

Konzeptionierung eines Spektrum-Management-Systems für heterogene Funklandschaften

von

Dipl.-Ing. Jörg Martin Schneider
geboren in Kaiserslautern

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

D 386

Datum der Einreichung: 27.09.2017

Datum der mündlichen Prüfung: 26.01.2018

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Hans D. Schotten

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Karl Jonas

Prüfungsvorsitzender: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Görges

Dekan des Fachbereiches EIT: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Zusammenfassung

Die Einführung des Internets hat einen stetigen Wandel des täglichen, sowie beruflichen Alltags verursacht. Hierbei ist eine deutliche Verlagerung in den virtuellen Raum (Internet) festzustellen. Zusätzlich hat die Einführung von sozialen Netzwerken, wie beispielsweise Facebook das Verlangen des Nutzers immer „online“ zu sein, deutlich verstärkt. Hinzu kommen die kontinuierlich wachsenden Datenmengen, welche beispielsweise durch Videostreaming (YouTube oder Internet Protocol Television (IPTV)) oder den Austausch von Bildern verursacht werden. Zusätzlich verursachen neue Dienste, welche beispielsweise im Rahmen vom Internet der Dinge und auch Industrie 4.0 eingeführt werden, zusätzliche Datenmengen. Aktuelle Technologien wie Long Term Evolution Advanced (LTE-A) im Funkbereich und Very High Speed Digital Subscriber Line (VDSL) beziehungsweise Glasfaser in kabelgebundenen Netzen, versuchen diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Angesichts der steigenden Anforderungen an die Mobilität des Nutzers, ist die Verwendung von Funktechnologien unabdingbar. In Verbindung mit dem stetig wachsenden Datenaufkommen und den ansteigenden Datenraten ist ein wachsender Bedarf an Spektrum, also freien, beziehungsweise ungenutzten Frequenzbereichen einhergehend. Für die Identifikation geeigneter Bereiche müssen allerdings eine Vielzahl von Parametern und Einflussfaktoren betrachtet werden. Einer der entscheidenden Parameter ist die entstehende Dämpfung im betrachteten Frequenzbereich, da diese mit steigender Frequenz größer wird und somit die resultierende Abdeckung bei gleichbleibender Sendeleistung sinkt. In aktuellen Funksystemen werden Frequenzen ≤ 6 GHz verwendet, da diese von den Ausbreitungseigenschaften geeignete Eigenschaften aufweisen. Des Weiteren müssen vorhandene Nutzungsrechte, Inhaber des Spektrums, Nutzungsbedingungen und so weiter im Vorfeld abgeklärt werden. In Deutschland wird die Koordination von der Bundesnetzagentur vorgenommen.

Aufgrund der Vielfalt der vorhandenen Dienste und Anwendungen ist es leicht ersichtlich, dass der Frequenzbereich ≤ 6 GHz stark ausgelastet ist. Neben den kontinuierlich ausgelasteten Diensten wie zum Beispiel Long Term Evolution (LTE) oder Digital Video Broadcast (DVB), gibt es spektrale Bereiche, die nur eine geringe zeitliche Auslastung aufweisen.

Markant hierfür sind Frequenzbereiche, welche beispielsweise ausschließlich für militärische Nutzung reserviert sind. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass sich dies nicht ausschließlich auf den zeitlichen Bereich beschränkt, vielmehr ergibt sich eine Kombination aus zeitlicher und räumlicher Beschränkung, da die Nutzung meist auf einen räumlichen Bereich eingrenzbar ist. Eine weitere Einschränkung resultiert aus der derzeit starren Vergabe von Frequenzbereichen. Die Zuteilung basiert auf langwierigen Antragsverfahren und macht somit eine kurzfristige variable Zuteilung unmöglich.

Um diesem Problem gerecht zu werden, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines generischen Spektrum-Management-Systems (SMSs) zur dynamischen Zuteilung vorhandener Ressourcen. Eine Anforderung an das System ist die Unterstützung von bereits bekannten Spektrum Sharing Verfahren, wie beispielsweise Licensed Shared Access (LSA) beziehungsweise Authorized Shared Access (ASA) oder Spectrum Load Smoothing (SLS). Hierfür wird eine Analyse der derzeit bekannten Sharing Verfahren vorgenommen und diese bezüglich ihrer Anwendbarkeit charakterisiert. Des Weiteren werden die Frequenzbereiche unterhalb 6 GHz hinsichtlich ihrer Verwendbarkeiten und regulatorischen Anforderungen betrachtet. Zusätzlich wird ein erweiterter Anforderungskatalog an das Spektrum-Management-System (SMS) entwickelt, welcher als Grundlage für das Systemdesign verwendet wird. Essentiell ist hierbei, dass alle (potentiellen) Nutzer beziehungsweise Inhaber eines spektralen Bereiches die Funktionalität eines derartigen Systems verwenden können. Hieraus ergibt sich bereits die Anforderung der Skalierbarkeit des Systems. Zur Entwicklung einer geeigneten Systemarchitektur werden bereits vorhandene Lösungsansätze zur Verwaltung und Speicherung von Daten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit verglichen und bewertet. Des Weiteren erfolgt die Einbeziehung der geografischen Position. Um dies adäquat gewährleisten zu können, werden hierarchische Strukturen in Netzwerken untersucht und auf ihre Verwendbarkeit geprüft. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Spektrum-Management-Systems (SMSs) durch Adaption bereits vorhandener Technologien und Verfahren, sowie der Berücksichtigung aller definierten Anforderungen.

Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung einer zentralisierten Broker-Lösung nicht geeignet ist, da die Verzögerungszeit einen exponentiell-förmigen Verlauf bezüglich der Anzahl der Anfragen aufweist und somit

nicht skaliert. Dies kann mittels einer Distributed Hash Table (DHT)-basierten Erweiterung überwunden werden ohne dabei die Funktionalität der Broker-Lösung einzuschränken. Für die Einbringung der Geoinformation hat sich die hierarchische Struktur, vergleichbar zum Domain Naming Service (DNS) als geeignet erwiesen.

Als Parameter für die Evaluierung hat sich die resultierende Zugriffszeit, das heißt die Zeit welche das System benötigt um Anfragen zu bearbeiten, sowie die resultierende Anzahl der versorgbaren Nutzer herausgestellt. Für die Simulation wird ein urbanes Areal mit fünf Gebäuden betrachtet. In der Mitte befindet sich ein sechsstöckiges Firmengebäude, welches in jedem Stockwerk mit einem Wireless Local Area Network Access Point (WLAN-AP) ausgestattet ist. Umliegend befinden sich vier Privathäuser, welche jeweils mit einem WLAN-AP ausgestattet sind. Das komplette Areal wird von drei Mobilfunkbetreibern mit je einer Basisstation (BS) versorgt. Als Ausgangspunkt für die Evaluierung erfolgt der Betrieb ohne SMS. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass eine Überlastung der Long Term Evolution Basisstationen (LTE-BSen) vorliegt (im Speziellen bei Betreiber A und B). Im zweiten Durchlauf wird das Szenario mit einem SMS betrachtet. Zusätzlich kommen in diesem Fall noch Mikro Basisstationen (Mikro-BSen) zum Einsatz, welche von der Spezifikation vergleichbar zu einem Wireless Local Area Network (WLAN) sind. Hier zeigt sich ein deutlich ausgewogeneres Systemverhalten. Alle BSen und Access Points (APs) befinden sich deutlich unterhalb der Vollastgrenze.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit belegen, dass ein heterogenes, zeitweise überlastetes Funksystem, vollständig harmonisiert werden kann. Des Weiteren ermöglicht der Einsatz eines SMSs die effiziente Verwendung von temporär ungenutzten Frequenzbereichen (sogenannte White- und Gray-spaces).

Schlagwörter - Spectrum Management System, Spectrum Sharing, Detektionsverfahren, Spektrumnutzungsregeln, Datenbankanbindungen und Datenorganisation, Hierarchische verteilte Architekturen, Zeitsynchronisierung, Plug and Play, Self-X, Distributed Hash Tables, Bootstrapping

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation und Ziele der Arbeit | 4 |
| 1.1.1 | Parameter | 6 |
| 1.1.2 | Anforderungen | 6 |
| 1.1.3 | Zielsetzung | 8 |
| 1.2 | Aufbau der Arbeit | 10 |
| 1.3 | Beiträge | 11 |
| 2 | Problemstellung und Methodik | 13 |
| 2.1 | Anwendungsspezifische Anforderungen | 16 |
| 2.1.1 | FM 52 und FM 53 | 17 |
| 2.1.2 | International Mobile Telecommunications | 20 |
| 2.1.3 | Program Making and Special Event | 21 |
| 2.1.4 | Global System for Mobile Communications (GSM)- Rail | 22 |
| 2.1.5 | Industrial, Scientific, and Medical Band | 23 |
| 2.1.6 | Zusätzliche Anforderungen | 23 |
| 2.1.7 | Zusammenfassung der Anforderungen | 24 |
| 2.2 | Analyse benötigter Funktionalitäten | 26 |
| 2.2.1 | Architektur | 27 |
| 2.2.1.1 | Skalierbarkeit | 28 |
| 2.2.1.2 | Frequenzunabhängigkeit | 28 |
| 2.2.2 | Schnittstellen | 31 |
| 2.2.3 | Protokolle | 32 |
| 2.2.4 | Validierung | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Fazit | 33 |
| 3 | Grundlagen zur dynamischen Spektrumsnutzung | 35 |
| 3.1 | Stand der Technik | 39 |
| 3.1.1 | Zentralisierte Herangehensweise | 43 |
| 3.1.2 | Verteilte Herangehensweise | 43 |
| 3.2 | Verfahren zur Vergabe von Frequenzbereichen | 44 |
| 3.2.1 | Handel mit Spektrum | 44 |
| 3.2.2 | Regelbasierte Auswahl | 45 |
| 3.2.3 | Verfahren zur dynamischen Frequenzallokation | 46 |
| 3.2.3.1 | Opportunistischer Ansatz | 48 |
| 3.2.3.2 | Verhandlungs-basierter Ansatz | 48 |
| 3.2.3.3 | Ankündigungs-basierter Ansatz | 49 |
| 3.2.3.4 | Mehrdimensionaler Ansatz | 49 |
| 3.2.4 | Implementierungsansätze | 50 |
| 3.2.4.1 | ASA und LSA | 50 |
| 3.2.4.2 | Co-Primary Shared Access und Licensing Light | 57 |
| 3.2.4.3 | Secondary Horizontal Sharing Access | 57 |
| 3.2.4.4 | Unlicensed Shared Access | 57 |
| 3.2.4.5 | Unlicensed Primary Shared Access | 58 |
| 3.2.4.6 | Spectrum Load Smoothing (SLS) | 58 |
| 3.2.4.7 | Licensed Assisted Access (LAA) | 63 |
| 3.2.5 | Resultierende Möglichkeiten aus Sharing-Verfahren | 64 |
| 3.3 | Themenverwandte Projekte | 65 |
| 3.4 | Existierende Lösungen für Spektrum-Management | 67 |
| 3.4.1 | Definition Kontext und Kontextmanagement | 67 |
| 3.4.2 | Kontext-sensitive und Kontext-Management- Systeme | 70 |
| 3.4.3 | Architekturen und Implementierungen | 73 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.4.3.1 | Zentralisierte Systeme | 73 |
| 3.4.3.2 | Verteilte Systeme | 75 |
| 3.4.4 | Implementierung von Peer to Peer (P2P) Netzwerken | 78 |
| 3.4.4.1 | Gnutella | 79 |
| 3.4.4.2 | Content Addressable Network | 80 |
| 3.4.4.3 | Chord | 81 |
| 3.4.4.4 | Pastry | 83 |
| 3.4.4.5 | Vergleich der Implementierungen | 85 |
| 3.5 | Zusammenfassung und Fazit | 85 |
| 4 | Architektur und Aufbau | 87 |
| 4.1 | Vergleich Kontext-Management-Architekturen | 87 |
| 4.2 | Zentralisierte Spektrum-Management-Architektur | 90 |
| 4.3 | Verteilte Spektrum Management Architektur | 100 |
| 4.3.1 | Organisation nach geografischer Lage | 102 |
| 4.3.2 | Organisation im Frequenzbereich | 103 |
| 4.3.3 | Schnittstellen | 108 |
| 4.4 | Fazit | 109 |
| 5 | Protokolle und Algorithmen | 113 |
| 5.1 | Adaptive Selektion des Sharing-Verfahrens | 113 |
| 5.1.1 | Anfrage von Spektrum | 114 |
| 5.1.2 | Lizenzierte Frequenzbereiche | 115 |
| 5.1.3 | Nicht-lizenzierte Frequenzbereiche | 116 |
| 5.2 | Detektionsverfahren | 124 |
| 5.3 | Protokolle | 131 |
| 5.3.1 | Chord Protokoll | 132 |
| 5.3.1.1 | Bootstrap Protokoll | 133 |
| 5.3.1.2 | Datenredundanz | 134 |
| 5.3.1.3 | Zeitsynchronisation | 135 |
| 5.4 | Multilayer Struktur | 146 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.5 | Fazit | 148 |
| 6 | Evaluierung | 151 |
| 6.1 | Beschreibung des Anwendungsfalls | 152 |
| 6.2 | Beschreibung der Szenarien | 153 |
| 6.3 | Systeme ohne SMS | 159 |
| 6.4 | Systeme mit SMS | 165 |
| 6.5 | Fazit | 175 |
| 7 | Gesamtergebnis und Ausblick | 177 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 177 |
| 7.2 | Ergebnisse | 179 |
| 7.3 | Fazit | 179 |
| 7.4 | Ausblick | 180 |
| A | Aufbau der Datenbanken | 199 |
| A.1 | Spektrums Datenbanken | 199 |
| A.1.1 | Lizenzierte Frequenzbereiche | 200 |
| A.1.2 | Nicht lizenzierte Frequenzbereiche | 201 |
| A.2 | Geolocation Datenbanken | 202 |
| A.3 | Spektrum Usage Rules Datenbank | 203 |
| A.4 | Einbindung in das SMS | 203 |
| B | Loadbalancing | 205 |
| B.1 | Einbindung eines Knotens | 205 |
| B.2 | Lastausgleich innerhalb des Systems | 206 |
| C | Spectrum Markup Language und Data Control Language | 209 |
| C.1 | Spectrum Markup Language | 209 |
| C.2 | Data Control Language | 210 |

| | |
|------------------------------|------------|
| D Bootstrapping | 213 |
| E Programmablaufpläne | 215 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Prinzipieller Aufbau einer CR-basierten Architektur | 4 |
| 1.2 | Exemplarische zeitabhängige Frequenzbelegung für einen festen Ort | 5 |
| 1.3 | Exemplarische Frequenzbelegung für CDMA basierte Systeme | 5 |
| 1.4 | Einflüsse eines dynamischen Spektrum Managements auf beteiligte Komponenten | 7 |
| 2.1 | Methodische Herangehensweise | 14 |
| 2.2 | Analyse und Extraktion der Anforderungen | 16 |
| 2.3 | Dreistufige Herangehensweise zur Freigabe von Spektrum | 17 |
| 2.4 | Konzept einer Geo-location Datenbank | 20 |
| 3.1 | Belegung des 2,3 GHz Spektrums in Frankreich | 36 |
| 3.2 | Übersicht der Frequenz-Vergabeverfahren | 36 |
| 3.3 | Referenz-Terminologie | 38 |
| 3.4 | Nationale Gesetzgebung zur Frequenzzuteilung | 39 |
| 3.5 | Mögliche Zugriffsverfahren für lizenzierte Spektralbereiche | 42 |
| 3.6 | Rechte und Pflichten eines Lizenznehmers | 44 |
| 3.7 | Darstellung der Effizienz verschiedener Zugriffsverfahren bezogen auf resultierende Technologie-Neutralität | 47 |
| 3.8 | LSA Systemaufbau | 52 |
| 3.9 | ETSI Systemarchitektur für LSA | 53 |
| 3.10 | ETSI High-Level Abstraktion und funktionales Mapping | 54 |
| 3.11 | Möglicher LSA Systemaufbau | 55 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.12 | Spektrumsnutzung mittels SLS am Beispiel von drei IEEE 802.11a Kanälen im 5 GHz Bereich | 60 |
| 3.13 | Prinzip des sogenannten Spectrum Load Smoothing im Zeitbereich über einen kompletten Frame | 61 |
| 3.14 | Iteratives Spectrum Load Smoothing mit einem adaptiven Anteil von neu zugeteilten Ressourcen | 63 |
| 3.15 | CoMoRa Gesamtkonzept | 65 |
| 3.16 | Aufbau einer Broker-basierten Middleware-Struktur | 74 |
| 3.17 | Eigenschaften von Client-Server und Peer-to-Peer Strukturen | 77 |
| 3.18 | Topologie eines CAN-Netzes mit fünf Knoten | 81 |
| 3.19 | Schematische Darstellung eines Chord Ringes mit 7 Knoten | 82 |
| 3.20 | Pastry Knoten (ID 10233102, $b = 4$ und $l = 8$) | 84 |
| 4.1 | Ablauf der Entwicklung des Architekturdesigns | 89 |
| 4.2 | Erweiterungen des Architekturdesigns | 90 |
| 4.3 | Suchanfrage bei einer übergebenen PolygonID oder Ort | 98 |
| 4.4 | Architektur einer SME inklusive aller benötigten Schnittstellen | 100 |
| 4.5 | Verzögerungsverhalten eines zentralisierten Systems | 101 |
| 4.6 | Aufbau einer Baumstruktur zur Datenorganisation im verteilten Spektrumsmanagement | 103 |
| 4.7 | Abbildungsvorschriften zwischen einem 2^{160} Bit Adressraum und dem Frequenzbereich | 106 |
| 4.8 | Funktionsweise der Redundanzzeugung mittels Einbringung einer zweiten Adressierungsebene | 107 |
| 4.9 | Schnittstellen einer SME einer verteilten Architektur | 109 |
| 5.1 | Ermittlung der Lizenzierung | 114 |
| 5.2 | Ermittlung des Sharing-Verfahrens | 116 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.3 | Systemanbindung von DUs | 117 |
| 5.4 | Leistung in dBm der WLAN Kanäle 1 bis 13 | 118 |
| 5.5 | Belegungsmuster der WLAN Kanäle 1 bis 13 | 119 |
| 5.6 | Prinzipieller Aufbau zur Erkennung von periodischen Belegungsmustern | 121 |
| 5.7 | Spektrum Belegungsmuster der WLAN Kanäle 3, 5, 7 und 12 | 121 |
| 5.8 | DFT Ergebnisse der WLAN Kanäle 3, 5, 7 und 12 | 123 |
| 5.9 | Vergleich der Komplexität und der Genauigkeit der vorgestellten Detektionsverfahren | 130 |
| 5.10 | Auswahlverfahren für einen geeigneten Detektionsalgorithmus | 131 |
| 5.11 | Ablauf des Bootstrap-Vorgangs | 133 |
| 5.12 | Aufbau eines SME-SMs | 135 |
| 5.13 | Chord Ring mit acht Knoten und den zugehörigen Fingertables | 137 |
| 5.14 | PariSync Nachrichten Struktur | 138 |
| 5.15 | Kommunikation im IEEE 1588 Protokoll | 139 |
| 5.16 | Abweichung vier Knoten | 140 |
| 5.17 | RTT-Verteilung des T-Online Servers | 141 |
| 5.18 | Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion | 143 |
| 5.19 | PariSync - Synchronisierungsintervall: eine Stunde | 144 |
| 5.20 | PariSync - Synchronisierungsintervall: drei Stunden | 144 |
| 5.21 | PariSync - Synchronisierungsintervall: 24 Stunden | 145 |
| 5.22 | Zusammenhang zwischen Synchronisierungsintervall und resultierender maximaler Abweichung | 146 |
| 5.23 | Zusammenhang zwischen der geografischen und hierarchischen Organisation | 147 |
| 6.1 | Simuliertes Areal mit fünf Gebäuden | 152 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.2 | Schematischer Aufbau des Simulators | 154 |
| 6.3 | Durchsatz unter idealen Bedingungen für die vier betrachteten Zustände | 156 |
| 6.4 | Profil des Nutzerverhaltens bei geringer Verwendung . . | 157 |
| 6.5 | Profil des Nutzerverhaltens bei durchschnittlicher Verwendung | 158 |
| 6.6 | Profil des Nutzerverhaltens bei häufiger Verwendung . . | 158 |
| 6.7 | Tageszeit abhängige Gewichtung des Nutzerverhaltens . . | 159 |
| 6.8 | Auslastung der LTE-BSen ohne SMS | 161 |
| 6.9 | Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS1 | 162 |
| 6.10 | Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS2 | 162 |
| 6.11 | Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS3 | 163 |
| 6.12 | Auslastung der firmeninternen WLAN-APs | 164 |
| 6.13 | Auslastung der privaten WLAN-APs | 165 |
| 6.14 | Häufigkeit der benötigten Anzahl von Hops bei 100 Anfragen | 167 |
| 6.15 | Maximale Verzögerung bei 100 Anfragen | 168 |
| 6.16 | Auslastung der LTE-BSen mit SMS | 170 |
| 6.17 | Anzahl der zurückgewiesenen Anfragen | 171 |
| 6.18 | Auslastung der firmeneigenen WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs | 172 |
| 6.19 | Auslastung der privaten WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs | 173 |
| 6.20 | Auslastung der Micro-Basisstationen unter Verwendung eines SMSs | 174 |
| 7.1 | Exemplarischer Aufbau eines SMSs im I4.0-Umfeld | 182 |
| A.1 | Schematischer Aufbau des Datenbankensystems | 199 |
| A.2 | Auszüge einer Datenbank zur Zuordnung der Frequenzbereiche | 200 |

| | | |
|-----|---|-----|
| A.3 | Schematischer Aufbau der Datenbankanbindung an eine SMS | 204 |
| B.1 | Einbindung einer zusätzlichen SME | 205 |
| B.2 | Programmablaufplan zur SME Einbindung | 206 |
| B.3 | Loadbalancing innerhalb des Netzwerks | 207 |
| C.1 | Data Entry in SpectrumML | 209 |
| C.2 | Geographical Location Entry in SpectrumML | 209 |
| C.3 | Registration Entry in SpectrumML | 209 |
| C.4 | Response Entry in SpectrumML | 210 |
| C.5 | SpectrumSensingData Entry in SpectrumML | 210 |
| C.6 | Type Entry in SpectrumML | 210 |
| C.7 | Data Control Language Nachrichtenstruktur | 211 |
| D.1 | Bootstrapping Prozess | 213 |
| E.1 | Programmablaufplan der Main Klasse | 215 |
| E.2 | Programmablaufplan einer Basisstation | 216 |
| E.3 | Programmablaufplan eines Clients | 217 |
| E.4 | Programmablaufplan des SMSs | 218 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Implementierungsanforderungen an eine Geo-Location-Datenbank aus dem ECC-Report 186 | 19 |
| 2.2 | Anforderungen an ein universelles SMS | 25 |
| 2.3 | Beschreibung geeigneter Verfahren zum Spectrum Sharing | 26 |
| 2.4 | Relevanz der Einflussparameter auf die Zugriffsgeschwindigkeit in den drei Szenarien | 31 |
| 3.1 | Bewertung der Sharing-Verfahren hinsichtlich der Szenarien | 64 |
| 3.2 | Nachrichtentypen des GNUTELLA-Protokolls | 79 |
| 3.3 | Eigenschaften von P2P Implementierungen | 85 |
| 4.1 | Vergleich der verschiedenen Architekturen und deren Eigenschaften | 88 |
| 4.2 | Anforderungen an ein universelles Spektrum-Management- System | 92 |
| 4.3 | Vergleich der verschiedenen Architekturen und deren funktionalen Eigenschaften | 94 |
| 4.4 | Typen von Polygonzügen | 97 |
| 4.5 | Übergabeparameter bei Datenabfrage | 99 |
| 4.6 | Bewertung relevanter DHT Implementierungen | 104 |
| 4.7 | SHA-1 Frequenz-Hashing | 105 |
| 4.8 | Regeln für die Kommunikation zwischen Schichten | 108 |
| 4.9 | Bewertung der Architektur | 111 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Parameter zur Spektrumsanfrage | 114 |
| 5.2 | Bewertung der Anwendbarkeit von Sharingverfahren bezogen auf die Lizenzierung | 115 |
| 5.3 | Analyseverfahren | 119 |
| 5.4 | Bewertung von DFT und AKF zur Belegungsdetektion . | 124 |
| 5.5 | Verwendete Simulationsparameter | 142 |
| 5.6 | Bewertung der Architektur | 149 |
| 6.1 | LTE Frequenzen | 153 |
| 6.2 | Randbedingungen | 155 |
| 6.3 | Initialisierungsparameter für p_{idle} | 157 |
| A.1 | Datenbank zur Zuordnung der Frequenzbereiche | 200 |
| A.2 | Aufbau der Datenbank für lizenzierte Frequenzbereiche . | 201 |
| A.3 | Aufbau der Datenbank für nicht lizenzierte Frequenzbereiche | 202 |
| A.4 | Aufbau der Geolocation Datenbank | 202 |
| A.5 | Aufbau der Spektrum Usage Rules Datenbank | 203 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| ADEL | Advanced Dynamic Spectrum 5G mobile networks Employing Licensed shared access |
| AG | Arbeitsgruppe |
| AKF | Autokorrelationsfunktion |
| AP | Access Point |
| ASA | Authorized Shared Access |
| AWGN | Additive White Gaussian Noise |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie |
| BNetzA | Bundesnetzagentur |
| BS | Basisstation |
| BWA | Broadband Wireless Access |
| CAF | Cyclic Autocorrelation Function |
| CAN | Content Addressable Network |
| CAPEX | CAPital EXpenditure |
| C-Cast | Context Casting |
| CCIR | Comité Consultatif International des Radiocommunications |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CEPT ECCV | Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications European Conference on Computer Vision |

| | |
|------------------|---|
| CF | Cycle Frequencies |
| CoBrA | Context Broker Architecture |
| CoMoRa | Cognitive Mobile Radio |
| ContextML | Context Markup Language |
| C-PMSE | Cognitive Program Making and Special Events |
| CR | Cognitive Radio |
| CS-CRS | Correspondence Group on Cognitive Radio |
| CSMA/CD | Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection |
| CTS | Clear to Send |
| CxB | Context Broker |
| DB | Datenbank |
| DC | Direct Current |
| DCL | Data Control Language |
| DCS | Dynamic Channel Selection |
| DECT | Digital Enhanced Cordless Telecommunications |
| DFS | Dynamic Frequency Selection |
| DFT | Diskrete Fourier Transformation |
| DHT | Distributed Hash Table |
| DNS | Domain Naming Service |
| DSA | Dynamische Spektrums Allokation |
| DSL | Digital Subscriber Line |
| DTT | Digital Terrestrial Television |
| DU | Decision Unit |
| DVB | Digital Video Broadcast |

| | |
|------------------|---|
| DVB-T | Digital Video Broadcast-Terrestrial |
| ECC | Electronic Communications Committee's |
| E-GSM-R | Extended-GSM-R |
| EIRP | Equivalent Isotropically Radiated Power |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| FAR | Frequency Agile Radio |
| FCC | Federal Communications Commission |
| G-LAB | German Lab |
| GLDB | Geo-Location Database |
| GPS | Global Positioning System |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| GSM-R | Global System for Mobile Communications – Rail(way) |
| HTTP | Hypertext Transfer Protocol |
| HTTP REST | Hypertext Transfer Protocol Representational State Transfer |
| ID | Identifier |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IMT | International Mobile Telecommunications-Advanced |
| IP | Internet Protocol |
| IPTV | Internet Protocol Television |
| ISM | Industrial Scientific and Medical |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ITU | International Telecommunication Union |

| | |
|-----------------|--|
| ITU-R | International Telecommunication Union - Radiocommunication |
| I4.0 | Industrie 4.0 |
| Java EE | Oracle Java Enterprise Edition |
| KMS | Kontext Management System |
| kogLTE | Kognitiv LTE |
| KPI | Key Performance Indicator |
| KUSZ | Kognitives IR-UWB-System für zuverlässige Echtzeitanwendungen in der Automatisierungstechnik |
| LAA | Licensed Assisted Access |
| LBT | Listen before Talk |
| LoS | Line-of-Sight |
| LSA | Licensed Shared Access |
| LSRAI | LSA Spectrum Resource Availability Information |
| LTE | Long Term Evolution |
| LTE-A | Long Term Evolution Advanced |
| LTE-BS | Long Term Evolution Basisstation |
| LT-Sync | Lightweight Time Sync |
| M2M | Machine-to-Machine |
| MFCN | Mobile/Fixed Communication Networks |
| Mikro-BS | Mikro Basisstation |
| MNO | Mobile Network Operator |
| MoCA | Mobile Collaboration Architecture |
| NoU | Number of Users |

| | |
|--------------|--|
| NRA | National Regulatory Authorities |
| NSN | Nokia Solutions and Networks |
| NTP | Network Time Protocol |
| NTFA | National Table of Frequency Allocations |
| OASIS | Open Archival Information System |
| OPEX | OPERating EXpenditure |
| OSI | Open Systems Interconnection Model |
| P2P | Peer to Peer |
| PACE | Pervasive, Autonomic, Context-aware Environments |
| PDA | Personal Digital Assistent |
| PDB | Policy Data Base |
| PHY | Physical Layer |
| PMR | Professional Mobile Radio |
| PMSE | Program Making and Special Events |
| PN | Primär-Nutzer |
| PSD | Power Spectral Density |
| PTP | Precision Time Protokolle |
| QoS | Quality of Service |
| RCSM | Reconfigurable Context-Sensitive Middleware for Pervasive Computing |
| RegTP | Deutsche Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post |
| RPC | Remote Procedure Calls |
| RSPG | Radio Spectrum Policy Group |

| | |
|---------------|---|
| RSS | Received Signal Strength |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| RTS | Request to Send |
| RTT | Round trip time |
| SDR | Software Defined Radio |
| SHA | Secure Hash Algorithm |
| SLS | Spectrum Load Smoothing |
| SMA | Spektrum-Management-Architektur |
| SME | Spektrum-Management-Einheit |
| SME-SM | Spektrum Management Einheit-Speicher Manager |
| SMS | Spektrum-Management-System |
| SMSs | Spektrum-Management-Systems |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| SML | Spectrum Markup Language |
| SN | Sekundär-Nutzer |
| SOAP | Simple Object Access Protokoll |
| SPICE | Service Platform for Innovative Communication Environment |
| TD-LTE | Time Division Long Term Evolution |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| TTL | Time to Live |
| UC | Use-Case |
| UHF | Ultra High Frequency |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| UNII | Unlicensed National Information Infrastructure |

| | |
|----------------|--|
| USRP | Universal Software Radio Peripheral |
| UWB | Ultra-wideband |
| VDSL | Very High Speed Digital Subscriber Line |
| WG FM | Working Group Frequency Management |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WLAN-AP | Wireless Local Area Network Access Point |
| WRC | World Radio Conference |
| XML | Extensible Markup Language |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |

1 Einleitung

Die Übertragung von Daten per Funk ist in der heutigen Zeit ein nicht mehr wegzudenkender Sachverhalt. Smartphones oder auch Tablets sind mittlerweile zu einem festen Bestandteil im Alltag geworden. Zur Erreichung der gewünschten Mobilität dieser Geräte ist eine Anbindung an das Internet ausschließlich mittels Funk sinnvoll. Speziell im Bereich der Funkübertragung gibt es eine Vielzahl von Übertragungsdiensten, welche interferenzfrei zeitgleich koexistieren müssen. Des Weiteren ist ein zusätzlicher Anstieg des zu übertragenden Datenvolumens durch die Einführung neuer Funkdienste zu erwarten. Hierzu zählen insbesondere das „Internet der Dinge“ [1], Industrie 4.0 (I4.0) und die Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation [2]. Cisco prognostizierte, verglichen zu den kabelgebundenen Anschlüssen, einen dreimal schnelleren Anstieg des Datenvolumens im Zeitraum von 2013 bis 2018. In absoluten Zahlen ergibt dies einen Wert von 15.383 Petabytes pro Monat für die mobilen Endgeräte im Vergleich zu 86.409 Petabytes für die kabelgebundenen Anschlüsse [3]. Nokia Networks und Qualcomm prognostizieren bis 2020 einen Anstieg des Datenaufkommens um den Faktor 1000 ([4], [5], [6] und [7]) und einen Anstieg der Anzahl der verbundenen Endgeräte auf circa 50 Milliarden [8]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist der Bedarf an Spektrum nahezu unbegrenzt. Aufgrund der physikalischen Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen ist eine sinnvolle Nutzung nur innerhalb eines beschränkten Frequenzbereiches möglich. Bereits verwendete Frequenzbereiche (zum Beispiel für Mobilfunk oder militärische Anwendungen) unterliegen zudem einer strikten Vergabe durch die International Telecommunication Union (ITU) während der World Radio Conference (WRC). Diese findet im Abstand von mehreren Jahre statt und ist für die weltweite Koordination zuständig. Durch die Digitalisierung des Rundfunks, insbesondere des analogen Antennenfernsehens auf Digital Video Broadcast-Terrestrial (DVB-T), wird eine höhere spektrale Effizienz erreicht und somit entstehen freie Frequenzbereiche (sogenannte Digitale Dividende). Die resultierenden Frequenzbänder (speziell im 800 MHz Bereich) wurden im Mai 2010 von der Bun-

desnetzagentur an die Mobilfunkbetreiber versteigert und können bis 31. Dezember 2025 genutzt werden. Ein Großteil dieses Spektrums wurde bis dahin für die sogenannten Program Making and Special Events (PMSE) verwendet. Typische PMSE-Komponenten sind beispielsweise drahtlose Videokameras, Mikrofone, In-ear Monitorsysteme, Konferenzanlagen und Datenverbindungen. Speziell für kleinere Veranstalter stellt die Umrüstung auf neuen Systeme eine große Herausforderung dar, da dies mit hohen Kosten verbunden ist. Auf der WRC-12 wurde bereits der Antrag zur Räumung des 700 MHz Frequenzbandes gestellt. Im Rahmen der WRC-15 wurde beschlossen, dass der Frequenzbereich von 470 MHz bis 690 MHz bis mindestens 2030 für drahtlose Mikrofone und Rundfunk verwendet werden darf. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine bindende Regelung und somit kann dies von jeder nationalen Administration eigenständig entschieden werden. Für die Bundesrepublik hat diese Entscheidung nur eine untergeordnete Bedeutung, da diese Frequenzen bereits 2015 im Rahmen der „Digitalen Dividende 2“ versteigert worden sind und bis 31. Dezember 2033 genutzt werden dürfen [9].

Die stetig fortschreitende technologische Entwicklung ermöglicht zwar die Nutzung höherer Frequenzbereiche, jedoch unterliegen diese mit steigender Frequenz auch einer größeren Dämpfung. Daher eignen sich solche Frequenzbereiche meist nur für Kommunikationssysteme mit kurzer Distanz zwischen Sender und Empfänger. Oftmals ist für Frequenzen oberhalb einiger GHz eine direkte Sichtverbindung, sogenannte Line-of-Sight (LoS) zwischen den Teilnehmern notwendig, was meist nur bei Richtfunkverbindungen gewährleistet werden kann.

Resultierend aus diesem Ablauf, erweist sich die Zuteilung von exklusiv genutzten Spektralbereichen als ein komplizierter und aufwendiger Sachverhalt. Für die Beantragung von neuen spektralen Bereichen müssen sowohl ein nicht unerheblicher bürokratischer Aufwand, sowie eine entsprechende Vorlaufzeit einkalkuliert werden. Es ist daher notwendig, mit dem maximalen Bedarf zu kalkulieren, um entsprechende Reserven beziehungsweise Verhandlungsspielräume sicherzustellen. Andererseits werden große Bereiche des zugewiesenen Spektrums nur zeitweise verwendet und weisen eine deutliche Unterauslastung auf [10]. Um diesem Problem gerecht zu werden, wurden bereits dynamische Spektrums-Zugriffsverfahren entwickelt [11]. Der Schlüssel zur Realisierung solcher

Systeme ist die Cognitive Radio (CR)-Technologie, mit deren Hilfe eine opportunistische Nutzung lizenzierter Frequenzbereiche ermöglicht wird [12]. Für die Umsetzung kommen sogenannte Software Defined Radios (SDRs) zum Einsatz. Diese ermöglichen eine teilweise Festlegung der Funktionalitäten auf der Bitübertragungsschicht (Open Systems Interconnection Model (OSI) - Layer 0) per Software. Die Federal Communications Commission (FCC) hat die folgende formale Definition für CR veröffentlicht:

Definition 1.1 (*Cognitive Radio (CR)*)

A CR is a radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which it operates. This interaction may involve active negotiation or communications with other spectrum users and/or passive sensing and decision making within the radio. The majority of cognitive radios will probably be SDRs, but neither having software nor being field reprogrammable are requirements of a cognitive radio. [13]

Aus Definition 1.1 lässt sich ableiten, dass die Hauptmerkmale eines CR aus der kognitiven Funktionalität, sowie der Rekonfigurierbarkeit bestehen [14]:

- **Kognitive Fähigkeiten:** Das CR ist in der Lage das aktuelle Geschehen im umliegenden Spektrum zu erfassen. Hierbei kommen erweiterte Detektions- und Lernverfahren zum Einsatz.
- **Rekonfigurierbarkeit:** Das CR besitzt eine frei programmierbare Radioschnittstelle, welche in der Lage ist auf verschiedenen Frequenzen und Zugriffstechnologien zu agieren.

CR Systeme sind ein erster Schritt für eine effizientere Frequenznutzung. Für die effiziente Nutzung der spektralen Bereiche ist es jedoch notwendig die kognitive Intelligenz auf Basis eines verteilten Systems zu konzeptionieren. In Abbildung 1.1 ist der prinzipielle Aufbau einer CR-basierten Architektur dargestellt.

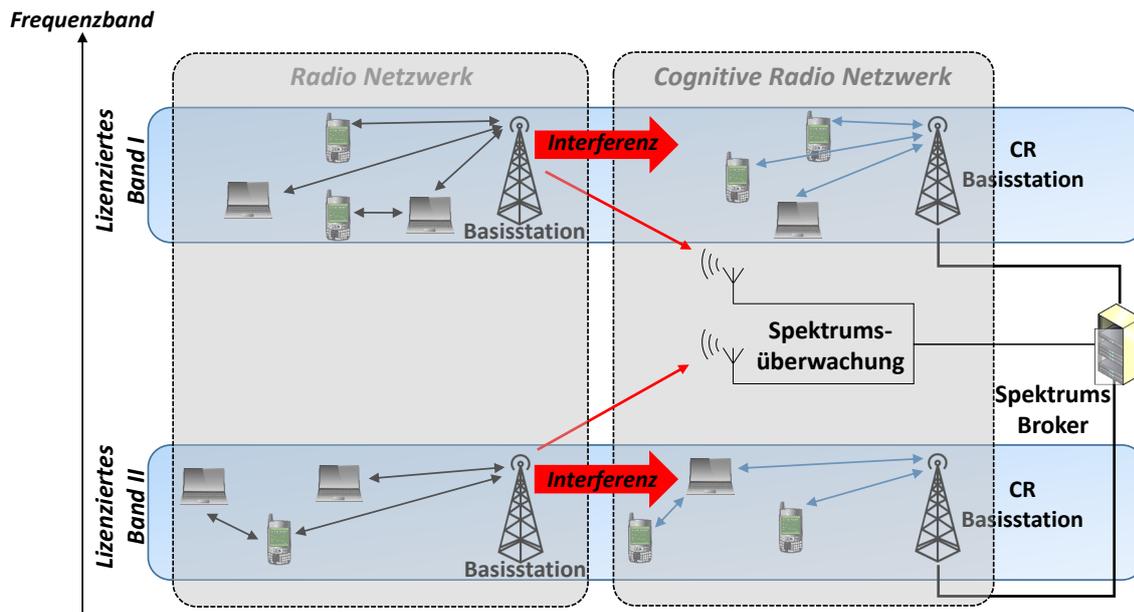


Abbildung 1.1. Prinzipieller Aufbau einer CR-basierten Architektur

Basierend auf diesem Sachverhalt und der daraus resultierenden hohen Relevanz der Thematik erfolgt, innerhalb dieses Kapitels, eine Beschreibung der Aufgabenstellung. Anschließend wird der Aufbau der Arbeit erläutert und abschließend werden die wissenschaftlichen Beiträge beschrieben.

1.1 Motivation und Ziele der Arbeit

Die statische Vergabe von spektralen Bereichen an feste Nutzer, in Verbindung mit sporadischer Aktivität führt zu sogenannten „White Spaces“, also ungenutzten Bereichen. Diese Problematik lässt sich mit Hilfe einer mehrdimensionalen Abbildung beschreiben, welche von den Parametern Raum, Zeit und Frequenz abhängt. In Abbildung 1.2 ist die beispielhafte Belegung eines Frequenzbereiches über der Zeit für einen festen Ort dargestellt.

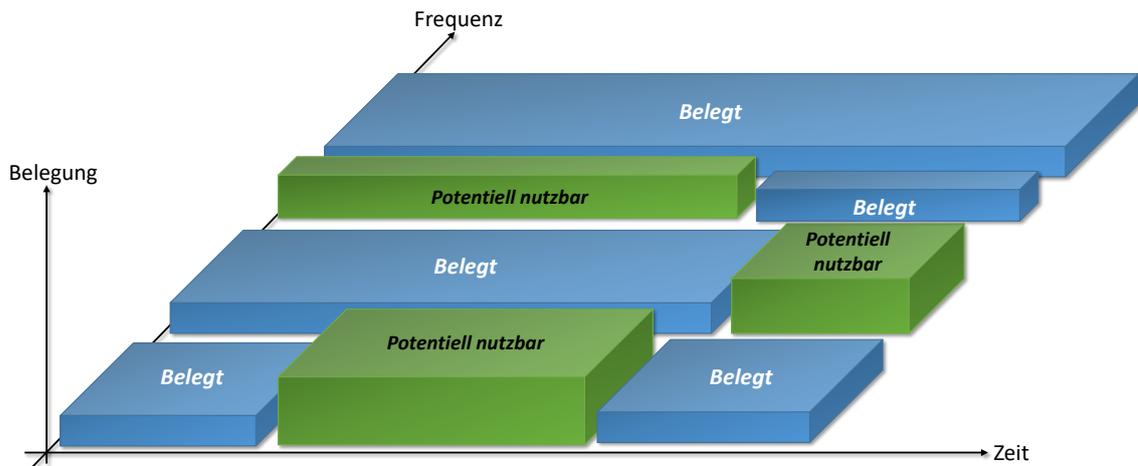


Abbildung 1.2. Exemplarische zeitabhängige Frequenzbelegung für einen festen Ort [15]

Eine weitere Möglichkeit zur Mehrfachnutzung von spektralen Bereichen bietet die Anwendung von Code Division Multiple Access (CDMA)-Verfahren, welche als weitere Dimension die Verwendung orthogonaler Codes aufweist. Um eine optimale Ausnutzung des Frequenzbereiches zu erzielen, müssen alle möglichen, beziehungsweise zulässigen Codes ausgenutzt werden. Bei Bedarf können diese auch auf verschiedene Anwendungen aufgeteilt werden. Abbildung 1.3 zeigt den Sachverhalt bei der Verwendung eines CDMA-Systems mit ungenutzten Übertragungs-codes und somit nicht allokierten Ressourcen.

