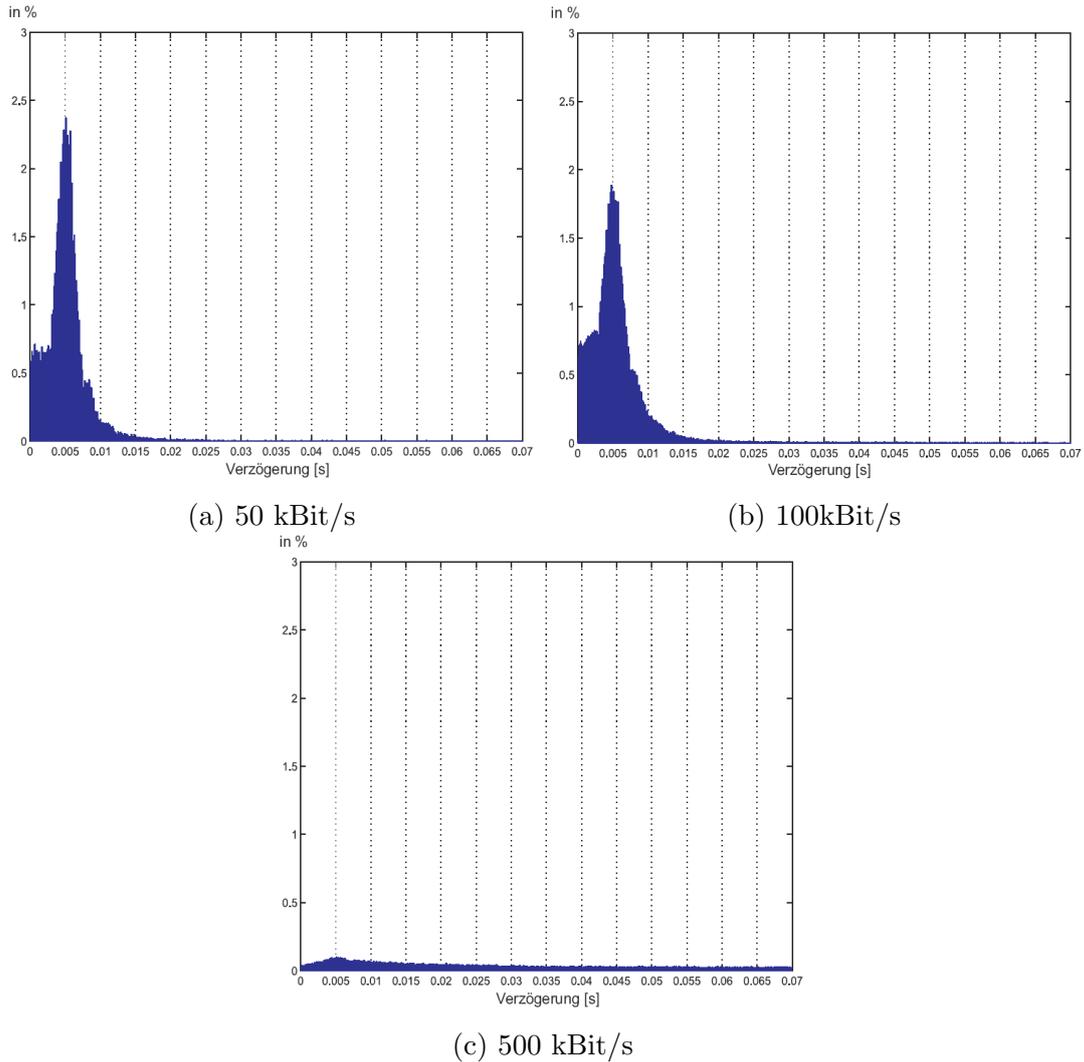


Abbildung 4.5: Histogramme der Paketverzögerungen für verschiedene Datenraten im Overlay-System.

werden. Man erkennt deutlich, dass bei zunehmender Datenrate die Verzögerungszeiten zunehmen und die Häufung bei 5ms relativ gesehen abnimmt. Stehen dem Overlay-System weniger Unterträger zur Verfügung, erhöht sich ebenfalls die Verzögerungszeit der Pakete. Hierbei spielt jedoch auch die Annahme eine Rolle, dass für eine Übertragung mindestens 10 Unterträger zur Verfügung stehen müssen. Ist dies nicht der Fall, findet keine Übertragung statt und das Paket wird zwischengespeichert.