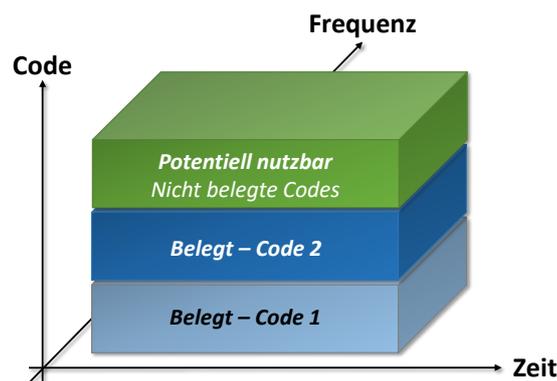


Abbildung 1.3. Exemplarische Frequenzbelegung für CDMA-basierte Systeme [15]

Zur Beschreibung einer räumlichen Begrenzung werden häufig sogenannte Polygonzüge verwendet. Mit Hilfe von Eckpunkten (hier Längen- und Breitengrade) und geradlinigen Verbindungsstrecken erfolgt eine Be-

schreibung des Gebietes. Zusätzlich wird noch die Höhenangabe mit einbezogen um beispielsweise innerhalb von Gebäuden die einzelnen Stockwerke unterscheiden zu können.

Mit Hilfe von sogenannten „Dynamische Spektrums Allokation (DSA)“ (engl. Dynamic Spectrum Access) Technologien [16] soll es ermöglicht werden, derartige ungenutzte Frequenzbereiche für andere Anwendungen verfügbar zu machen. Hierbei wird der Spektrums-Inhaber (Incumbent) als Primär-Nutzer (PN) bezeichnet, während der Sekundär-Nutzer (SN) den Bereich für seine Dienste nutzen möchte.

1.1.1 Parameter

Bei der Umsetzung beziehungsweise Kozeptionierung eines Systems ist die anvisierte Zielsetzung und deren Wirkungsweise ausschlaggebend. Im Zusammenhang mit Funkübertragungssystemen lässt sich die Dienstgüte (Quality of Service (QoS)) als essentieller Parameter identifizieren. Dieser gibt eine direkte Rückmeldung bezüglich der Qualität der verwendeten Funkverbindung, woraus auch Informationen bezüglich der Zuverlässigkeit und eventuell auch der Systemauslastung geschlossen werden können. Zusätzlich müssen gegebene Randparameter beim Spektrumsharing beachtet werden. Diese resultieren aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten und auch den Vorgaben durch die Regulierungsbehörden. Bei der System-Konzeptionierung müssen diese entsprechend einfließen.

1.1.2 Anforderungen

Eine grundlegende Anforderung an eine entsprechende Spektrum-Management-Architektur (SMA) stellt die Kompatibilität zu den bereits vorhandenen statischen und dynamischen Systemen, wie beispielsweise LSA beziehungsweise ASA [17] dar. Zusätzlich müssen Leitlinien [18], welche von der Europäischen Kommission (beispielsweise FM52 [19] und FM53 [20]) erarbeitet worden sind mit einbezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine detaillierte Betrachtung der verfügbaren Verfahren, sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für eine SMA. Für die Verarbeitung der Daten, sowie das Bereitstellen der entsprechenden Funktionalitäten ist es notwendig eine geeignete Systemarchitektur zu entwickeln. Als Grundlage werden im Folgenden vorhandene Ansätze verteilter Systeme aus der Informatik untersucht und verglichen. Um eine möglichst generische Integrierbarkeit in bereits vorhandene Systeme

me zu gewährleisten, werden im Folgenden sogenannte Overlay-Systeme betrachtet. Diese werden auf der Anwendungsschicht des OSI-Schichten-Modells (Layer 7) implementiert, wodurch keine Veränderung der bereits vorhandenen Ressourcen notwendig ist. Bei der Bereitstellung der Informationen muss auch eine Optimierung von Diensten auf höheren Layern berücksichtigt werden. Hierfür wurden bereits verschiedene Konzepte und Algorithmen [21], [22], [23], [24], entwickelt. Eine der bekanntesten Implementierungen sind die sogenannten P2P Systeme. Abbildung 1.4 zeigt die Einflussfaktoren, sowie beteiligte und auch bereits existierende Komponenten, welche bei dem Entwurf der neuen Architektur berücksichtigt werden müssen.

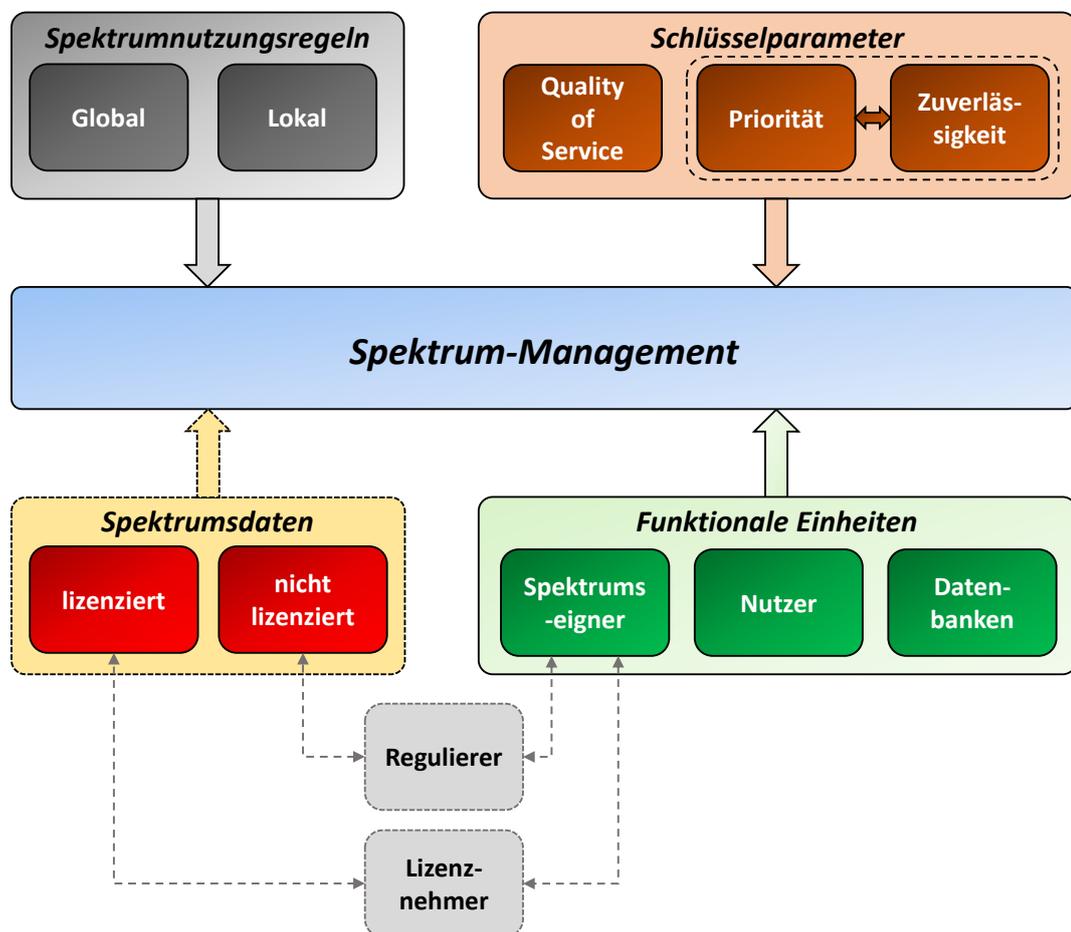


Abbildung 1.4. Einflüsse eines dynamischen Spektrum Managements auf beteiligte Komponenten

Die Effizienz eines solchen Systems lässt sich nicht nur mittels des Aufbaus der Architektur bestimmen. Vielmehr ist die Effizienz der spek-

tralen Zuteilung und der daraus resultierenden Verbesserung des QoS entscheidend. Zur Optimierung der Effizienz ist es daher notwendig möglichst viel a priori-Information zu erhalten. Hierzu zählen insbesondere Information zur Charakterisierung eines Frequenzbereiches wie beispielsweise die Art der Lizenzierung.

1.1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf sowie die Verifikation einer SMA auf Basis eines verteilten Ansatzes. Eine Systemevaluierung erfolgt auf der Anzahl der pro Zelle versorgbaren Nutzer und des daraus resultierenden QoS. Für die Umsetzung lassen sich vorab die nachfolgenden funktionalen Anforderungen definieren:

- Messung des Spektrums
- Einbindung von a priori-Informationen (z.B. aus Datenbanken)
- Datenauswertung und Interpretation
- Regeln zur Konfliktlösung

Des Weiteren sollen zeitweise ungenutzte spektrale Bereiche anderen Diensten zugänglich gemacht werden, ohne den eigentlichen primären Dienst beziehungsweise Nutzer mittels erzeugter Interferenzen zu stören. Eine weitere Problemstellung, welche innerhalb dieser Arbeit betrachtet wird, ist die Verwendung von nicht lizenzierten Frequenzbändern (beispielsweise das Industrial Scientific and Medical (ISM)-Band). Da es innerhalb eines solchen Bandes keinen Inhaber und somit keinen PN gibt, bedarf es zuverlässiger Messungen sowie Detektionsverfahren zur Erfassung der Belegung. Der Schwerpunkt liegt hierbei nicht ausschließlich auf der Sicherstellung des QoS für einen einzelnen Nutzer, vielmehr muss das Ziel eine gleichmäßige und möglichst gerechte Verteilung der Ressourcen zwischen den Teilnehmern sein. Zur Beurteilung der Effizienz der Detektionsverfahren werden die Fehldetektion der Spektrumsbelegung, sowie die daraus resultierende Interferenz herangezogen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die entstehende Interferenz auch einen direkten Einfluss auf das QoS aufweist.

Hieraus lässt sich die nachfolgende Fragestellung ableiten, welche im Rahmen dieser Arbeit beantwortet wird:

Ist es möglich eine frequenz- und technologieunabhängige Spektrums-Management-Architektur zu entwerfen, welche in der Lage ist bereits bestehende Verfahren, wie beispielsweise LSA und SLS, zu integrieren?

Zur effizienteren Strukturierung der Arbeit wird die Fragestellung in einzelne Teilfragen untergliedert:

- Welche Verfahren zum Spektrumsharing sind bereits relevant beziehungsweise verfügbar?
- Welche Parameter sind für die vollständige Beschreibung der Resource „Spektrum“ notwendig beziehungsweise hinreichend?
- Welche Art der Beschreibung ist für die Darstellung von Kontextbeziehungsweise Spektrums-Information geeignet?
- Wie müssen geeignete Architekturen zur Verwaltung solcher Daten aufgebaut sein?
- Wo liegen die Schwachpunkte der verschiedenen Architekturen und wie kann diesen entgegengewirkt werden?
- Was muss beim Entwurf einer Architektur unter Einbeziehung von Verfahren wie beispielsweise ASA/LSA beachtet werden?
- Welche Verfahren sind für die Detektion freier spektraler Bereiche geeignet?
- Wie können Zusatzinformationen aus Datenbanken geeignet eingebunden werden und wie müssen diese organisiert werden?
- Für welche Anwendungen ist ein derartiges System, zum Beispiel hinsichtlich der Zugriffszeiten, geeignet?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die nachfolgende Arbeit ist thematisch in die vier Unterbereiche aufgeteilt:

1. Architektur
2. Schnittstellen
3. Protokolle
4. Validierung

Strukturell ist die Arbeit in sechs Kapitel aufgeteilt, welche im Nachfolgenden kurz beschrieben werden.

In Kapitel 2 („Problemstellung und Methodik“) erfolgt eine Identifikation der Szenarien und der daraus resultierenden Anforderungen an die Architektur, welche für den Entwurf des Systems in Kapitel 4 herangezogen werden. Zusätzlich erfolgt die Identifikation geeigneter Validierungsparameter.

In Kapitel 3 („Grundlagen zur effizienten und dynamischen Spektrumsnutzung“) wird der aktuelle Stand der Technik betrachtet und darüber hinaus neue Ansätze zur gemeinschaftlichen Spektrumsnutzung (sogenanntes Spektrum-Sharing) diskutiert und verglichen. Des Weiteren erfolgt eine Untersuchung der verschiedenen Frequenzbereiche und der daraus resultierenden Anforderungen an eine SMA. Anschließend werden Systeme zur Datenverarbeitung, sogenannte Kontext Management Systeme (KMSe) analysiert und verglichen. Abschließend wird ein Überblick bezüglich der aktuell laufenden sowie der bereits abgeschlossenen Projekte und Arbeiten gegeben.

Basierend auf den in Kapitel 2 und 3 gewonnenen Erkenntnissen erfolgt in Kapitel 4 „Systemaufbau“ die Konzeption der SMA, sowie die daraus resultierenden Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle.

Wichtige Konzepte wie Lastverteilung, Synchronisierung, Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie Nutzungsregeln und Zertifizierung werden in einzelnen Abschnitten explizit betrachtet und weiterentwickelt. In Kapitel 5 („Detektionsverfahren“) werden verschiedene Ansätze zur Belegungserkennung mittels Sensing betrachtet, verglichen und bewertet. In Kapitel 6 („Datenbanken“) erfolgt eine detaillierte Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten Datenbanken sowie die eigens entworfene Datenorganisation. Kapitel 7 („Verifikation des Gesamtsystems“) beinhaltet die

Verifikation der gestellten Anforderungen sowie der in Kapitel 2 identifizierten Key Performance Indicators (KPIs). In Kapitel 8 („Gesamtergebnis und Ausblick“) wird nochmals ein Überblick über die gesamte Arbeit und die Ergebnisse gegeben. Abschließend erfolgt ein Fazit und ein Ausblick.

1.3 Beiträge

Eine Analyse der Anforderungen an das beschriebene System macht ersichtlich, dass sich eine entsprechende Problemlösung nur mit Hilfe einer Zerlegung in mehrere Teilgebiete entwickeln lässt. Hierbei kann eine prinzipielle Aufteilung in konzeptionelle Ansätze und die zugehörigen qualitativen sowie auch quantitativen Analysen vorgenommen werden. Die konzeptionellen Ansätze setzen sich aus der Systemarchitektur sowie den zugehörigen Übertragungsprotokollen zusammen. Eine qualitative und quantitative Analyse der einzelnen Komponenten erfolgte sowohl auf Komponenten- und auch auf Systemebene. Nachfolgend sind die Beiträge, welche im Rahmen dieser Arbeit vom Autor und der Arbeitsgruppe (AG) erarbeitet wurden, thematisch aufgeführt.

1. Kontextinformation und Kontext-Management-Architekturen:

- Beschreibung von Verfahren zur Erfassung und Verarbeitung von Kontextinformationen [25] [26] [27]
- Entwicklung einer vereinfachten Architektur zur Verwaltung, Speicherung und Verarbeitung von Kontextdaten [28]
- Kontext-basierte Optimierung von heterogenen Funknetzen [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39]

2. Verteilte, selbstorganisierende Architekturen zum Kontextmanagement:

- Bereitstellung und Zugriff auf Sensordaten im Internet mittels verteilter Architekturen [40] [41] [42] [39]
- Entwurf und Implementierung verteilter Architekturen zur Verwaltung von Kontextdaten im Internet [43] [44] [42] [45]
- Plug and Play Fähigkeit [44] [42] [45]

3. Spektrum-Management und -Allokation:

- Einbindung zusätzlicher Informationsquellen wie beispielsweise Datenbanken in ein verteiltes SMS [46] [47]
- Entwurf von Konzepten zur Erkennung von ungenutzten spektralen Bereichen basierend auf Messwerten und zusätzlichen Informationen (zum Beispiel aus Datenbanken) [46]
- Identifikation geeigneter Verfahren zur Vergabe von Spektrum abhängig von der Form der Lizenzierung [46] [47]
- Entwicklung von Algorithmen zur Entscheidung bezüglich der Allokierung des Spektrums. [48]

2 Problemstellung und Methodik

Als Grundlage für die Bearbeitung einer Fragestellung ist es im ersten Schritt zwingend notwendig, die daraus resultierende Problemstellung abzuleiten und geeignet zu formulieren. Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt daher, basierend auf der in Kapitel 1 definierten Zielsetzung, eine Extraktion der exakten Problemstellung. Aufbauend auf dieser Zielsetzung wird eine Methodik zur Lösung der Problemstellung entwickelt. Diese fungiert auch als Leitfaden für den weiteren Aufbau dieser Arbeit.

Basierend auf der Motivation und dem aktuellen Stand der Technik und Forschung, erfolgt ein Gap-Analyse. Diese dient als Grundlage für die konkrete Formulierung der Problemstellung. Ausgehend von der Problemstellung wird, unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik und Forschung ein geeigneter Lösungsansatz erarbeitet. Dieser beinhaltet sowohl die funktionale Sicht als auch notwendige Implementierungsaspekte. Anschließend erfolgt die Evaluation des entwickelten Lösungsansatzes mit Hilfe eines Simulators. Hierfür ist es notwendig ein repräsentatives Szenario zu entwickeln und geeignete Modelle für ein realistische Systemverhalten in den Simulator einfließen zu lassen. Zur Sicherstellung der korrekten Implementierung des Simulators, beziehungsweise einzelner Komponenten, kommen dedizierte Testszenarien zum Einsatz. Nach erfolgreicher Validierung wird die Simulation des eigentlich definierten Szenarios durchgeführt. Im letzten Schritt erfolgt die Auswertung der Simulationsergebnisse. In Abbildung 2.1 ist eine grafische Übersicht der hier angewendeten methodischen Herangehensweise dargestellt.

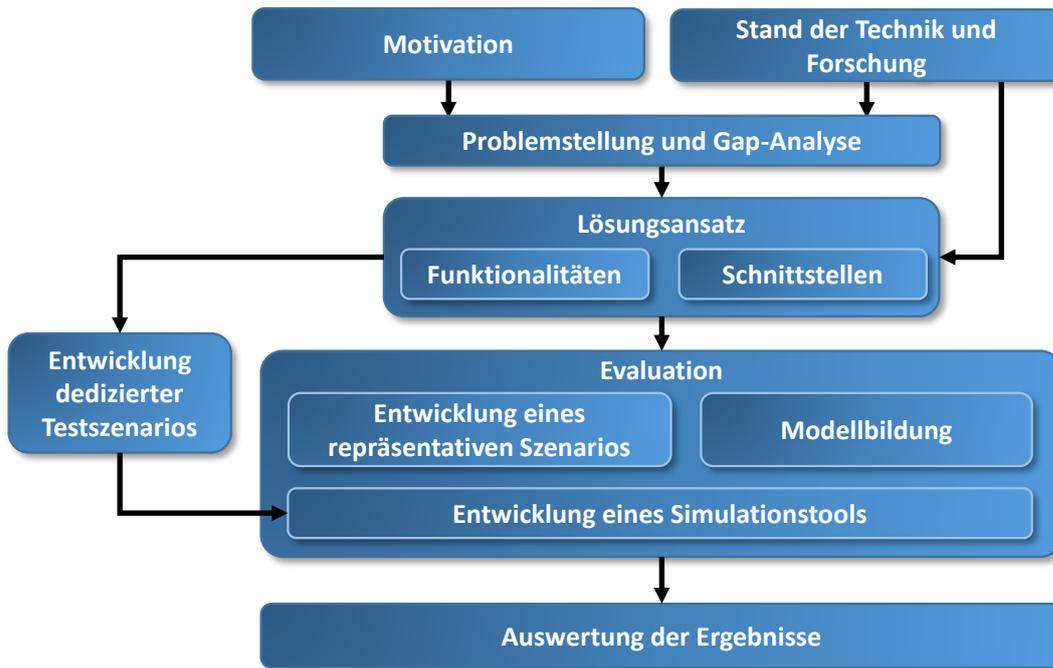


Abbildung 2.1. Methodische Herangehensweise

Für den Entwurf einer solchen Referenzarchitektur ist die Betrachtung der Motivation und der daraus resultierenden Ziele ausschlaggebend. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse erfolgt die Identifikation der Anforderungen an ein solches System.

Auf Basis der bekannten Vor- und Nachteile der bereits vorhandenen Ansätze wird versucht, mittels Kombinationen und Erweiterungen dieser Lösungen eine neuartige Architektur zu entwickeln. Diese sollte nach Möglichkeit alle Vorteile vereinen und die Nachteile unterdrücken. Bei dem Entwurf beziehungsweise der Planung einer SMA ist es wichtig die Anwendungsfälle (sogenannte Use-Cases (UCs)) zu betrachten und die daraus entstehenden Anforderungen zu extrahieren. Hiermit erfolgt die Identifikation der KPIs), welche für die Beurteilung des Systems herangezogen werden (Evaluierung). Gleichzeitig muss der aktuelle Stand der Technik analysiert werden und entsprechend in die Konzeptionierung einfließen.

Bereits in dem vorangegangenen Kapitel wurde eingehend die Problematik der stetig steigenden Anforderungen an heutige Funkssysteme und deren spektrale Organisation erläutert. Bezüglich der Implementierung und Umsetzung derartiger Systeme schlägt sich dies in einer wachsenden

Komplexität nieder um immer bessere Verbindungsqualitäten sicherzustellen. Hierbei ergibt sich ein Engpass in der Zuteilung der verfügbaren spektralen Bereiche. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob es mit Hilfe des heutigen Standes der Technik möglich ist eine Architektur zu entwerfen, die diese Problematik auflöst. Zur Entwicklung einer geeigneten Lösung für das hier gestellte Problem bedarf es einer eingehenden Analyse der Problemstellung und der Extraktion aller relevanten Aspekte. Zum besseren Verständnis dieser Arbeit ist es an dieser Stelle notwendig eine Definition der Begriffe *System* und *Architektur* vorzunehmen.

Definition 2.1

Architektur Eine Architektur beschreibt den generischen Aufbau eines Systems, dessen funktionalen Umfang sowie die dafür notwendigen Schnittstellen.

Definition 2.2

System Ein System beschreibt eine Implementierung einer Architektur. Hierbei erfolgt eine Umsetzung in Hard- und/oder Software.

Mit Hilfe der Definitionen 2.1 und 2.2 kann das Open Archival Information System (OASIS)-Referenzmodell problemspezifischer formuliert werden, woraus sich die in Abbildung 2.2 dargestellte Vorgehensweise ergibt.

Demnach lässt sich die Herangehensweise in die folgenden Schritte unterteilen:

1. Identifikation der relevanten Szenarien
2. Beschreibung der Aufgabenstellung
⇒ *Anforderungserhebung*
3. Identifikation der Schlüsselfunktionen und -parameter
⇒ *Anforderungsanalyse*
4. Erfassung aller nichttechnischen Anforderungen
⇒ *Anforderungsspezifikation*
5. Ableitung der aus (3) resultierenden technischen Anforderungen
⇒ *Anforderungsspezifikation*

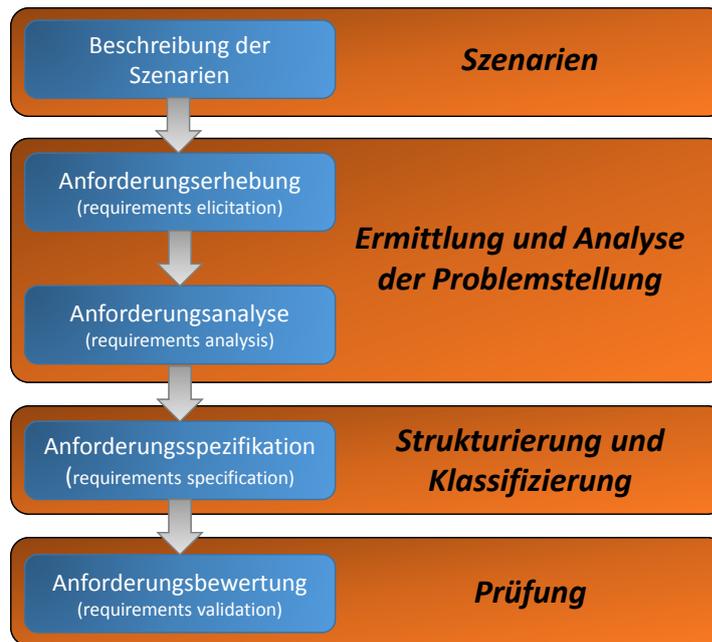


Abbildung 2.2. Vorgehensweise zur Analyse und Extraktion der Anforderungen

6. Validierung der Implementierung mit Hilfe von (3)
 ⇒ *Anforderungsbewertung*

Zusätzlich müssen für die Verifikation entsprechende KPIs oder auch Schlüsselparameter identifiziert werden. Basierend auf diesen Parametern erfolgt ein Vergleich mit bereits vorhandenen Ansätzen oder Lösungen, um das System quantitativ zu bewerten.

2.1 Anwendungsspezifische Anforderungen

Für den Entwurf eines universell nutzbaren SMSs und der dafür benötigten SMA ist es notwendig einen Überblick bezüglich der bereits vorhandenen Konzepte zu erlangen. Zusätzlich muss eine Betrachtung der möglichen UCs erfolgen, um daraus resultierende Anforderungen in den Entwurf mit einfließen zu lassen. Im Zusammenhang mit Spektrum Sharing ist es unabdingbar die Ergebnisse den Untersuchungen FM 52 und FM 53 zu betrachten, welche auch erste Ansätze für den Entwurf eines SMSs beinhalten.

2.1.1 FM 52 und FM 53

Im Rahmen der Working Group Frequency Management (WG FM) genauer gesagt FM 52 des Electronic Communications Committee's (ECC) [49] erfolgt eine ausführliche Betrachtung des (2,3-2,4) GHz Bandes. Die Betrachtung des Bereichs der sogenannten White Spaces, welche im Bereich (694-790) MHz (Kanal 49 bis 60) liegen, wurde im Rahmen des FM 53-Vorhabens der ECC untersucht. Das Ziel beider Projekte war, beziehungsweise ist es, eine gemeinsame Nutzung der spektralen Bereiche zu ermöglichen unter Berücksichtigung der vom primären Dienst vorhandenen Anforderungen. Im Kontext von FM 52 wird als Sharing-Verfahren ASA/LSA für PMSE [50] betrachtet.

Für die Freigabe von spektralen Bereichen wird im Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications European Conference on Computer Vision (CEPT ECCV) Report 58 [51], die in Abbildung 2.3 dargestellte dreistufige Herangehensweise vorgeschlagen.

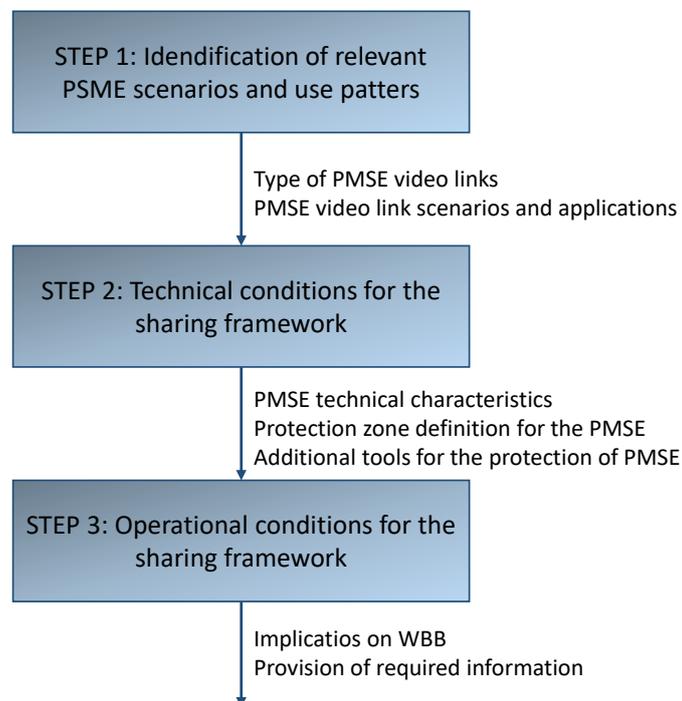


Abbildung 2.3. Dreistufige Herangehensweise zur Freigabe von Spektrum [51]

Das in Abbildung 2.3 dargestellte Vorgehen ist exemplarisch für die

PMSE-Nutzung im (2,3-2,4) GHz-Band und wird als Grundlage für den weiteren Systementwurf verwendet.

Im Gegensatz zu FM 52 befasst sich FM 53 mit dem Sharing von sogenannten White Spaces im Bereich (694-790) MHz (Kanal 49 bis 60). Gegenwärtig ist davon auszugehen, dass diese Frequenzen in den nächsten Jahren für die Verwendung von sogenannten Mobile/Fixed Communication Networks (MFCN) freigegeben werden. Wie bereits erwähnt, wurden mit CR erste Bemühungen für die gemeinsame Nutzung von spektralen Bereichen unternommen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass ein ausschließlich Sensor-basierter Ansatz keine zufriedenstellenden Ergebnisse bezüglich der entstehenden Interferenz liefert [52] [53]. Um diesem Problem gerecht zu werden wurde das Konzept der sogenannten Geo-location-Datenbank eingeführt, welche in der Lage ist dedizierte Informationen für einen geografischen Bereich bezüglich dessen aktueller Frequenznutzung bereitzustellen.

Für die Implementierung einer solchen Geo-Location-Datenbank wurden im ECC-Report 186 [54] Anforderungen bezüglich der Funktionalitäten aufgestellt. Diese sind in Tabelle 2.1 mit entsprechender Erklärung aufgeführt und werden innerhalb dieser Arbeit auf den weiteren Systementwurf Einfluss haben.

Tabelle 2.1. Implementierungsanforderungen an eine Geo-Location-Datenbank aus dem ECC-Report 186 [54]

| <i>Anforderung</i> | <i>Beschreibung</i> |
|---|--|
| Technische Information bezüglich zu schützendem Dienst/System | Datensatz mit beispielsweise Antennenposition, Antennenparameter oder Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP) |
| | Empfängerparameter |
| | Tabelle mit möglichen zu schützenden Diensten (inklusive Parametern) |
| Verzögerungszeit | Möglichst geringe Verzögerungszeiten bei Datenupdates |
| Update Frequenz | Notwendige Updatefrequenz, damit die Daten möglichst aktuell sind |
| Umsetzung der Daten in die Datenbank | Umsetzung der gespeicherten Informationen in eine Liste von zulässigen Frequenzen und Sendeleistungen |

Des Weiteren ist im ECC-Report 186 ein erster konzeptioneller Aufbau, einer Geo-Location-Datenbank dargestellt. An dieser Stelle bleibt anzumerken, dass der Aufbau in Abbildung 2.4 konzeptionell auf die Verwendung von Digital Terrestrial Television (DTT) ausgelegt ist. Ungeachtet dessen bietet dieser Ansatz eine gute Grundlage für den weiteren Systementwurf.

Aus dem Aufbau in Abbildung 2.4 wird ersichtlich, dass hier der Begriff Datenbank sehr weit ausholt und noch zusätzliche Funktionalitäten beinhaltet, welche bei der konkreten Implementierung berücksichtigt werden müssen. Um an dieser Stelle eine eindeutige Abgrenzung zwischen einer Datenbank und der Geo-location Datenbank herzustellen, sei angemerkt, dass im Folgenden eine Datenbank als reiner Datenspeicher ohne jegliche Zusatzfunktionalität angesehen wird.

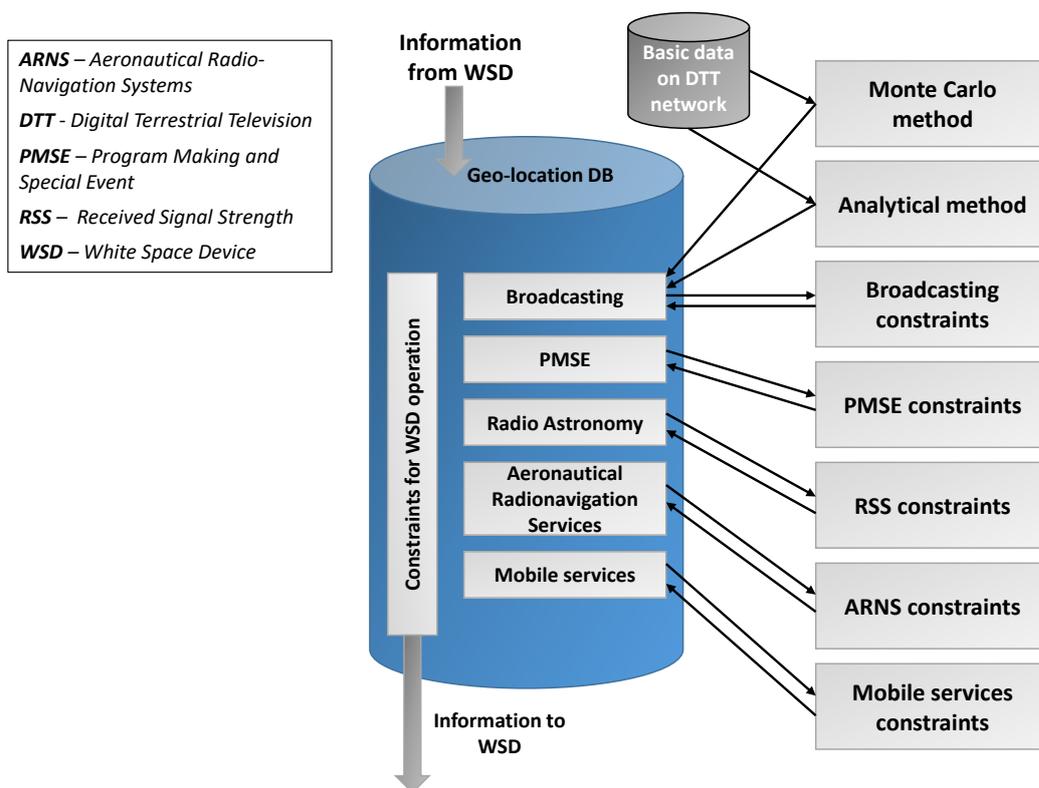


Abbildung 2.4. Konzept einer Geo-location Datenbank aus dem ECC-Report 186 [54]

2.1.2 International Mobile Telecommunications

Eine zentrale Rolle bei der Verteilung beziehungsweise Zuteilung von Spektrum spielt die Sonderorganisation der Vereinten Nationen namens International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT), genauer gesagt die International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU-R) welche für die Radiokommunikation, also den Funk-Sektor zuständig ist (früher Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR)). Das Ziel dieser Organisation ist eine rationale, gerechte, effiziente und ökonomische Verwendung der begrenzten Ressource - Spektrum. Zu den Aufgabengebieten zählen unter anderem die zellularen Funkssysteme wie beispielsweise das 4G-Mobilfunknetz. Die Anforderungen an derartige Systeme wurden von der ITU-R-Standardisierungsorganisation definiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Anforderungen für das 3G-Mobilfunksystem, veröffentlicht im *IMT-2000*, sowie für 4G-Systeme, veröffentlicht in den *IMT-Advanced*-Anforderungen, be-

trachtet. In der IMT-2000-Spezifikation wurden Mitte der 90er Jahre die Merkmale für die 3. Mobilfunkgeneration festgelegt. Diese wurden in den IMT-Advanced-Anforderungen unter anderem bezüglich der höheren Datenraten erweitert. Nachfolgend, sind die wichtigsten Aspekte, welche für diese Arbeit relevant sind, aufgeführt ([55] [56] [57]):

1. Hohe Datenübertragungsraten sowohl im Außen- als auch im Innenbereich
2. Symmetrische und asymmetrische Datenübertragung
3. Unterstützung von leitungsvermittelnden- und paketvermittelnden Diensten sowie Internet Protocol (IP) und Echtzeit Video
4. Sprachqualität vergleichbar zu Festnetztelefonie
5. Vergrößerte Kapazitäten und verbesserte Spektrumsnutzung
6. Simultane Nutzung verschiedener Dienste (Multimedia) durch End-Nutzer beziehungsweise Terminals
7. Globales (internationales) Roaming zwischen den verschiedenen Infrastrukturen
8. Verwendung von offenen Standards (zur Kostenreduktion)
9. Datenraten von bis zu 1 Gbit/s

Die Anforderungen lassen sich somit für eine Spektrum-Management-Einheit (SME) beziehungsweise SMA wie folgt ableiten:

1. Systemunabhängigkeit
2. Abdeckung aller relevanten Frequenzbereiche
3. Geringe Latenzzeiten
4. Kommunikationsmöglichkeit zwischen den involvierten Einheiten
5. Datenbanken zur Speicherung von a-priori Informationen

2.1.3 Program Making and Special Event

Im Zuge der Digitalen Dividende I erfolgte unter Anderem eine Neuzuteilung der Frequenzen 790 MHz bis 862 MHz aufgrund der Umstellung auf DVB-T. Bis 2015 waren die Bereiche (790 – 814) MHz und (838 – 862) MHz für die Verwendung im Bereich der Veranstaltungstechnik zugewiesen. Im Rahmen der Neuzuteilung sind diese Frequenzbereiche allerdings an die Mobilfunkbetreiber (Aufbau der LTE-Netze)

versteigert worden und sind somit, aufgrund der möglichen Interferenzen nur noch eingeschränkt nutzbar. Zusätzlich sind für die Veranstaltungstechnik neue Frequenzbänder im Bereich 710 MHz bis 790 MHz und 822 MHz bis 832 MHz reserviert worden. Wie bereits erwähnt, wurde auf der WRC-12 ein Antrag auf eine Digitale Dividende II gestellt, wodurch die Mobilfunkbetreiber auch den Frequenzbereich 694 MHz bis 790 MHz erhalten sollten. Diesbezüglich wurde auf der WRC-15, die weltweite Harmonisierung des 700 MHz Bandes (694 – 790) MHz für die Mobilfunknutzung beschlossen [58]. Des Weiteren hat die WRC-15 keine Digitale Dividende III angeregt, wodurch der Frequenzbereich 470 MHz bis 694 MHz bis zum Jahr 2026 für terrestrisches Fernsehen und drahtlose Produktionsmittel weiterhin zur Verfügung steht [59]. Dies stellt speziell für kleinere Veranstalter eine finanz-technische Herausforderung dar und bedarf einer Lösung zur Integration bestehender Analgen in koexistierende Funkssysteme. Um diesem Problem gerecht zu werden, startete Anfang 2011 das Forschungsprojekt Cognitive Program Making and Special Events (C-PMSE) [60]. Ziel dieses Projektes ist, unabhängig von einer politischen Lösung, den Erhalt oder sogar die Steigerung der Betriebssicherheit (eigener und auch benachbarter Systeme) zu gewährleisten. Hierbei sollen für den Betrieb in heterogenen Funksystemen potentielle Störquellen ausfindig gemacht werden um Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Die resultierenden Anforderungen an eine SME lassen sich aus Sicht von C-PMSE somit wie folgt definieren [60]:

1. Abdeckung aller relevanten Frequenzbereiche
2. Geringe Latenzzeiten
3. Überwachung des spektral relevanten Bereichs (Sensing)
4. Algorithmen zur Erkennung von Störern
5. Verfahren zur Vermeidung von Interferenzen (Regeln)
6. Kommunikationsmöglichkeit zwischen den involvierten Einheiten
7. Datenbanken für Speicherung von a-priori Informationen

2.1.4 GSM-Rail

Eine weitere Anwendung, welche im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden soll, ist Global System for Mobile Communications – Rail(way) (GSM-R) [61]. Hierbei handelt es sich um einen weltweiten Mobilfunkstandard, der auf GSM aufbaut, aber speziell für die Anwendung im

Schienenverkehr angepasst wurde. Für GSM-R ist ein exklusives Frequenzband reserviert. Des Weiteren wurden für die Verwendung von Extended-GSM-R (E-GSM-R) weitere Frequenzen bereitgestellt, welche allerdings momentan noch nicht exklusiv genutzt werden können, da diese in der GSM-Spezifikation [62] noch nicht vorgesehen sind. Somit ist aktuell eine Nutzung nur als Bündelfunk (auch als Professional Mobile Radio (PMR) bezeichnet) oder im Direct-Modus [63] möglich. Für die Konzeptionierung einer SME ergeben sich somit aus GSM-R-Sicht die folgenden Anforderungen:

1. Abdeckung aller relevanten Frequenzbereiche
2. Geringe Latenzzeiten
3. Kommunikationsmöglichkeit zwischen den involvierten Einheiten
4. Datenbanken zur Speicherung von a-priori Informationen

2.1.5 Industrial, Scientific, and Medical Band

Das sogenannte ISM-Band beinhaltet Frequenzbereiche, die keine explizite Genehmigung durch den Regulierer erfordern. In diesen Bereichen ist das Senden gestattet, solange die angegebenen Grenzwerte für die Sendeleistung eingehalten werden. Da somit auch keinerlei Koordination innerhalb dieser Bereiche erfolgt, kann es auch zu Kollisionen und Interferenzen kommen. Zur Reduktion der Interferenzen und somit zur Verbesserung der Dienstgüte der einzelnen Teilnehmer ist die Anwendung einer SME denkbar. Somit ergeben sich die nachfolgenden Anforderungen an eine SME:

1. Abdeckung aller relevanten Frequenzbereiche
2. Geringe Latenzzeiten
3. Kommunikationsmöglichkeit zwischen den involvierten Einheiten
4. Überwachung des spektral relevanten Bereichs (Sensing)
5. Algorithmen zur Erkennung von Störern
6. Datenbanken zur Speicherung von a-priori Informationen

2.1.6 Zusätzliche Anforderungen

Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Anforderungen müssen noch weitere Anforderungen an die SME berücksichtigt werden, welche für einen Markterfolg von bedeutender Relevanz sind:

1. Unterstützung vorhandener Lösungsansätze wie LSA/ASA oder SLS
2. Plug and Play:
 - (a) Automatisches An- und Abmelden von Systemkomponenten ohne zusätzliche administrative Eingriffe
 - (b) Automatische Verwaltung von Informationen bezüglich Gültigkeit (sogenanntes „Life Cycle Management“)
 - (c) Automatische Synchronisierung aller betroffenen Einheiten in dem SMS bei Änderungen im Netzwerk
3. Möglichst geringe Beeinflussung der Netzarchitektur
4. Vollständige Mobilitätsunterstützung für jede SME und auch die verbundenen Clients (offline-Betrieb im „Inselbetrieb“)

Die zusätzlich definierten Anforderungen garantieren den Entwurf einer SME, die vollständig autonom, das heißt ohne zusätzlichen administrativen Aufwand, betrieben werden kann.

2.1.7 Zusammenfassung der Anforderungen

Wie aus den vorangegangenen Unterkapiteln ersichtlich wird, ergeben sich für die Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungen Schnittmengen. Allgemein können die Frequenzbereiche in lizenzierte und nicht lizenzierte Bereiche unterteilt werden. Dieser Unterschied ist auch in den Anforderungen der aufgeführten Anwendungsbereiche ersichtlich. Um einen generischen Lösungsansatz zu erhalten ist es somit notwendig, dass die SMA sowie jede SME sowohl die Anforderungen des lizenzierten als auch des nicht lizenzierten Falls abdeckt. Zusammenfassend ergeben sich somit die in Tabelle 2.2 aufgelisteten Anforderungen sowohl auf funktionaler-, als auch auf Architekturebene.