4 MAC Design und Hidden Station Problem

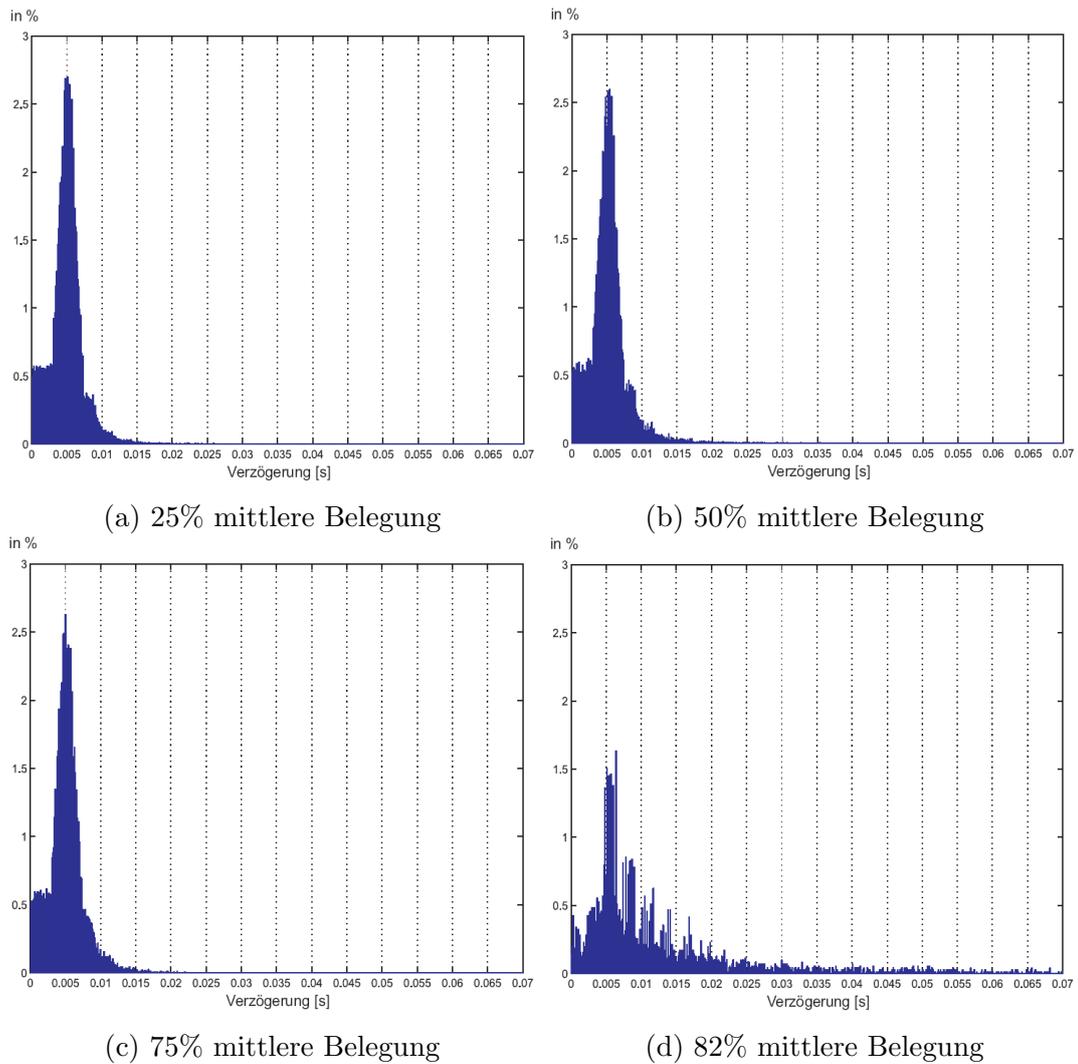


Abbildung 4.6: Histogramme der Paketverzögerungen für verschiedene mittlere Belegungen durch das Hauptsystem (1 Belegungszone, 5 Overlay-Stationen, Datenrate 50 kBit/s).