Tabelle 2.2. Anforderungen an ein universelles SMS

| Nummer | Anforderung | Beschreibung | Herkunft |
|---------------|--|--|--|
| 1 | Frequenzunabhängig | Keine Einschränkung für den verwendeten Frequenzbereich | Grundlegend |
| 2 | Latenzzeit | Geringe Verzögerung für Anfragen und bei Datenspeicherung | Grundlegend |
| 3 | Einbindung Spektrumsinformation | Möglichkeit zur Einbindung von Datenbanken für zusätzliche Informationen bezüglich des spektralen Bereiches | FM 52, FM 53, LSA/ASA |
| 4 | Einbindung von Sensorinformation | Möglichkeit zur Einbringung von gemessener Spektrumswerte zur Belegungserkennung | FM 52, FM 53, SLS |
| 5 | Automatisches An- und Abmelden von Systemkomponenten | Gesteuerte An- und Abmeldung von Systemkomponenten sowie die Erkennung bei Ausfall | Plug & Play |
| 6 | Überprüfung der Gültigkeit der Daten | Automatische Überprüfung der Daten bezüglich deren Alter | FM 52, FM 53, Plug & Play |
| 7 | Synchronisierung | Automatische Synchronisierung aller Einheiten im Netzwerk bei Änderungen | Plug & Play |
| 8 | Zeitsynchronisierung | Automatische Zeitsynchronisierung zwischen allen Einheiten | Plug & Play |
| 9 | Kompatibilität zu bestehenden Netzstrukturen | Möglichkeit zur Einbindung in bereits bestehende Netzstrukturen | System muss auch offline („Inselbetrieb“) lauffähig sein |
| 10 | Vollständige Mobilitätsunterstützung | System muss auch offline („Inselbetrieb“) lauffähig sein | Plug & Play |
| 11 | Definition von exclusion, restriction und protection Zonen | Definition von geografischen Bereichen, die entsprechenden Schutz bedürfen, zum Beispiel zur Minimierung von Interferenzen | ETSI TS 103235, ETSI TS 103154 |

Eine eingehende Beschreibung bereits vorhandener Verfahren zum Spektrum Sharing erfolgt in Kapitel 3.

2.2 Analyse benötigter Funktionalitäten

Für die Planung beziehungsweise den Entwurf einer SME ist zusätzlich zu den Anforderungen auch eine Definition der Funktionalität notwendig. Basierend auf dem CR-Ansatz von Mitola [64] ergibt sich die nachfolgende funktionale Definition für ein SMS.

„Ein vollständig autonom agierendes SMS muss eigenständig in der Lage sein, verfügbare spektrale Bereiche zu detektieren und diese einem Nutzer bei Bedarf zuzuweisen.“

Es ist offensichtlich, dass es sich hierbei um eine noch sehr rudimentäre Definition eines SMSs handelt, welches nicht in der Lage ist allen Anforderungen gerecht zu werden. In dieser Beschreibung wird beispielsweise keinerlei Berücksichtigung der verschiedenen spektralen Bereiche (lizenziert oder unlizenziert) vorgenommen. Um diesem Problem gerecht zu werden sind in Tabelle 2.3 Verfahren für den Umgang mit lizenzierten sowie auch nicht lizenziertem Spektrum aufgeführt.

Tabelle 2.3. Beschreibung geeigneter Verfahren zum Spectrum Sharing

| <i>Frequenzbereich</i> | <i>Beschreibung</i> | <i>Verfahren</i> |
|------------------------|-------------------------------------|---|
| Lizenziert | Fest vorgegebener Inhaber vorhanden | Verhandlungsbasiert (ASA, LSA), Sensing und Opportunistisch |
| Unlizenziert | Kein fester Inhaber vorhanden | Nur Sensing (SLS) zulässig |

Das System muss in der Lage sein alle notwendigen Information bereitzustellen, wobei an dieser Stelle die konkrete Implementierung noch nicht festgeschrieben werden soll, zum Beispiel, wer für die Bereitstellung der Information verantwortlich ist. Unter Einbeziehung dieses Kriteriums ergibt sich die nachfolgende Definition der Aufgabenstellung für ein SMS:

„Ein vollständig autonom agierendes SMS muss eigenständig in der Lage sein, verfügbare spektrale Bereiche zu detektieren

und diese einem Nutzer bei Bedarf zuzuweisen. Hierfür muss das System in der Lage sein Frequenzbereiche gemäß ihrer Eigenschaften zu unterscheiden (zum Beispiel: lizenziert oder unlizenziert). Des Weiteren muss das System geeignete Schnittstellen für die Kommunikation mit externen Einheiten bereitstellen.“

Die Definition beschreibt nun allgemein die Eigenschaften, die ein SMS aufweisen muss. Für eine konkrete Implementierung sind diese allerdings noch ungenügend und müssen daher noch weiter konkretisiert werden. An dieser Stelle ist es nicht notwendig eine exakte Planungs- beziehungsweise Implementierungsvorgabe zu machen. Vielmehr muss ein vollständiger Systemüberblick gegeben werden. Unter Einbeziehung der im vorangegangenen Kapitel definierten Anforderungen ergibt sich die folgende Definition:

„Ein vollständig autonom agierendes SMS muss eigenständig in der Lage sein, verfügbare spektrale Bereiche zu detektieren und diese einem Nutzer bei Bedarf zuzuweisen. Hierfür muss das System in der Lage sein Frequenzbereiche gemäß ihrer Eigenschaften zu unterscheiden (zum Beispiel: lizenziert oder unlizenziert). Des Weiteren muss das System geeignete Schnittstellen für die Kommunikation mit externen Einheiten bereitstellen. Hierzu zählen insbesondere Clients, Sensingeinheiten und Datenbanken.“

Als Clients werden hier alle externen Einheiten betrachtet, welche Spektrum besitzen und dies anbieten möchten, sowie auch alle anfragenden Einheiten.

2.2.1 Architektur

Zum Entwurf einer geeigneten Architektur ist es notwendig die einzelnen Systemkomponenten eines SMSs zu identifizieren und deren vollständigen Funktionsumfang zu definieren. Hierbei haben sich die funktionalen Anforderungen in Abschnitt 2.1.7 als relevant herauskristallisiert.

Für den Entwurf der Architektur spielen die Skalierbarkeit und die Frequenzunabhängigkeit eine entscheidende Rolle und werden aus diesem Grund in den beiden nachfolgenden Unterkapiteln betrachtet.

2.2.1.1 Skalierbarkeit

Für den Betrieb eines SMSs ist es wichtig ein vollständig skalierbares System zu entwerfen, das heißt die Anforderung muss für alle Kommunikationen innerhalb des SMSs eingehalten werden. Somit muss das SMS für eine beliebige Anzahl von Teilnehmern in der Lage sein den vollen Funktionsumfang bereitzustellen. Insbesondere bezieht sich dies auf die Latenzen bei Anfragen.

2.2.1.2 Frequenzunabhängigkeit

Bei der Planung beziehungsweise Umsetzung des SMSs muss die Architektur derart gewählt werden, dass keinerlei Abhängigkeiten vom Frequenzbereich oder von der Anwendung bestehen. Somit müssen verschiedene Szenarien bei der Planung beachtet werden. Prinzipiell wird eine Einteilung der Frequenzbereiche in einen lizenzierten und einen nicht-lizenzierten Bereich vorgenommen. Als Konsequenz ergeben sich für die Sharing-Verfahren das verhandlungsbasierte und das sensingbasierte Sharing. Um einen vollständigen LSA/ASA- und SLS-Support zu gewährleisten erfolgt für die Konzeptionierung eine zusätzliche Aufspaltung in passives und aktives Sharing. In Verbindung mit den in Unterkapitel 2.1 aufgeführten Anwendungsbereichen ergeben sich die drei nachfolgenden Szenarien.

Szenario 1: Aktives Sharing von lizenzierten Frequenzbereichen

In diesem Szenario wird das Sharing von Spektrum zwischen zwei Netzbetreibern betrachtet. Hierbei möchte Netzbetreiber A Spektrum für einen dedizierten Zeitraum Δt in einem spezifizierten, begrenzten Frequenzbereich verwenden. Für die Beschreibung der räumlichen Dimension werden sogenannte Polygonzüge verwendet, welche mittels der geografischen Längen- und Breitengrade der Eckpunkte spezifiziert werden. Die Anfrage von Netzbetreiber A an das SMS beinhaltet die Informationen bezüglich des Frequenzbereiches, der Zeit sowie des zugehörigen Polygons. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Zeitspanne noch eine Anfangszeit t_{start} beinhaltet. Innerhalb des SMSs muss somit der folgende Prozess ablaufen:

1. Ermittlung des Spektrumseigners mittels der Datenbanken (hier Netzbetreiber B)
2. Ermittlung des zulässigen Sharingverfahrens (hier Aktiv)
3. Ermittlung der zuständigen Kontaktadresse von Netzbetreiber B (beispielsweise eine URL)

Die eigentliche Verhandlung erfolgt dann zwischen den beiden Netzbetreibern unter Austausch von Nutzungsregeln und ist somit vergleichbar zu den in LSA/ASA vorgestellten Ansätzen.

Szenario 2: Passives Sharing von lizenzierten Frequenzbereichen

Als Ausgangspunkt für dieses Szenario werden ebenfalls zwei Netzbetreiber betrachtet. Auch hier möchte Netzbetreiber A Spektrum von Netzbetreiber B für einen dedizierten Zeitraum Δt und einen definierten örtlichen Bereich verwenden. Für das Sharing von Spektrum ergibt sich der folgende Ablauf:

1. Ermittlung des Spektrumseigners mittels der Datenbanken (hier Netzbetreiber B)
2. Ermittlung des zulässigen Sharingverfahrens (hier Passiv)
3. Ermittlung der zulässigen Interferenzparameter (maximal zulässige Interferenzdauer Δt_{Inf})
4. Ermittlung der Belegung basierend auf Messwerten durch Entscheider
5. Übermittlung der Freigabe des Spektrums für Netzbetreiber A

Während der Nutzung des Spektrums ist der Lizenznehmer (hier Netzbetreiber A) verpflichtet regelmäßig Messungen bezüglich der Aktivität des Spektrumsinhabers vorzunehmen, um die vorgegebene Interferenzdauer Δt_{Inf} einzuhalten. Somit muss das Messintervall t_{mess} kleiner sein als die vorgegebene Interferenzdauer ($t_{\text{mess}} < \Delta t_{\text{Inf}}$).

Szenario 3: Sharing von nicht-lizenzierten Frequenzbereichen

Für den Umgang mit nicht-lizenziertem Spektrum kann ausschließlich ein passives Spektrumsharing verwendet werden. Im Vergleich zu Szenario 2 gibt es hier allerdings keinen Spektrumseigner, der in der Lage ist Vorgaben für die Nutzung zu machen. Vielmehr erfolgt eine unkoordinierte Verwendung des Frequenzbereiches. Einschränkungen werden lediglich vom Regulierer vorgegeben. Um die Bearbeitung der Spektrumsanfrage von Netzbetreiber A bearbeiten zu können, werden in dem SMS folgende Schritte bearbeitet:

1. Ermittlung der Lizenzierung mittels der Datenbanken (hier nicht-lizenziert)
2. Ermittlung des zulässigen Sharingverfahrens (hier Passiv)
3. Auswahl potentiell geeigneter Subbänder basierend auf in einer Datenbank hinterlegten Belegungsmustern (vergleichbar zu SLS)
4. Ermittlung der Belegung basierend auf Messwerten durch Entscheider
5. Übermittlung der Freigabe des Spektrums für anfragende Einheit

Aus den vorgestellten Szenarien wird ersichtlich, dass die Zugriffsgeschwindigkeit auf die Informationen eine entscheidende Rolle für das Verhalten des Systems spielt. Je nach Szenario lassen sich verschiedene Einflussparameter identifizieren. In Tabelle 2.4 sind die verschiedenen Parameter und deren Relevanz im Bezug auf ihren Einfluss auf die Zugriffsgeschwindigkeit für jedes Szenario aufgeführt.

Als zentraler Schlüsselparameter für ein solches System ergibt sich somit die Zuteilungszeit t_{ges} , welche für die Zuteilung des Spektrums benötigt wird. Zur Synchronisierung müssen alle Nachrichten mit einem Zeitstempel versehen werden. Zusätzlich erhalten alle Messdaten noch einen Verfallsstempel. Um entstehende Abweichungen zwischen den Knoten (Einheiten zum Speichern und Aufarbeiten von Daten) zu kompensieren ist es daher notwendig eine Synchronisierung der Uhrzeiten zwischen den einzelnen Knoten beziehungsweise Einheiten vorzunehmen. Hierfür muss ein entsprechendes Protokoll bei der Planung entworfen werden. Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Zuteilung von Spektrum ist es, speziell

Tabelle 2.4. Relevanz der Einflussparameter auf die Zugriffsgeschwindigkeit in den drei Szenarien

| <i>Nummer</i> | <i>Parameter</i> | <i>Szenario 1</i> | <i>Szenario 2</i> | <i>Szenario 3</i> |
|---------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Erkennung Spektrumstyps | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2 | Ermittlung des Eigners | ✓ | ✓ | |
| 3 | Ermittlung des Sharing-Verfahrens | ✓ | ✓ | |
| 4 | Übermittlung der Nutzungsregeln | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5 | Identifikation potentielle Frequenzbänder | | | ✓ |
| 6 | Ermittlung der Belegung | | ✓ | ✓ |

für Szenario 2 und 3, darüber hinaus notwendig stabile Detektionsalgorithmen zu verwenden. Für die Bewertung dieser Verfahren wird die Wahrscheinlichkeit für eine Fehldetektion p_f verwendet. Aus dem bisherigen Kapitel lassen sich somit die nachfolgenden Bewertungsparameter ableiten:

- Zuteilungszeit t_{ges}
- Wahrscheinlichkeit für eine Fehldetektion p_f

Basierend auf diesen Parametern erfolgt in Abschnitt 2.2.4 eine Beschreibung der Validierung.

2.2.2 Schnittstellen

Für die Implementierung ist die Wahl geeigneter Schnittstellen von großer Bedeutung, da diese für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten genutzt werden. Diese beschreiben die Verbindungen zwischen den Einheiten sowie die übertragenen Datenformate. Der Entwurf geeigneter Schnittstellen hängt von dem Aufbau des Gesamtsystems ab,

dass heißt, auf welcher Schicht des International Organization for Standardization (ISO)/OSI-Models die Implementierung erfolgt. Um der Anforderung einer „geringen Beeinflussung der Netzarchitektur“ (vergleiche 2.1.6) gerecht zu werden wird die Implementierung im Rahmen dieser Arbeit auf der Anwendungsschicht angesiedelt.

2.2.3 Protokolle

Basierend auf den Anforderungen an die Systemarchitektur sowie der Auswahl der Schnittstellen muss die Planung der Protokolle erfolgen. Hierbei handelt es sich um eine Ansammlung von Regeln und Formaten (sogenannter Syntax), welche bei der Kommunikation eingehalten werden müssen. Für den Entwurf der Protokolle haben sich die folgenden Aspekte als relevant gezeigt:

- Einheitliche Datenformate
- „Plug and Play“ Unterstützung
 - Automatische Einbindung neuer Knoten und Clients (Einheiten welche Daten bereitstellen oder Abfragen) , für den Fall eines verteilten Systems)
 - Automatische Abmeldung von Knoten und Clients
 - Automatische Erkennung von Fehlern bei Knoten und Clients
- Zeitsynchronisierung
 - Automatische Korrektur divergierender Zeiten von Knoten und Clients
 - Erfassung von Latenzzeiten bei der Übertragungen
 - Vollständige Mobilitätsunterstützung (offline-Betrieb)

Basierend auf dem Sachverhalt, dass die Implementierung der Architektur auf der Anwendungsschicht angesiedelt wird, besteht die Möglichkeit der Nutzung von bereits vorhandenen Protokollen wie beispielsweise dem Hypertext Transfer Protocol (HTTP).

2.2.4 Validierung

Die Validierung ist ein wichtiger Schritt zur Beurteilung des entworfenen Systems bezüglich der funktionalen Vorgaben und nutzt die identifizierten KPIs zur Bewertung des Systems. Für die Identifikation der KPIs werden sowohl die aufgeführten Anwendungsfälle herangezogen sowie auch die entsprechenden Implementierungsparameter. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich die folgenden KPIs ableiten:

- Spektrumsauslastung pro Zeit und Ort
- Anzahl verbundener Endgeräte
- Verfügbare Bandbreite pro Nutzer
- Zuteilungszeit t_{ges}
- Wahrscheinlichkeit für eine Fehldetektion p_f

2.3 Fazit

Abhängig von der Art des Spektrums (lizenziert oder nicht-lizenziert) erfolgt eine Identifizierung der Anwendungsbereiche und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Anforderungen an das System (bezüglich des Ablaufes der Zuteilung), welche für die Evaluierung des SMSs beachtet werden müssen. Die hierfür notwendigen a-priori Informationen sind in entsprechenden Datenbanken hinterlegt. Handelt es sich um ein nicht-lizenziertes Frequenzband, bedarf es zusätzlicher Sensing-Informationen sowie geeigneter Detektionsverfahren. Basierend auf den hier definierten Anforderungen und identifizierten KPIs erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln der Entwurf der Gesamtarchitektur und der Protokolle sowie der benötigten Zusatzfunktionalitäten.

3 Grundlagen zur dynamischen Spektrumsnutzung

Das stetig wachsende Datenvolumen in Kommunikationsnetzen (bis 2020 wird eine Vervielfachung um den Faktor 1000 prognostiziert [6]) resultiert im Bereich der funkbasierten Übertragung in einem wachsenden Bedarf an Spektrum. Zusätzlich erwartet die ITU einen Anstieg des Datenaufkommens um 25% - 40% pro Jahr [65] [66]. Ein Problem stellt hierbei die meist starre Zuteilung von Frequenzbereichen dar, wodurch einerseits Bereiche mit Unter- sowie Überlast resultieren. Das derzeitige verwendete Lizenzmodell beruht auf einer langfristigen und exklusiven Zuteilung von spektralen Bereichen an die entsprechenden Nutzer oder Dienste. Koordiniert wird dieser Vorgang international durch die WRC. Die nächste Konferenz ist für das Jahr 2018 [67] geplant. Zusätzlich zu dem starren Vergabeverfahren ergibt sich das Problem des „Hortens“ von Spektrum, da jeder Betreiber bei der Beantragung seinen maximalen Bedarf abdecken möchte. Messungen im GSM-Band haben bereits gezeigt, dass die durchschnittliche spektrale Auslastung bei circa 20% [68] liegt. Des Weiteren gibt es speziell im militärischen Bereich Spektren, welche nur in bestimmten Regionen ausgelastet sind. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung des (2,3 – 2,4) GHz Frequenzbandes (3rd Generation Partnership Project (3GPP) Band 40) in Frankreich. Dieser spektrale Bereich ist für die exklusive Nutzung durch das Militär, genauer gesagt die Telemetrie vorgesehen. Aus Abbildung 3.1 wird ersichtlich, dass sich die Nutzung dieses Frequenzbandes sehr stark auf lokale Bereiche eingrenzen lässt.

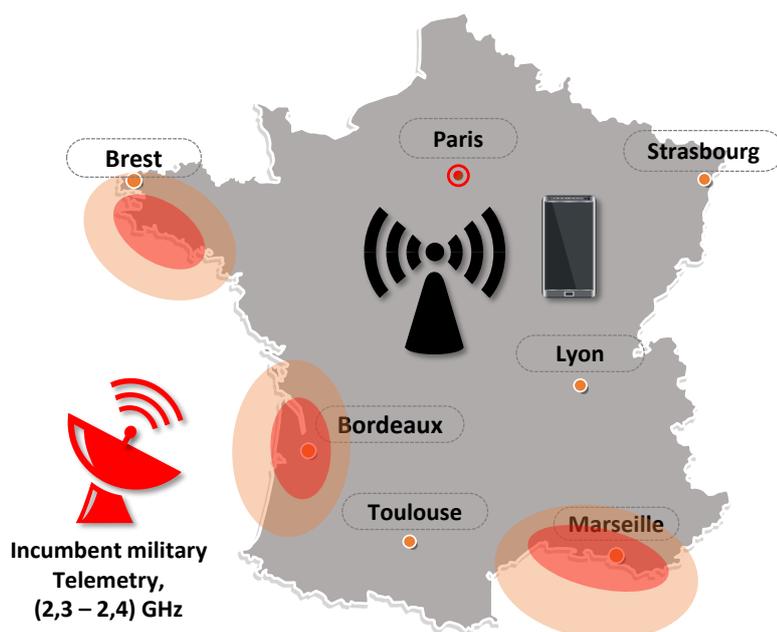


Abbildung 3.1. Belegung des 2,3 GHz Spektrums in Frankreich [17]

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden bereits diverse Strategien und Lösungsansätze entwickelt welche im Laufe dieses Kapitels betrachtet und bewertet werden. Als Übersicht ist in Abbildung 3.2 eine prinzipielle Auflistung der Vergabeverfahren zusammengestellt worden.



Abbildung 3.2. Übersicht der gegenwärtig verfügbaren Frequenz-Vergabeverfahren

Erste Ansätze zur automatischen Adaption des Funkzuganges, um eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen zu erhalten, wurden erstmals mit dem CR durch Joseph Mitola III betrachtet. Dieser beschränkt sich nicht ausschließlich auf die Funkzugangstechnologien und ist von Mitola [64] [69] wie folgt definiert worden:

Definition 3.1 (*Cognitive Radio*)

„The term cognitive radio identifies the point at which wireless Personal Digital Assistants (PDAs) and the related networks are sufficiently computationally intelligent about radio resources and related computer-to-computer communications to:

- a) detect user communications needs as a function of use context,
- and
- b) provide radio resources and wireless services most appropriate to those needs.“ [64] [69]

Dieser bezeichnet ein Funksystem, welches in der Lage ist eigenständig verfügbare spektrale Bereiche zu detektieren und entsprechend zu nutzen wodurch eine effizientere Nutzung erzielt werden kann [14]. Für die weitere Verwendung wird an dieser Stelle allerdings auf die Definition 1.1 der FCC verwiesen. Die Umsetzung von Systemen zur dynamischen Spektrumsnutzung beschränken sich nicht nur auf die technischen Aspekte, vielmehr hat auch die Rechtslage einen entscheidenden Einfluss auf derartige Systeme. Zum Verständnis ist es daher notwendig eine eindeutige Definition für den Begriff „Spectrum Management“ einzuführen.

Definition 3.2 (*Spectrum Management*)

„**Spectrum management** is a combination of regulatory procedures and tools for managing spectrum resources at radio service or application level in view of delivering regulatory solutions to accommodate different types of use, address new spectrum demand while accounting for existing uses, like regulatory solutions which dependent upon the type of ‚regulatory regime‘ (General vs. individual licence/authorisation)“ [70]

Bei der Zuteilung beziehungsweise Autorisierung der einzelnen spektra-

len Bereiche, bezogen auf den ECC Report 205 [71] erfolgt eine Einteilung in beiden folgenden Kategorien:

- *Governmental use*: Die Nutzung ist ausschließlich für staatliche Dienste (zum Beispiel Militär) vorgesehen.
- *Commercial use / civil use / non governmental*: Die Verwendung dieser Frequenzbereiche ist für den kommerziellen Gebrauch vorgesehen und darf unter Einhaltung vorgegebener Richtlinien verwendet werden. Hierbei sind die beiden nachfolgenden Anwendungsfälle zu unterscheiden:
 - *Individual authorisation*: In diesem Fall wird der Frequenzbereich einem speziellen Nutzer oder Anwendung zugeteilt. Hierbei handelt es sich nicht um einen Kauf des Spektrum sondern um ein Nutzungsrecht für einen definierten Zeitraum.
 - *General authorisation*: Handelt es sich um eine generelle Autorisierung, so dürfen die angegebenen Frequenzbereiche unter Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte von jedermann verwendet werden.

In Abbildung 3.3 sind nochmals die fundamentalen Unterschiede bezüglich den verschiedenen Regulatorien aufgeführt.

| Individual authorization (Individual rights of use) | | General authorization (No individual rights of use) | |
|--|--|--|--|
| Individual licence ¹ | Light-licensing | | Licence-exempt |
| Individual frequency planning / coordination Traditional | Individual frequency planning / coordination | No individual frequency planning / coordination | No individual frequency planning / coordination |
| Procedure for issuing licences | Simplified procedure compared to traditional procedure for issuing licences | Registration and/or notification | No registration nor notification |
| | With limitations in the number of users | No limitations in the number of users nor need for coordination | |

¹ Auch unter dem Begriff „traditional licencing“ bekannt

Abbildung 3.3. Referenz-Terminologie [72]

Zur Darstellung beziehungsweise Auflistung der Frequenzbereiche kommen sogenannte National Table of Frequency Allocations (NTFA) [71] zum Einsatz. Diese beziehen sich primär auf die Bereiche mit individueller Autorisierung. Basierend auf dem ITU-Konzept zur nationalen Frequenz-Zuweisung, ermöglicht sie eine fein granulare Darstellung der Frequenzbereiche bezüglich Zuordnung und den relevanten Randbedingungen. Der entsprechende internationale Ablauf einer Frequenzzuteilung ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

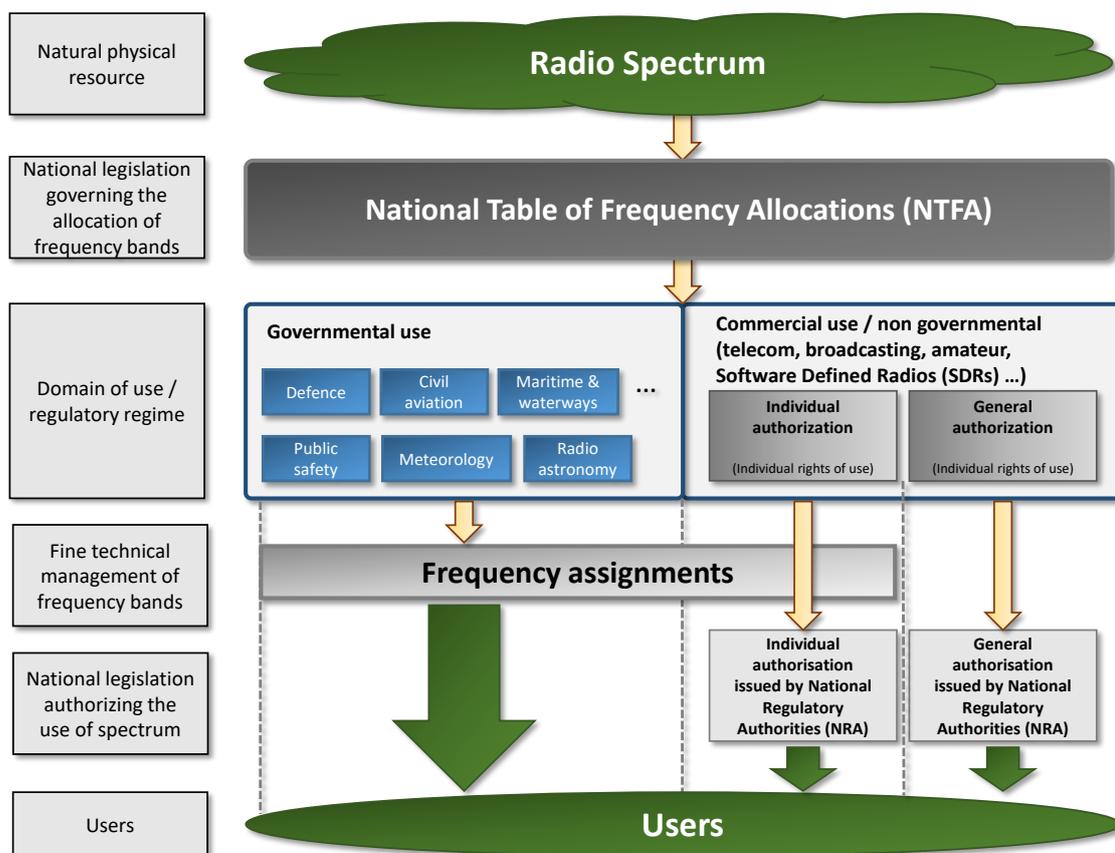


Abbildung 3.4. Nationale Gesetzgebung zur Frequenzzuteilung [70]

3.1 Stand der Technik

Trotz der sich immer weiterentwickelnden Empfängerstrukturen und der daraus resultierenden Vergrößerung des nutzbaren Frequenzbereiches bleibt dieser ab einigen GHz, bedingt durch die physikalischen Eigenschaften, nur eingeschränkt nutzbar. Insbesondere für längere Übertragungstrecken ist es also unausweichlich auf Frequenzbereiche unterhalb

von 6 GHz zurückzugreifen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden ist es daher unabdingbar eine möglichst generische Sende- beziehungsweise Empfangseinheit zu verwenden. Hierfür bietet sich der CR-Ansatz (siehe Definition 1.1 und 3.1) als eine geeignete Möglichkeit an.

Meist erfolgt die Optimierung eines solchen Systems ohne eine zusätzliche Kommunikation mit weiteren Einheiten. Die Optimierung kann sich sowohl am Dienst beziehungsweise den Anforderungen selbst als auch an den resultierenden Kosten orientieren. Eine detaillierte Beschreibung über den Aufbau eines solchen Systems wird an dieser Stelle nicht gegeben, vielmehr handelt es sich um eine rein generische Beschreibung. Meist werden im Zusammenhang mit CR auch noch die Begriffe Frequency Agile Radio (FAR) und Software Defined Radio (SDR) verwendet, wobei diese sich in der Definition und somit in den betrachteten Schwerpunkten unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Funkanbindung, genauer gesagt der Bitübertragungsschicht (sogenannter Physical Layer (PHY)-Layer im ISO/OSI Model), und deren optimaler Anpassung, weshalb hier ausschließlich der Begriff SDR verwendet wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die „Optimierung“ zwar auf die Bitübertragungsschicht bezieht, wobei die hierfür notwendige Signalisierung durchaus auf der Anwendungsschicht (Application Layer) erfolgen kann und somit eine sogenannte Overlay Implementierung erlaubt. Konventionelle Funk-Empfänger sind in der Regel so ausgelegt, dass sie meist ausschließlich für eine Funktechnologie, das heißt für einen stark eingeschränkten Frequenzbereich mit einem fest vorgegebenen Übertragungsverfahren arbeiten. Bei der Verwendung eines SDRs wird hingegen davon ausgegangen, dass es sich um eine Empfängerstruktur handelt, welche per Software möglichst flexibel steuerbar ist [73]. Einer der bekanntesten Vertreter dieser Klasse ist die Universal Software Radio Peripheral (USRP) SDR Plattform [74], welche in Verbindung mit GNU Radio [75] arbeitet. Derartige Systeme bieten eine hohe Flexibilität und somit auch das Potential verschiedenste Funktechnologien und Frequenzbereiche abzudecken. Arbeitet jedoch ein solches System völlig eigenständig, das heißt ohne jegliche externe Kontrolle, so kann dies trotzdem zu Kollisionen oder einer ineffizienten Verwendung des Spektrums führen. Um diesem Problem gerecht zu werden bedarf es eines Netzwerkes, welches die Kom-

munikation und Koordination zwischen den verschiedenen Funkknoten ermöglicht. In Bezug auf die Einbindung unterschiedlicher Technologien (Frequenzbereiche und Modulationen) ergeben sich natürlich auch Einschränkungen auf das Gesamtsystem. Die hier beschriebenen Einschränkungen beziehen sich einerseits auf den Aufwand für die Signalisierung in der Backbone-Struktur sowie den administrativen Aufwand, welcher für die Vergabe eines Frequenzbereiches notwendig ist. Wichtig für die Bewertung eines derartigen Systems ist die QoS und die Anzahl der versorgten Endgeräte beziehungsweise Nutzer (Number of Users (NoU)). Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich aus der Art der Lizenzierung des verwendeten Frequenzbereiches und der daraus resultierenden Vielfalt an involvierten Funktechnologien in diesem Bereich. Prinzipiell kann zwischen lizenzierten und nicht-lizenzierten Frequenzbereichen unterschieden werden. Innerhalb eines lizenzierten Bereiches ist die Verwendung auf den entsprechenden Inhaber unter Einhaltung der vom Regulierer vorgegebenen Regeln (beispielsweise Sendeleistung oder Bandbreite) beschränkt. Die Verwendung von nicht-lizenzierten Frequenzbändern, wie beispielsweise dem ISM-Band, unterliegt hingegen nur den vom Regulierer vorgegebenen Restriktionen und sind frei nutzbar. Ein nicht-lizenziertes Band kann somit keinem festen Eigner zugeteilt werden, wodurch mit einer generellen Koexistenz verschiedener Technologien und den damit verbundenen Problemen umgegangen werden muss. Bezogen auf das Konzept der gemeinsamen Nutzung von spektralen Bereichen hat dies implizite Auswirkungen auf die QoS aller beteiligten Partner. Im Gegensatz zu den lizenzierten Bändern benötigen die nicht-lizenzierten Frequenzbereiche keinerlei Koordination zwischen den einzelnen Teilnehmern, und somit ist jeder Sender eigenständig für die Erkennung und Vermeidung einer Kollision verantwortlich. Erschwert wird dies durch die verschiedenen Übertragungstechniken. Innerhalb derartiger Frequenzbänder, welche aber für eine bestimmte Technologie festgeschrieben sind, lässt sich aufgrund der besseren Eindeutigkeit der Kollisionserkennung auch eine verbesserte QoS erzielen. Ein Beispiel für einen derartigen Anwendungsfall ist das sogenannte Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)-Frequenzband für Schnurlostelefone. Für den Fall des lizenzierten Spektrums kann eine Unterscheidung zwischen den geteilten und exklusiv genutzten Frequenzbereichen unterschieden werden. Hierbei bietet eine exklusive Nutzung den Vorteil,

dass der Inhaber des Spektrums alleiniger Verwender ist und dadurch keine zusätzlichen Interferenzquellen vorhanden sind. Andererseits kann dies zu ungenutzten Bereichen führen und somit zu einer ineffizienten Ausnutzung. Die Anwendung sogenannter *sharing* Verfahren, also Verfahren zur Bereitstellung von (ungenutzten) spektralen Bereichen, bietet für andere Anwendungen eine geeignete Abhilfe. Ein Nachteil ist jedoch der potentielle Anstieg der Interferenz, woraus eine geringere Dienstgüte resultiert. Abbildung 3.5 zeigt die verschiedenen Zugriffsverfahren für lizenzierte und nicht-lizenzierte Spektralbereiche.

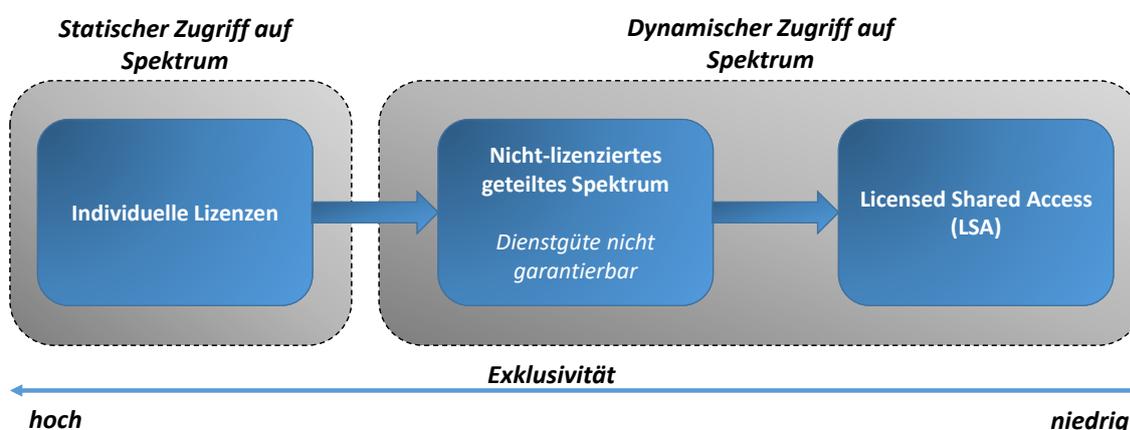


Abbildung 3.5. Mögliche Zugriffsverfahren für lizenzierte Spektralbereiche [76]

Zur Erzielung einer effizienten Ausnutzung des Spektrums ist die Verwendung von Verfahren zur geteilten Spektrumsnutzung unabdingbar. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Einbindung und Verwendung von schwach oder ungenutzten Frequenzbereichen. Solche Bereiche ergeben sich zum Beispiel aus militärischen Anwendungen, welche einen exklusiven Frequenzbereich verwenden, aber meist nur mit starker zeitlicher und örtlicher Begrenztheit eingesetzt werden. Hieraus resultierten Spektren mit wenig Auslastung. Mit Hilfe eines Systems zur Verteilung sowie zeitlich und örtlich beschränkter Neuzuteilung solcher Frequenzbereiche würde sich eine effizientere Verwendung gewährleisten lassen. Mittels der Nutzer-Klassifizierung nach primär und sekundär, ergibt sich eine übersichtliche Möglichkeit zur Modellierung der Problemstellung.

Für die Verfahren, die diese Problemstellung adressieren, kann eine prinzipielle Unterteilung in zentralisierte und verteilte Techniken vorgenommen werden.

3.1.1 Zentralisierte Herangehensweise

Eine Möglichkeit für die Steuerung von *spectrum sharing*-Verfahren ist die Verwendung einer zentralen Einheit. Dieser Ansatz bietet eine hohe Genauigkeit und ist wegen des höheren Aufwandes besser für Anwendungen mit zeitlich längerer Zuteilung geeignet. Aufgrund des relativ großen Zeitbedarfs wird in solchen Systemen versucht, eine orthogonale, also eine interferenzfreie Ressourcenverteilung zu erzielen. Dies bietet den Vorteil, dass keine detaillierten Informationen bezüglich des Interferenzverhaltens vorliegen müssen. Beispiele für solche Systeme sind die Geo-Location Database (GLDB), in der Informationen bezüglich eines bestimmten Gebietes hinterlegt werden, oder der auf den Einsatz eines Spectrum Brokers [46] basierende Ansatz.

3.1.2 Verteilte Herangehensweise

Im Vergleich zur zentralisierten Herangehensweise bietet eine verteilte Lösung eine deutlich höhere Flexibilität. Mittels eines solchen Ansatzes kann eine vollständige Integration in einen Standard erfolgen, wodurch keinerlei geschäftliche Vereinbarungen zwischen den Betreibern notwendig sind. Ein Beispiel ist das sogenannte *peer-to-peer coexistence protocol*, welches mittels definierter Schnittstellen Daten zwischen den involvierten Einheiten austauscht. Ein Beispiel für die Anwendung eines solchen Protokolls ist in der IEEE 802.16h-Spezifikation [77] zu finden. Ist die Einbindung von Schnittstellen in der Spezifikation nicht oder nicht mehr möglich, so kann auch die Verwendung von sogenannten *coexistence beacons* erfolgen. Solche Beacons werden meist in regelmäßigen Abständen von Systemen ausgesendet, womit ein vorhandenes System detektiert werden kann. Durch die Einbringung von Zusatzinformation kann eine effizientere Verwendung des Spektrums erzielt werden. In der IEEE 802.22.1-Spezifikation [78] wurde dieses Konzept bereits berücksichtigt. Funkssysteme, welche prinzipiell auf die Verwendung eines gemeinsamen Spektrums ausgelegt sind, können auf der Sicherungsschicht des ISO/OSI-Modells basierte Modelle zurückgreifen. Ein solches Verfahren ist in der IEEE 802.11-Spezifikation [79] mittels Request to Send (RTS) und Clear to Send (CTS) implementiert. Befindet sich das System im *Wi-Fi coexistence mode*, wird innerhalb der Pausen das Listen before Talk (LBT) Prinzip angewendet um Kollisionen zu verringern. Ba-

siert die dynamische Entscheidung bezüglich der Spektrums-Verwendung rein auf gemessenen Werten und daraus resultierenden Entscheidungen bezüglich der Belegungserkennung, so wird dies als *spectrum sensing* und Dynamic Frequency Selection (DFS)/Dynamic Channel Selection (DCS) bezeichnet.

3.2 Verfahren zur Vergabe von Frequenzbereichen

Für die Vergabe von Spektrum an Dritte stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche unter anderem auf Regeln oder Verhandlungen zwischen dem Eigner und dem potentiellen Nutzer (zum Beispiel SN) erfolgen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die für diese Arbeit relevanten Verfahren beschrieben.

3.2.1 Handel mit Spektrum

Der Handel mit Spektrum ist ein Markt-basierter Mechanismus, welcher es erlaubt spektrale Bereiche für eine sekundäre Verwendung freizugeben. Jeder SN hat innerhalb eines solchen Prozesses Rechte, die er geltend machen kann sowie auch Regeln, die er befolgen muss. Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft Rechte und Pflichten eines Lizenznehmers.

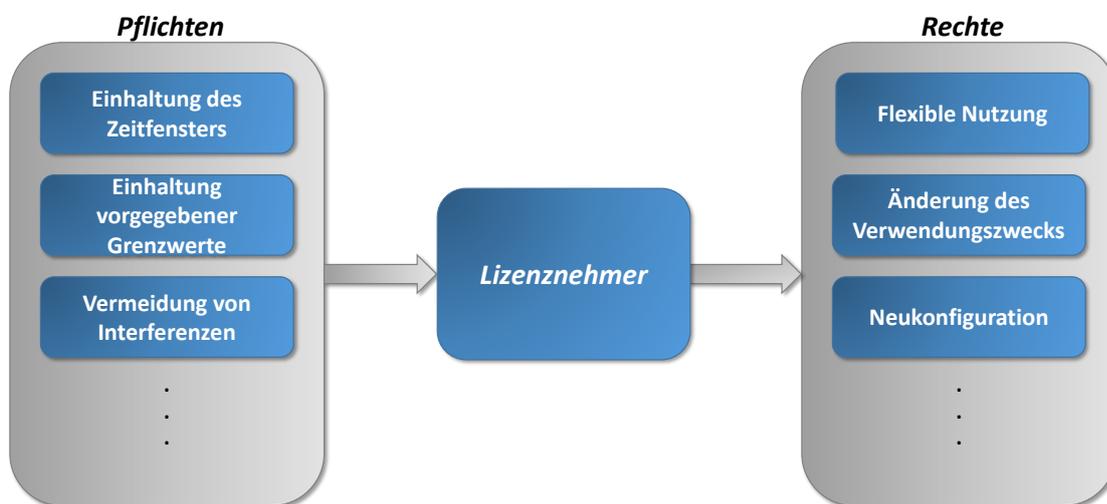


Abbildung 3.6. Rechte und Pflichten eines Lizenznehmers

Speziell die Pflichten können vom Inhaber des Spektrums beeinflusst und auch auf dessen Anforderungen angepasst werden. Prinzipiell sind für den Handel mit Spektrum Unterscheidungen bezüglich der Verwen-

dungsdauer zu treffen. Innerhalb dieser Arbeit werden drei Klassen von Zeitfenstern unterschieden:

- Klasse 1: Hierbei handelt es sich um eine Dauerleihe mit Ablaufdatum. Die Dauer ist länger als ein Jahr.
- Klasse 2: Die Fristen in dieser Klasse liegen zwischen einer Stunde bis maximal ein Jahr.
- Klasse 3: In der Klasse 3 werden alle Kurzzeitleihen betrachtet, das heißt alle Fristen die kleiner als eine Stunde sind.

Es ist an dieser Stelle offensichtlich, dass die Anforderungen an die verwendete SME für Vorgänge der Klasse 3 wesentlich höher sind als solche der Klasse 1.

3.2.2 Regelbasierte Auswahl

Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit CR-Systemen ist die Einbindung von sogenannten Nutzungsregeln. Diese erlauben es sowohl dem Regulierer als auch dem Spektrumseigner Regeln zu definieren beziehungsweise festzulegen, welche dann vom SN eingehalten werden müssen. Ein diesbezüglich verbreiteter Ansatz stellt die Verwendung einer Datenbank zur Speicherung dieser Regeln dar. Zu beachten bleibt hierbei die lokale Abhängigkeit, welche hinsichtlich der Granularität die Landesgrenzen deutlich unterschreiten kann. Hierdurch können eine Vielzahl lokal begrenzter Gebiete entstehen. Meist werden diese mit Hilfe von Polygonzügen beschrieben.