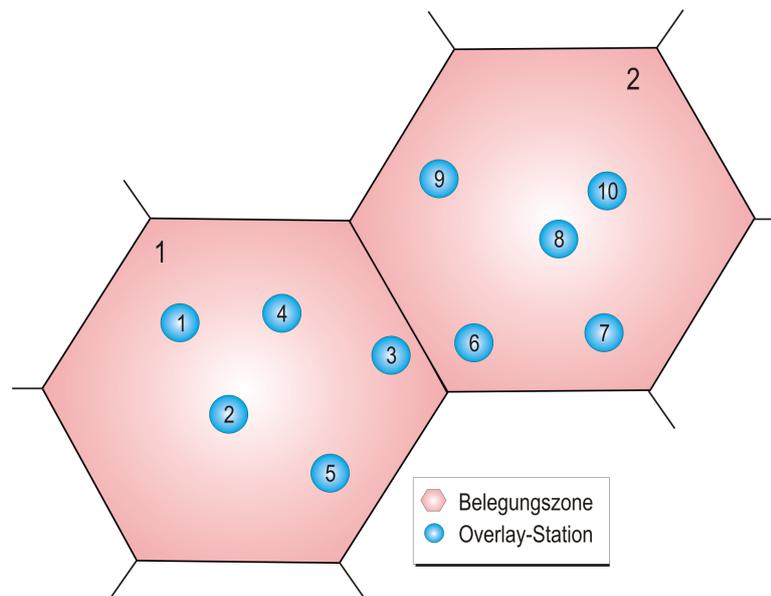


Abbildung 4.7: Szenario mit zehn Overlay-Stationen in zwei Belegungszone

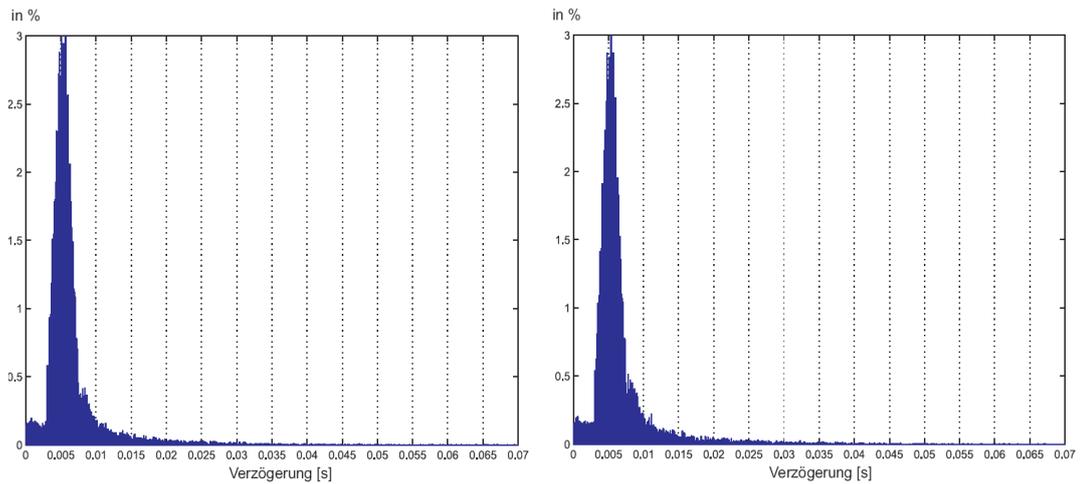
4.4.2 Zehn Stationen in zwei Belegungszone

Abbildung 4.7 zeigt das Szenario mit zwei Belegungszone und zehn Overlay-Stationen. Aufgrund der hohen Simulationszeiten wurde hier ein System mit nur 32 Unterträgern verwendet. Die benutzten Parameter sind:

Anzahl der Belegungszone	2
mittlere Anzahl der belegten Unterträger	25%, 50% und 75%
Wiederholungsrate der Belegungswechsel	1s
Anzahl der Overlay-Stationen	10
Geschwindigkeit der Stationen	0 m/s
Datenrate pro Verbindung	50 kbit/s (500 Bit Pakete)
Anzahl der Unterträger	32

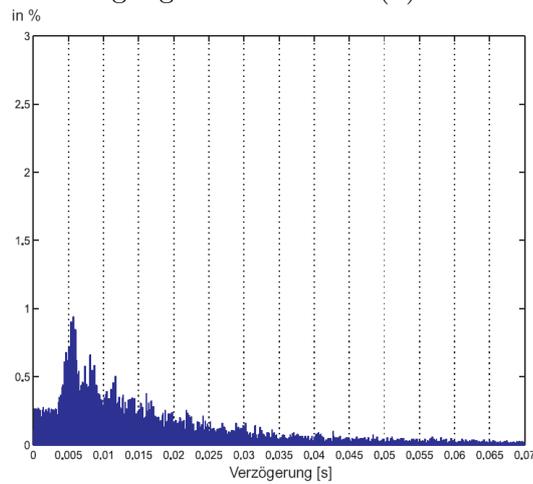
In Abbildung 4.8 sind die Verzögerungszeiten für verschiedene mittlere Belegungen aufgetragen. Ähnlich wie im ersten Szenario nehmen die Verzögerungen mit zunehmender Belegung durch das Hauptsystem zu. Da für die Übertragung zwischen zwei Stationen in verschiedenen Belegungszone nur die Schnittmenge der freien Unterträger zur Verfügung steht, treten jedoch schon bei einer kleineren mittleren Belegung höhere Verzögerungszeiten auf.

4 MAC Design und Hidden Station Problem



(a) 25% mittlere Belegung

(b) 50% mittlere Belegung



(c) 75% mittlere Belegung

Abbildung 4.8: Histogramme der Paketverzögerungen für verschiedene mittlere Belegungen durch das Hauptsystem (2 Belegungszone, 10 Overlay-Stationen).

5 Zusammenfassung

In diesem Bericht zum Abschluss des zweiten Projektjahres von TAKOKO werden die (Zwischen-)Ergebnisse aus den bisher behandelten APs vorgestellt.

AP 2 umfasst die Detektion der Frequenzlücken in AP 2.1, die Störminimierung auf das Hauptsystem (AP 2.3) sowie den Entwurf eines adaptiven COFDM Senders. In AP 2.1 wurden die Untersuchungen des ersten Projektjahres [4] um eine abstrakte Analyse der Belegungssituation mit Hilfe von Verkehrsmodellen ergänzt. Der Grundgedanke dabei ist, die Belegungslücken in verschiedenen Spectrum Pools zu beobachten und anhand der Messwerte für das Overlay-System relevante Parameter der Belegung durch das Hauptsystem abzuleiten, wie z.B. die Kohärenzzeit der Belegung oder die mittlere Anzahl verfügbarer Kanäle, anhand derer entschieden wird, welcher Pool am besten für die momentane Übertragungssituation geeignet ist.