Zur Bereitstellung solcher Regeln ist es notwendig eine einheitliche Syntax sowie ein einheitliches Datenformat zu verwenden. Im Rahmen des DARPA neXt Generation (XG) Programms wurde in [80] [81] eine spezielle Sprache zur Darstellung der Regeln entwickelt. Auf dieser Syntax beruht auch das XG Radio System, welches in [82] näher beschrieben wird. Ein detaillierter Überblick bezüglich der regelbasierten Spektrumszuteilung ist in [83] und [84] aufgeführt. Innerhalb dieser Arbeit wird ein speziell für Spektrumsmanagement entwickeltes Extensible Markup Language (XML)-Derivat mit dem Namen Spectrum Markup Language (SML) verwendet. Detailliertere Informationen diesbezüglich können im Anhang C dieser Arbeit nachgelesen werden.

3.2.3 Verfahren zur dynamischen Frequenzallokation

Mit Hilfe einer dynamischen Zuteilung, das heißt eines „Ausleihens“ beziehungsweise „Vermietens“ des Spektrums zwischen den verschiedenen Technologien oder Anwendungen kann eine Lastverschiebung erreicht werden. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, ist eine Unterscheidung zwischen den lizenzierten und nicht lizenzierten Frequenzbereichen unabdingbar.

- **Lizenzierter Frequenzbereich:** Das Spektrum ist einem Eigner (auch Inhaber PN) zugewiesen, welcher es in der Regel exklusiv für eine vorgegebene Anwendung nutzt (zum Beispiel Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)).
- **Nicht-lizenzierter Frequenzbereich:** Mehrere Nutzer müssen sich diese spektralen Bereiche teilen, wobei jeder gleiche Rechte und Vorgaben hat. Als Beispiel für eine solche Vorgabe ist die im 2,4 GHz-Band maximal erlaubte Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP) von 100 mW zu nennen. Als Beispiel sind das Unlicensed National Information Infrastructure (UNII) sowie das ISM Band zu erwähnen.

In beiden Fällen wird zur Beurteilung die Güte der Übertragung herangezogen. Dies kann sich, je nach Anwendung aus mehreren Parametern, wie beispielsweise die Anzahl der versorgten Nutzer pro Fläche oder Durchsatz pro Nutzer, zusammensetzen. Des Weiteren müssen die eingesetzten Funktechnologien mit in Betracht gezogen werden. Aus diesem Grund ergibt sich eine Unterscheidung zwischen dem horizontalen und vertikalen Sharing.

- **Horizontal Sharing:** Die Nutzung eines spektralen Bereiches beschränkt sich auf die Systeme, welche alle eine vergleichbare Funktechnologie verwenden (zum Beispiel Sharing zwischen zwei Mobilfunkbetreibern im UMTS Netz).
- **Vertical Sharing:** Die Nutzung des Spektrums unterliegt keinerlei Beschränkungen bezüglich der verwendeten Funktechnologie.

Bei der Betrachtung der Effizienz des vertikalen Spectrum Sharing bezogen auf die Neutralität der verwendeten Funktechnologien zeigt Irnich

[85], dass diese mit steigender Anzahl der verwendeten Technologien abnimmt. Zur Verdeutlichung unterscheidet er zwischen Systemen mit:

- Gleicher Funktechnologie (zum Beispiel LTE, UMTS oder WLAN)
- Einer begrenzten Anzahl von Technologien, welche aber bekannt sind
- Beliebiger Technologie

Aus Abbildung 3.7 ist deutlich erkennbar, dass mit steigender Exklusivität des Frequenzbereiches eines spektralen Bereiches auch die Effizienz des Sharing steigt.

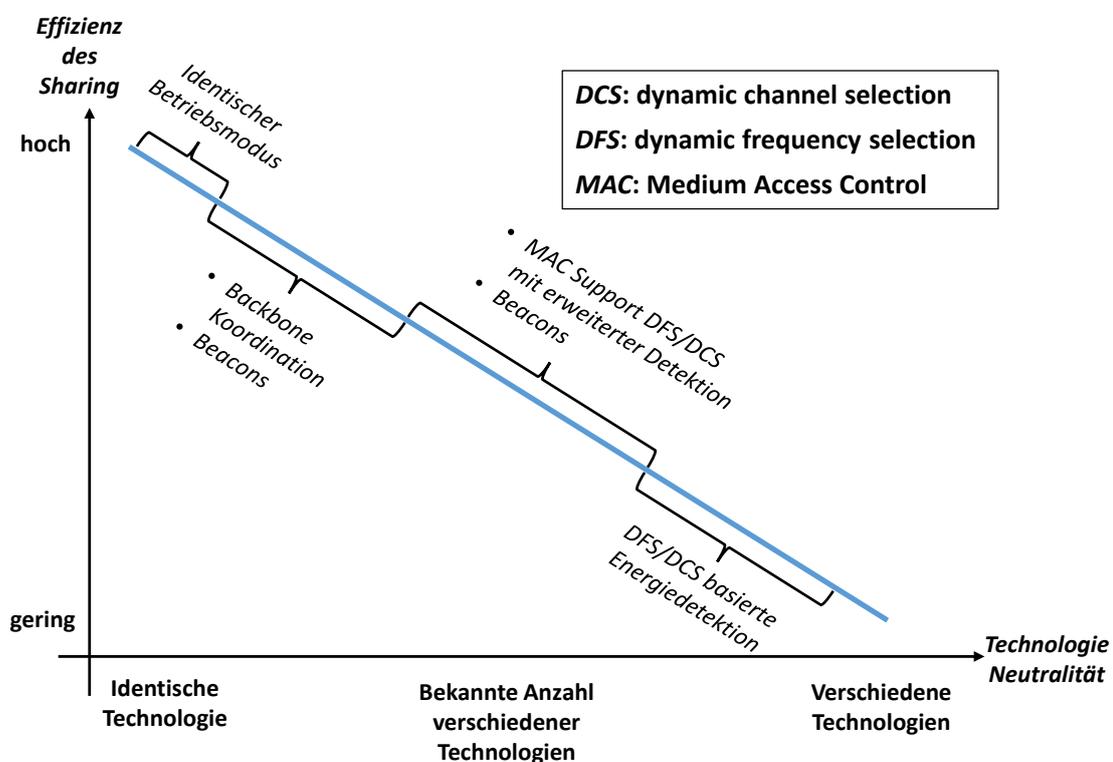


Abbildung 3.7. Darstellung der Effizienz verschiedener Zugriffsverfahren bezogen auf resultierende Technologie-Neutralität [76]

Als Konsequenz ergibt sich somit mit steigender Anzahl von Funksystemen einerseits ein Übergang vom horizontalen zum vertikalen Spektrum Sharing sowie eine geringer werdende Effizienz. Somit lässt sich schlussfolgern, dass mit einem vertikalen Spektrum Sharing immer eine geringere Effizienz des Gesamtsystems hervorgeht. Zur Sicherstellung

der aufgeführten Anforderungen gibt es verschiedene Ansätze, die in verschiedenen Projekten untersucht worden sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese vorgestellt.

3.2.3.1 Opportunistischer Ansatz

Der opportunistische Ansatz basiert auf der erfolgreichen Detektion des primären Nutzers zur Maximierung der QoS. Für einen PN ist es nicht notwendig Kenntnis über potentielle SN zu besitzen. Die Art des Sensing, das heißt, ob das Endgerät selbst die Messung vornimmt oder ob zusätzliche externe Messeinrichtungen verwendet werden, spielt hierbei keine Rolle. Entscheidend ist die Einhaltung der vom Regulierer vorgegebenen Bedingungen und Anforderungen. Ein wichtiges Merkmal ist die Tatsache, dass ein PN nicht über die Verwendung informiert werden muss, vielmehr ist der SN für die Detektion des PN verantwortlich und muss das Spektrum entsprechend freigeben. Für den Fall, dass ein PN mit einer CDMA-basierten Übertragung arbeitet, ist es unabdingbar, dass der SN seine Leistung unterhalb des Schwellwertes der PN hält. Zur Charakterisierung der verschiedenen Verfahren wird die Wahrscheinlichkeit einer Fehldetektion (P_f) verwendet. $1 - P_f$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die maximale Interferenzzeit t_{\max} , mit der die maximal zulässige Zeitspanne definiert wird, in der ein PN (nach einer Sendepause) von einem SN gestört werden darf, nicht überschritten wird. Für die Einhaltung der vorgegebenen Zeit ist des SN zuständig. Als weitere Konsequenz folgt, dass die Zeit t_{\max} sowohl die maximale Zeitdifferenz zwischen zwei Messungen festlegt und zugleich einen Bereich definiert, in dem ein SN ohne Messung senden darf. Ein Beispiel für einen opportunistischen Ansatz liefert CORVUS [86] [87] und das sogenannte *spectrum pooling* [88]. Das Interesse an diesen Konzepten zeigt sich an den bereits vorhandenen Implementierungen von Prototypsystemen [89] [90].

3.2.3.2 Verhandlungs-basierter Ansatz

Bei dieser Vorgehensweise ist es einem SN nur gestattet das Spektrum eines PN zu verwenden, falls er diesen um Erlaubnis gefragt und diese auch erhalten hat. Dem SN wird dann das Spektrum für die Zeit Δt bereitgestellt. Im Gegensatz zum opportunistischen Ansatz verfügt der PN, also der Inhaber des Spektrums, jederzeit über das Wissen, wer in seinem Bereich außerdem aktiv ist. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist die ef-

fiziente Möglichkeit der Koordination und somit der Sicherstellung einer optimalen Dienstgüte. Ein Nachteil dieser Herangehensweise liegt in der Koordination der beteiligten Einheiten, da hierfür ein System benötigt wird, welches die Kommunikation zwischen den Einheiten sicherstellt und gegebenenfalls koordiniert. DIMSUMnet [91] [92] ist ein Beispiel für ein solches System. Hierbei kommt ein sogenannter „Broker“ zum Einsatz, der für die Zuteilung von Spektrum an die einzelnen Teilnehmer verantwortlich ist. Eine weitere verhandlungsbasierte Option für die Vergabe von Spektrum sind Auktionen. Hierbei wird das Spektrum für die Zeit Δt an den Meistbietenden bereitgestellt [93] [94].

3.2.3.3 Ankündigungs-basierter Ansatz

Bei diesem Verfahren meldet ein PN einer zentralen Einheit (zum Beispiel einem Broker), dass ein freier spektraler Bereich vorhanden ist, der für einen vorgegebene Zeitraum zur Verfügung steht. Alle SN, die diese Mitteilung erhalten beziehungsweise mithören, haben die Möglichkeit das Spektrum zu nutzen. Im Gegensatz zu verhandlungsbasierten Ansätzen findet jedoch keine Koordination zwischen den SN statt und somit ist auch keine Sicherstellung einer bestimmten Dienstgüte möglich. Die in IEEE 802.22 definierte Spezifikation [95] verwendet einen solchen Ansatz.

3.2.3.4 Mehrdimensionaler Ansatz

Die bereits vorgestellten Verfahren und Konzepte zum Sharing von temporär ungenutzten spektralen Bereichen beschränken sich meist auf die reine Betrachtung im Zeitbereich. Faulhaber und Farber [96] stellen das Konzept einer regelbasierten Nutzung von Spektrum auf. Ein offensichtlicher Schwachpunkt dieser Herangehensweise ist in den anzuwendenden Exklusivrechten zu sehen. De Vany et. al. [97] stellen in ihrem Beitrag ein Konzept einer multidimensionalen Herangehensweise, kurz TAS, vor, die hier wie folgt beschrieben werden kann: „The owner of the TAS-based rights would have the exclusive right to produce electromagnetic waves for a specified period of time (T), over a specified geographic area (A), and in a specified range of frequency (S)“ [97]. Der Ansatz des TAS ist auch unter dem Begriff des *electrospace* bekannt. Matheson und Morris erweiterten diesen Ansatz in [98] auf ein Modell mit insgesamt sieben Dimensionen:

- Frequenz
- Zeit
- Drei Dimensionen der Position (Längengrad, Breitengrad, Höhenwinkel)
- Zwei mögliche Ankunftsrichtungen (Azimut, Höhenwinkel)

Mit Hilfe dieser Parameter ist es möglich eine Zone mit exklusiven Rechten zu definieren. Die Anwendung einer mehrdimensionalen Herangehensweise darf allerdings nicht als Sicherstellung einer gewünschten QoS angesehen werden, da zufällige Störungen jederzeit unerwartete Interferenzen erzeugen können [99].

3.2.4 Implementierungsansätze

Für die Umsetzung der beschriebenen Ansätze wurden auch bereits konkrete Lösungsverfahren entwickelt, welche in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

3.2.4.1 ASA und LSA

Im Mai 2011 wurde im Zuge des 72. Treffens der ECC WG FM das Konzept des ASA vorgestellt [4] [100] [5]. Ziel ist die effiziente dynamische Nutzung von temporär ungenutzten spektralen Bereichen (unabhängig von Ort oder Zeit) für nicht Interferenz-limitierte Systeme, welche für die IMT durch die ITU-R identifiziert worden sind. Für den Betrieb solcher Systeme wurden anfänglich das 2,3 GHz Band (mobile sharing with military applications/wireless channels) und das 3,8 GHz Band (mobile with satellites) vorgesehen. Ende 2011 veröffentlichte die Radio Spectrum Policy Group (RSPG) ein zu ASA vergleichbares Konzept namens LSA [101] [100], welches allerdings zusätzlich noch regulatorische Aspekte berücksichtigt. Im Vergleich zu ASA adressiert LSA auch Frequenzbereiche, welche nicht dem IMT angehören. Beide Ansätze sind verhandlungsbasiert und verwenden keine spektralen Messwerte. Zusätzlich sei an dieser Stelle angemerkt, dass das ASA-Konzept, welches von Nokia und Qualcomm entwickelt wurde, einen etwas generischeren Ansatz als LSA verfolgt, welches speziell für die Bedürfnisse der Mobilfunkbetreiber optimiert worden ist. Mit Hilfe der Correspondence Group on Cognitive Radio (CS-CRS), genauer gesagt die WG FM, wurden erste Bemühungen zur Erweiterung von ASA zu LSA unternommen. Hierfür wurden

die Projekte FM53 („Received Signal Strength (RSS) and LSA“) sowie FM52 („2,3 GHz“) ins Leben gerufen. Für eine genauere Beschreibung des FM52 und FM53 Projektes wird an dieser Stelle auf Kapitel 2.1.1 verwiesen. Innerhalb der RSPG wurde auf Anfrage der Europäischen Kommission die folgende Definition für LSA erarbeitet:

Definition 3.3 (LSA)

„A regulatory approach aiming to facilitate the introduction of radiocommunication systems operated by a limited number of licensees under an individual licensing regime in a frequency band already assigned or expected to be assigned to one or more incumbent users. Under the Licensed Shared Access (LSA) approach, the additional users are authorised to use the spectrum (or part of the spectrum) in accordance with sharing rules included in their rights of use of spectrum, thereby allowing all the authorised users, including incumbents, to provide a certain Quality of Service (QoS)“ [102]

Eine vereinfachte Definition wird innerhalb des *Advanced Dynamic Spectrum 5G mobile networks Employing Licensed shared access (ADEL)* Projektes [103] verwendet:

Definition 3.4 (ADEL-LSA)

„Incumbent operators may allow others to share their spectrum at specific times and places, according to an agreed set of rules.“ [103]

Im Bereich des Spektrum-Managements lässt sich ASA beziehungsweise LSA in den Bereich der „individuell lizenzierten Systeme“ eingliedern. Dies ermöglicht eine effektive Verwaltung der spektralen Bereiche und steht somit im Gegensatz zum bisherigen Ansatz, in dem Spektrumseigner immer Vorrang oder gar Exklusivrechte haben. Ein zentraler Aspekt von ASA beziehungsweise LSA ist die Verwendung einer GLDB sowie einer Policy Data Base (PDB). In Abbildung 3.8 sind die wichtigsten Komponenten einer LSA-Architektur aufgeführt.

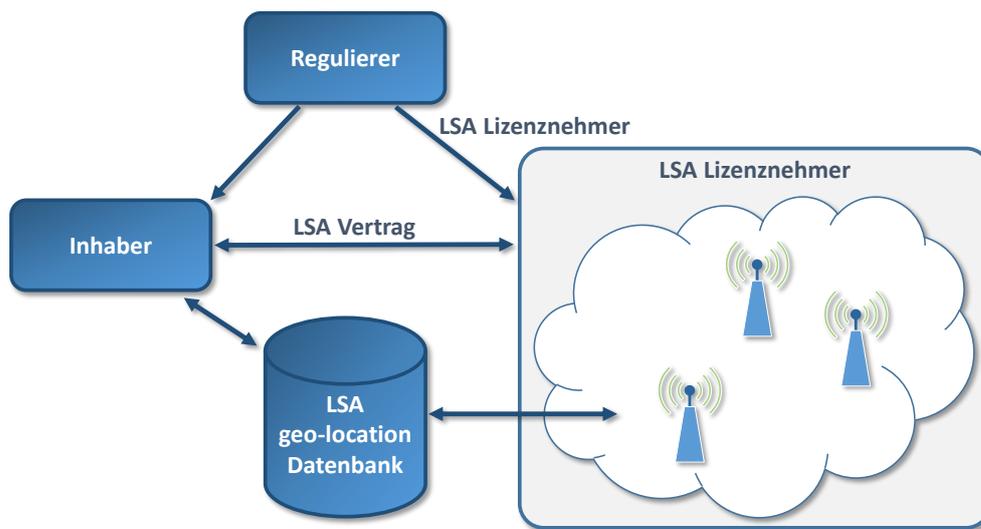


Abbildung 3.8. LSA Systemaufbau [17]

Bei der Verwendung von LSA erfolgt eine eingehende Beurteilung der Nutzer (PN und SN) sowie des daraus resultierenden notwendigen Schutzes gegen Interferenzen. Unter Einhaltung der vorgegebenen Parameter ist es möglich eine Dienstgüte für einen Anwendungsfall zu kalkulieren. Dieses Konzept beschränkt sich auf die zeitliche und geografische Ebene. Zusätzlich kann innerhalb eines LSA-Systems der Inhaber des Spektrums zusätzliche Nutzungsregeln definieren, welche von Lizenznehmern eingehalten werden müssen. Bei der Erstellung der Regeln ist der Lizenzgeber zur Einhaltung der Vorgaben des Regulators verpflichtet. Im Fall von ASA hat der Lizenznehmer das Recht, die spektralen-Bereiche immer dann zu nutzen, wenn der Inhaber (Lizenzgeber) nicht aktiv ist. Die Verwendung eines spektralen Bereiches kann sich auch auf ein lokal begrenztes Gebiet beschränken [5]. Das Ziel des Ansatzes ist keineswegs die Beeinträchtigung oder Vermeidung von lizenzgestützten Verfahren zum Teilen von Spektrum. Vielmehr ist das Ziel ein übergreifendes System zu definieren. Eine funktionale Systemarchitektur wurde von dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI) in [104] definiert und ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

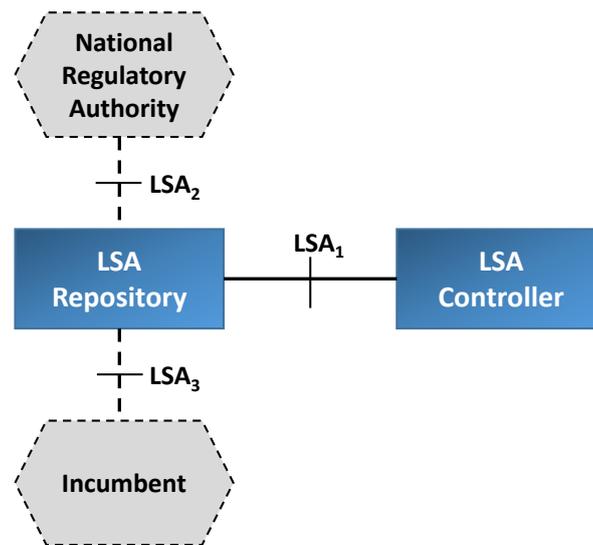


Abbildung 3.9. ETSI Systemarchitektur für LSA [104]

Der Aufbau lässt sich auf der logischen Ebene in ein LSA Repository und einen LSA Controller aufteilen. Das LSA Repository ist hierbei für die Speicherung der Belegung sowie die einzuhaltenden Sicherheitsanforderungen verantwortlich. Des Weiteren ist es in der Lage die verfügbaren Informationen an den LSA Controller weiterzuleiten. Zusätzlich ist eine Anbindung zur Überwachung der Daten für den Regulierer vorgesehen. Die eigentliche Zuteilung von Spektrum obliegt dem LSA Controller und basiert auf den Informationen vom LSA Repository. Im Rahmen dieses Ansatzes ergeben sich insgesamt drei Schnittstellen, LSA₁ bis LSA₃, welche für die Kommunikation spezifiziert werden müssen. Zur Beschreibung der benötigten Funktionalitäten erfolgt eine High-Level Abstraktion [104] unter Berücksichtigung definierter Anforderungen [105]. Abbildung 3.10 zeigt die ETSI High-Level Abstraktion und das funktionale Mapping.

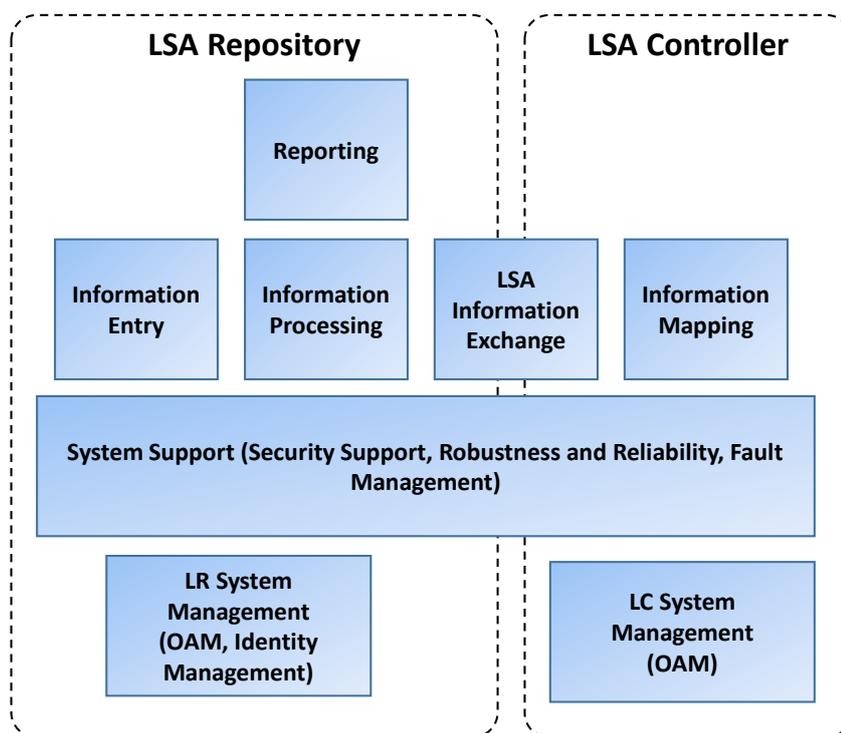


Abbildung 3.10. ETSI High-Level Abstraktion und funktionales Mapping [104]

Für die funktionale Betrachtung spielt die Kommunikation zwischen dem LSA Repository und dem LSA Controller eine entscheidende Rolle. In Abbildung 3.9 wird diese Verbindung durch die Schnittstelle LSA_1 repräsentiert. Für die Kommunikation werden bezüglich der Interface Management Funktionen gefordert, dass diese Methoden bereitstellen, welche eine koordinierte Kommunikation zwischen den einzelnen Einheiten ermöglichen [104]. Des Weiteren sollte eine Funktionalität zur Detektion von Applikations- als auch Protokollfehlern implementiert sein. Innerhalb der Kommunikation zwischen LSA Repository und LSA Controller werden unter anderem Informationen bezüglich der Verfügbarkeit von Spektrum ausgetauscht, welche im Folgenden als LSA Spectrum Resource Availability Information (LSRAI) bezeichnet werden. Diese Daten werden vom LSA Repository an den LSA Controller übermittelt und beinhalten eine Gültigkeitsdauer. Für die Prüfung der Gültigkeit ist der LSA Controller verantwortlich. Zusätzlich beinhaltet die LSRAI eine Option zur Festlegung von sogenannten Exclusion, Restriction und Prediction Zones wie in R-FUNC-05 und R-FUNC-06 im ETSI TS-103154 [105] definiert. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen wird im

Folgenden auf eine eingehende Betrachtung der Protokolle und Prozeduren im ETSI TS-103235 [104] verzichtet und an dieser Stelle auf das Originaldokument verwiesen.

In Abbildung 3.11 ist der in [101] vorgeschlagene prinzipielle Aufbau eines solchen Systems dargestellt. Im Gegensatz zu Abbildung 3.8 sind hier noch die Kommunikationswege zwischen den einzelnen Einheiten sowie deren Hierarchie im System beschrieben.

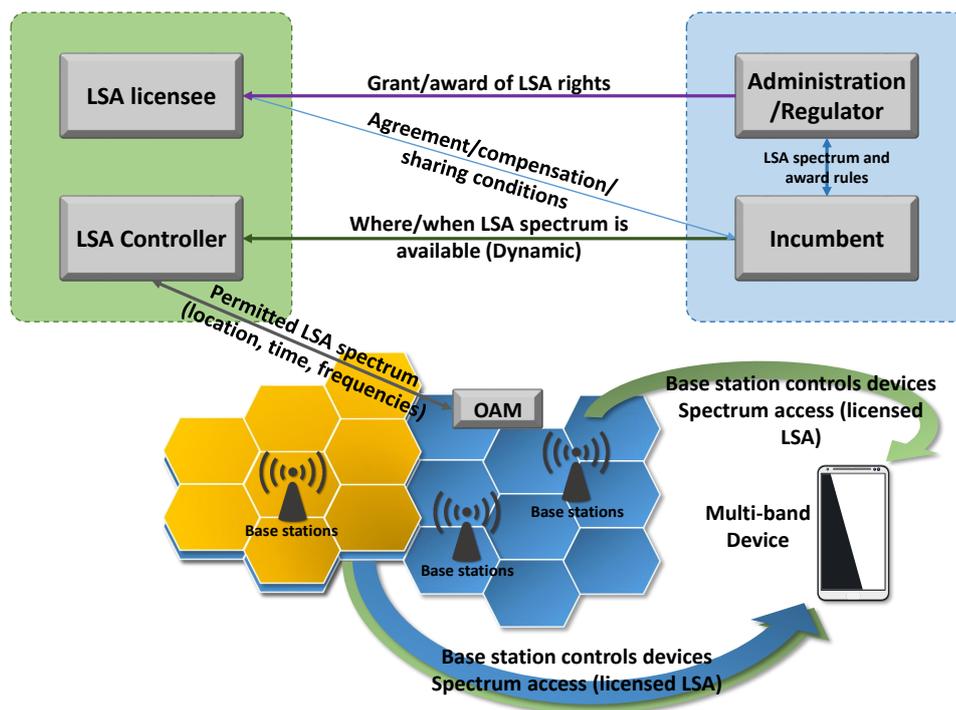


Abbildung 3.11. Möglicher LSA Systemaufbau [101]

Ein weiterer Ansatzpunkt liegt in der Einbindung von sogenannten *Small Cells*, die aufgrund ihrer geringeren Sendeleistung geografisch näher an Sendern des eigentlichen Spektrumsinhabers positioniert werden können. Des Weiteren sind auch höhere Frequenzen, wie beispielsweise 2,3 GHz und 3,5 GHz, zur Übertragung in einer solchen kleinen Zelle geeignet. Erste Erfolge konnten Anfang 2013 von Nokia Solutions and Networks (NSN) [106] und dem CORE+ Konsortium [107] mit dem Aufbau des ersten *Time Division Long Term Evolution (TD-LTE) Spectrum Sharing mittels LSA* Versuchs eines live 2,3 GHz TD-LTE Netzwerks erzielt werden. In den ersten Ergebnissen konnte laut Rouanne [106] ein Gewinn von bis zu 18% erhöhten Durchsatz erzielt werden. Advanced Dynamic Spectrum 5G mobile networks Employing Licensed shared access (ADEL) ist

ein von der EU im Rahmen von FP7 ICT Objective 1.1: „Future Networks“ [103] gefördertes Vorhaben, welches im Dezember 2013 begonnen hat. Das zugrunde liegende Ziel dieses Projektes ist die Ausschöpfung des durch LSA gegebenen Potentials zur effizienten Nutzung von Spektrum. Im Rahmen von ADEL werden die folgenden Punkte als Ziel anvisiert:

- Zehnfache Verbesserung der Kapazitätsmetrik (beispielsweise Summe der Netzwerkkapazität)
- Minimierung der CAPital EXpenditure (CAPEX) und OPerating EXpenditure (OPEX) der Netzbetreiber
- Effizientere Nutzung des Spektrums
- Verbesserung der Funkanbindung unter Sicherstellung von QoS

Ansätze, in denen keine Prädiktion der Dienstgüte möglich ist, wie beispielsweise „opportunistic spectrum access“ oder „secondary use“, finden innerhalb von LSA keine Berücksichtigung. Bei LSA ist es wichtig, dass alle involvierten Interessenten möglichst eng auf nationaler Ebene zusammenarbeiten. Nur so ist die Einführung eines MFCN innerhalb eines Frequenzbandes möglich. Hierbei lassen sich die nachfolgenden funktionalen Einheiten eines Funksystems wie folgt extrahieren:

- Administration / National Regulatory Authorities (NRA)
- Inhaber (beispielsweise der Netzbetreiber (Mobile Network Operator (MNO))
- Potentieller LSA Lizenznehmer (beispielsweise ein Netzbetreiber)

Eine allgemeingültige Angabe der Implementierung eines LSA Systems ist aufgrund der von Land zu Land abweichenden Vorgaben nicht möglich. Hingegen sollten beim Entwurf eines LSA Systems die folgenden Punkte immer berücksichtigt werden:

Möglichkeiten zur Einbindung der

- Administration (NRA)
- Spektrumsinhaber sowie potentieller LSA Lizenznehmer
- Erstellung von Nutzungsregeln für LSA Lizenznehmer (Prozedur muss mit der Authorisation Directive [108] kompatibel sein . Diese beinhaltet Leitlinien für das effiziente Spektrum Sharing).

3.2.4.2 Co-Primary Shared Access und Licensing Light

In diesem Modell teilen mehrere primäre Lizenzinhaber einen Frequenzbereich unter Einhaltung von fest vorgegebenen Bedingungen, welche mittels gegenseitiger Verträge abgesichert werden [109]. Die ausgehandelten Bedingungen müssen durch die Regulierungsbehörde genehmigt werden und dienen als Grundlage für die Aufteilung der vorhandenen Ressourcen. Ein vergleichbarer Ansatz wurde von der damaligen Deutsche Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP), heutige Bundesnetzagentur (BNetzA), für den 3,5 GHz-Bereich in Fixed Broadband Wireless Access (BWA) (2004/5) diskutiert. In den FCC 2007-Regeln wird für das sogenannte „light licensing“ Schema [110] ein ähnliches Verfahren für den Frequenzbereich 3,65 GHz – 3,7 GHz vorgestellt, welches in der IEEE 802.11y Spezifikation [111] integriert worden ist.

3.2.4.3 Secondary Horizontal Sharing Access

Beim Secondary Horizontal Sharing Access sind zusätzlich zu dem Lizenznehmer noch weitere sekundäre Dienste zugelassen. Diese besitzen ebenfalls eine Lizenz, welche es ihnen ermöglicht den Frequenzbereich unter Einhaltung von vorgegebenen Regeln zu nutzen. Hierbei liegt die Priorität in der Vermeidung beziehungsweise Minimierung von Interferenzen zu dem eigentlichen Lizenznehmer. Eine Koordination zwischen den einzelnen sekundären Diensten ist an dieser Stelle nicht vorgesehen, wodurch die Nutzung innerhalb der sekundären Diensten vergleichbar zu einem nicht-lizenzierten Frequenzbereich ist. Ein Beispiel für eine derartige Lizenzierung ist der sogenannte PMSE Service, welcher im selben Frequenzband arbeitet wie einige der TV Rundfunk Kanäle. Die Regulierer in Europa sowie auch im Vereinigten Königreich zeigen ebenfalls ein gesteigertes Interesse an der Bereitstellung der vorhandenen Ressourcen. Hierzu hat die CEPT ECCV eine Studie angefertigt, in der die Anforderungen für den Betrieb von CR im Ultra High Frequency (UHF)-Band identifiziert werden [112].

3.2.4.4 Unlicensed Shared Access

Ein Sharing in nicht-lizenzierten Frequenzbereichen bietet, wie bereits erwähnt, die Schwierigkeit, dass kein Lizenznehmer im klassischen Sinne vorhanden ist. Alle Nutzer dürfen den Frequenzbereich unter Einhaltung

der vom Regulierer vorgegebenen Regeln uneingeschränkt verwenden. Das ISM Band ist einer der bekanntesten Vertreter dieser Klasse. Speziell im 2,4 GHz Band müssen sich Technologien wie beispielsweise WLAN, Bluetooth, Zigbee oder Mikrowellen einen Frequenzbereich teilen.

3.2.4.5 Unlicensed Primary Shared Access

Etwas anders ist die Sachlage im Bereich des Unlicensed Primary Shared Access [113], wo ein dedizierter, nicht-lizenzierter Bereich einer Anwendung zugeschrieben wird. Es erfolgt keine explizite Zuteilung zu einem Spektrumseigner, wodurch auch kein dedizierter Lizenznehmer existiert. Ein Beispiel für einen solchen Frequenzbereich ist das DECT Band, welches im Bereich von 1,9 GHz arbeitet. Innerhalb dieses Bandes darf jedes DECT-zertifizierte Endgerät betrieben werden, ohne dass eine explizite Lizenzierung erfolgen muss. Zwischen den einzelnen Teilnehmern erfolgt jedoch keine Koordination, wodurch die Organisation durchaus mit einem nicht-lizenzierten Frequenzband vergleichbar ist.

3.2.4.6 Spectrum Load Smoothing (SLS)

Ein zu ASA/LSA komplementärer Ansatz wird beim SLS [114] verfolgt. Hierzu kann sowohl eine gedächtnislose als auch eine gedächtnisbehaftete Detektion zum Einsatz kommen. Berlemann et al. beschreiben in [115] die von SLS zu adressierenden Ziele wie folgt:

- Identifikation der spektralen Möglichkeiten (welche spektralen Bereiche können wie geteilt werden?)
- Verwendung dieser Möglichkeiten in einer koordinierten Art und Weise
- Freigabe des Spektrums, sobald dies vom Inhaber benötigt beziehungsweise verwendet wird

Als Grundlage für diesen Ansatz dient die Idee des sogenannten „Wasserfüll-Verfahrens“ (englisch: water filling algorithm), welches bereits aus der Informationstheorie bekannt ist und bei Mehrträgerverfahren verwendet wird (beispielsweise in Anwendungen wie Digital Subscriber Line (DSL)). Hierbei wird die Sendeleistung und die Modulation der einzelnen Subträger auf die Übertragungsfunktion des Kanals angepasst. Mit Hilfe von SLS ist es möglich eine Optimierung der Koordinierung

sowie auch der Nutzung des Spektrums zu erzielen, falls diese eine der aufgeführten Dimensionen mit einem weiteren System teilen muss:

- Räumliche Dimension
- Frequenzbereich (Träger oder Subträger)
- Zeitbereich
- Spreizcode
- Übertragungsleistung
- Polarisation

Für die nachfolgende Betrachtung erfolgt die Anwendung des SLS-Verfahrens im Zeitbereich auf festen Frequenzen. Somit ergibt sich für das Sharing eines Kanals ein Time Division Multiple Access (TDMA)-ähnliches Verfahren. Je nach Implementierung ist eine zentrale sowie auch dezentrale Implementierung umsetzbar. In Abbildung 3.12 ist das Spektrum von drei IEEE 802.11a Kanälen sowie deren Nutzung (graue Bereiche) exemplarisch dargestellt. Mittels eines SLS-basierten Systems erfolgt die Identifikation von potentiell freien beziehungsweise ungenutzten Bereichen (blaue Bereiche).

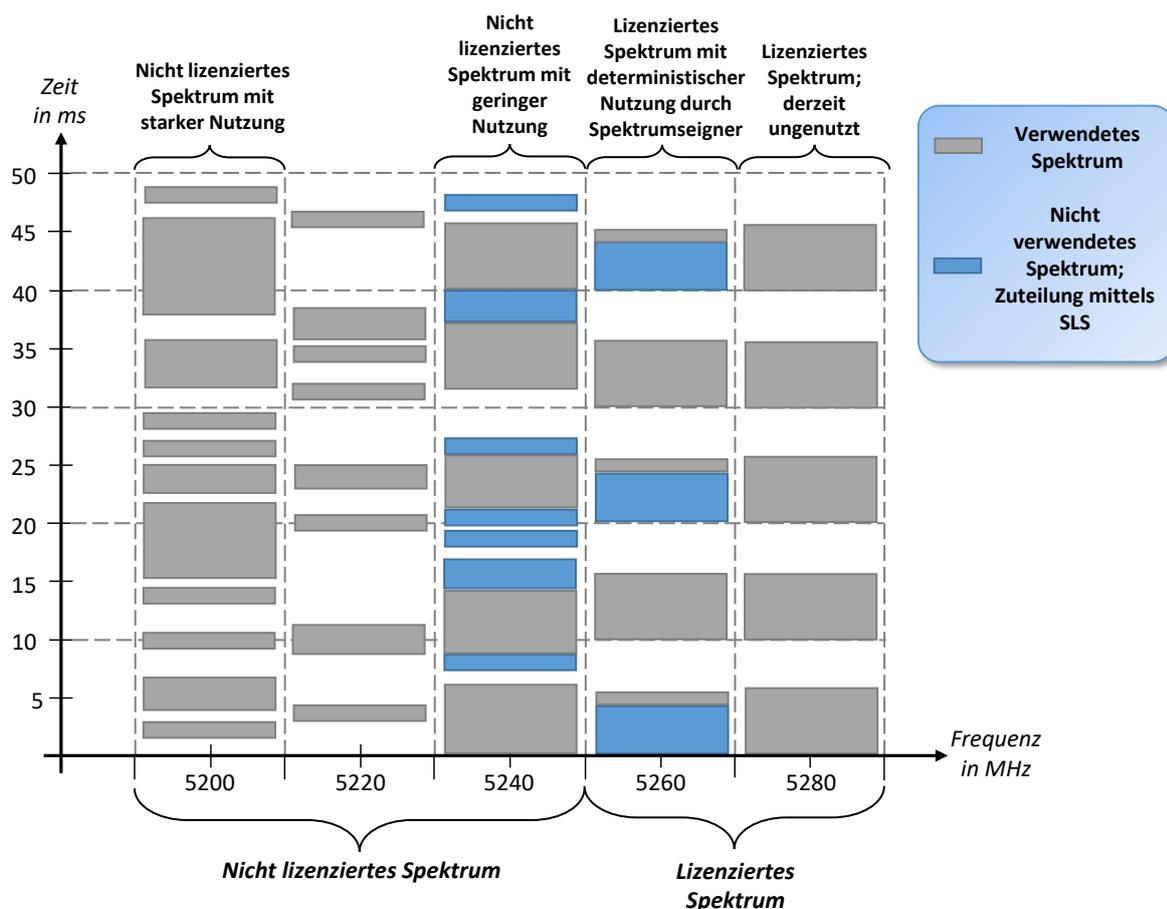


Abbildung 3.12. Spektrumsnutzung mittels SLS am Beispiel von drei IEEE 802.11a Kanälen im 5 GHz Bereich [115]

Für die Beschreibung des verwendeten SLS-Algorithmus werden feste Frequenzen zu verschiedenen Zeitpunkten betrachtet. Zusätzlich wird an dieser Stelle vorausgesetzt, dass es sich bei der Übertragung um eine Frame-basierte Kommunikation handelt. Eine Identifikation der Slotlänge kann mit Hilfe einer Autokorrelationsfunktion (AKF) erfolgen [116]. SLS ist ein iterativer Algorithmus, welcher schrittweise noch vorhandene Ressourcen an andere Teilnehmer zuweist. Die ersten beiden Schritte für einen derartigen Prozess sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

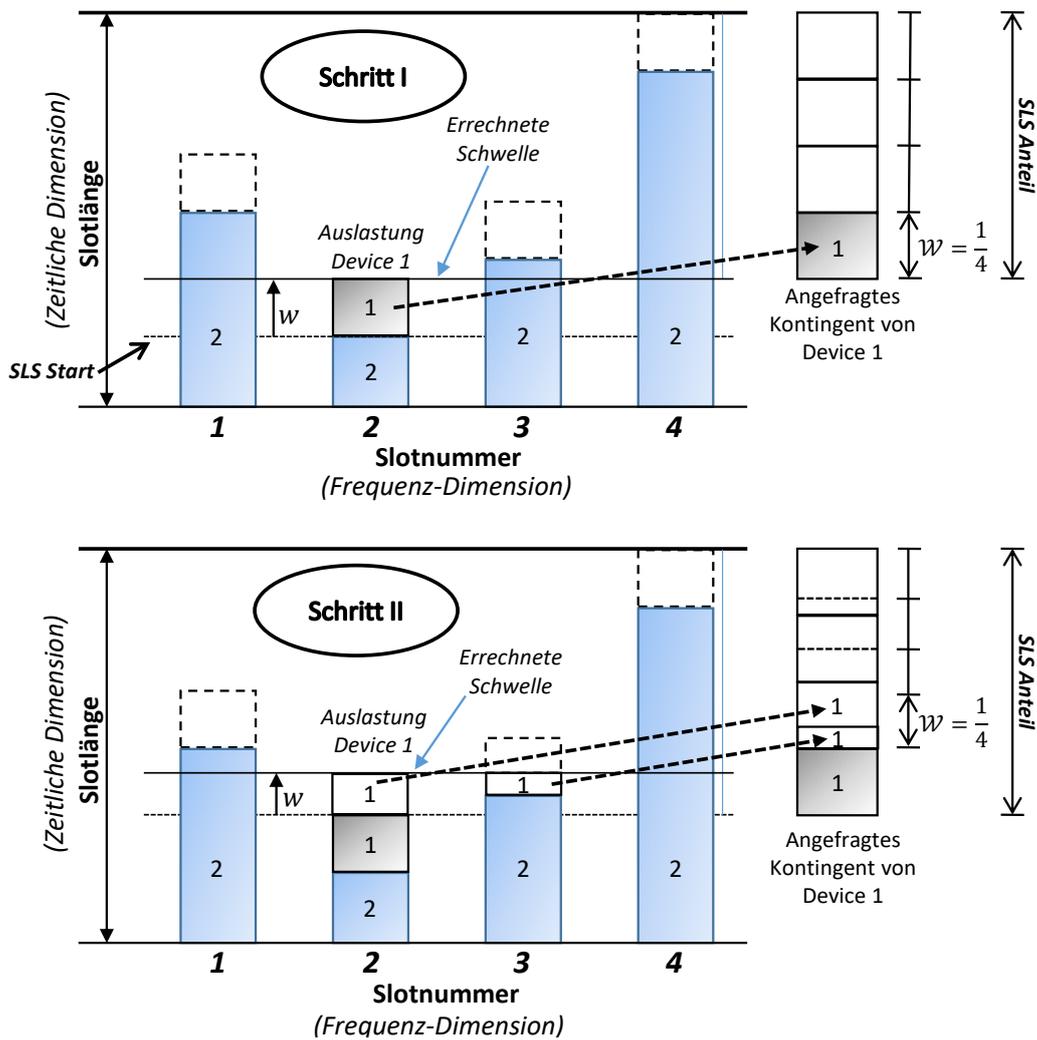


Abbildung 3.13. Prinzip des sogenannten Spectrum Load Smoothing im Zeitbereich über einen kompletten Frame (bestehend aus vier Slots) [115]

Die Schwelle w für die zusätzliche Allokation von Ressourcen ergibt sich aus [115] wie folgt:

$$w = \frac{\text{Menge der bereits verteilten Ressourcen}}{\text{Anzahl der Slots}} \quad (3.1)$$

Die somit entstehende Differenz zwischen der errechneten Schwelle und der Belegung wird mit Anteilen anderer Nutzer (SN) aufgefüllt.