Für den adaptiven COFDM Sender wurde eine OFDM-Rahmenstruktur entworfen, die sich flexibel an den aktuellen Belegungsvektor anpasst und Parameter für die in Kapitel 2.2 vorgestellten Algorithmen zur Störunterdrückung berücksichtigt. Die Verfahren zur Störminimierung konnten einfach in den adaptiven Sender integriert werden, ohne signifikante Einbußen in der Leistungsfähigkeit des Overlay-Systems zu verursachen. Der Vergleich von OFDM und MC-CDMA hat gezeigt, dass prinzipiell beide Verfahren für Overlay-Systeme geeignet sind. Bei starker Interferenz hat OFDM leichte Vorteile, weil es robuster gegenüber Einflüssen der Hauptsysteme ist. Bei etwas schwächerer Interferenz kommt der Spreizungsgewinn von MC-CDMA zum Tragen.

Insgesamt wurde in diesem Arbeitspaket [3] die physikalische Schicht eines OFDM-basierten Senders entworfen, der in der Lage ist, sich flexibel an die wechselnde Spektrumsbelegung in einem Overlay-System anzupassen. Es wurde gezeigt, dass die entwickelten Algorithmen die Anforderungen erfüllen, die konkreten Parameter müssen jedoch individuell an das jeweilige Overlay-System angepasst werden.

In Kapitel 3 werden die Zwischenergebnisse zu AP 3.2 präsentiert. Als Verfahren zur Störunterdrückung wurden bisher Notch-Filterung im analogen Zeitbe-

5 Zusammenfassung

reich, Fensterung im digitalen Zeitbereich betrachtet. Desweiteren wurden zwei Ansätze zur Kompensation des Leakage-Effekts im Frequenzbereich untersucht, die auf einer Rekonstruktion mit Hilfe von Beobachtungsträgern und Subtraktion des Interferenzsignals bzw. einer Kompensationsmatrix basieren. Erste Simulationen eines einzelnen Störsignals haben gezeigt, dass das Interferenzsignal mit einer Kombination aus Fensterung und matrix-basierter Leakage-Kompensation fast auf das Niveau des Rauschens reduziert werden kann. Im weiteren Projektverlauf muss die Leistungsfähigkeit der Verfahren zur Störminimierung in realistischeren Interferenzszenarien im Hinblick auf die Unterdrückung der Störungen und auf die Verbesserung der Bitfehlerrate im Overlay-System untersucht werden.

Die ersten Zwischenergebnisse zu AP 4, das sich mit der MAC-Schicht befasst, werden in Kapitel 4 vorgestellt. Hier wurde ein Overlay-System als Ad-Hoc System betrachtet, das besondere Anforderungen an das MAC-Protokoll stellt, da sowohl die Overlay- als auch die Ad-Hoc-Komponente berücksichtigt werden müssen. Zum einen müssen die Hauptsysteme in der Umgebung detektiert werden, um Interferenzen zu vermeiden. Eine besondere Herausforderung hierbei war die Koordination der spektralen Messungen ohne Basisstation. Zum anderen müssen auch andere Overlay-Stationen detektiert werden, um Informationen über die Topologie des Ad-Hoc Netzwerkes zu erhalten und eine Synchronisation innerhalb des Overlay-Systems zu ermöglichen. Durch die Integration eines RTS / CTS Handshakes ist die entworfene MAC-Struktur ebenfalls in der Lage versteckten Stationen eine Detektion von laufenden Übertragungen zu ermöglichen.

Die endgültigen Ergebnisse zu AP 3 und AP 4 werden in den Abschlussberichten zum jeweiligen AP zusammengefasst, die am Ende des dritten Projektjahres fällig sind.

6 Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind im Rahmen von TAKOKO entstanden:

U. Berthold, S. Brandes, F.K. Jondral and M. Schnell, “A Framework for Cross-layer Optimization in OFDM Based Overlay Systems,” in *Proc. of 11th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2006, pp. 253–257.