Diese Informationen bezüglich der Belegung des Spektrums werden in einer Datenbank hinterlegt und dienen als Grundlage für die weitere Vergabe von Spektrum. Mit Hilfe dieser Datenbankeinträge und aktu-

ellen Messwerten wird dann eine Entscheidung bezüglich der Vergabe gefällt. Somit beruht diese Herangehensweise vollständig auf Messinformation und verzichtet komplett auf jegliche Verhandlungen zwischen Spektrumsinhaber und Client. Prinzipiell wird hierbei zwischen zwei verschiedenen SLS-Ansätzen unterschieden:

1. Basierend auf Beobachtung vorhergehender Frames
2. Mittels Reservierung

Für den Fall einer vorliegenden Reservierung muss diese mittels eines Broadcasts angemeldet werden. Die Reservierungsinformation könnte beispielsweise ein Teil eines erweiterten IEEE 802.11-Beacon [79] sein. Der Anteil der Ressourcen, welcher mittels SLS verteilt wird, wird auch als *SLS-amount* bezeichnet. Im Falle einer SLS-Reservierung liegt dieser automatisch bei 1. Liegt hingegen keine Reservierung vor, so wird dieser Wert adaptiv angepasst um eine stabile Regelung zu erhalten. Der Ablauf ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

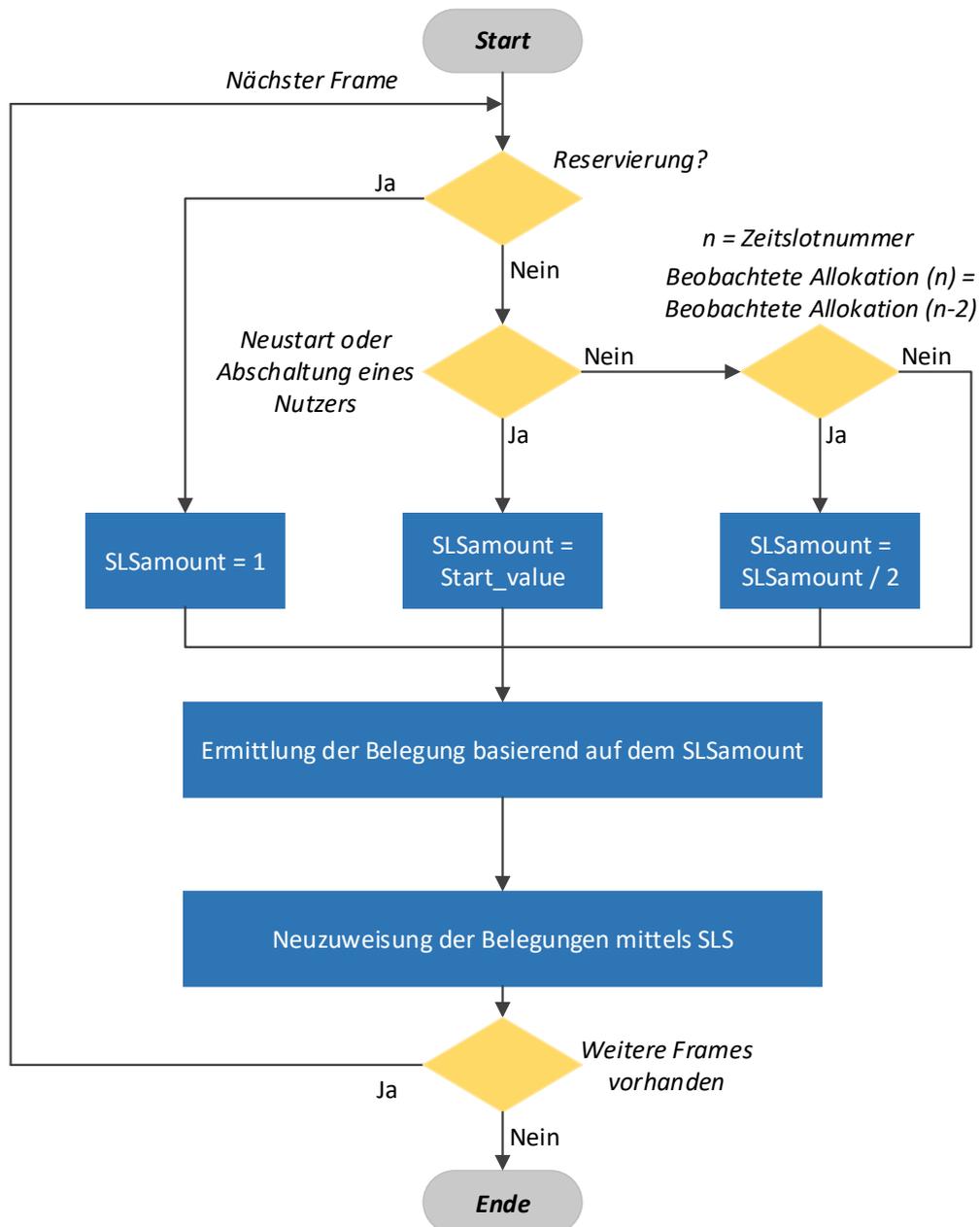


Abbildung 3.14. Iteratives Spectrum Load Smoothing mit einem adaptiven Anteil von neu zugeteilten Ressourcen [115]

3.2.4.7 Licensed Assisted Access (LAA)

Das sogenannte Licensed Assisted Access (LAA) Verfahren [117] wurde zur Verbesserung der LTE-Leistungsfähigkeit entwickelt. Es ermög-

licht den Betreibern eine Verwendung des nicht lizenzierten 5 GHz Frequenzbandes. Mit Hilfe von Small oder auch Pico Zellen wird eine Leistungssteigerung des Systems erreicht. Wie bereits beschrieben birgt die Verwendung von nicht-lizenzierten Frequenzbereichen den Nachteil, dass dem Endgerät keine Übertragungsgüte zugesichert werden kann. Ein Vorschlag bezüglich der Implementierung befindet sich in der 3GPP LTE Release 13 [118] [119].

3.2.5 Resultierende Möglichkeiten aus Sharing-Verfahren

Die vollständige Kontrolle der Netzbetreiber über das zugeteilte Spektrum basiert in den heutigen 3GPP Mobilfunknetzen auf der exklusiven Zuteilung der Frequenzbereiche. Mit Hilfe der aufgeführten Sharing-Verfahren ergeben sich neue Möglichkeiten zur effizienteren Nutzung des Spektrums. Nachfolgend sind drei verschiedene Sharing-Szenarien aufgeführt:

1. Intra-MNO Sharing
2. Inter-MNO Sharing
3. Offloading, das heißt durch Verwendung anderer verfügbarer Technologien (zum Beispiel WLAN)

In Tabelle 3.1 ist der Zusammenhang zwischen der Anwendbarkeit der Sharing-Verfahren und den Sharing-Optionen aufgeführt.

Tabelle 3.1. Bewertung der Sharing-Verfahren hinsichtlich der Szenarien (- = nicht anwendbar; O = anwendbar mit Einschränkungen; + = vollständig anwendbar)

| | <i>Intra-MNO Sharing</i> | <i>Inter-MNO Sharing</i> | <i>Offloading</i> |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Exklusiv | + | - | - |
| ASA/LSA | - | + | - |
| Co-Primary Shared Access | - | + | - |
| Secondary Horizontal Access | - | 0 | + |
| Unlicensed Shared Access | - | - | + |
| Unlicensed Primary Shared Access | - | - | - |
| Spectrum Load Smoothing | - | - | + |
| Licensed Assisted Access | - | - | + |
| Licensed Light | - | + | - |

3.3 Themenverwandte Projekte

Eine entscheidende Rolle für den effizienten Betrieb eines vollständig autonomen Spektrum-Management-Systems spielen die Verfahren zur Belegungsdetektion sowie die dahinterliegende Architektur zur Verwaltung und Verteilung der Kontextdaten.

Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt Cognitive Mobile Radio (CoMoRa) [120] hat die Zielsetzung ein kognitives Funkzugangssystem zu entwickeln, welches sich den Bedürfnissen aller Spektrums-Nutzer anpasst. Hierbei erfolgt die Einbindung der aus Deutschland aktuell vorgegebenen Rahmenbedingungen, wobei das Konzept für zukünftige Änderungen der Spektrums-Nutzung vorbereitet sein soll. Das Systemkonzept soll hierbei keine Einschränkungen bezüglich der verwendeten Funktechnologie aufweisen. Eine abschließende Verifikation des Systemkonzeptes erfolgte mittels einer Demonstration. Abbildung 3.15 zeigt die prinzipielle Architektur des in CoMoRa entwickelten Systems.

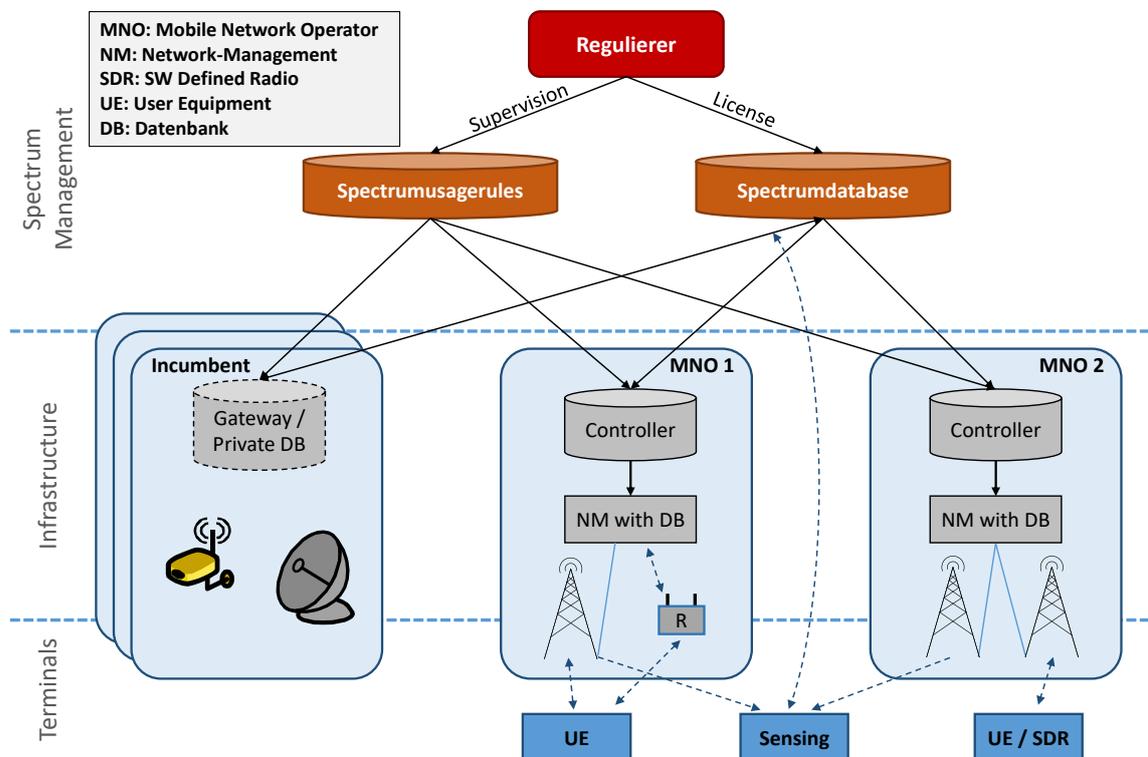


Abbildung 3.15. CoMoRa Gesamtkonzept [120]

Hierbei spielt die Einbindung von gesammelten Sensorwerten sowie zusätzlicher Informationen bezüglich der Funkzugangsnetze (*Radio Resource Management, Network Management, Self-Organizing Networks*) und den Informationen der Spektrenauswertung in Datenbanken eine entscheidende Rolle.

Das Verbundvorhaben Kognitiv LTE (kogLTE), welches ein Partnerprojekt zu CoMoRa darstellt, untersucht die Funkumgebung innerhalb von Gebäuden. Das Ziel ist die Entwicklung einer adaptiven Hochfrequenzelektronik, welche sich kognitiv auf die veränderten Funkbedingungen anpasst. Hierbei liegt der Schwerpunkt in der Optimierung der derzeitigen Funkausnutzung in dem Frequenzbereich unterhalb von 900 MHz. Ein zweites Partnerprojekt von CoMoRa ist das Verbundvorhaben Kognitives IR-UWB-System für zuverlässige Echtzeitanwendungen in der Automatisierungstechnik (KUSZ), welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert wird. Das Ziel des KUSZ-Projektes ist die Entwicklung eines Funksystems zur drahtlosen Vernetzung von Industrieanlagen. Hierbei soll jede Funkstation selbständig freie Funkkanäle identifizieren können. Die geplanten Untersuchungen sind für den gesamten erlaubten Ultra-wideband (UWB)-Spektrumsbereich (3,1 GHz - 10,6 GHz) in Raum, Zeit und Frequenz geplant. Des Weiteren ist die Einbindung eines Managementplans vorgesehen, welcher auf den Ergebnissen einer Prädiktionskomponente beruht und für jeden Teilnehmer eine Reihe möglicher Kanäle speichert. Im Rahmen des C-PMSE werden Verfahren zur Verbesserung der Frequenznutzung und Koexistenz für PMSE-Systeme durch kognitive Verfahren untersucht. Mit Hilfe der Entwicklung der Systemkomponenten (Antennen, Scan-Receiver, Scan-Controller, Cognitive Engine, Datenbank usw.) sowie von Mess- und Testmethoden dienen Kanal-, Stör- und Koexistenzmodelle als Referenz für die Standardisierungs- und Regulierungsaktivitäten innerhalb des Projektes. Hierfür wurden Frequenzen bis zu 275 GHz hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit analysiert [121] [122].

3.4 Existierende Lösungen für Spektrum-Management

Als Ausgangspunkt für diese Arbeit ist es unabdingbar einen Überblick über bisher vorhandene Spektrum-Management Systeme und Architekturen zu erhalten. Dies beinhaltet insbesondere Bemühungen, die aus Projekten oder auch seitens der Behörden beziehungsweise Regulierer erfolgt sind. Des Weiteren erfolgt in diesem Abschnitt eine Betrachtung von themenverwandten Problemstellungen, wie beispielsweise die Darstellung von Daten (wie Messwerte, Spektrale Belegungen, Nutzungsregeln, ...) sowie die verteilte Speicherung.

3.4.1 Definition Kontext und Kontextmanagement

Wie bereits beschrieben ist für den Betrieb eines Spektrum Management Systems eine Architektur zur Verwaltung den in Abschnitt 3.2 genannten Zusatzdaten notwendig. Hierzu wurden innerhalb verschiedener Forschungsaktivitäten erste Ansätze entwickelt. Eines der ersten kontextbasierten Systeme mit dem Namen „Active Badge Location System“ [123] wurde bereits im Jahre 1992 im Zusammenhang mit Anwendungen für Lokalisierungen vorgestellt. Im Rahmen weiterer Projekte wie beispielsweise GUIDE [124], Context Broker Architecture (CoBrA) [125] [126], MobiLife [127], Service Platform for Innovative Communication Environment (SPICE) [128], Context Casting (C-Cast) [129] oder German Lab (G-LAB) [130] wurden derartige Architekturen angewendet und auch weiterentwickelt. Der Grundgedanke all dieser Architekturen beruht auf der Verwendung sogenannter Kontextdaten oder Kontextinformationen. Zur effizienten Handhabung dieser Daten wurden diesbezüglich verschiedene Ansätze entwickelt, welche nachfolgend näher betrachtet werden. Eine grundlegende Voraussetzung für die Entwicklung einer entsprechenden Kontext-Management-Architektur stellt eine eindeutige Definition des Begriffes „Kontext“ dar. Schilit war einer der ersten Autoren, die eine technische Definition des Begriffes „Kontext“ vorgestellt haben. In seiner Arbeit [102] beschreibt er Kontext als eine Ansammlung von Informationen, welche einen Nutzer in einem kontext-sensitiven System beschreiben um das Systemverhalten entsprechend anpassen zu können. Diese Definition ist durchaus technisch motiviert, jedoch für die Umsetzung beziehungsweise Anwendung noch zu allgemein. In einem

weiteren Artikel [131] benennt er zusätzlich die seiner Meinung nach wichtigsten Aspekte von Kontext als:

- Den Standort des Nutzers
- Die in der Umgebung befindlichen Personen
- Die in der Umgebung verfügbaren Ressourcen

Weitere Kontextinformationen wie beispielsweise Sensordaten, finden bei ihm ebenfalls Anwendung. Im Folgenden ist eine konkrete Definition für Kontext sowie Context-awareness von Schilit in [102] zitiert:

Definition 3.5

„One challenge of mobile distributed computing is to exploit the changing environment with a new class of applications that are aware of the context in which they are run. Such context-aware systems adapt according to the location of use, the collection of nearby people, hosts, and accessible devices as well as to changes to such things over time.“
[102]

In seiner Interpretation von Kontext geht er davon aus, dass dieser auf die Position eines Nutzers, benachbarte Personen und Objekte sowie weitere, funktional verwendbare Einheiten (beispielsweise verfügbare Funknetzwerke) beschränkt werden kann [102]. Schilits Definition zeigt allerdings eine strenge Restriktion bezüglich der verwendbaren Daten und erweist sich somit als unflexibel. Es besteht keine Möglichkeit beispielsweise Nutzerprofile aus einer Datenbank zu verwenden. Dey hingegen lockerte in seiner Arbeit [132] die Definition von Kontext und definierte ihn wie folgt:

Definition 3.6

Context includes, but is not limited to, information the user is attending to, emotional state, focus of attention, location and orientation, date and time of day, objects and people in the user’s environment.
[132]

Ähnlich wie auch Schilit verwendet Dey für die Definition konkrete Daten, woraus ein relativ starres und unflexibles System resultiert.

Um eine unmittelbare Entscheidung treffen zu können, ob Informationen als Kontext einzuordnen sind, ist eine allgemeinere aber auch eindeutige Definition notwendig. Eine geeignete Definition findet sich in Deys Dissertation aus dem Jahr 2000:

Definition 3.7

Context is any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between a user and an application, including the user and application themselves. [133]

In Deys Dissertation wird Kontext nicht anhand konkreter Beispiele oder physikalischer Größen beschrieben, vielmehr verwendet er übergreifende Charakteristika. Mit der Definition 3.7 ist einerseits eine meist eindeutige Kontext-Zuordnung von Information möglich, ohne neue Bereiche beziehungsweise Informationen auszugrenzen.

Definition 3.5, 3.7 und 3.6, sowohl von Schilit als auch von Dey, beschreiben den Begriff „Kontext“ aus der Sicht einer Applikation. Diese Betrachtungsweise ist keineswegs unüblich, vielmehr wird diese Vorgehensweise unter anderem auch von Chen [134] und Schmidt [135] angewendet.

Nach McCarthys Auffassung [136] ist es durchaus gerechtfertigt mehrere Definitionen von Kontext zuzulassen, die jeweils auf die entsprechende Anwendung angepasst sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine heterogene Sensor- und Datenlandschaft angenommen, womit die erste Definition von Dey [132] zu speziell wäre und somit eine starke Restriktion zur Folge hätte. Basierend auf der Definition 3.6 von Dey [133] wurde die nachfolgende Definition für diese Arbeit formuliert.

Definition 3.8 (*Kontext*)

Als Kontext oder Kontextinformation wird jede Art von Information angesehen, mittels derer es möglich ist eine Charakterisierung einer Instanz (physikalisch sowie auch virtuell) vorzunehmen. Instanzen können in diesem Zusammenhang sowohl als biologische Lebensformen (Mensch oder Tier), Gegenstände oder auch virtuelle Objekte repräsentieren, die für eine Interaktion zwischen Nutzer und Anwendung sorgen. Dies kann gegebenenfalls den Nutzer als auch die Anwendung beinhalten.

Im Folgenden wird Definition 3.8 als Grundlage für den Begriff „Kontext“ angesehen.

3.4.2 Kontext-sensitive und Kontext-Management-Systeme

Mittels der vorangehenden Definitionen des Begriffs Kontext beziehungsweise Kontextinformation ist es nun möglich eine Interpretation für den Begriff Kontextmanagement zu definieren und daraus die Funktion einer Kontext-Management-Architektur anzugeben. In entsprechenden Veröffentlichungen beziehungsweise wissenschaftlichen Beiträgen tauchen im Zusammenhang mit „Kontext“ auch Begriffe wie „Context-Aware“ [102] oder „Context Awareness“ [137] auf. Diese Umschreibungen lassen schon darauf schließen, dass die Autoren der Beiträge ihren Schwerpunkt nicht auf die Kontextdaten selbst legen, sondern vielmehr in dem Verhalten beziehungsweise in der Adaption des Verhaltens des Gesamtsystems, welches abhängig von den Kontextdaten agiert, sehen. Der Begriff „context-aware“ wurde erstmals von Schilit [102] in dem folgenden Zusammenhang verwendet: „Context-aware computing is the ability of a mobile user’s applications to discover and react to changes in the environment they are situated in“ [102]. Mit dieser Definition beschreibt Schilit hier ein System welches in der Lage ist relevante Änderungen in der Umgebung zu erfassen und das Verhalten des Systems diesen anzupassen. In seiner Dissertation teilt er den Ablauf innerhalb eines solchen Systems in die folgenden drei Schritte auf [138]:

- Discover (erfassen), Erfassung von Kontextdaten
- Selection (auswählen), Auswahl geeigneter Information
- Use (anwenden), Verwendung innerhalb einer Anwendung

Brown [137] betrachtet den Begriff „Context Awareness“ als eine Beschreibung oder Bezeichnung von Applikationen, deren Funktion und/oder Verhalten hauptsächlich von Kontextinformationen bestimmt wird. Um den Begriff „Context Aware“ näher zu spezifizieren hat Brown [137] in seiner Arbeit Kontext-Informationen als Parameter beschrieben, welche die aktuelle Situation charakterisieren. Dies deckt sich mit der obigen Definition für Kontext. Hierfür dienen ihm beispielsweise die Uhrzeit, Personen in der Umgebung, Jahreszeit oder Sensordaten wie Temperatur. Des Weiteren beschreibt Ryan [139] in einer anderen Arbeit „context awareness“ als die Fähigkeit eines Computers Informationen bezüglich der Umgebung zu erfassen und entsprechende Aktionen auszuführen. Als Umgebungsinformationen verwendet er Ort, Zeit, Temperatur oder die Nutzeridentität.

Weitere Begriffe, die im Zusammenhang mit kontext-sensitiven Systemen (Context Aware Systems) in Verbindung gebracht werden, sind:

- Intelligente Anpassung (Intelligente Adaptation): Brown [140] beschreibt in seiner Arbeit die Möglichkeiten der intelligenten Anpassung von Diensten in Funknetzwerken unter der Verwendung von Umgebungsinformation.
- Reactive Environment: Dieser Begriff wurde von Cooperstock geprägt [141]. Er beschreibt ein Konzept für einen kontext-sensitiven Besprechungsraum.
- Responsive Environment: Elrot [142] verwendet diesen Begriff in seiner Arbeit im Zusammenhang mit automatisierten Gebäuden. Als Testobjekt wurden 13 Büroräume und einige angrenzende öffentliche Gebiete mit Sensoren ausgestattet. Neben Sensoren für physikalische Messwerte, wie beispielsweise Temperatur oder Luftdruck, finden in dieser Anwendung auch elektronische Kalendereinträge und active Badges Verwendung.
- Context-sensitive: In der Arbeit von Rekimoto [143] werden Anwendungen, deren Dateikommunikation bidirektional erfolgt, als kontextsensitiv bezeichnet.
- Dynamisches System: Fickas [144] untersuchte das Verhalten eines umgebungsgesteuerten Computersystems, welches zu Servicezwecken verwendet werden soll. Als Eingabe werden Sprachsignale und Tastatureingaben verwendet. Ein Funkmodem sowie eine

Infrarot-Schnittstelle stellen eine Verbindung zu umliegenden Systemen her um weitere Informationen über die Umgebung zu erhalten. Als übergreifende Beschreibung der einzelnen Komponenten verwendet Fickas den Begriff des dynamischen Systems.

In dieser Arbeit werden die Begriffe „Context Aware“ und „Context Aware System“ in den Definitionen 3.9 und 3.10 wie folgt beschrieben:

Definition 3.9 (*Kontext-sensitiv*)

Als Kontext-sensitiv wird die Anpassung eines Verhaltensmusters auf bestimmte Einflussparameter beschrieben. Die hierbei eintretende Verhaltensänderung erfolgt völlig autonom und basiert auf kombinatorischen Verknüpfungen. Hierbei können sowohl physikalische Parameter (z.B. Messwerte) als auch virtuelle Parameter und entsprechende Zustände eine Rolle spielen.

Definition 3.10 (*Kontext-sensitives System*)

Ein System wird als kontext-sensitives System bezeichnet, wenn es mit seinem Verhalten den Anforderungen in Definition 3.9 gerecht wird, das heißt ein System, welches in der Lage ist sein Verhalten an die, mittels Kontextinformation beschriebenen, relevanten Gegebenheiten anzupassen.

Kontext-sensitive Systeme werden in der Literatur gelegentlich auch als *Context-Aware Systems* bezeichnet. Innerhalb dieser Arbeit wird aber der Begriff „kontext-sensitive Systeme“ verwendet.

Jede Änderung der relevanten Kontextinformation bewirkt bei einem kontext-sensitiven System eine Adaption an die neuen Gegebenheiten und wird auch als *Context-Awareness* bezeichnet. Es hat sich gezeigt, dass mit Hilfe von Kontext Informationen eine Optimierung von LTE-Advanced Netzen erzielt werden kann [46]. Des Weiteren hat sich Context-Awareness zu einem wichtigen Business Enabler entwickelt [145] [146]. Um eine solches System jedoch realisieren zu können ist es notwendig die Kontextinformationen auf definierte Art und Weise zu verarbeiten. Dieser Vorgang wird als Kontextmanagement bezeichnet und bedingt die Verwendung einer sogenannten Kontext-Management-Architektur.

In der Regel wird ein solches System als „Middleware“ realisiert. Beispiele für derartige Systeme sind Reconfigurable Context-Sensitive Middleware for Pervasive Computing (RCSM) [147], Confab [148], Pervasive, Autonomic, Context-aware Environments (PACE) [149] und Mobile Collaboration Architecture (MoCA) [150].

Ein weiterer wichtiger Punkt für den Aufbau eines einsatzfähigen Systems ist die Verteilung und Speicherung von Kontextinformationen um eine vollständige Funktionalität aufbauen zu können.

3.4.3 Architekturen und Implementierungen

Eine gängige Art der Implementierung von Kontext-Management-Architekturen stellt die sogenannte Middleware-Struktur da. Diese ermöglicht die Kommunikation zwischen Einheiten in heterogenen zentralisierten und verteilten Systemen. Für die Kommunikation wird zwischen dem Betriebssystem eines Knotens und der eigentlichen, verteilten Middleware-Einheit eine zusätzliche Schicht zur Abstrahierung implementiert. Mit Hilfe dieser Schicht (auch als Abstraction Layer bezeichnet) wird es ermöglicht, dass die Heterogenität des Systems keinen Einfluss auf die Kommunikation zwischen den Einheiten hat. Für den Datentransfer erscheint das System als vollständig homogen. Meist werden bei den Middleware-Strukturen beziehungsweise -Implementierungen statische Modelle zugrunde gelegt, in denen die Daten beziehungsweise Dienste in einer Datenbank hinterlegt sind. Die verwendeten Modelle für die Repräsentation der Daten sowie die zugehörige Datenverarbeitung bieten meist keine Variabilität. Für die Interaktion zwischen den beteiligten Einheiten ergibt sich dann eine sogenannte request/provide Interaktion. Hierbei erfolgen die Anfragen (request) von der Datenquelle, dem sogenannten Provider, unmittelbar, das heißt asynchron beantwortet (provide). Zur Bereitstellung solcher Dienste eignet sich eine Client/Server Architektur, mit deren Hilfe entfernte Funktionalitäten zugänglich gemacht werden. Als Beispiele lassen sich die Remote Procedure Calls (RPC) [151] [152] [153] und das Simple Object Access Protokoll (SOAP) [154] auflisten.

3.4.3.1 Zentralisierte Systeme

Eine einfache zentralisierte Middleware-Struktur lässt sich an dieser Stelle mit Hilfe der Implementierung eines sogenannten Context Broker (CxB) aufführen. Abbildung 3.16 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer

solchen Struktur.

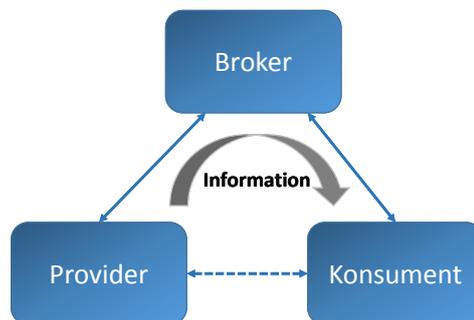


Abbildung 3.16. Aufbau einer Broker-basierten Middleware-Struktur [25]

Der Broker dient in diesem Ansatz als zentrale Vermittlungsstelle und ist somit die Engstelle der gesamten Architektur, was sich negativ auf die Skalierbarkeit auswirkt. Zur Verbesserung der Performanz und der Skalierbarkeit erweisen sich sogenannte Publish/Subscribe Protokolle als vorteilhaft. Dies ermöglicht ein asynchrones Abfragen der Daten und ist mit einem Abonnement von Daten vergleichbar. Die Übertragung der Daten ist ereignis-basiert und somit beispielsweise abhängig von Schwellwerten. Mit diesem Verfahren kann die Belastung des Systems deutlich reduziert werden. Beispiele für derartige Implementierungen sind CoBrA [126] [155], Oracle Java Enterprise Edition (Java EE) [156] oder Benachrichtigungs-Dienste (notification services) [155] [157] [158] [159].

3.4.3.2 Verteilte Systeme

Zur Verwaltung und Speicherung von großen Datenmengen aus einer Vielzahl verschiedener Quellen ist die Verwendung einer zentralisierten Architektur aufgrund der mangelhaften Skalierbarkeit ungeeignet. Eine geeignete Lösung für derartige Aufgabenstellungen sind P2P-Netze [160]. Die Implementierung eines derartigen Netzwerks lässt sich als Overlay-Netzwerk auf eine bereits bestehende Infrastruktur aufsetzen und besitzt einen eigenen Adressraum, mit dessen Hilfe auch ein vollständig unabhängiges Routing gewährleistet werden kann. Eine weitere Eigenschaft von P2P-Netzen ist die Gleichberechtigung aller Teilnehmer. Die interne Organisation einer solchen Overlay-Struktur basiert auf der Verwendung von Listen mit Nachbarknoten. Mit Hilfe dieser Einträge erfolgt die Kommunikation innerhalb des P2P-Netzes. Wichtig ist hierbei, dass diese Listen immer aktuell sein müssen um „tote“ Links zu vermeiden. Die Struktur und somit auch das Protokoll von P2P-Netzen lässt sich mit Hilfe der Liste von vorhandenen Nachbarknoten kategorisieren, wodurch sich unterschiedliche Organisationen der Daten sowie auch Zugriffszeiten ergeben. Prinzipiell werden hierbei strukturierte und unstrukturierte Overlays unterschieden.

3.4.3.2.1 Unstrukturierte Overlays

Innerhalb eines unstrukturierten Overlays erfolgt eine zufällige Auswahl von benachbarten Knoten, zu denen eine Verbindung aufrecht erhalten wird. Diese sind als vollständig dezentral anzusehen und weisen somit keine zentralen Komponenten auf, welche zu Ausfällen führen könnten. Für die Suche nach gespeicherten Informationen oder Dateien wird meist ein Flooding [161] [162] oder auch Random-Walk-Algorithmus [163] verwendet. Diese Vorgehensweise zeichnet sich einerseits durch einen geringen Speicheraufwand innerhalb eines einzelnen Knotens aus, andererseits resultiert dies allerdings auch in einer verschlechterten Suchperformanz. Darüber hinaus können, trotz hinterlegter Daten, keine Sucherfolge garantiert werden.

3.4.3.2.2 Strukturierte Overlays

In strukturierten Overlays erfolgt die Auswahl der benachbarten Knoten auf vorgegebenen deterministischen Beziehungen, welche für jeden Knoten innerhalb der DHT identisch sind. Dies erfolgt meist durch die Zu-

weisung eines eindeutigen m -Bit Schlüssels für jeden Knoten. Eine Hashfunktion wird hierbei meist zur Generierung des Schlüssels verwendet (zum Beispiel durch Anwendung der Hashfunktion auf die IP-Adresse). Die Hashfunktion ist hierbei eine, im Allgemeinen nicht injektive, Abbildungsvorschrift einer großen Eingabemenge (Schlüssel) auf eine kleinere Zielmenge (Hashwert). Neue Knoten kontaktieren gemäß einer Metrik die ihnen nächstgelegenen Nachbarknoten um entsprechende Information bezüglich des P2P-Protokolls zu erhalten. Für die Speicherung von Dateien wird ebenfalls ein Schlüssel erzeugt (zum Beispiel durch Anwenden der Hashfunktion auf den Dateinamen), wobei der gemäß der Metrik am nächstenliegende Knoten dafür zuständig ist. Im Vergleich zu unstrukturierten Overlays muss hier ein Prozess zum Churn Handling [164] implementiert werden um beim Ausfall von Knoten die Funktionsfähigkeit weiter gewährleisten zu können. Abbildung 3.17 zeigt einen Überblick über Client-Server und P2P-Systeme.

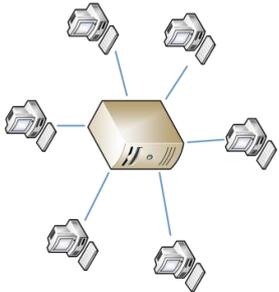
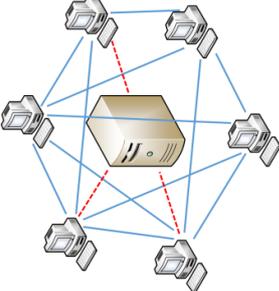
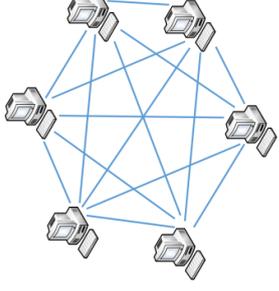
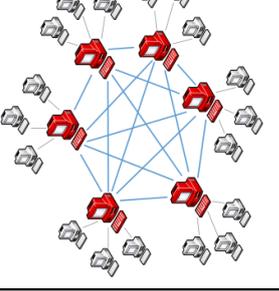
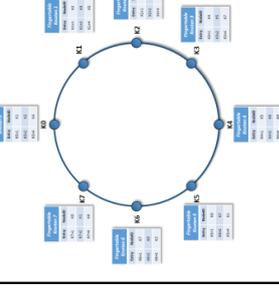
| Peer-to-Peer | |
|--|---|
| <p>1. Ressourcen werden zwischen den Knoten aufgeteilt</p> <p>2. Ressourcen von anderen Knoten sind direkt zugänglich</p> <p>3. Knoten agiert sowohl als Provider als auch als Client (Server Konzept)</p> | |
| Unstrukturierte P2P | |
| 1. Generation | |
| Zentralisiertes P2P | P2P |
| <p>1. Server ist die zentrale Einheit und alleine für die Bereitstellung der Information verantwortlich</p> <p>2. Server benötigt hohe Rechenleistung (Performance)</p> <p>3. Clients benötigen keine hohe Performance</p> | <p>1. Alle Funktionen eines P2P Systems sind enthalten</p> <p>2. Zentrale Einheit zur Verwaltung wird benötigt</p> <p>3. Zentrale Einheit kann als eine Art Index/Gruppen Datenbank angesehen werden</p> |
| <p>Beispiel: WWW</p>  | <p>Beispiel: Napster</p>  |
| 2. Generation | |
| Hybride P2P | DHT Basiert |
| <p>1. Alle Funktionen eines P2P Systems sind enthalten</p> <p>2. Ein Knoten kann beliebig entfernt werden ohne eine Einschränkung der Funktion zu erhalten</p> <p>3. → Dynamische zentrale Einheiten</p> | <p>1. Alle Funktionen eines P2P Systems sind enthalten</p> <p>2. Ein Knoten kann beliebig entfernt werden ohne eine Einschränkung der Funktion zu erhalten</p> <p>3. → Keine zentrale Einheit vorhanden</p> <p>4. Verbindungen im Overlay-Netz sind fest vorgegeben</p> |
| <p>Beispiele: Gnutella 0.4, Freenet</p>  | <p>Beispiele: Gnutella 0.6, JXTA</p>  |
| <p>Beispiele: Chord, CAN, Pastry</p>  | |

Abbildung 3.17. Eigenschaften von Client-Server und Peer-to-Peer Strukturen [165]

3.4.4 Implementierung von P2P Netzwerken

Für die strukturierten Overlays wurden bereits verschiedene Algorithmen entwickelt, die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden. Die minimale Anforderung bezüglich der Funktionalität solcher Algorithmen beinhaltet die nachfolgenden Punkte:

- Beitreten neuer Knoten zum Overlay Netzwerk
 - Aufbau eines neues Systems oder Integration eines Knoten in eine bestehendes System
 - Festlegung der Verantwortlichkeiten in Verbindung mit benachbarten Knoten
- Abmelden von Knoten
 - Entfernung eines Knoten aus einem bestehenden System
 - Neuzuteilung der Verantwortlichkeiten mit benachbarten Knoten
- Erkennung von ausgefallen Knoten und automatische Reorganisation
- Anordnung von Knoten
 - Festlegung der Verantwortlichkeiten
 - Berücksichtigung gegenwärtiger Knotenauslastung
 - Einbringung von Loadbalancing Verfahren
- Speicherung von Daten
 - Orts- und frequenzabhängige Datenspeicherung (z.B.: Received Signal Strength Indicator (RSSI), Belegungen, Nutzungsregeln, ...)
- Abfragen von Daten
- Orts- und frequenzabhängige Datenabfrage (z.B.: RSSI, Belegungen, Nutzungsregeln, ...)

3.4.4.1 Gnutella

Eines der ersten P2P-Netzwerke wurde im Jahre 2000 von Justin Frankel und Tom Pepper unter dem Namen GNUTELLA [166] vorgestellt. Das Ziel war die Entwicklung einer vollständig dezentralen Struktur, welche robust ist und ein hohes Maß an Sicherheit gegenüber äußeren Angriffen bieten sollte. Ein Problem dieses dezentralen Ansatzes zeigt sich jedoch bei der Einbindung neuer Knoten, dem sogenannten „Bootstrapping“, in das Netzwerk. Um diesem Problem gerecht zu werden erhält jeder Knoten beim Start eine Liste von Knoten, die er zum Bootstrapping kontaktieren kann. Zur Vervollständigung der Listen wird bei jedem Knoten eine Abfrage bezüglich der eingetragenen Nachbarn vorgenommen. Mit Hilfe dieser Tabellen erfolgt das Routing von Nachrichten. Zur Kommunikation verwendet das GNUTELLA-Protokoll fünf verschiedene Nachrichtentypen, sogenannte Deskriptoren. In Tabelle 3.2 sind die Nachrichtentypen dargestellt.

Tabelle 3.2. Nachrichtentypen des GNUTELLA-Protokolls [160] [166]

| <i>Nachrichtentyp</i> | <i>Beschreibung</i> |
|-----------------------|--|
| Ping | Dient zum Auffinden aktiver Knoten im Netzwerk. Aktive Knoten antworten mit einem Pong. |
| Pong | Wird als Antwort auf eine Ping-Nachricht gesendet. Enthält die Adresse des antwortenden Peers sowie die Datenmenge, die dieser dem Netzwerk zur Verfügung stellt. |
| Query | Wird bei der Suche von Dateien im Netzwerk verwendet. Sobald ein angefragter Knoten die gewünschte Information hat, antwortet er mit einer QueryHit-Nachricht. |
| QueryHit | Wird als Antwort auf eine Query-Nachricht gesendet. Enthält unter anderem die IP-Adresse sowie den Port des Knotens, der eine gesuchte Datei zur Verfügung stellt. |
| Push | Wird zur Überbrückung einer Firewall verwendet um eventuell hinter der Firewall vorhandene Knoten zu erreichen. |

Zur Aufrechterhaltung möglichst aktueller Listen in einem Knoten werden während der gesamten Laufzeit Ping Nachrichten an bekannte Peers versendet. Jede dieser Nachrichten ist mit einem Time to Live (TTL)-Wert versehen, welcher von jedem beteiligten Knoten vor der Weiterleitung dekrementiert wird. Dies bietet den Vorteil, dass keine unnötigen beziehungsweise veralteten Nachrichten durch das Netzwerk verschickt werden. Es ist offensichtlich, dass die Struktur des Netzwerkes

nicht deterministisch ist und eine Abhängigkeit von der Startreihenfolge der Knoten besteht. Aus diesem Grund ist GNUTELLA in die Kategorie der unstrukturierten Netze einzuordnen.

Die Anfragen innerhalb eines solchen Systems werden, wie bereits erwähnt, mittels Query-Nachrichten ausgeführt. Da diese aber nur eine begrenzte Anzahl von Hops als TTL haben, kann ein Erfolg nicht garantiert werden.

3.4.4.2 Content Addressable Network

Ratnasamy et al. haben im Jahre 2000 die Content Addressable Network (CAN)-Implementierung [167] vorgestellt, in der erstmals sogenannte verteilte Hashtabellen (DHT) verwendet wurden. Für die Topologie verwendet die CAN-Implementierung ein d -dimensionales kartesisches Koordinatensystem, welches im Raum $[0, 1)^d$ organisiert ist. Zur Beschreibung der Funktionsweise wird im Folgenden eine zweidimensionale Zuordnung mit der Fläche $[0, 1) \times [0, 1)$ betrachtet. Die Daten werden mittels der Anwendung von zwei verschiedenen Hashfunktionen auf den CAN-Raum verteilt. Hierbei liefert die erste Hashfunktion die x -Koordinate und die zweite die y -Koordinate. Das entstehende Tuple (hier x - und y -Koordinate) beschreibt die Koordinate des zu speichernden Datensatzes im CAN-Raum. Liegt der Punkt innerhalb des Zuständigkeitsbereiches des Knotens k_n , so ist dieser für die Speicherung der Daten verantwortlich. Kommen neue Knoten zum System hinzu, wird der größte Adressbereich halbiert und die Zuständigkeit zwischen den beiden Knoten neu aufgeteilt. Analog wird beim Ausfall eines Knotens die Zuständigkeit dem benachbarten Knoten zugeteilt. Von den Änderungen der Zuständigkeiten sind ausschließlich die involvierten Knoten (hier zwei) betroffen, wodurch kein „Rehashing“ notwendig wird. Diese Eigenschaft wird auch als „konsistentes Hashing“ bezeichnet. In Abbildung 3.18 ist als Beispiel ein zweidimensionaler CAN-Raum mit insgesamt fünf Knoten dargestellt.