S. Brandes, L. Falconetti and M. Schnell, “Time and Frequency Domain NBI Mitigation in OFDM Based Overlay Systems,” in *Proc. of 11th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2006, pp. 51–55.

U. Berthold, S. Brandes, M. Schnell and F.K. Jondral, “Performance of OFDM-CDMA Overlay Systems Considering Inaccurate Allocation Vectors,” in *Proc. of 10th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2005, pp. 230–234.

U. Berthold, Friedrich K. Jondral, “Generalized System Model of an Overlay Environment,” in *2005 Software Defined Radio Forum Technical Conference (SDR '05)*, Orange County, CA, USA, November 2005.

U. Berthold, S. Brandes, M. Schnell and F.K. Jondral, “On Focus: OFDM Based Overlay Scenarios,” in *Proc. of the 15th IST Mobile and Wireless Communications Summit 2006*, Myconos, Greece, June 2006, CD-ROM.

S. Brandes and M. Schnell, “Sidelobe Suppression with Cancellation Carriers for OFDM Based Overlay Systems,” in *Proc. of 10th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2005, pp. 235–239.

S. Brandes, I. Cosovic and M. Schnell, “Sidelobe suppression in OFDM systems by insertion of cancellation carriers,” in *Proc. of IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC Fall '05)*, Dallas, TX, USA, September 2005.

S. Brandes, I. Cosovic and M. Schnell, “Reduction of Out-of-Band Radiation

6 Veröffentlichungen

in OFDM Based Overlay Systems,” in *IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)*, Baltimore, MD, USA, November 2005, pp. 662–665.

S. Brandes, I. Cosovic and M. Schnell, “Techniques for Ensuring Co-existence Between B-VHF and Legacy VHF Systems,” in *Proc. of 2006 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA, March 2006, CD-ROM.

S. Brandes, I. Cosovic and M. Schnell, “Reduction of Out-of-Band Radiation in OFDM Systems by Insertion of Cancellation Carriers”, in *IEEE Communication Letters*, Vol. 10, No. 6, pp. 420–422, 2006.

F. Capar and F.K. Jondral, “A Rayleigh Fading Channel Model for Multicarrier Systems: A Tapped Delay Line Model,” in *Proc. of 59th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2004)*, Milan, Italy, May 2004.

I. Cosovic, S. Brandes, M. Schnell and B. Haindl, “Physical Layer Design for a Broadband Overlay System for ATC communications in the VHF Band,” in *24th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2005)*, Washington D.C., USA, October 2005.

I. Cosovic, S. Brandes and M. Schnell, “A Technique for Sidelobe Suppression in OFDM Systems,” in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'05)*, St. Louis, MO, USA, November 2005.

I. Cosovic, S. Brandes and M. Schnell, “Subcarrier Weighting - A Method for Sidelobe Suppression in OFDM Systems”, in *IEEE Communication Letters*, Vol. 10, No. 6, pp. 444–446, 2006.

I. Cosovic, S. Brandes and M. Schnell, “Physical Layer Design Challenges of an OFDM Based Overlay System,” in *Proc. of the 15th IST Mobile and Wireless Communications Summit 2006*, Myconos, Greece, June 2006, CD-ROM.

Piotr Rykaczewski, Jörg Brakensiek, Friedrich K. Jondral, “Decision Directed Methods of I/Q Imbalance Compensation in OFDM Systems”, in *Proceedings of the IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC F'04)*, 26-29 September 2004, Los Angeles, CA, USA.

J. Schwarz and S. Brandes, “Leakage Compensation in an OFDM Overlay System

for DSB-AM Aircraft Radio,” in *Proc. of 10th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2005, pp. 240–244.

Timo Weiss, Stephan Maas, Friedrich K. Jondral, “Bandwidth-based Handoff Algorithms for Spectrum Pooling Systems”, in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) 2004*, 20-22 September, Port Louis, Mauritius.

Timo Weiss, Marcus Spiering, Friedrich K. Jondral, “Quality of Service in Spectrum Pooling Systems”, in *Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2004*, 5-8 September, Barcelona, Spain.

Eingereichte Artikel:

U. Berthold, S. Brandes, M. Schnell and F.K. Jondral, “OFDM based Overlay Systems - A Promising Approach for Enhancing Spectral Efficiency,” *submitted to IEEE Communications Magazine*, 2006.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Zander, “Radio resource management in future wireless networks: requirements and limitations,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 8, August 1997.
- [2] J. Mitola, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,” in *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, San Diego, CA, USA, November 1999, pp. 3–10.
- [3] S. Brandes and U. Berthold, “TAKOKO – Technischer Bericht 2: PHY Design Sender,” Juli 2006.
- [4] —, “TAKOKO – Zwischenbericht zum Arbeitsfortschritt 1,” Juli 2005.
- [5] U. Berthold and F. K. Jondral, “Guidelines for Designing OFDM Overlay Systems,” in *Proceedings of the IEEE 1st International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, Baltimore (MD), USA, November 2005, pp. 626–629.
- [6] T. Weiss, J. Hillenbrand, and F. Jondral, “A diversity approach for the detection of idle spectral resources in spectrum pooling systems,” in *48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau, 22.-25. September 2003*, 2003, p. CDROM.
- [7] U. Berthold, S. Brandes, M. Schnell, and F. K. Jondral, “Performance of OFDM-CDMA overlay systems considering inaccurate allocation vectors,” in *Proceedings of the 10th International OFDM-Workshop, Hamburg, September 2005*, pp. 230 – 234.
- [8] S. Brandes and U. Berthold, “TAKOKO – Technischer Bericht 1: Definition der Szenarien,” März 2005.
- [9] U. Berthold and F. Jondral, “Generalized system model of an overlay environment,” in *Proceedings of the 2005 Software Defined Radio Forum Technical Conference (SDR '05)*, Orange County (CA), USA, November 2005, p. CDROM.

- [10] I. Cosovic, S. Brandes, and M. Schnell, "A technique for sidelobe suppression in OFDM systems," in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom '05)*, St. Louis, MO, USA, November 2005.
- [11] S. Brandes, I. Cosovic, and M. Schnell, "Sidelobe suppression in OFDM systems by insertion of cancellation carriers," in *IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conf. (VTC Fall '05)*, Dallas, USA, Sept. 2005.
- [12] S. Brandes and M. Schnell, "Sidelobe suppression with cancellation carriers for OFDM based overlay systems," in *Proc. of 10th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2005, pp. 235–239.
- [13] S. Brandes, I. Cosovic, and M. Schnell, "Reduction of out-of-band radiation in OFDM based overlay systems," in *1st IEEE Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005)*, Baltimore, MD, USA, November 2005, pp. 662–665.
- [14] J. A. Bingham, *ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [15] L. de Clercq, M. Peeters, S. Schelstraete, and T. Pollet, "Mitigation of Radio Interference in xDSL Transmission," *IEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 3, pp. 168–173, 2000.
- [16] A. Redfern, "Receiver window design for multicarrier communication systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 5, pp. 1029–1036, 2002.
- [17] J. Schwarz and S. Brandes, "Leakage Compensation in an OFDM Overlay System for DSB-AM Aircraft Radio," in *Proc. of 10th International OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, August 2005, pp. 240–244.
- [18] J. Hillenbrand, T. A. Weiss, and F. K. Jondral, "Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 4, April 2005, pp. 349 – 351.
- [19] Y. Ofek, "Generating a Fault Tolerant Global clock using High Speed Control Signals for the MetaNet Architecture," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 5, pp. 2179–2188, May 1994.
- [20] A. Varga, *OMNet++, Discrete Event Simulation System (Version 3.1)*, Budapest University of Technology and Economics, 2005.

Literaturverzeichnis