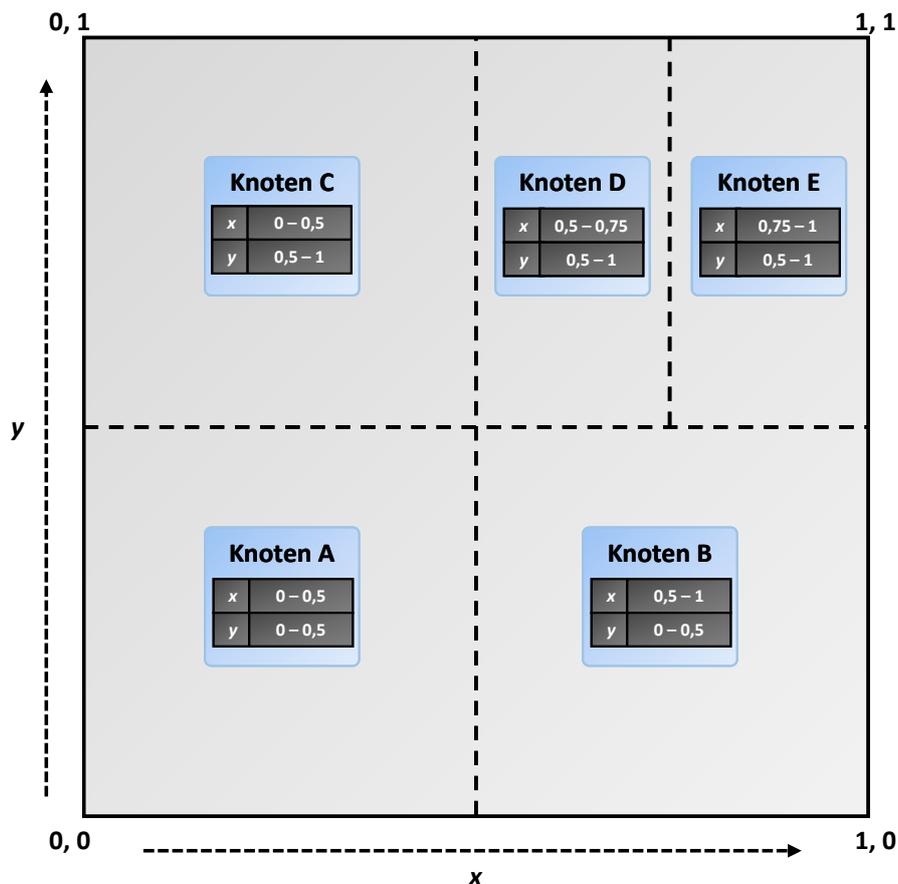


Abbildung 3.18. Topologie eines CAN-Netztes mit fünf Knoten [167]

3.4.4.3 Chord

Die Organisation der Knoten in einer Chord-Implementierung [168] ist auf Modulobasis aufgebaut und ordnet die Knoten in einer Ringstruktur an. Hierbei erfolgt die Anordnung der Schlüssel aufsteigend im Uhrzeigersinn. Abbildung 3.19 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Chord-Ringes.

Der erste Knoten (k_2), welcher im Uhrzeigersinn, auf den Knoten k_1 folgt, wird als Nachfolger von k_1 bezeichnet. Analog wird der nächste Knoten (hier k_7) gegen den Uhrzeigersinn als Vorgänger von k_1 bezeichnet. Bei der Betrachtung muss die Modulo-Arithmetik berücksichtigt werden, das heißt die Anzahl der Knoten ist durch den maximalen Adressraum beschränkt und ergibt sich aus 2^m , wobei m vom Hash-Algorithmus abhängig ist. Die Speicherung von Daten ist abhängig von deren Schlüssel, wobei der zuständige Knoten wie folgt ausgewählt wird:

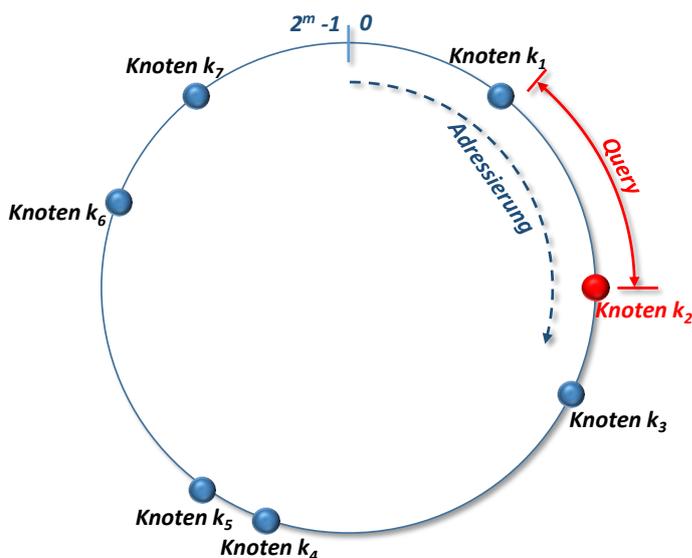


Abbildung 3.19. Schematische Darstellung eines Chord Ringes mit 7 Knoten [46] [168]

[Auswahl des zuständigen Knotens] Liegt der Schlüssel der zu speichernden Daten innerhalb des Adressbereiches zwischen Knoten k und Vorgänger, so ist der Knoten k für die Speicherung der Daten verantwortlich.

Damit ein neuer Knoten einem bereits bestehenden Chord-Overlay Netzwerk beitreten kann ist es notwendig mindestens einen Knoten des Netzwerkes zu kennen. Meist wird dies mit Hilfe einer festen Liste von Adressen gelöst, was allerdings zu einer gewissen Inflexibilität des Systems führt. Für die Anmeldung eines neuen Knotens k_{Neu} wird mit Hilfe des „Kontakt-Knotens“ k_{B} der direkte Nachfolger $k_{\text{Nachf.}}$ von k_{Neu} ermittelt und dem Knoten mitgeteilt. Knoten k_{Neu} benachrichtigt anschließend seinen Nachfolger ($k_{\text{Nachf.}}$) über seine Existenz, so dass dieser seine Verweise entsprechend anpassen kann. Mittels einer periodischen Stabilisierung erfolgt eine Aktualisierung der Listen aller benachbarten Knoten. Bei der Speicherung von Daten wird ein Schlüssel-Werte-Paar (key-value-pair) verwendet, wobei der Schlüssel die Speicherposition im Chord-Ring angibt (somit den zuständigen Knoten). Die eigentlichen Nutzdaten sind als Werte hinterlegt und dienen als Grundlage für die Generierung des Schlüssels in der Form Schlüssel=Secure Hash Algorithm (SHA)-1(Wert). Die Suche von Daten innerhalb eines Chord Netzes beruht auf einem Suchmechanismus, welcher in der Lage ist den

Nachfolgeknoten zu einem gegebenen Schlüssel zu finden. Liegt ein Ergebnis vor, wird die Anfrage an diesen Knoten weitergeleitet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der entsprechende Knoten gefunden ist. Um eine Beschleunigung des Suchvorganges zu erreichen, wird in jedem Knoten eine sogenannte Fingerliste (auch Fingertable genannt) geführt. Diese beinhaltet eine Liste aus benachbarten Knoten, wobei der i -te Eintrag in der Liste des Knotens k den Schlüssel des ersten Knotens enthält, der mindestens $2^i - 1$ entfernt ist. Für die Fingertable des Knotens k_m ergeben sich somit Einträge mit den Schlüsseln $k_m + 2^i - 1$ mit $i = 1 \dots m$ wobei m die Anzahl der Bits des Schlüssels darstellt [168]. Sind alle Fingerlisten vollständig, so können Suchanfragen mit dem Aufwand $\mathcal{O}(\log_2(n))$ [168] bearbeitet werden, wobei n die Anzahl der Knoten im Netzwerk beschreibt.

3.4.4.4 Pastry

Wie auch bei der Chord-Implementierung werden bei Pastry [169] die Knoten mittels eines 128-bit großen Schlüssels identifiziert. Für die Anordnung der Knoten ergibt sich, wie auch bei Chord, eine Ringstruktur. Jeder Knoten innerhalb der Pastry-Struktur verwaltet für das Routing die folgenden Listen:

- Routing table (Routing-Tabelle)
- Neighborhood set (Tabelle mit Nachbarknoten)
- Leaf set (Tabelle mit Knoten aus dem Netzwerk)

Die nachfolgende Beschreibung des Pastry-Algorithmus bezieht sich auf die Originalbeschreibung von Zhao et. al [169]. Jede Routing Table besteht aus $\lceil \log_{2^b} N \rceil$ Reihen mit jeweils $2^b - 1$ Einträgen in der Reihe n . Hierbei verweist jeder Eintrag auf einen Knoten, dessen Bezeichnung (Identifier (ID)) in den ersten n Stellen mit der ID des betrachteten Knotens übereinstimmen. Des Weiteren muss der Wert an der Stelle $n + 1$ einen anderen Wert aufweisen als den in der eigenen ID des Knoten. Für das Auffinden eines Schlüssels ist der Aufwand unter normalen Bedingungen $\mathcal{O}(\lceil \log_{2^b} N \rceil)$, wobei hier die Wahl des Parameters b eine entscheidende Rolle spielt. Die Wahl stellt einen Kompromiss zwischen der Größe der Routing Table (circa $\lceil \log_{2^b} N \rceil \times (2^b - 1)$ Einträge) und der Anzahl der benötigten Hops dar ($\lceil \log_{2^b} N \rceil$). Ein typischer Wert für b ist 4. Im Neighborhood Set M sind Knoten (und deren IP) hinterlegt,

welche sich bezüglich der Metrik nahe am betrachteten Knoten befinden. Meist wird dies für Routing-Zwecke verwendet. Das Leaf Set L beinhaltet die numerisch betrachtet $|L|$ nächstliegenden Knoten. Hierbei beinhaltet die Liste sowohl die $|L|/2$ Knoten, deren ID kleiner ist als die des betrachteten Knotens, als auch $|L|/2$ Knoten, deren ID größer ist als die des betrachteten Knotens. Typische Größenordnungen für $|L|$ und $|M|$ sind 2^b oder 2×2^b . Abbildung 3.20 zeigt den Aufbau einer solchen Tabelle mittels eines Beispielknotens der ID 10233102, $b = 4$ und $l = 8$. Hierbei beschreibt l die Länge der ID. Die Routing Table beginnt mit Reihe Null, wobei an allen grün hinterlegten Feldern die Ziffer der ID des betrachteten Knotens mit dem zu betrachtenden Wert übereinstimmt.

| NodeID 10233102 | | | |
|-------------------------|---------------|---------------|------------|
| Leaf set | | | |
| | SMALER | LARGER | |
| 10233033 | 10233021 | 10233120 | 10233122 |
| 10233001 | 10233000 | 10233230 | 10233232 |
| Routing table | | | |
| -0-2212102 | 1 | -2-2301203 | -3-1203203 |
| 0 | 1-1-301233 | 1-2-230203 | 1-3-021022 |
| 10-0-31203 | 10-1-32102 | 2 | 10-3-23302 |
| 102-0-0230 | 102-1-1302 | 102-2-2302 | 3 |
| 1023-0-322 | 1023-1-000 | 1023-2-121 | 3 |
| 10233-0-01 | 1 | 10233-2-32 | |
| 0 | | 102331-2-0 | |
| | | 2 | |
| Neighborhood set | | | |
| 13021022 | 10200230 | 11301233 | 31301233 |
| 02212102 | 22301203 | 31203203 | 33213321 |

Abbildung 3.20. Pastry Knoten mit der ID 10233102, mit $b = 4$ und $l = 8$ [169]

3.4.4.5 Vergleich der Implementierungen

Für die spätere Auswahl einer geeigneten DHT-Struktur ist es wichtig eine Gegenüberstellung und Bewertung der angeführten Implementierungen unter den nachfolgenden Aspekten zu betrachten:

- Organisation
- Suchaufwand
- Struktur
- Implementierungsaufwand
- Redundanz

In den nachfolgenden Tabelle 3.3 sind die Eigenschaften der hier betrachteten DHT-Implementierungen nochmals zusammengefasst.

Tabelle 3.3. Eigenschaften von P2P Implementierungen [166] [170] [167] [168]

| <i>Parameter</i> | <i>Gnutella</i> | <i>CAN</i> | <i>Chord</i> |
|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Organisation | unstrukturiert | strukturiert/konsistent | strukturiert/konsistent |
| Dimension | keine Angabe | ≥ 1 | 1 |
| Suchaufwand | keine Angabe | $\mathcal{O}(N^{1/2})$ | $\mathcal{O}(\log(N))$ |
| Implementierungsaufwand | hoch | mittel | niedrig |
| Redundanz | nein | möglich | möglich |

3.5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde eine Übersicht bezüglich der aktuell bekannten Verfahren und Lösungsansätze im Bereich des Spektrum Management gegeben. Jedes der hier vorgestellten Verfahren ist für eine entsprechende Anwendung beziehungsweise einen dedizierten Frequenzbereich optimiert. Für den Entwurf einer übergreifenden Struktur ist es somit notwendig eine regelbasierte Auswahl für die gegebenen Randbedingungen zu treffen. Abhängig von der Auswahl müssen dann eventuell anfallende Zusatzinformation wie beispielsweise Sensordaten in das System eingebracht werden. Für die Verwaltung beziehungsweise Steuerung eines derartigen Systems bedarf es einer skalierbaren Struktur, welche in der Lage ist sowohl Daten zu verarbeiten als auch zu speichern. Aus dem Stand der Technik und den Erkenntnissen der Informatik hat sich gezeigt, das sich für die Speicherung großer Datenmengen DHT-basierte P2P Netze gut eignen. Im Bereich der Datenverarbeitung wurde entsprechend das

Gebiet des Kontext-Management betrachtet. Basierend auf diesen Erkenntnissen sowie der in Kapitel 2 formulierten Aufgabenstellung und betrachteten Szenarien, wird in den nachfolgenden Kapiteln eine eigens dafür entwickelte Architektur entworfen und validiert.

4 Architektur und Aufbau

Als Grundlage für den Entwurf des Spektrum-Management-Systems dient die in Kapitel 2 identifizierte Problemstellung und die daraus extrahierten Anforderungen. Mit Hilfe einer detaillierten Betrachtung und Analyse der aktuell verfügbaren Lösungen und Forschungsergebnisse aus Kapitel 3 erfolgte eine ausführliche Ausarbeitung der Aufgabenstellungen. Des Weiteren hat sich im Rahmen dieser Analyse gezeigt, dass die Ergebnisse von FM 52 [19] und FM 53 [20] einen entscheidenden Einfluss auf die Systemarchitektur haben und somit bei der Konzeptionierung berücksichtigt werden.

Für die Herangehensweise wird ein Top-Down Verfahren angewendet, wobei die Planung auf einer abstrakten Ebenen startet und immer weiter konkretisiert wird. Eine Übersicht der Herangehensweise sowie die Identifikation der wichtigsten Schritte wurde in Kapitel 2 dargestellt. Es ist an dieser Stelle bereits deutlich erkennbar, dass eine Zerlegung des Gesamtproblems in einzelne Teilprobleme erfolgen muss um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten.

Ausgehend von den identifizierten Teilproblemen erfolgt eine Analyse der bereits vorhandenen Ergebnisse aus anderen thematisch verwandten wissenschaftlichen Arbeiten und Projekten. Auf diesen Erkenntnissen beruht der Entwurf der einzelnen Teilkomponenten. Bereits in Kapitel 3 wurde eingehend die Art und der Aufbau des Informationsflusses betrachtet. Hieraus lassen sich erste Erkenntnisse und sogar Einschränkungen bei der Wahl einer Architektur ableiten.

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt eine eingehende Beschreibung der Herangehensweise für den Entwurf der Architektur. Die so gewonnenen Komponenten werden dann zu einem Gesamtsystem zusammengefügt und anschließend als „Grundstruktur“ betrachtet und diskutiert.

4.1 Vergleich Kontext-Management-Architekturen

Durch die Zerlegung der Aufgabenstellung in kleinere Teilprobleme hat sich bereits in Kapitel 2 gezeigt, dass die Architektur zur Verwaltung der

Daten eine zentrale Rolle spielt. Für die Auswahl beziehungsweise Konzeptionierung einer geeigneten Architektur ist es daher notwendig die zu verwaltenden Daten und deren Darstellungsformate zu betrachten. Es hat sich herausgestellt, dass die zu verwaltenden Daten vergleichbar zu sogenannten Kontextinformationen sind. Dies lässt sich mit der im Rahmen dieser Arbeit zugrunde gelegten Definition 3.8 von Kontext zeigen. Wie auch in der Definition können im Zusammenhang mit Spektrum-Management auftretenden Daten als Parameter zur Charakterisierung eines Zustandes einer Instanz angesehen werden.

Aus diesem Sachverhalt ergibt sich, dass die im Zusammenhang von Kontextinformation entwickelten Systeme als Grundlage für die Konzeptionierung einer Spektrums-Management-Architektur verwendet werden können. In Kapitel 3 erfolgte eine Betrachtung von zentralen und dezentralen Lösungsansätzen.

Die Funktion eines Spektrum-Management-Systems beruht auf der effizienten Verwaltung und Auswertung von zusätzlichen Informationen. In Tabelle 4.1 ist ein Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kontext-Management-Architekturen aufgeführt.

Tabelle 4.1. Vergleich der verschiedenen Architekturen und deren Eigenschaften

| <i>Architektur</i> | <i>Verteilt</i> | <i>Skalierbar</i> | <i>Management Funktionalität</i> | <i>Erweiterbar</i> | <i>Overlay</i> |
|---|-----------------|---------------------------------|--|---|----------------|
| Kontext Broker- Architektur | Nein | Nein | Ja | Ja | Ja |
| CoBrA – Context Broker Architecture | Nein | Nein | Ja | Ja | Ja |
| MobiLife | Nein | Nein | Ja | Ja | Ja |
| SOCAM | Nein | Nein | Ja | Ja | Ja |
| Datenbank- System (beispielsweise MySQL) | Nein | Nein (Hardware- abhängig) | Nein (Nur mittels externer Steuereinheiten) | Nein (Abhängig von externer Steuereinheiten) | Ja |

Die Auswertung von Tabelle 4.1 zeigt, dass die Kontext-Broker-Architekturen von C-Cast [129] sowie der CoBrA Ansatz [155] vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Beide verwenden für die Kommunikation eine semantische Beschreibungssprache, welche es erlaubt zusätzlich zu den Nutzdaten noch sogenannte Metadaten einzubringen. Im Vergleich mit

einer konventionellen Datenbank (beispielsweise MySQL Datenbank) wird ersichtlich, dass die Broker-basierten Ansätze für die Anwendung im Bereich der Verarbeitung von Kontextinformation besser geeignet sind, da diese deutlich optimiertere Ansätze für den Umgang mit diesen Daten aufweisen. Die Datenbanksysteme sind hingegen starr und bieten nur eine sehr stark eingeschränkte Erweiterbarkeit. Wie bereits erwähnt sind Spektrumsinformationen und Kontextinformationen vergleichbar, wodurch sich die Verwendung eines brokerbasierten Ansatzes als zweckmäßiger Ansatz erweist. Speziell der Kontext-Broker-Ansatz aus dem C-Cast-Projekt wurde für die Verarbeitung von sensorbasierten Kontextinformationen optimiert und bietet daher eine geeignete Grundlage für die Weiterentwicklung. Diesbezügliche Erkenntnisse wurden von dem Autor bereits in [25] [28] [41] veröffentlicht. Als Beschreibungssprache hat sich schon im Rahmen des C-Cast-Projekt die Verwendung von XML Derivaten als Praktikabel herausgestellt. Hierfür ist bereits ein, für die Repräsentation von Kontextinformationen, geeignetes Format vorhanden. Diese wird im Weiteren als Grundlage für die Entwicklung eines auf Spektrumsinformation optimierten XML-Derivats verwendet. Das weitere Vorgehen für diese Arbeit ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Mittels eines systematischen Architekturdesigns im Top-Down-Ansatz erfolgt eine Erweiterung der identifizierten Referenzstruktur unter Einbeziehung der definierten Anforderungen sowie dem aktuellen Stand der Technik.

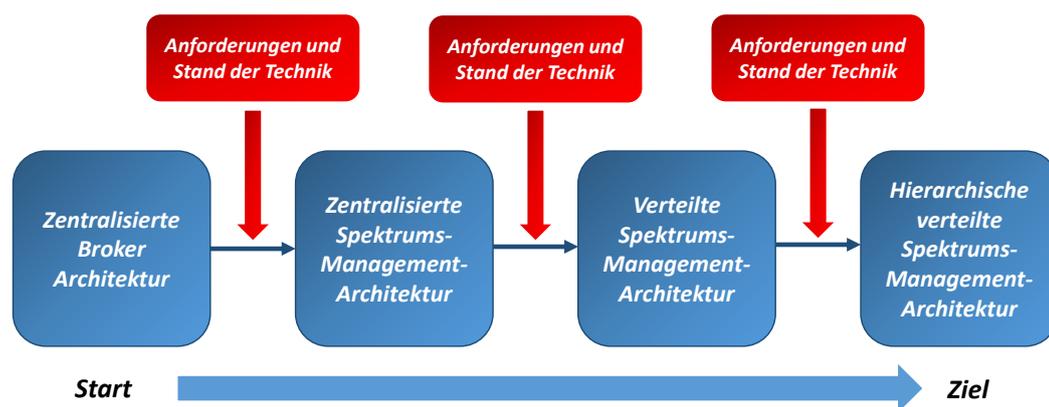


Abbildung 4.1. Ablauf der Entwicklung des Architekturdesigns

In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Entwicklungsschritte aus Abbildung 4.1.

4.2 Zentralisierte Spektrum-Management-Architektur

Für die Erweiterung der Kontext-Broker-Architektur zu einer zentralisierten Spektrums-Management-Architektur ist es notwendig, die bereits vorhandenen und die benötigten Funktionalitäten gegenüber zu stellen um die notwendigen Erweiterungen zu identifizieren. Aus Tabelle 2.2 lassen sich diesbezüglich folgende Funktionalitäten extrahieren:

- Einbindung von Spektrumsinformationen
- Einbindung von Sensorinformationen
- Einbindung in bestehende Systeme

Um diese geforderten Funktionalitäten bedienen zu können, müssen beim Systementwurf entsprechende funktionale Baugruppen eingeplant werden. Im ECC Report 186 [54] wird zu diesem Zweck eine Geo-Location Datenbank verwendet. Wie bereits erwähnt, beinhaltet diese noch Funktionalitäten, welche deutlich über die einer gewöhnlichen Datenbank hinausgehen. Im Folgenden wird an dieser Stelle angenommen, dass die eigentliche Funktionalität in der Spektrum-Management-Unit angesiedelt wird und die Datenbank ausschließlich als Datenspeicher für die Spektrumsinformation verwendet wird. In Abbildung 4.2 ist die Erweiterung der Broker-Architektur zu einer Spektrums-Broker-Architektur dargestellt.

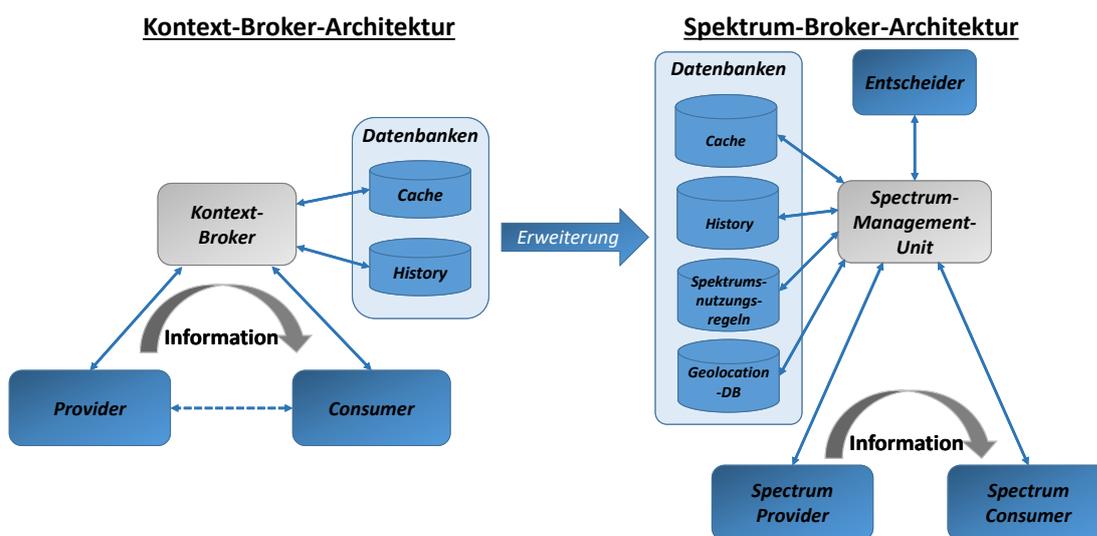


Abbildung 4.2. Erweiterungen des Architekturdesigns

Das Konzept der Spektrum-Broker-Architektur wurde vom Autor bereits veröffentlicht [46].

Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, basiert die Kommunikation zwischen den Einheiten der Kontext-Broker-Architektur auf einem XML-basierten Datenformat namens Context Markup Language (ContextML) [171]. Dieses Datenformat bietet den Vorteil, dass es sowohl von Maschinen eingelesen werden kann und gleichzeitig auch von Menschen lesbar ist. Für die Darstellung der Kontextdaten und deren Speicherung wird das Konzept von „Entity“ und „Scope“ verwendet. Hierbei beschreibt der Scope den Eigentümer beziehungsweise die Quelle der Daten. Dieser Tag setzt sich aus einer „Entity ID“ (zum Beispiel Name oder Bezeichnung der Quelle) sowie dem „Entity type“ (Beschreibung der Quelle) zusammen.

Bei diesem Ansatz wird jeder Kontextparameter ausschließlich einem Scope zugewiesen. Im Gegenzug kann ein Entity aber mehrere Scopes enthalten. Die eigentlichen Nutzdaten sind in den *Parametern* hinterlegt, die wiederum einem Scope zugeordnet sind.

Basierend auf den Anforderungen in Tabelle 2.2 erfolgt die Identifikation der notwendigen Zusatzfunktionalitäten. Zur besseren Übersicht wird dies in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2. Anforderungen an ein universelles Spektrum-Management-System

| <i>Nummer</i> | <i>Anforderung</i> | <i>Benötigte Funktionalität</i> | <i>Lokalisierung</i> |
|---------------|--|--|---|
| 1 | Frequenzunabhängigkeit | Darstellungsmöglichkeit aller Frequenzen sowie deren Zusatzinformationen | SME |
| 2 | Latenzzeit | Schnelle Datenverarbeitung, möglichst direkte Verbindung | SME und externe Einheiten |
| 3 | Einbindung von Spektrumsinformation | Schnittstelle zum Anbinden von Datenbanken | SME |
| 4 | Einbindung von Sensorinformation | Schnittstelle zum Anbinden von externen Sensing Einheiten | SME |
| 5 | Automatisches An- und Abmelden von Systemkomponenten | Darstellung mittels entsprechender Protokolle | ContextML und Protokollimplementierung |
| 6 | Überprüfung der Gültigkeit der Daten | Life-Cycle Management | SME |
| 7 | Synchronisierung | Automatische Synchronisierung aller Einheiten im Netzwerk bei Änderungen | SME und externe Einheiten |
| 8 | Zeitsynchronisierung | Automatische Zeitsynchronisierung zwischen allen Einheiten | SME und externe Einheiten |
| 9 | Kompatibilität zu bestehenden Netzstrukturen | Möglichkeit zur Einbindung in bereits bestehende Netzstrukturen | Implementierung |
| 10 | Vollständige Mobilitätsunterstützung | System muss auch offline („Inselbetrieb“) lauffähig sein | SME |
| 11 | Definition von exclusion, restriction und protection Zonen | Definition von geografischen Bereichen, die entsprechenden Schutz bedürfen, zum Beispiel zur Minimierung von Interferenzen | SME und externe Entscheider; Darstellung durch SpectrumML |

Eine grundlegende Anforderung, welche entscheidende Auswirkungen auf das Systemdesign hat, ist Anforderung Nummer 9 „Kompatibilität zu bestehenden Netzstrukturen“. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, womit sich der Einfluss des Systems weitgehend auf der Anwendungsschicht (Layer 7) befinden muss. Um diesem gerecht zu werden, bietet sich eine Overlay-Implementierung an. Hierbei bleiben alle darunterliegenden Schichten unberührt. Des Weiteren ist es möglich ein vollständig unabhängiges Routing zu verwenden, wodurch eine eigenständige Netztopologie erzielt werden kann.

Speziell im Kontext von Spektrumsinformation spielt die Aktualität der Daten eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund beinhaltet jede Übertragung den bereits erwähnten *Timestamp* und den *Expires* Zeitstempel. Mit Hilfe dieser Tags erfolgt eine Beurteilung der Aktualität der gespeicherten Daten mittels des Life-Cycle Management. Zusätzlich muss eine Zeitsynchronisierung zwischen der SME und den anderen Einheiten erfolgen um eventuelle Diskrepanzen, welche durch Unterschiede in der Systemzeit verursacht werden könnten, auszuräumen. Die kann beispielsweise der Fall sein, wenn kein Zugriff auf einen Network Time Protocol (NTP) Server oder andere Referenzen wie Global Positioning System (GPS) besteht.

Für die Anmeldung von Providern wird ebenfalls eine ContextML basierte Darstellung verwendet. Diese beinhaltet Informationen bezüglich Scope und Entity. Eine Gültigkeitsdauer wird hierbei nicht angegeben. Vielmehr ist der Provider verpflichtet seine Anmeldung in festen Abständen zu wiederholen, um dem Broker seine Aktivität zu signalisieren.

Die Abfrage von Daten erfolgt mittels des Hypertext Transfer Protocol Representational State Transfer (HTTP REST), wobei die gesuchten Daten (Scope und Entity) mit Hilfe von Parametern an den Broker übermittelt werden. Die Antwort wird dann als ContextML-Dokument übertragen. ContextML-Beispiele befinden sich im Anhang C dieser Arbeit.

Prinzipiell lassen sich die Funktionalitäten für beide Strukturen in eine Datenerfassung, Datenverwaltung inklusive Speicherung und Datenabfrage unterteilen. In Tabelle 4.3 sind die Anforderungen an eine SMA beziehungsweise die verfügbaren Funktionalitäten der Kontext-Broker-Architektur aufgeführt.

Tabelle 4.3. Vergleich der verschiedenen Architekturen und deren funktionalen Eigenschaften [25] [126] [172] [46] [173]

| Funktionalität | Kontext-Broker-Architektur | Spektrum-Management-Architektur |
|-----------------------|---|--|
| Datenerfassung | <ul style="list-style-type: none"> • An- und Abmeldung beim Broker • Request/Provide Unterstützung • Publish/Subscribe Unterstützung • Datenrepräsentation mittels XML-Derivat • Datenorganisation mittels Scope und Entity | <ul style="list-style-type: none"> • An- und Abmeldung beim Broker • Request/Provide Unterstützung • Publish/Subscribe Unterstützung • Geeignetes Format zur Datenrepräsentation • Datenorganisation mittels Scope, Entity, Frequency oder • Location/Area • Zeitsynchronisation für Systemzeit |
| Datenverwaltung | <ul style="list-style-type: none"> • An- und Abmeldung von Clients • Request/Provide Unterstützung • Publish/Subscribe Unterstützung • Datenrepräsentation mittels XML-Derivat • Datenorganisation mittels Scope und Entity • Speicherung der Daten | <ul style="list-style-type: none"> • An- und Abmeldung beim Broker • Request/Provide Unterstützung • Publish/Subscribe Unterstützung • Geeignetes Format zur Datenrepräsentation • Datenorganisation mittels Scope, Entity, Frequenz oder Location/Area • Zeitsynchronisation für Systemzeit • Einbindung von Datenbanken (beispielsweise Geolocation Datenbank) für zusätzliche Metainformationen • Einbindung von Einheiten zur Belegungserkennung des Spektrums |
| Datenabfrage | <ul style="list-style-type: none"> • Abfrage von Daten mittels Scope und Entity | <ul style="list-style-type: none"> • Abfrage von Spektrumsdaten mittels Frequenzbereich und Location/Area • Abfrage der Belegungserkennung für Frequenzbereiche bestimmter geografischer Bereiche |

Es ist ersichtlich, dass die Erweiterung mindestens die nachfolgenden zusätzlichen Funktionalitäten bereitstellen muss:

1. Schnittstelle für die Anbindung eines Entscheiders (sogenannte Decision Unit (DU))
2. Schnittstelle für die Einbindung von Spektrumsinformationen aus Datenbanken
3. Erweiterte Suchfunktionen mit den Parametern Frequenz und Ort beziehungsweise geografischer Regionen
4. Möglichkeit zur Definition von geografischen Bereichen
5. Zeitsynchronisation zwischen den Einheiten
6. Datenbank und entsprechendes Format zur Erstellung und Speicherung von Nutzungsregeln (zum Beispiel gemäß LSA)

Speziell im Zusammenhang mit der Repräsentation von geografischen Positionen bietet sich eine Darstellung auf Basis von Polygonzügen an. Diese werden mit Hilfe von Eckpunkten charakterisiert und können somit ohne größeren Aufwand in einer Datenbank hinterlegt werden. Zusätzlich existieren bereits Verfahren, wie beispielsweise der Punkt-in-Polygon-Test nach Jordan [174], welche es ermöglichen festzustellen, ob ein Punkt innerhalb dieses Polygons liegt oder nicht.

Bereits der Entwurf der Kontext-Broker-Architektur erfolgte auf Basis eines Overlay-Systems (vergleiche Kapitel 3), wodurch die Anbindung vorhandener Komponenten deutlich erleichtert wird. Des Weiteren können bereits bestehende Übertragungsprotokolle verwendet werden [28]. Für die nachfolgenden Beschreibungen ist es an dieser Stelle notwendig einen Unterschied zwischen der Beschreibung einer SME und einer SMA vorzunehmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Definitionen 4.1 und 4.2 verwendet.

Definition 4.1 (*Spektrum-Management-Einheit (SME)*)

Eine Spektrum-Management-Einheit (SME) beschreibt eine einzelne Einheit zur Verarbeitung, Verwaltung und Speicherung von Spektrumsinformationen. Jede SME ist in sich ein abgeschlossenes zentralisiertes System, welche mit Hilfe von definierten Schnittstellen mit weiteren Einheiten, zum Beispiel Datenbanken oder einer Entscheider-Einheiten (Decision Unit (DU)), kommuniziert.

Definition 4.2 (*Spektrum-Management-Architektur (SMA)*)

Eine Spektrum-Management-Architektur (SMA) beschreibt den vollständigen Aufbau eines SMSs. Dieses besteht, in der Regel, aus mehreren SMEen die mit Hilfe einer vorgegebenen Organisationsstruktur miteinander kommunizieren. Des Weiteren beinhaltet die SMA alle weiteren zusätzlich benötigten Einheiten wie beispielsweise Datenbanken oder DUs.

Zur Sicherstellung der Grundfunktionalität muss die SME Schnittstellen zu den DUs bereitstellen. Diese sind für die Belegungserkennung, basierend auf dem gemessenen Leistungsdichtespektrum, verantwortlich. In Kapitel 6 werden diesbezüglich verschiedene Verfahren vorgestellt und verglichen. An dieser Stelle sei allerdings angemerkt, dass hier nicht nach dem optimalen generischen Detektionsalgorithmus gesucht wird. Vielmehr erfolgt der Entwurf einer generischen Architektur, welche es ermöglicht verschiedene Detektionsalgorithmen einzubinden. Um eine effiziente Zuteilung von Spektrum zu gewährleisten und alle in Kapitel 2 vorgestellten Anwendungsfälle abdecken zu können, müssen zusätzliche Informationen (beispielsweise die Art der Lizenzierung oder maximale Grenzwerte) über einen spektralen Bereich vorhanden sein. Da es sich hierbei um Informationen handelt, die entweder statisch sind oder für größere Zeitabstände gültig sind (Monate oder Jahre), eignen sich Datenbanken um diese zu hinterlegen. Aus diesem Grund ist es notwendig eine SME zusätzlich mit einer entsprechenden Schnittstelle für die Einbindung zu versehen. Im Gegensatz zu Kontextinformationen sind Spektrumsinformationen für eine spezifizierte Frequenz und mit einer geographische Position beziehungsweise einem geographischen Bereich verknüpft. Intern werden die Daten daher als ein Wertetupel bestehend aus *Frequenz*, *PolygonID* und dem jeweiligen *Wert* hinterlegt. Für die Suche nach Daten ist es somit relevant, für welche Frequenz und an welcher Position diese gültig sein müssen. Für den Suchalgorithmus werden hier zwei Fälle unterschieden:

- Übergabe eines geographischen Punktes mit Längen- und Breitengraden
- Übergabe der ID des zuständigen Polygonzugs (falls dieser schon bekannt ist)

Grundlegend kann zwischen gebundenen und freien Polygonen unterschieden werden. Gebundene Polygone beschreiben fest vorgegebene Strukturen wie beispielsweise Landesgrenzen oder Bundesländer. Diese können als fest angesehen werden und sind in Datenbanken hinterlegt. Jede SME im Netzwerk hat die Möglichkeit direkt auf eine entsprechende Datenbank zuzugreifen oder die Daten über einen anderen Knoten im Netzwerk zu beziehen. Die Kontrolle über diese Datenbanken obliegt der Bundesnetzagentur (BNetzA) [175], wobei diese in der Regel nicht der Betreiber solcher Datenbanken ist. Freie Polygonzüge beschreiben Areale, die sich in ihrer Struktur, das heißt in den zugehörigen Grenzen verändern können. Hierzu zählen zum Beispiel die Zellgrenzen einer Basisstation oder auch sogenannte Exclusive Zones [176] [177]. Hierbei wird je nach der Gültigkeitsdauer der Polygonzüge unterschieden. In Tabelle 4.4 sind die verschiedenen Typen von Polygonzügen aufgeführt.

Tabelle 4.4. Typen von Polygonzügen

| <i>Typ</i> | <i>Gültigkeit</i> | <i>Speicherung</i> |
|------------|---|--------------------|
| 1 | $\Delta t < 5$ Minuten | SME |
| 2 | $5 \text{ Minuten} \leq \Delta t \leq 24$ Stunden | SME |
| 3 | $\Delta t > 24$ Stunden | SME und DB |

Um die Zugriffszeiten möglichst gering zu halten werden die freien Polygonzüge per Broadcast innerhalb des Netzwerks verteilt und von jeder SME zwischengespeichert.

Als Basis für die Organisation der Daten werden die gebundenen Polygonzüge verwendet. Da diese auf vorhandenen Grenzen basieren ist deren Organisation fest vorgegeben. Hierbei werden die Kontinentalgrenzen als Ausgangspunkt für die Beschreibung verwendet, woraus sich eine Baumstruktur ergibt. Die ID eines Polygonzugs setzt sich somit für Deutschland wie folgt zusammen:

<Kontinent>. <Land>. <Bundesland>. <Landkreis>. <Stadt>. <ID-Nummer>

Beispiel Stadt Kaiserslautern:

europa.de.rlp.lk-kl.kl.1

Die *ID-Nummer* ist eine fortlaufende Zahl, wobei leere Einträge aufgefüllt werden. Überdeckt ein Polygon beispielsweise mehrere Städte, so verkürzt sich die Bezeichnung um den Parameter *<Stadt>*.

Ist die ID des Polygonzugs bekannt, so kann die Information direkt aus der SME ausgelesen werden. Werden bei der Anfrage Koordinaten (Längen- und Breitengrade) übergeben, so muss intern die zuständige *PolygonID* ermittelt werden. Hierfür eignet sich der bereits erwähnte Jordan-Algorithmus, mit dessen Hilfe bestimmt werden kann, ob der gegebene Koordinatenpunkt innerhalb eines Polygonzugs liegt. Befindet sich die angegebene Position innerhalb eines Gebäudes, so können mehrere Polygonzüge vorhanden sein. Um diese unterscheiden zu können, wird zusätzlich noch die Höhe mit übertragen. In Abbildung 4.3 ist der Ablauf einer Suchanfrage veranschaulicht.

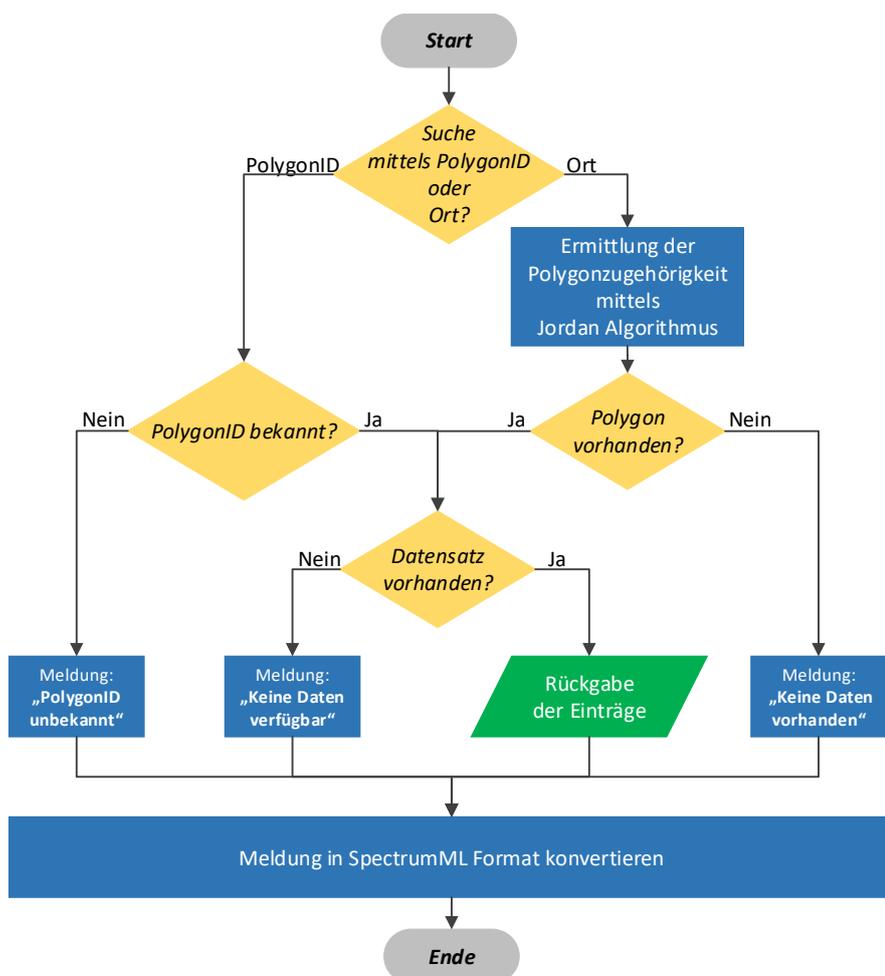


Abbildung 4.3. Suchanfrage bei einer übergebenen PolygonID oder einem Ort (Länge und Breite)

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten der Brokerarchitektur verwendet HTTP RESTful-Schnittstellen, wobei die eigentlichen Nutzinformationen in einem ContextML-Dokument eingebettet sind. Ein markanter Vorteil dieser Schnittstellen ist die *Zustandslosigkeit*, das heißt jede Anfrage eines Clients an einen Server ist in sich abgeschlossen, da alle notwendigen Informationen für den Server in der Nachricht enthalten sind. Für die Verwendung im Bereich Spektrummanagement bedarf es der Entwicklung eines speziell dafür angepassten, XML-basierten Datenformats. Hierbei muss eine Unterstützung der folgenden Funktionalitäten gewährleistet werden:

- Anmeldemöglichkeit von Polygonzügen basierend auf Eckpunkten
- Anpassung der Schnittstellen zur Datenabfrage:
 - Abfrage des Leistungsdichtespektrums
 - Abfrage der Belegung
 - Abfrage von zusätzlicher Spektrumsinformation

Für den Betrieb ist es zusätzlich notwendig alle benötigten und optionalen Parameter zu identifizieren, welche bei einer Anfrage mit übergeben werden müssen. Eine Spezifikation der Parameter ist in Tabelle 4.5 aufgeführt.

Tabelle 4.5. Übergabeparameter bei Datenabfrage

| <i>Bezeichnung</i> | <i>Funktionalität</i> | <i>Parameter</i> | <i>Datenformat</i> | <i>Erforderlich</i> |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| getSpectrum | Gibt Leistungsdichtewerte zurück | Start Frequenz | Double | Ja |
| | | Stop Frequenz | Double | Ja |
| | | Location oder PolygonID | String | Ja |
| getOccupancy | Gibt Belegung zurück | Start Frequenz | Double | Ja |
| | | Stop Frequenz | Double | Ja |
| | | Location oder PolygonID | String | Ja |
| | | DetectionType | String | Optional |
| getUsageRules | Gibt Nutzungsregeln zurück | Start Frequenz | Double | Ja |
| | | Stop Frequenz | Double | Ja |
| | | Location oder PolygonID | String | Ja |

Wie bereits erwähnt, ist es mit ContextML nicht möglich alle benötigten Anforderungen bezüglich der Verarbeitung von Spektrumsinformation

abzudecken. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit und dem Verbundprojekt CoMoRa ein speziell auf diesen Anwendungsfall zugeschnittenes XML-Format namens SML entwickelt. Somit ergibt sich die in Abbildung 4.4 dargestellte Architektur mit den aufgeführten Schnittstellen.

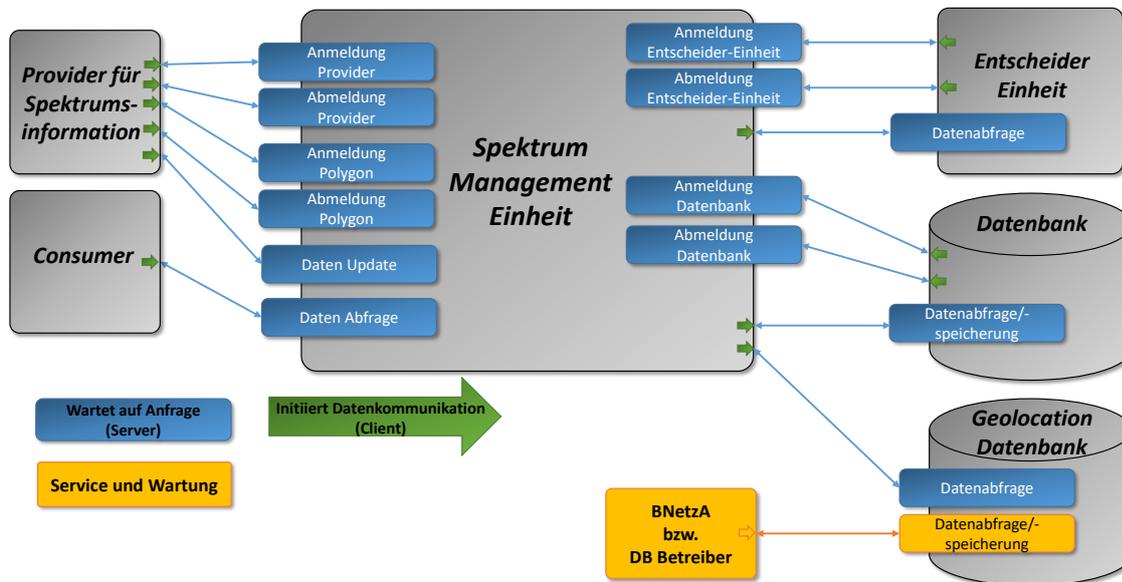


Abbildung 4.4. Architektur einer SME inklusive aller benötigten Schnittstellen

Die an der SME aufgeführte Schnittstelle zur Datenabfrage ist für alle Abfragen (zum Beispiel Spektrumsdaten oder Belegung) zuständig. Für die Implementierung kann dies bei Bedarf aufgeteilt werden.

4.3 Verteilte Spektrum Management Architektur

Die Verwendung zentralisierter Architekturen zeigt Schwachstellen, welche sich einerseits im Bereich der Skalierbarkeit als auch bezüglich der Ausfallsicherheit (Single Point of Failure) bemerkbar machen. Um dies zu verdeutlichen wurden die Verzögerungszeiten eines einzelnen realen (zentralisierten) Systems in Abhängigkeit von der Anzahl der angemeldeten und anfragenden Clients gemessen. Für die Messung wurde eine auf JBOSS basierte Java Implementierung verwendet, welche im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn Marcos Rates Crippa durchgeführt worden ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Anzahl der gleichzeitig anfragenden Clients dargestellt und auf der y-Achse die resultierende Verzögerung.

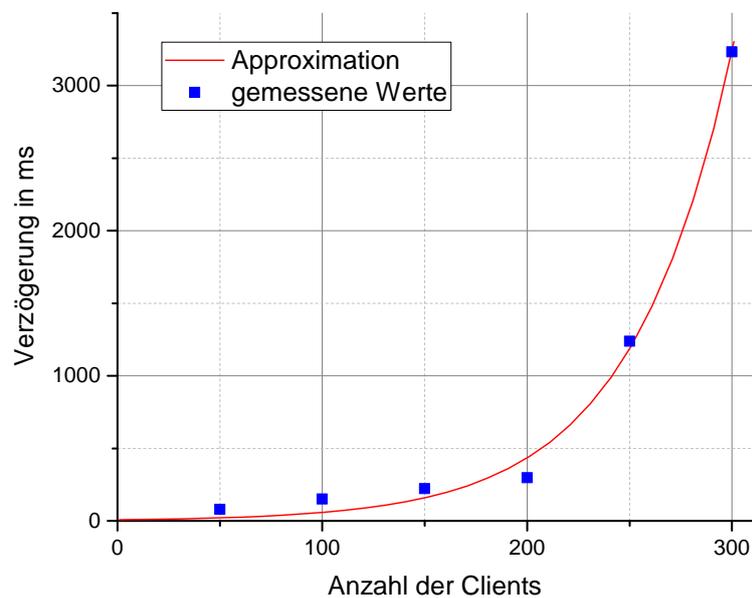


Abbildung 4.5. Verzögerungsverhalten eines zentralisierten Systems

Mittels einer Approximation durch eine Exponentialfunktion kann das Verhalten durch die nachfolgende Gleichung beschrieben werden:

$$t = 7,813 \cdot e^{0,02009 \cdot n}, \quad (4.1)$$

wobei n die Anzahl der verbundenen Clients beschreibt. An dieser Stelle sei allerdings angemerkt, dass es sich um eine Einzelmessung handelt. Die Ergebnisse sind neben der Anzahl der Clients auch noch abhängig von der verwendeten Hardware sowie der softwaremäßigen Implementierung. Als Resultat ergibt sich eine Kurvenschar mit unterschiedlichen Offsets, Steigungen und auch Verschiebungen.

Die so entstehenden Schwankungen resultieren in stark variierenden Latenzzeiten bei den einzelnen Systemen. Des Weiteren kann eine Skalierbarkeit des Systems unter diesen Umständen nicht sichergestellt werden. Um diesem Problem gerecht zu werden, bietet die Erweiterung des zentralisierten Ansatzes auf eine verteilte Architektur geeignete Möglichkeiten. Das Ziel ist hierbei die bereits vorhandenen Funktionalitäten unverändert zu lassen und mittels eines geeigneten Verfahrens mehrere zentrale SMEen zu einer verteilten Architektur zu verknüpfen. Wichtig bei dem Entwurf dieser Architektur ist die Berücksichtigung des Sachver-

haltes, dass keine zentrale Organisation vorhanden sein darf. In Kapitel 3 wurden bereits verschiedene Implementierungen für derartige Systeme vorgestellt und verglichen. Um den Anforderungen bezüglich der Wiederverwendung gerecht zu werden, eignen sich Overlay-Architekturen. Derartige Ansätze werden bei DHT-basierten verteilten Systemen verwendet (vergleiche Kapitel 3). Zur Auswahl einer geeigneten Struktur für Anwendungen muss eine detaillierte Betrachtung der Anforderungen bezogen auf die vorhandenen Architekturen erfolgen. Eine zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist die Aufteilung der Daten zwischen den einzelnen SMEen im Netzwerk. Dies bedarf einer geeigneten Strukturierung der Daten und somit Organisation der Knoten (SMEen) im Netzwerk. Als Parameter für die Organisation wird die Frequenz sowie auch die geografische Position beziehungsweise der geografische Bereich (Polygon) verwendet. Bei der Betrachtung einer vollständig verteilten SMA ist es ersichtlich, dass eine Aufteilung in Subnetze erfolgen muss, da ein Kompromiss zwischen der Komplexität und dem Organisationsaufwand gefunden werden muss.

4.3.1 Organisation nach geografischer Lage

Die Beschreibung der Spektrumsinformation besteht aus Wertetupeln, die sich jeweils aus den Koordinaten (Längen-, Breitengrade und Höhe) sowie der Frequenz und dem zugehörigen Messwert des Empfangspegels zusammensetzen. Für die Organisation der Daten werden Polygonzüge verwendet. Innerhalb jedes Polygonzuges müssen die Werte bezüglich der Koordinaten und Frequenzen eindeutig sein, beziehungsweise ein Tupel muss eindeutig einem Polygon zugewiesen werden können. Um dies zu gewährleisten muss eine surjektive Abbildungsvorschrift angewendet werden.

Die Abbildungsvorschrift lässt sich, wie bereits erwähnt, in eine örtliche sowie auch eine frequenz-organisierte Struktur ableiten. Verglichen mit dem heutigen Stand der Technik lässt sich eine, im Bezug auf die örtliche Auflösung, vergleichbare Problemstellung bei der Namensauflösung im Internet finden. Hierfür wurde ein sogenannter DNS eingerichtet, welcher für die Namensauflösung verantwortlich ist. Die Organisation erfolgt mittels einer Baumstruktur, wobei sich ein vollständiger Domainname aus der Verkettung aller Labels eines Pfades zusammensetzt. Grundlegend eignet sich eine baumartige Struktur, wie sie auch im

DNS verwendet wird. Diese lässt sich in Blätter und Äste aufteilen, wobei jedes Blatt eine frequenzorganisierte Struktur (beschrieben durch die Funktion $k_n = f(\text{Frequenz})$) und die Äste die Ortsabhängigkeit widerspiegeln. Mittels dieser Struktur ist es zudem möglich die Anforderung der Unabhängigkeit einzuhalten, da jedes Blatt auch vollständig autonom fungieren kann. Zur Kommunikation zwischen den Blättern müssen geeignete Knoten für die externe Kommunikation bestimmt werden. In Abbildung 4.6 ist eine solche Baumstruktur dargestellt.

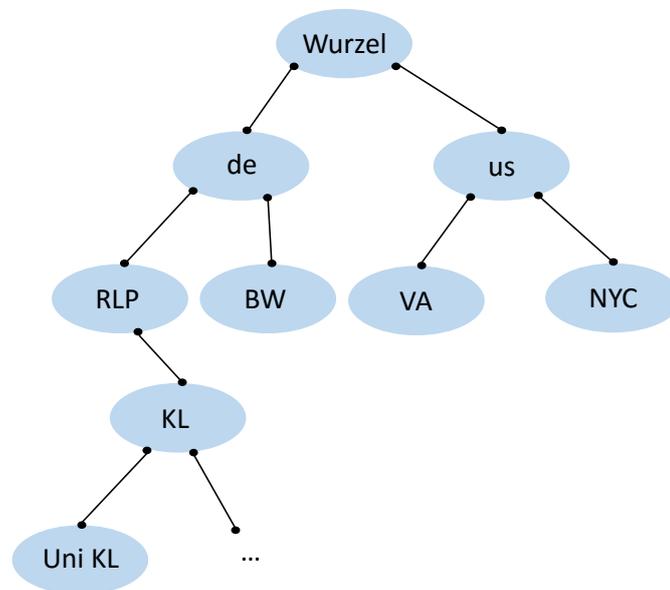


Abbildung 4.6. Aufbau einer Baumstruktur zur Datenorganisation im verteilten Spektrumsmanagement

Ein markanter Vorteil dieses Ansatzes ist, dass einzelne Zweige auch vollständig autonom fungieren können.

4.3.2 Organisation im Frequenzbereich

Für die Organisation im Frequenzbereich wird eines der untersten Blätter in der Baumstruktur betrachtet (vergleiche Abbildung 4.6 „Uni KL“). Eine Eigenschaft eines solchen Blattes ist die Zuständigkeit für einen gegebenen örtlichen Bereich, genauer gesagt ein Polygon. Die Spektrumsinformationen innerhalb eines solchen Polygons müssen eindeutig bezüglich der Frequenz und des Ortes sein. Eine Speicherung beziehungsweise Verwaltung der Daten erfolgt mittels verteilter SMEen. Von der Funktionalität ist jede SME im verteilten System vergleichbar zu einer zen-

tralisierten SME. Zur Sicherstellung einer effizienten Organisation der SMEen ist ein Protokoll beziehungsweise eine Struktur notwendig, die es erlaubt die bestehenden Funktionalitäten einer SME möglichst unverändert zu lassen, aber eine strukturierte Aufteilung der Daten zwischen den SMEen ermöglicht. Für die Lösung dieses Problems eignen sich Overlay-basierte Ansätze. Aus der Informatik werden zur Speicherung von Daten in verteilten Systemen sogenannte DHT-basierte P2P Netzwerke verwendet. In Kapitel 3 wurde die Funktionsweise derartiger Netzwerke bereits eingehend erläutert. Für die Auswahl einer geeigneten Struktur bedarf es der Identifikation von Bewertungsparametern. Die folgenden Bewertungsparameter haben sich hierbei als relevant erwiesen:

- Dezentrale Overlay-Implementierung
- Strukturierte Datenorganisation mit dem Parameter Frequenz
- Option für Redundanz zur Datensicherung

Eine Bewertung der in Kapitel 3.4.4 vorgestellten Implementierungen ist in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Tabelle 4.6. Bewertung relevanter DHT Implementierungen

| <i>Implementierung</i> | <i>Dezentral</i> | <i>Strukturiert</i> | <i>Dimensionen der Datenorganisation</i> | <i>Redundanz</i> |
|------------------------|------------------|---------------------|--|--------------------|
| Gnutella | Ja | Nein | k.a. | Nicht systematisch |
| CAN | Ja | Ja | > 1 | Schwierig |
| Chord | Ja | Ja | 1 | Einfach |
| Pastry | Ja | Ja | 1 | Vorhanden |
| Tapestry | Ja | Ja | 1 | Einfach |

Aus Tabelle 4.6 wird ersichtlich, dass die Gnutella Implementierung aufgrund der fehlenden Strukturierung nicht als Grundlage für den Aufbau eingesetzt werden kann. Bei CAN handelt es sich um eine strukturierte Implementierung, die aber aufgrund ihrer mehrdimensionalen Adressierung nur schwierig mit einem Verfahren zur Erzeugung von Redundanz versehen werden kann. Am besten eignet sich die Chord-Struktur, da es sich um eine strukturierte Implementierung mit einer eindimensionalen Adressierung handelt. Die resultierende Ringstruktur erlaubt es mittels „doppeltem Hashing“ die Daten mehrfach auf verschiedenen Knoten der

DHT abzulegen. Somit eignet sich der Chord-Ansatz als Grundlage für den Aufbau der frequenz-organisierten Struktur. Für die Verwendung von Chord im Zusammenhang mit Spektrumsdaten bedarf es der folgenden funktionalen Erweiterungen:

- Frequenz-orientierte Organisation der Datenspeicherung
- Unterstützung von effizienten Bootstrapping Verfahren
- Einbringung von Redundanz
- Konzept für externe Kommunikation

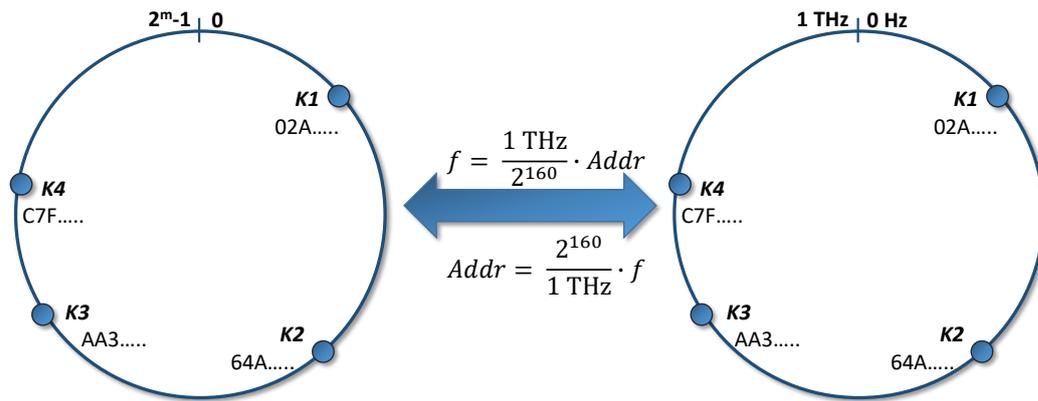
In Kapitel 3 wurde bereits eingehend die Funktionsweise der Chord-Implementierung erläutert. Eine zentrale Aufgabe bei der Datenorganisation spielt die SHA-1 Basis-Hashfunktion. Diese ist jedoch ungeeignet um eine strukturierte Speicherung von Frequenzinformationen zu gewährleisten. Zur detaillierteren Beschreibung werden drei Messwerte betrachtet, die in einer DHT abgespeichert werden sollen.

Die Werte in Tabelle 4.7 sollen mittels SHA-1 Hashing (160 Bit) in einem Chord Netzwerk abgespeichert werden.

Tabelle 4.7. SHA-1 Frequenz-Hashing

| <i>Frequenz</i> | <i>SHA-1</i> | <i>Wert</i> |
|-----------------|---|-------------|
| 1000 MHz | e3cbbba8883fe746c6e35783c9404b4bc0c7ee9eb | -68 dBm |
| 1001 MHz | dd01903921ea24941c26a48f2cec24e0bb0e8cc7 | -77 dBm |
| 1002 MHz | a5b1d7e217aa227d5b2b8a84920780cf637960e2 | -66 dBm |

Durch die Anwendung der SHA-1 Abbildung erfolgt eine Dekorrelation zwischen den Frequenzwerten und den Speicherorten in der DHT wodurch ein Auffinden innerhalb gewünschter Werte nur schwierig möglich ist. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn beispielsweise ein Frequenzbereich abgefragt wird und nicht nur ein spezieller Wert. Um diesem Problem gerecht zu werden, wird die SHA-1 Verschlüsselung durch eine Abbildung des Adressraumes auf einen dedizierten Frequenzbereich ersetzt. Alle Vorteile der Chord Implementierung bleiben erhalten, lediglich die Organisation der Nutzdaten wird verändert. In Abbildung 4.7 ist die Abbildungsvorschrift dargestellt.



Abbildungung 4.7. Abbildungsvorschriften zwischen einem 2^{160} Bit Adresraum und dem Frequenzbereich

Somit ergeben sich $2^{160} \approx 1,462 \cdot 10^{48}$ mögliche Einträge, woraus eine Frequenzauflösung von $\Delta f = f_{\text{ges}}/2^{160}$ resultiert. Für das Beispiel in Abbildung 4.7 mit $f_{\text{ges}} = 1 \text{ THz}$ ergibt sich eine Abstufung von $\Delta f \approx 6,842 \cdot 10^{-37} \text{ Hz}$. Die Verteilung der Messwerte auf die einzelnen Knoten in der DHT erfolgt somit ausschließlich auf Basis der Frequenzebene. Aufgrund der geforderten Heterogenität des Systems, also SMEen mit unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten, wird auch die Gleichverteilung der SHA-Funktion an dieser Stelle nicht benötigt. Für die Beurteilung der Knoten wird daher ein Leistungsindex L eingeführt, welcher die maximale Anzahl von Datensätzen angibt, die ein Knoten unter Einhaltung vorgegebener Parameter sicherstellen kann. Die resultierende Last eines Knotens ergibt sich somit wie folgt:

$$\alpha = \frac{\text{Anzahl der aktiven Datensätze}}{\text{Anzahl der maximal zulässigen Datensätze}} = \frac{n}{L} \quad (4.2)$$

Übersteigt die Last α einen Wert von 85%, so muss der betreffende Knoten versuchen einen Lastausgleich mit einem der benachbarten Knoten vorzunehmen. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus befindet sich in Anhang B. Zur gezielten Erzeugung von Daten-Redundanz innerhalb des Rings, wird eine um Δf verschobene zweite Abbildungsvorschrift erzeugt. Zur Berechnung des Offsets wird eine zufällige Zeichenkette auf eine SHA-1 Funktion gegeben und anschließend mit Hilfe der

Projektionsvorschrift umgerechnet, wie in Formel 4.3 dargestellt.

$$\Delta f = \frac{1 \text{ THz}}{2^{160}} \cdot \text{SHA1}(\text{zufällige Zeichenkette}) \quad (4.3)$$

In Abbildung 4.8 ist die Funktionsweise dargestellt, wobei die ursprüngliche Adressierung in schwarz und die zweite Ebene in rot dargestellt ist.

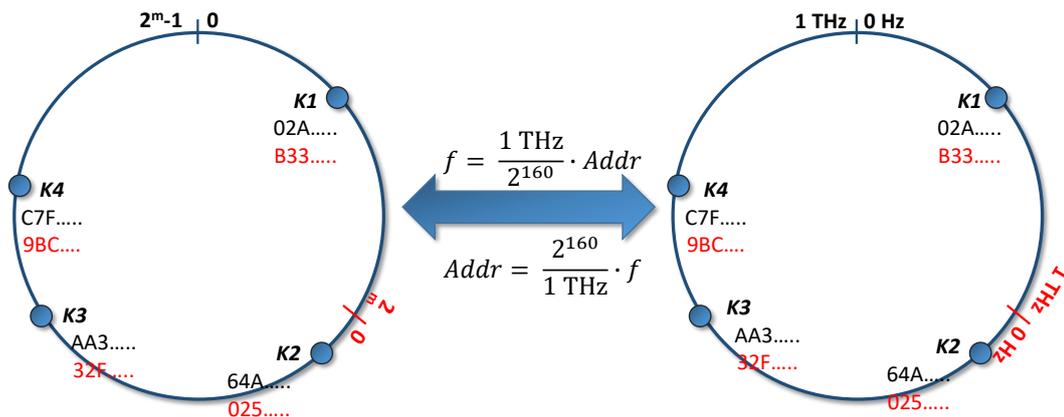


Abbildung 4.8. Funktionsweise der Redundanz erzeugung mittels Einbringung einer zweiten Adressierungsebene (rot dargestellt)

Eine weitere Schwierigkeit, die im Zusammenhang mit dezentralen Strukturen auftaucht, ist das sogenannte *Bootstrapping*. Neue Knoten beziehungsweise SMEen, die dem Netzwerk beitreten, müssen mindestens einen Knoten des bestehenden Netzes kennen. Hierfür gibt es sogenannte *Bootstrap-Knoten*, die alle notwendigen Informationen für die Konfiguration bereithalten. Bevor dieser Vorgang jedoch gestartet werden kann, muss ein Bootstrap-Knoten bereits bekannt sein. Hierfür gibt es verschiedene Lösungsansätze. Gibt es in einem Netzwerk nicht flüchtige Knoten, das heißt Knoten die immer verfügbar sind, so können diese mit einer festen Adresse versehen werden und in einer Liste jedes Knoten hinterlegt werden. Alternativ kann die Adressauflösung mittels eines DNS erfolgen. Hierbei kontaktiert der neue Knoten die hinterlegte Adresse, welche mittels des DNS entsprechend aufgelöst und umgesetzt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Kombination aus beiden Ansätzen verwendet. Hierzu beinhaltet jeder Knoten eine Liste von statischen Adressen, welche er versucht zu kontaktieren. Ist keine dieser Adressen erreichbar, sind in einer zweiten Liste dynamische Adressen hinterlegt,

welche mit Hilfe des DNS aufgelöst werden. Eine detaillierte Darstellung des Startvorgangs eines Knotens ist im Anhang D aufgeführt. Für die Kommunikation zwischen den in Abbildung 4.6 dargestellten Schichten wird der Ansatz der sogenannten *Superpeers* verwendet. Diese Knoten haben zusätzlich eine Verbindung zu einer weiteren Schicht und sind für die Kommunikation mit dieser zuständig. Mittels einer zusätzlichen Liste an Regeln wird festgelegt, welche Informationen an andere Schichten weitergegeben werden. In Tabelle 4.8 ist ein Beispiel für eine Regelliste aufgeführt. Die Spalte „Up“ gibt an ob eine Verbindung zur nächst höheren Schicht möglich ist. Analog beschreibt der Parameter „Down“ die Kommunikationsmöglichkeit zur darunterliegenden Schicht.

Tabelle 4.8. Regeln für die Kommunikation zwischen Schichten

| <i>Regeln</i> | <i>Start Frequenz</i> | <i>Stop Frequenz</i> | <i>Up</i> | <i>Down</i> |
|---------------|-----------------------|----------------------|-----------|-------------|
| 1 | 120,05 MHz | 205,3 MHz | true | true |
| 2 | 2 GHz | 2,305 GHz | true | false |
| 3 | 1020 MHz | 1500,3 MHz | false | false |

Wie auch beim Bootstrapping beinhaltet jeder Knoten eine Liste von potentiellen Knoten, die er versucht zu kontaktieren um das Netzwerk in die Baumstruktur einzubringen. Zur Sicherstellung der Redundanz zwischen den einzelnen Schichten betreibt jeder Chord Ring mindestens zwei Superpeers in jede Richtung. Ein detaillierter Ablaufplan befindet sich im Anhang D dieser Arbeit.

4.3.3 Schnittstellen

Für die Kommunikation zwischen den Knoten sowie zwischen den Schichten sind zusätzliche Schnittstellen notwendig. Zur Kommunikation mit den unmittelbaren Nachbarknoten im Netzwerk betreibt jeder Knoten zwei bidirektionale Schnittstellen. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Schnittstellen sind diese nicht an eine bestimmte Funktion gebunden sondern sind für die komplette Kommunikation der DHT verantwortlich. Jede SME betreibt drei dieser Schnittstellen, wobei zwei für die Kommunikation mit den direkten Nachbarknoten verwendet werden und noch eine weitere für die Kommunikation mit anderen Knoten innerhalb der DHT. Des Weiteren dient die dritte Schnittstelle für Zusatzfunktionalitäten wie beispielsweise die Zeitsynchronisation. In Abbildung 4.9 ist

eine SME mit den zusätzlichen Schnittstellen dargestellt. Alle Schnittstellen für die Kommunikation innerhalb der DHT sind rot dargestellt. Die Schnittstellen für die Datenübertragung zwischen den Schichten sind gelb dargestellt.

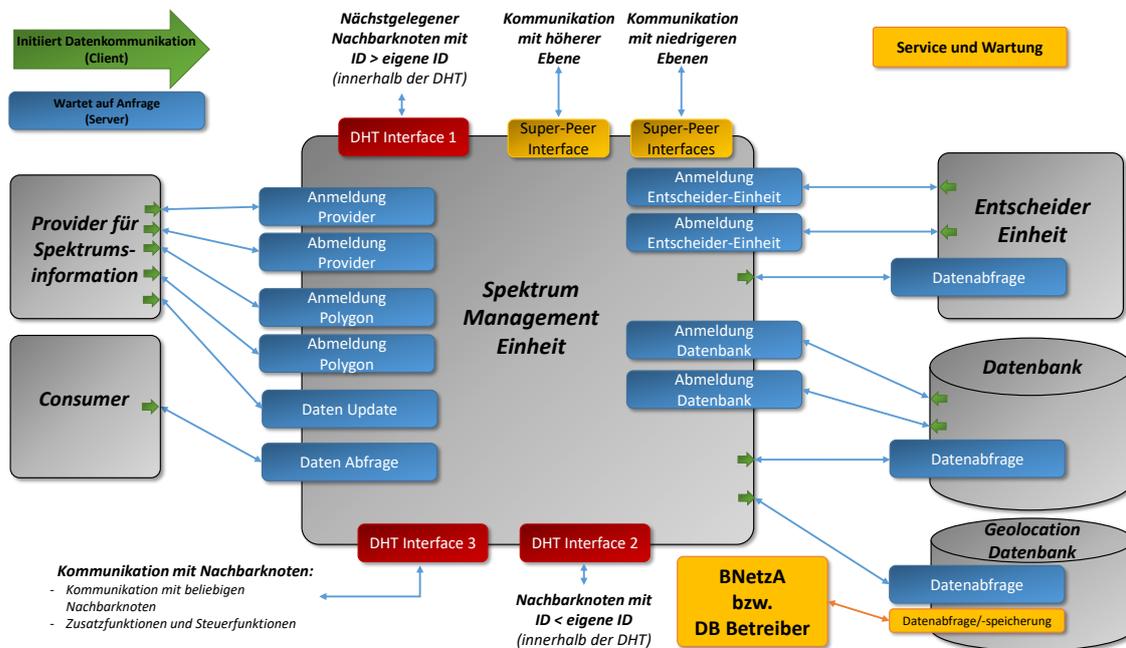


Abbildung 4.9. Schnittstellen einer SME einer verteilten Architektur

Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Schichten betreibt jede SME zwei sogenannte Super-Peer Schnittstellen. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise erfolgt im Anhang 5.

4.4 Fazit

Es hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren bei der Wahl einer geeigneten Architektur berücksichtigt werden müssen. Bereits in Kapitel 2 und 3 wurden diese eingehend beschrieben. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt eine Analyse der Problemstellung hinsichtlich der aus dem Stand der Technik bereits vorhandenen Lösungsansätze. Hierbei haben sich zwei, vom Ansatz her konträre Lösungen als potentiell geeignet herauskristallisiert. Auf Grund der Artverwandtschaft zwischen Kontext- und Spektrumsinformation ist der Einsatz einer Broker-Architektur als geeigneter Ansatz zu werten. Ein entscheidender Nachteil ist hierbei der zentralisierte Ansatz, wodurch eine Skalierung des Systems in Frage gestellt wird. Aus der Informatik sind diverse Ansätze für die verteilte

Speicherung von Daten bekannt, wobei hier keine Datenverarbeitung vorgenommen wird. Das Ziel ist somit die Kombination dieser Verfahren. Es hat sich gezeigt, dass mit Hilfe der Kombination einer Chord Struktur und Knoten mit der Funktionalität eines Brokers ein System aufgebaut werden kann, welches in der Lage ist die in Tabelle 2.2 definierten Anforderungen zu erfüllen. Eine Übersicht bezüglich der Ergebnisse und Beurteilungen ist in Tabelle 4.9 dargestellt. Zusammenfassend lassen sich die Beiträge dieses Kapitels wie folgt darstellen:

- Verteiltes, dezentrales SMS
- Konzept zum Loadbalancing zwischen den Knoten
- Duales Adressierungsverfahren zur Sicherstellung der Integrierbarkeit
- Einbringung von Redundanz

Tabelle 4.9. Bewertung der Architektur; - keine Unterstützung; o unterstützt mit Einschränkungen; + vollständige Unterstützung

| <i>Nummer</i> | <i>Anforderung</i> | <i>Bewertung</i> | <i>Bemerkung</i> |
|---------------|--|------------------|---|
| 1 | Frequenzunabhängig | + | Mittels Einbindung von externen Entscheidern durch entsprechende Schnittstelle |
| 2 | Latenzzeit | nicht verfügbar | Beurteilung erfolgt auf Basis der Simulationen in Kapitel 6 |
| 3 | Einbindung Spektrumsinformation | + | Mittels Einbindung von Datenbanken durch entsprechende Schnittstelle |
| 4 | Einbindung von Sensorinformation | + | Mittels Einbindung von Sensoren durch entsprechende Schnittstelle |
| 5 | Automatisches An- und Abmelden von Systemkomponenten | nicht verfügbar | Beurteilung erfolgt auf Basis der Protokolle in Kapitel D.1 |
| 6 | Überprüfung der Gültigkeit der Daten | + | Grundfunktionalität im Broker |
| 7 | Synchronisierung | + | Funktionalität des Chord Protokolls sowie Publish/Subscribe |
| 8 | Zeitsynchronisierung | nicht verfügbar | Beurteilung erfolgt auf Basis der Protokolle in Kapitel D.1 |
| 9 | Kompatibilität zu bestehenden Netzstrukturen | + | Implementierung erfolgt vollständig als Overlay |
| 10 | Vollständige Mobilitätsunterstützung | + | Implementierung als hierarchisches System, einzelne Chord-Gruppen sind eigenständig lauffähig |
| 11 | Definition von exclusion, restriction und protection Zonen | + | Beschreibung mittels Polygonzügen möglich; Ermittlung mittels externer Entscheider |

5 Protokolle und Algorithmen

Für die Kommunikation zwischen den einzelnen, in Kapitel 4 beschriebenen, Komponenten werden festgelegte Kommunikationsprotokolle benötigt. Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt eine eingehende Beschreibung der Abläufe sowie der zugehörigen Datenformate und Algorithmen. Ein weiterer zentraler Aspekt eines SMSs stellen die Detektionsverfahren zur Belegungserkennung dar. Jede Fehlentscheidung hat einen direkten Einfluss auf die Effizienz des Systems. Im Rahmen dieses Kapitels wird ein grober Überblick bezüglich der hier verwendeten Detektionsverfahren gegeben.

5.1 Adaptive Selektion des Sharing-Verfahrens

Neben der Performanz ist die Zuverlässigkeit ein entscheidender Faktor um eine effiziente Funktionsweise einer SMA sicherzustellen. Die Zuverlässigkeit beschreibt in diesem Zusammenhang eine Kombination aus den folgenden Aspekten:

- Auswahl eines geeigneten Sharing-Verfahrens,
- Minimierung der Interferenzen und
- Maximierung der QoS.

Für die Ermittlung eines geeigneten Verfahrens zum Spektrum-Sharing müssen alle notwendigen Informationen bezüglich des angefragten Frequenzbereiches eingeholt werden. Im Speziellen zählen hierzu die Art der Lizenzierung (lizenziert oder nicht lizenziert), Bandbreite, gegebenenfalls der Lizenznehmer und so weiter. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich eine primäre Aufspaltung in die lizenzierten und nicht lizenzierten spektralen Bereiche. Wie bereits in Kapitel 3 eingehend diskutiert wurde, besteht zwischen diesen beiden Bereichen eine Diskrepanz bezüglich der anwendbaren Sharingverfahren. Um eine geeignete Betrachtung dieses Sachverhaltes vornehmen zu können muss eine Analyse des Ablaufes einer solchen Anfrage erstellt werden.

5.1.1 Anfrage von Spektrum

Bei der Anfrage von Spektrum ist es aufgrund der bereits genannten Bedingungen notwendig vorab spezifizierte Parameter anzugeben. In Tabelle 5.1 sind die grundlegenden Parameter aufgeführt, welche für die Anfrage von spektralen Ressourcen benötigt werden.

Tabelle 5.1. Parameter zur Spektrumsanfrage

| <i>Parameter</i> | <i>Beschreibung</i> | <i>Beispiel</i> |
|------------------|--|-----------------|
| Eigene Lizenz | Art der Lizenzierung der anfragenden Einheit beziehungsweise Anwendung | lizenziert |
| Start Frequenz | Startfrequenz des angefragten Spektrums | 1800 MHz |
| Bandbreite | Bandbreite des angefragten Spektrums | 20 MHz |
| Nutzungszeit | Gewünschter Nutzungszeitraum | 10 Minuten |

Basierend auf den übergebenen Werten erfolgt eine Bestimmung der Lizenzierung des angefragten Spektrums. In Abbildung 5.1 ist der Ablauf eines solchen Prozesses aufgeführt.

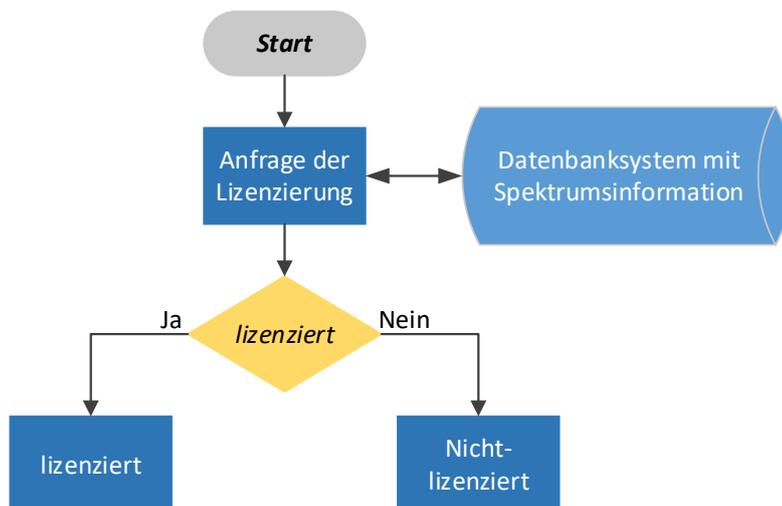


Abbildung 5.1. Ermittlung der Lizenzierung

Beinhaltet der angegebene Frequenzbereich sowohl lizenzierte als auch nicht-lizenzierte Anteile, so erfolgt eine Aufspaltung in zwei oder mehr Bereiche, welche in sich abgeschlossen sind. Diese können bei Bedarf entsprechend aggregiert werden um die gewünschte Bandbreite beziehungs-

weise den gewünschten Durchsatz zu erhalten. Im Nachfolgenden wird der lizenzierte sowie der nicht lizenzierte Anwendungsfall betrachtet.

5.1.2 Lizenzierte Frequenzbereiche

Für die Anfrage eines lizenzierten Frequenzbereiches stehen verschiedene Verfahren (vergleiche Kapitel 3) zur Verfügung. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens ist abhängig vom angefragten Frequenzbereich und dessen Lizenzierungsverfahren. In Tabelle 5.2 sind die verschiedenen Lizenzierungsverfahren für exklusiv und nicht exklusiv lizenzierte Frequenzbereiche aufgeführt und bezüglich ihrer Tauglichkeit bewertet. Die Bewertungen beziehen sich hierbei ausschließlich auf die Umsetzung im angefragten spektralen Bereich.

Tabelle 5.2. Bewertung der Anwendbarkeit von Sharingverfahren bezogen auf die Lizenzierung (++ = sehr gut, + = gut, - = schlecht, n/a = nicht möglich)

| | <i>Exklusiv lizenziert</i> | <i>Nicht exklusiv lizenziert</i> |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| ASA/LSA | ++ | n/a |
| Co-Primary Shared Access | n/a | ++ |
| Licensing Light | ++ | + |
| Secondary Horizontal Shared Access | n/a | ++ |
| Unlicensed Shared Access | - | ++ |
| Unlicensed Primary Shared Access | n/a | n/a |
| Spectrum Load Smoothing | n/a | ++ |
| Licensed Assisted Access | - | ++ |

Zusätzlich zum Frequenzbereich spielt die Art der Lizenzierung eine entscheidende Rolle für die Auswahl eines geeigneten Sharing Verfahrens. Aus Tabelle 5.2 wurde, im Rahmen dieser Arbeit, ein exemplarisches Sharing-Auswahlverfahren abgeleitet. Der Ablauf ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Handelt es sich bei dem angefragten Spektrum um einen lizenzierten Frequenzbereich, so kann zusätzlich zwischen dem aktiven und passiven Sharing unterschieden werden. Im Falle des passiven Sharing muss der SN das Spektrum räumen, sobald der Inhaber aktiv wird. Hierfür können beispielsweise gemessene Werte verwendet werden. Dies ermöglicht zwar eine effizientere Ausnutzung, allerdings kann dieses Vorgehen auch negative Einflüsse auf die Übertragungsgüte haben. Ob es sich um aktives oder passives Sharing handelt, wird vom Lizenzinhaber

festgelegt und innerhalb der Spektrumsanfrage an den SN übermittelt.

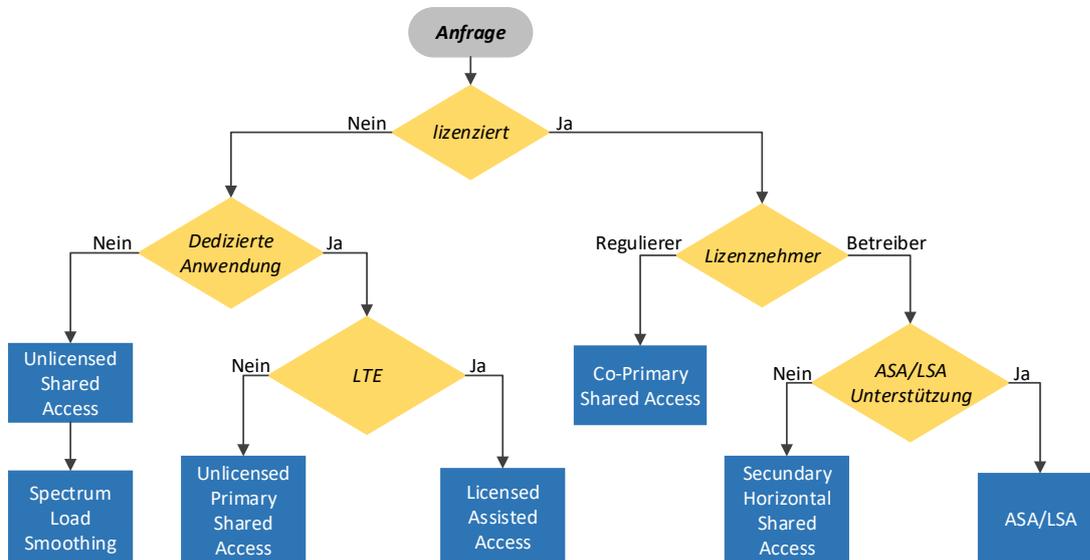


Abbildung 5.2. Ermittlung des Sharing-Verfahrens

5.1.3 Nicht-lizenzierte Frequenzbereiche

Bei der Anfrage von nicht-lizenziertem Spektrum kann keine QoS zugesichert werden. Vielmehr ist das Ziel die Minimierung der Interferenz zwischen den gleichberechtigten Teilnehmern. Ein bekanntes Verfahren für den Umgang mit einer derartigen Problemstellung ist das sogenannte LBT-Verfahren. Hierbei hört jeder Teilnehmer das Übertragungsmedium ab, und erst wenn dies für eine Zeit Δt nicht verwendet wird, beginnt dieser mit der Übertragung. Im Unterschied zu dem ursprünglichen LBT-Verfahren wird innerhalb dieser Arbeit der eigentliche Messvorgang in externe Sensing-Einheiten ausgelagert. Die Messwerte werden an die SME übermittelt und mit Hilfe der sogenannten DU interpretiert. In Abbildung 5.3 sind die notwendigen Komponenten des Systems dargestellt.

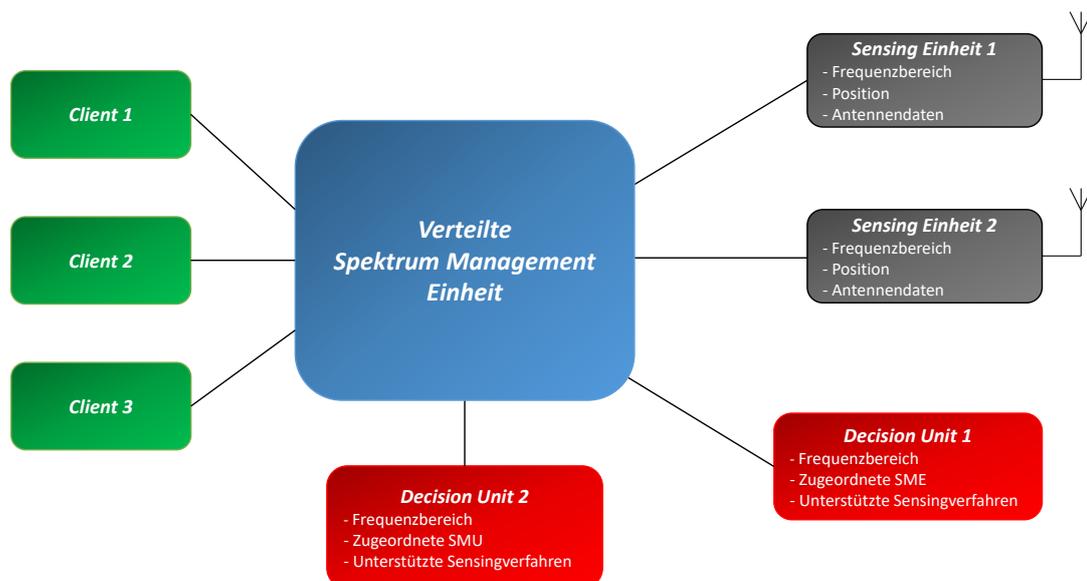


Abbildung 5.3. Systemanbindung von Decision Units (DUs)

Jede DU ist an einer SME angemeldet und wird von dieser für einen bestimmten Frequenzbereich sowie auch einen geographischen Bereich verwendet. Die Festlegung dieser Parameter obliegt der jeweiligen SME und kann bei Bedarf (zum Beispiel beim Ausfall einer DU) auch neu vergeben werden. Des Weiteren muss jede DU bei der Anmeldung an die SME ihre Fähigkeiten bezüglich der unterstützten Detektionsverhalten übermitteln. Für die Implementierung der DUs wurden daher im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Detektionsverfahren untersucht:

- Energiebasierte Detektion
- Wellenformbasierte Detektion
- Matched Filter
- Zyklstationaritätsbasiertes Sensing

Eine eingehende Beschreibung sowie ein Vergleich dieser Verfahren befindet sich in Abschnitt 5.3. Die Belegungserkennung berücksichtigt neben dem aktuellen Ergebnis noch die a-posteriori Information bezüglich der Belegung dieses Bereiches über einen vergangenen Zeitraum. Speziell in Verbindung mit dem SLS-Verfahren können eventuelle Muster in der Belegung des Spektrums erkannt und ausgenutzt werden. In Abbildung 5.4 ist eine exemplarische Messung der Leistung über der Zeit aufgetragen. Im Rahmen der Simulation wurde zur Vereinfachung angenommen,

dass keine Überlappung der Kanäle vorliegt und somit keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet.

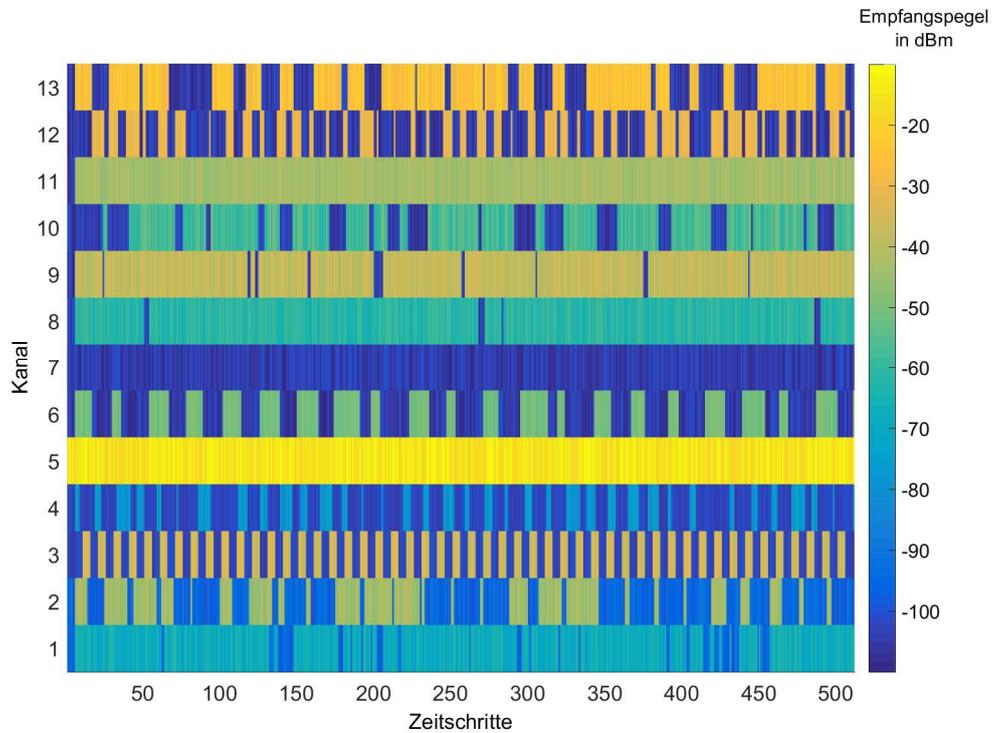


Abbildung 5.4. Leistung in dBm der WLAN Kanäle 1 bis 13

Nach der Anwendung einer Energiedetektion ergibt sich beispielhaft das Belegungsmuster aus Abbildung 5.5. Hierbei repräsentieren die roten Bereiche belegte Anteile.

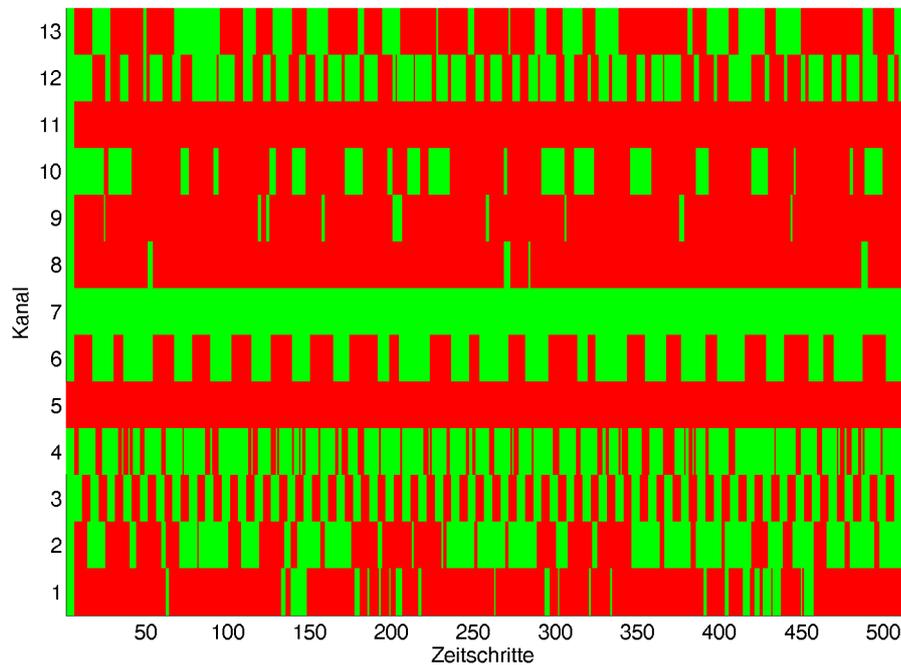


Abbildung 5.5. Belegungsmuster der WLAN Kanäle 1 bis 13

Anschließend werden auf das Belegungsmuster mit Hilfe der SME mehrere Analysealgorithmen angewendet, welche in Tabelle 5.3 aufgelistet sind und nachfolgend erläutert werden.

Tabelle 5.3. Analyseverfahren

| <i>Verfahren</i> | <i>Beschreibung</i> |
|-------------------------------|---|
| Prozentuale Gesamtnutzung | Berechnung der prozentualen Belegungs- beziehungsweise Nutzungsdauer bezogen auf gesamte Laufzeit |
| Prozentuale temporäre Nutzung | Berechnung der prozentualen Belegungs- beziehungsweise Nutzungsdauer innerhalb der letzten N Zeitschritte |
| Mustererkennung | Ermittlung von zeitlichen Belegungsmustern |

Die Verfahren zur Berechnung der prozentualen Nutzung A_N über N Zeitschritte beziehungsweise Samples sind im Vergleich zur Mustererkennung einfach zu beschreiben. Da es sich nach der Detektion um einen binären Wertebereich handelt (siehe Abbildung 5.5), ergibt sich die prozentuale Gesamtausnutzung wie in Formel 5.1 dargestellt. Zur Vereinfachung der Berechnung wird der zulässige Wertebereich für $d(n) \in 0,1$

beschränkt, wobei „0“ Spektrum frei und „1“ belegt angibt.

$$A_N = \frac{\sum_{n=0}^{n=N} d(n)}{N+1} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Eine Berechnung auf Basis vorangegangener Mittelwerte ergibt:

$$\begin{aligned} A_{N+1} &= \left(\frac{N}{N+1} \cdot \frac{1}{N+1} (d_0 + d_1 + \dots + d_N) + \frac{1}{N+1} \cdot (d_{N+1}) \right) \cdot 100\% \\ &= \left(\frac{N}{N+1} \cdot A_N + \frac{1}{N+1} \cdot (d_{N+1}) \right) \cdot 100\% \end{aligned} \quad (5.2)$$

Hierbei repräsentieren $d_1 \dots d_N$ die Belegungen der einzelnen Zeitabschnitte Δt .

Um eine Aussage bezüglich der Tendenz treffen zu können, wird der Mittelwert der Belegung über einen dedizierten Zeitraum Δt beziehungsweise über die daraus resultierende Anzahl von Samples gemittelt. Die Berechnung des gleitenden Mittelwertes erfolgt mit Hilfe von Gleichung 5.3.

$$A_{N+1} = A(n) + \frac{1}{N} (d_{n+1} - d_1) \quad (5.3)$$

Speziell für die Anwendung des SLS ist es wichtig vorhandene Muster in der Belegung beziehungsweise Verwendung des Spektrums zu erkennen. Im Rahmen dieser Arbeit werden hierfür die Ansätze der Diskrete Fourier Transformation (DFT) und der Zyklostationarität auf Basis einer AKF betrachtet. Der Vergleich der beiden Verfahren erfolgt mittels des Belegungsmusters der WLAN-Belegung aus Abbildung 5.5.

Mit Hilfe der DFT ist es möglich eine eindeutige Abbildung zwischen einer Zahlenfolge $x[n]$ und ihrem Spektrum $X[k]$ herzustellen. Das Spektrum einer gegebenen Zahlenfolge $x[n]$ errechnet sich wie in Gleichung 5.4 dargestellt.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot \frac{k \cdot n}{N}} \quad (5.4)$$

Diese Abbildungsvorschrift ermöglicht die Erkennung von periodischen Verhaltensmustern. Der prinzipielle Ablauf der Mustererkennung ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

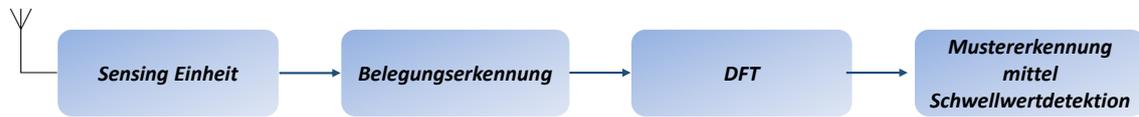


Abbildung 5.6. Prinzipieller Aufbau zur Erkennung von periodischen Belegungsmustern

Wird auf das Belegungsmuster der einzelnen Kanäle in Abbildung 5.5 eine DFT angewendet, so ergibt sich die in Abbildung 5.7 dargestellte Schar von Spektren für sie einzelnen Kanäle.

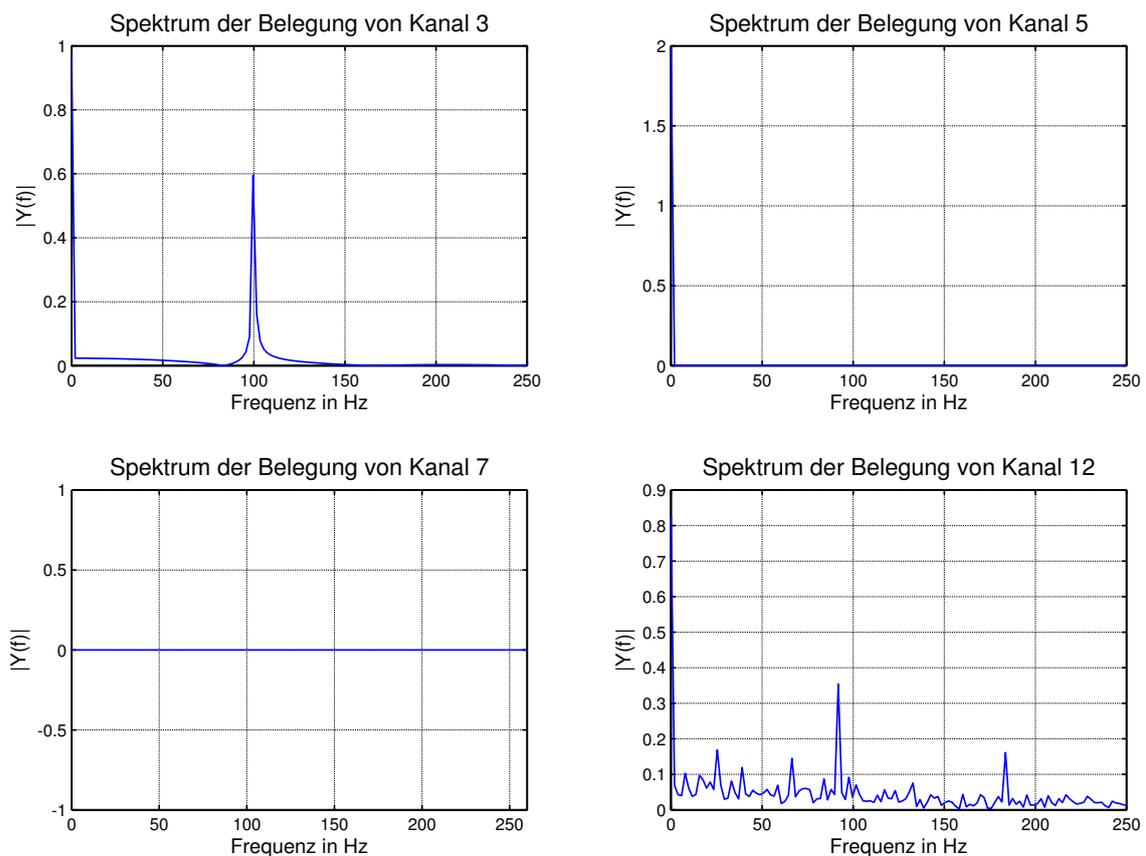


Abbildung 5.7. Spektrum Belegungsmuster der WLAN Kanäle 3, 5, 7 und 12

Aus Abbildung 5.5 wird bereits ersichtlich, dass exemplarisch eine Be-

trachtung der Kanäle 3, 5, 7 und 12 von Interesse ist. Bei der hier verwendeten Simulation entspricht ein Zeitschritt einer simulierten Zeitspanne von $t = 1$ ms.

- **Kanal 3**

Kanal 3 zeigt ein periodisches Verhalten mit einer Periodendauer von 10 Zeitschritten, woraus sich eine Frequenz $f = 100$ Hz ergibt.

- **Kanal 5**

Kanal 5 ist zu 100 % ausgelastet wodurch kein periodisches Muster vorhanden sein kann. Die vollständige Auslastung lässt sich in diesem Fall am vorhandenen Direct Current (DC)-Anteil des Signals identifizieren.

- **Kanal 7**

Kanal 7 ist nicht in Verwendung und weist somit ebenfalls kein periodisches Verhalten auf.

- **Kanal 12**

Kanal 12 wird zufällig verwendet, wobei gewisse periodische Anteile erkennbar sind.

Zur Erkennung eines periodischen Verhaltens wird auf das Ergebnis der DFT eine Schwellwertdetektion angewendet. Wie auch bei der energie-basierten Detektion ist die Bestimmung eines geeigneten Schwellwertes entscheidend für die Funktionsweise. Um eine flexible Detektion zu ermöglichen wird an dieser Stelle eine adaptive Detektion vorgenommen, wobei der Schwellwert mittels des vorhandenen Maximalwertes initialisiert wird.

Ein weiteres Verfahren zur Erkennung von Zyklstationarität ist die Anwendung einer AKF auf die in Abbildung 5.5 dargestellte Belegung. Aus der Anwendung von Gleichung 5.5 ergeben sich die AKF-Verläufe für die Kanäle 3, 5, 7 und 12.

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot x(n + \tau) \quad (5.5)$$

Abbildung 5.8 zeigt die aus den Belegungsmustern in Abbildung 5.5 resultierenden Funktionen.

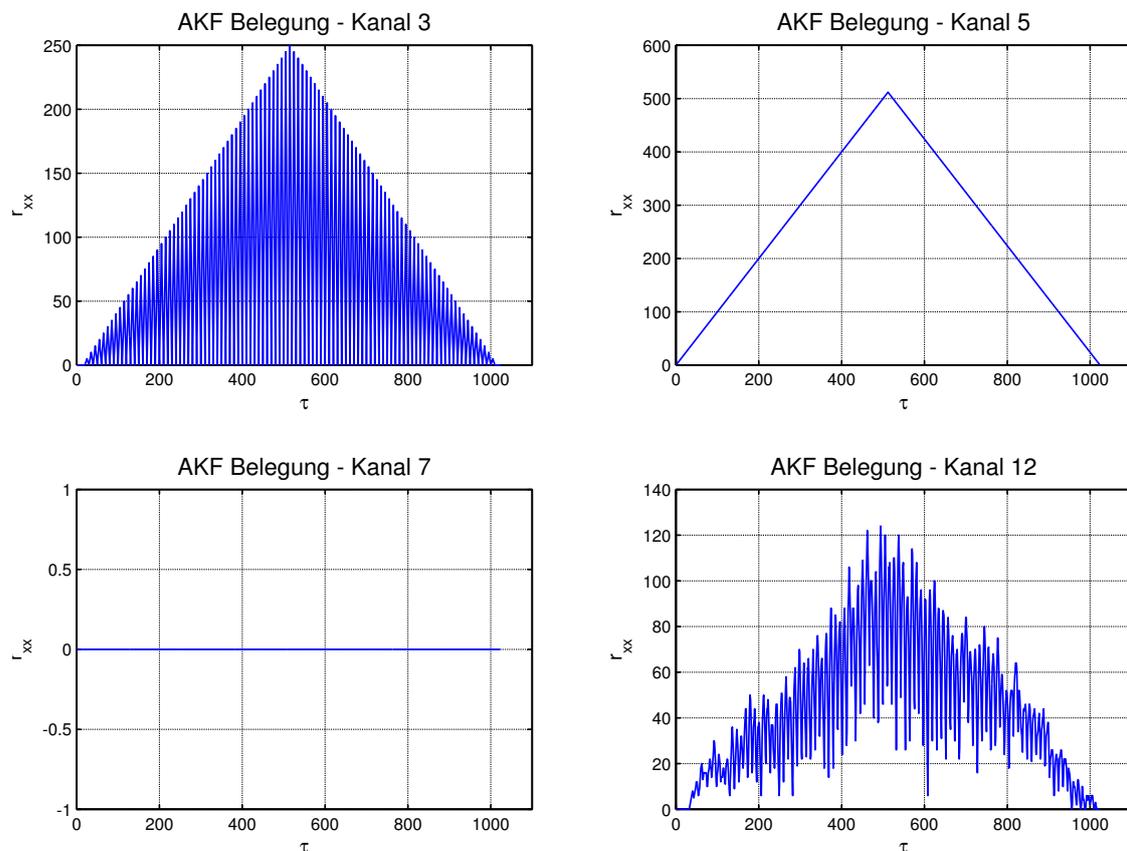


Abbildung 5.8. DFT Ergebnisse der WLAN Kanäle 3, 5, 7 und 12

Aufgrund der endlichen Folgenlänge des rechteckförmigen Eingangssignals ergibt sich die typische dreieckige Formgebung für die Kanäle 3, 5 und 12. Aus den ermittelten Verläufen lässt sich die Periode des Signals aus der AKF ermitteln. Eindeutig ergibt sich dies für den Kanal 3, da dieser mit einer festen Periode genutzt wird. Aufgrund der Verschiebung wird die Periodendauer des Signals durch den Abstand der Nullstellen beschrieben. Ist, wie im Fall von Kanal 5, eine nahezu vollständige Auslastung vorhanden, so sind keine Nullstellen vorhanden, und es ergibt sich ein Dreieck. Liegt, wie im Fall von Kanal 7 ein vollständig unbenutzter Kanal vor, so ist die AKF $R_{xx}(\tau) = 0 \forall \tau$. Für die Detektion einer Belegung mit verschiedenen periodischen Anteilen (verschiedener Frequenzen) ergibt sich eine ähnliche Darstellung wie in Abbildung 5.7 für Kanal 12. Es ist erkennbar, dass periodische Anteile vorhanden sind aber eine eindeutige Identifikation ist nicht möglich.

Im direkten Vergleich der beiden Verfahren (AKF und DFT) sind

bezüglich der Zuverlässigkeit keine markanten Unterschiede erkennbar. Somit sind prinzipiell beide für die Belegungserkennung geeignet. Entscheidend für die Anwendung eines solchen Verfahrens ist aber auch die Implementierbarkeit beziehungsweise der Aufwand, welcher für die Implementierung einer Detektion entsteht. Für den Fall der DFT kann dies, wie bereits beschrieben, mit Hilfe eines Schnellwertdetektors erfolgen. Durch sukzessive Detektion der Peaks ist eine Ermittlung der enthaltenen Frequenzanteile möglich. Des Weiteren kann mit Hilfe des DC-anteils unterschieden werden, ob ein Funkkanal vollständig ausgelastet oder ungenutzt ist. Bei der Anwendung der AKF ist die Detektion wesentlich aufwendiger, da hier eine Erfassung der Schnittpunkte mit der Zeitachse τ sowie eine Erkennung der Form der Hüllkurve erfolgen muss. Die Problematik wird am Kanal 12 verdeutlicht, wo mehrere Frequenzanteile vorhanden sind und somit die typische Dreiecksform stark verwischt wird. Des Weiteren ist eine Bestimmung der einzelnen Frequenzanteile und deren Gewichtung nicht möglich. Ein zusammenfassender Vergleich zwischen den beiden Verfahren ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4. Bewertung von DFT und AKF zur Belegungsdetektion (+ = geeignet, - = ungeeignet)

| <i>Parameter</i> | <i>DFT</i> | <i>AKF</i> |
|--------------------------------|------------|------------|
| Erkennung von Periodizität | + | + |
| Bestimmung der Frequenzanteile | + | - |
| Belegungserkennung | + | + |
| Aufwand | + | - |

Es wird somit deutlich, dass die Anwendung einer DFT im Vergleich zur AKF deutliche Vorteile in Bezug auf den notwendigen Aufwand zur Detektion einer periodischen Belegung aufweist. Aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung eine DFT basierte Detektion des Belegungsmusters verwendet.

5.2 Detektionsverfahren

Abhängig vom Sharing-Verfahren kann es notwendig sein mittels Messungen die Belegung von spektralen Bereichen zu erkennen. Hierfür verwendet die in Kapitel 4 vorgestellte Architektur eine DU, wobei an dieser Stelle noch keine Aussage bezüglich der Funktionalität getroffen wurde.

In diesem Abschnitt werden verschiedene Möglichkeiten für den Aufbau solcher Entscheider vorgestellt.

Eine der einfachsten und meistverwendeten Methoden ist das sogenannte energie-basierte Sensing [15] [178] [179] [180] [181] [182] [183], bei dem mit Hilfe eines Energiedetektors und einem entsprechend gewählten Schwellwert, bezogen auf den Rauschpegel, die Entscheidung über die Belegung des Kanals getroffen wird [184]. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der geringen Komplexität, wobei die Herausforderung in der Wahl des Schwellwertes liegt. Wird dieser „falsch“ gewählt, so resultiert dies in Fehldetektionen und somit in fehlerhaften Entscheidungen des Systems. Ein weiterer entscheidender Faktor ist in diesem Zusammenhang das Signal to Noise Ratio (SNR), wodurch eine Detektion von Spread Spectrum Signalen nur sehr eingeschränkt möglich ist [179]. Allgemein lässt sich ein empfangenes Signal $y(t)$ im Diskreten als $y[i]$ für den Fall von *additivem weißen gaußschen Rauschen* (Additive White Gaussian Noise (AWGN)) wie in Formel 5.6 [15] darstellen.

$$\begin{aligned} H_0 : y[i] &= w[i] \rightarrow \text{PN ist inaktiv} \\ H_1 : y[i] &= s[i] + w[i] \rightarrow \text{PN ist aktiv} \\ & i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (5.6)$$

Wird das Signal über eine Länge von N Samples betrachtet, so ergibt sich die in Formel 5.7 dargestellte Testmetrik [15].

$$M = \sum_{n=1}^N (|y[i]|)^2 \quad (5.7)$$

Die Entscheidung, ob ein Signal vorhanden ist basiert auf dem Vergleich mit einem festgelegten Schwellwert Λ_E , wodurch sich die erwähnten Hypothesen in Formel 5.6 ergeben. Zur Beschreibung der Performanz eines solchen Detektors, muss die Entdeckungswahrscheinlichkeit P_D sowie auch die Falschalarmwahrscheinlichkeit P_F betrachtet werden. In Formel 5.8 sind die beiden Fälle formuliert [15].

$$\begin{aligned} P_D &= P_r (M > \Lambda_E | H_1) \\ P_F &= P_r (M > \Lambda_E | H_0) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Hierbei ist P_F zu minimieren, um eine Maximierung der spektralen Auslastung zu gewährleisten. Für die Abschätzung der Rauschleistung wird weißes Rauschen angenommen, welches als mittelwertfreie Gaußsche Zufallsvariable mit der Varianz σ_w^2 , genauer gesagt $w[n] = N[0, \sigma_w^2]$, modelliert werden kann [15]. Um eine einfache Analyse zu ermöglichen wird das Nutzsignal $s[n]$ ebenfalls als mittelwertfreie Gaußsche Zufallsvariable $s[n] = N[0, \sigma_s^2]$ beschrieben. Basierend auf den hier getroffenen Annahmen lässt sich ableiten, dass die Testmetrik einer Chi-Quadrat Verteilung mit N Freiheitsgraden folgt und wie in Formel 5.9 beschrieben werden kann.

$$M = \begin{cases} \sigma_w^2 \chi_N^2 & H_0 \\ (\sigma_w^2 + \sigma_s^2) \chi_N^2 & H_1 \end{cases} \quad (5.9)$$

Hieraus ergeben sich die in den Formeln 5.10 und 5.11 dargestellten Wahrscheinlichkeiten für P_D und P_F .

$$P_F = 1 - \int_0^{\frac{\lambda_E}{\sigma_w^2}} \frac{x^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{x}{2}\right)}{2^{\frac{N}{2}} \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} dx \quad (5.10)$$

$$P_D = 1 - \int_0^{\frac{\lambda_E}{\sigma_s^2}} \frac{x^{\frac{N}{2}-1} \exp\left(-\frac{x}{2}\right)}{2^{\frac{N}{2}} \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} dx \quad (5.11)$$

Hierbei beschreibt λ_E den Schwellwert und Γ ist die unvollständige Gamma Funktion [185]. Zur Bestimmung eines geeigneten Rauschlevels bietet sich beispielsweise die Verwendung des sogenannten MUSIC [186] Algorithmus an.

Im Gegensatz zur energiebasierten Detektion ist das wellenformbasierte Sensing auf a-priori-Information bezüglich des gesuchten Nutzsignals angewiesen. Mittels einer Kreuz-Korrelation wird nach bekannten Signalmustern gesucht, wie beispielsweise Pilotsignale oder Preambles. Für die Metrik ergibt sich dann der folgende Zusammenhang [15]

$$M = \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^N y[i] \cdot s^*[i] \right]. \quad (5.12)$$

Für die Untersuchung wird eine bekannte Signalfolge $s[n]$ von N Samples benötigt, welche für die Korrelation mit dem zu detektierenden Signal verwendet wird. Somit resultieren zwei mögliche Fälle [15]:

1. Kein Nutzsinal vorhanden

$$M = \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^N w[i] \cdot s^*[i] \right] \quad (5.13)$$

2. Nutzsinal vorhanden

$$M = \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^N s[i] \cdot s^*[i] \right] + \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^N w[i] \cdot s^*[i] \right] \quad (5.14)$$

Die Existenz eines Nutzsinals wird mittels Vergleich von M mit einem gegebenen Schwellwert λ_w bestimmt. Die Genauigkeit beziehungsweise die Erfolgsrate dieses Verfahrens hängt maßgeblich von der Anzahl der bekannten Samples ab.

Der Matched Filter Ansatz ist prinzipiell vergleichbar mit der wellenformbasierten Detektion mit dem Unterschied, dass hier die Signalform vollständig bekannt sein muss. Vielmehr wird beim Matched Filter eine Analyse der eigentlichen Abtastwerte vorgenommen, wodurch eine gezielte Detektion von eventuell vorhandenen Trainingssequenzen ermöglicht wird. Für ein Signal $s[t]$, welches für $0 \leq t \leq T$ definiert ist, ergibt sich die Impulsantwort des Matched Filters zu:

$$h[t] = \begin{cases} s[T - t] & \text{wenn } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.15)$$

Somit stellt die Impulsantwort des Matched Filters das zeitgespiegelte Nutzsinal dar. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der geringen Ausführungszeit, jedoch bedarf es einer exakten Kenntnis des gesuchten Signals wie beispielsweise Bandbreite, Frequenz, Modulationsart oder Impulsform.

Die Detektion mittels des zyklstationären Sensings basiert auf den zyklstationären Eigenschaften des empfangenen Signals. Verursacht werden diese durch periodische Vorgänge innerhalb des Signals, wobei diese

auch gezielt eingebracht werden können (beispielsweise mittels periodischer Trainingssequenzen). Für die Beurteilung beziehungsweise Bewertung des Signals werden die statistischen Eigenschaften des Sendesignals betrachtet. Weist die Autokorrelationsfunktion sowie der Erwartungswert eines Zufallsprozess $x(t)$ einen periodischen Verlauf mit der Periode T auf, so wird der Zufallsprozess als schwach zyklstationär bezeichnet. Somit lässt sich der Erwartungswert wie in Formel 5.16 berechnen [187].

$$E_x(t) = E_x(t + m \cdot T) = E(x(t)) \quad (5.16)$$

Formel 5.17 [187] zeigt die daraus resultierende AKF.

$$R_x(t, \tau) = R_x(t + m \cdot T, \tau) = E_x(t) \cdot E_x^*(t + \tau) \quad (5.17)$$

Hierbei repräsentiert t die Zeitvariable, τ die Zeitverschiebung zwischen den Funktionswerten und m eine ganze Zahl. Wird die AKF mit Hilfe einer Fourierreihe beschrieben, ergibt sich die in Formel 5.19 dargestellte Form [187].

$$R_x(t, \tau) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (5.18)$$

Der Term $R_x^{\alpha}(\tau)$ beschreibt hierbei einen Fourierkoeffizienten, welcher auch als Cyclic Autocorrelation Functions (CAFs) bezeichnet wird. Die Fourierfrequenzen α repräsentieren die Cycle Frequencies (CFs). Für die Berechnung der CAFs wird die Herangehensweise wie bei den gewöhnlichen Fourierkoeffizienten, in Formel 5.19 dargestellt, verwendet [187].

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (5.19)$$

Wird die AKF mit Hilfe einer Fourierreihe beschrieben, so ergibt sich die CAF zu Formel 5.20 [12] [188].

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E_x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot E_x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt. \quad (5.20)$$

Durch Anwendung des Wiener-Chintschin-Theorems kann mit Formel 5.20 die spektrale Leistungsdichte berechnet werden (siehe Formel 5.21) [187].

$$S_x^\alpha(f) = \mathcal{F} \{R_x^\alpha(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5.21)$$

Für die Verwendung im Zusammenhang mit der Belegungserkennung von spektralen Bereichen wird auf das Leistungsdichtespektrum ein Hypothesentest angewendet. Dies ist in Formel 5.22 und 5.23 dargestellt.

$$H_0 : S_y^\alpha(f) = S_n^\alpha \quad (5.22)$$

$$H_1 : S_y^\alpha(f) = S_s^\alpha + S_n^\alpha \quad (5.23)$$

Somit beschreibt S_n^α das Power Spectral Density (PSD) des additive Rauschens $n(t)$ und S_s^α das PSD des Nutzsignals $s(t)$. An dieser Stelle wird vorausgesetzt, dass das Rauschen $n(t)$ keine zyklstationären Anteile besitzt und somit das Leistungsdichtespektrum für $\alpha \neq 0$ null ist.

Die vorgestellten Detektionsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Komplexität, Genauigkeit und der dafür notwendigen a-priori Informationen. In Abbildung 5.9 ist ein Vergleich unter Berücksichtigung der genannten Kriterien aufgeführt.

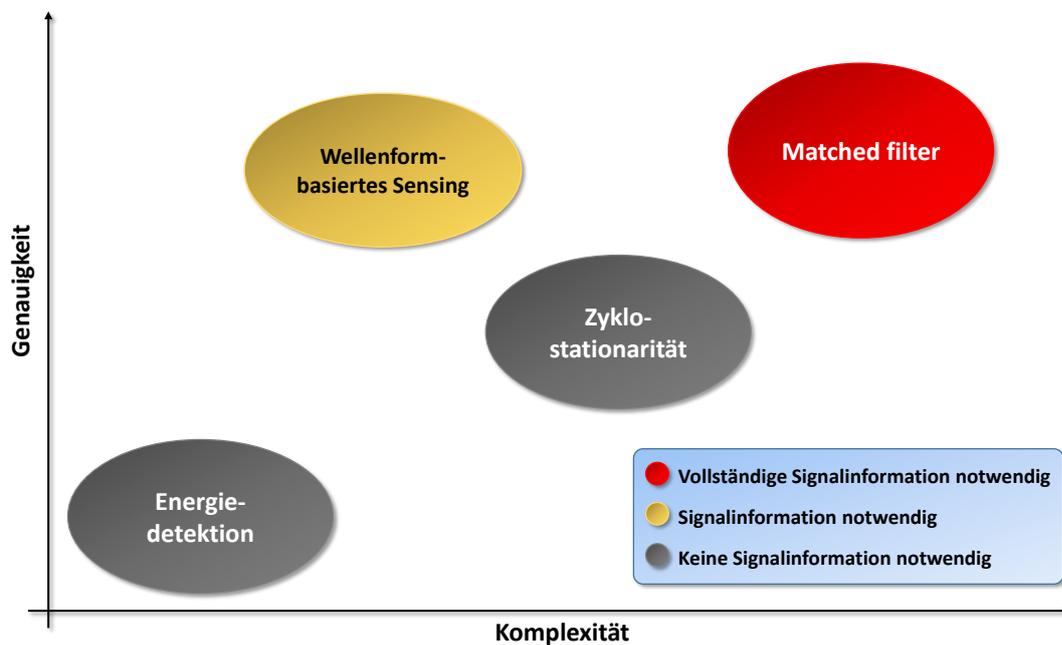


Abbildung 5.9. Vergleich der Komplexität und der Genauigkeit der vorgestellten Detektionsverfahren [15]

Ein weiterer entscheidender Faktor bei der Detektion ist das SNR, dessen Einfluss abhängig vom angewendeten Verfahren ist. Handelt es sich um zyklstationaritätsbasiertes Sensing, können auch periodische Eigenschaften des Rauschens negative Auswirkungen auf die Detektionsgenauigkeit haben. Um adäquate Ergebnisse im Bezug auf die Verwendung innerhalb einer SMA beziehungsweise eines SMS erzielen zu können muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand gefunden werden. Speziell korrelationsbasierte Ansätze weisen oftmals große Bearbeitungszeiten auf, wodurch die Information dann bereits veraltet sein kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei einer SME immer ein energiebasierter Detektor als „Grundausstattung“ vorausgesetzt. Weitere Detektoren können in Form von Clients an das System angemeldet werden. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens basiert auf dem in Abbildung 5.10 dargestellten Programmablaufplans. Hierbei erfolgt die Bearbeitung in der für den Frequenzbereich zuständigen SME.

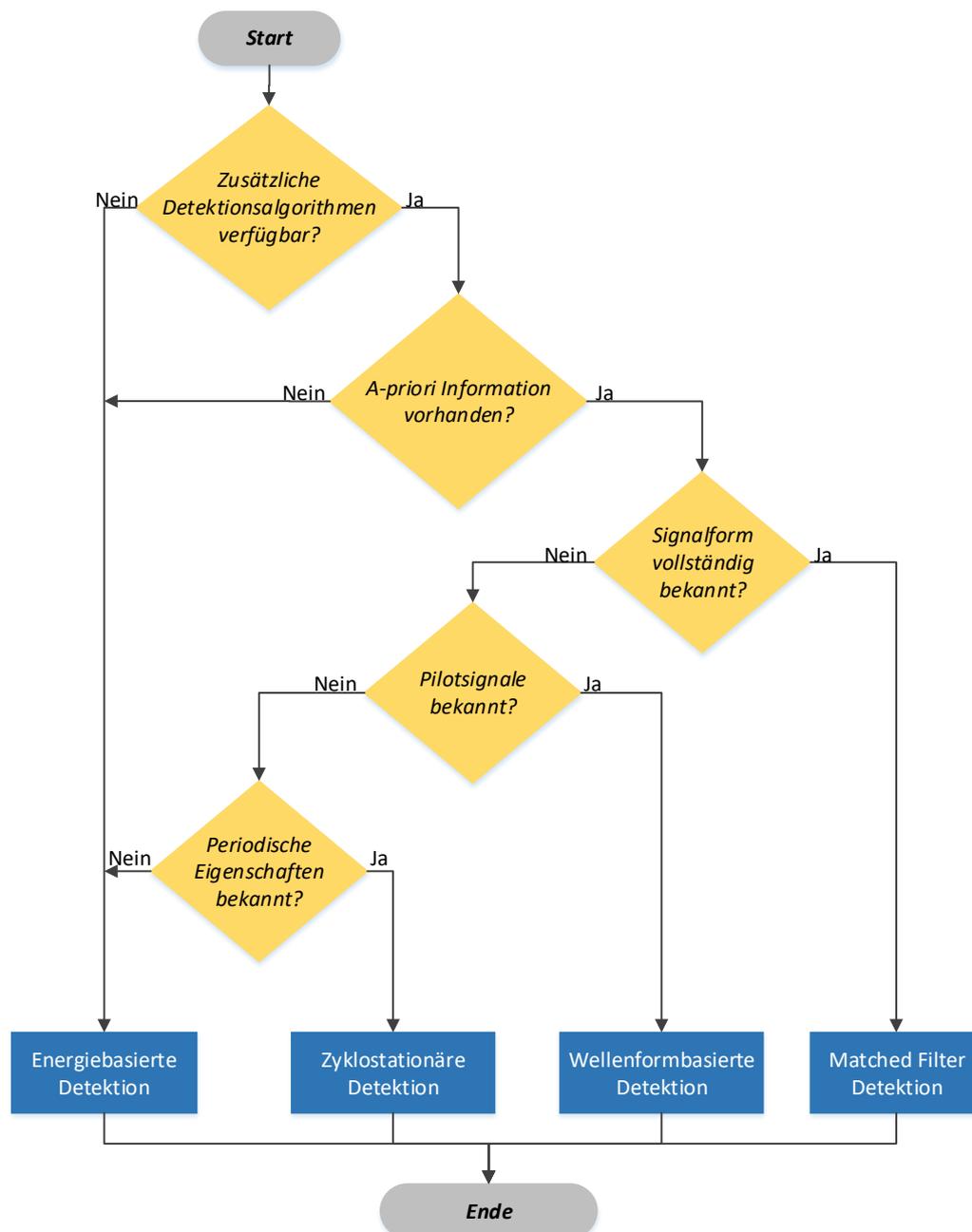


Abbildung 5.10. Auswahlverfahren für einen geeigneten Detektionsalgorithmus

5.3 Protokolle

Um eine effiziente Nutzung der in Kapitel 4.3 vorgestellten Architektur zu gewährleisten, werden im Rahmen dieser Arbeit geeignete Protokolle entwickelt und getestet. Bei der Betrachtung der einzelnen Protokolle müssen vorab alle Übergabeparameter sowohl in Ein- als auch in Ausgangsrichtung identifiziert werden. Für den Aufbau eines SMSs werden

in den folgenden Abschnitten die Protokolle zur

1. Datenübertragung (Nutzdaten)
2. Kommunikation zwischen den SMEen sowie zwischen den Layern (Kontrolldaten)
3. Bootstrapping beziehungsweise Plug-and-Play
4. Datenredundanz
5. Zeitsynchronisation betrachtet

Bei der Datenübertragung wird an dieser Stelle eine Unterscheidung zwischen Nutz- und Kontroll-Daten vorgenommen. Hierbei beinhaltet der Begriff Nutzdaten jede Art von Information, welche zur Beschreibung der Eigenschaften eines Spektrums dienen (beispielsweise Messwerte). Kontroll-Daten werden ausschließlich für die Verwaltung und Steuerung des Systems verwendet und beinhalten keine Nutz-Daten. Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten SpektrumML-Datenformates, befindet sich in Anhang C dieser Arbeit. Zusätzlich wird ein spezielles Protokoll namens Data Control Language (DCL) für die Übertragung der Kontroll-Daten entwickelt. DCL verwendet einen minimierten Overhead und ermöglicht somit eine deutliche Performanzsteigerung des Systems. Eine eingehende Beschreibung von DCL befindet sich ebenfalls in Anhang C dieser Arbeit.

5.3.1 Chord Protokoll

Das innerhalb einer Schicht verwendete Chord Protokoll basiert auf der von Stoika [168] vorgestellten Implementierung, wobei die folgenden Funktionalitäten ergänzt wurden:

- Bootstrap-Algorithmus
- Erzeugung von Datenredundanz
- Zeitsynchronisation
- Erweiterung auf Multilayer-Struktur

Die Funktionalitäten wurden bereits ausführlich in Kapitel 4 beschrieben. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt in diesem Teil der Arbeit eine Spezifizierung der notwendigen Protokolle für die spätere Implementierung.

5.3.1.1 Bootstrap Protokoll

Essentiell für die erfolgreiche Einbindung eines Knotens in eine bestehende Struktur ist die Kenntnis von mindestens einem aktiven Teilnehmer in der Struktur. Um diesem Problem gerecht zu werden und die Plug-and-Play Funktionalität zu gewährleisten wird das speziell entwickelte Bootstrap Protokoll verwendet. Die Funktionsweise wird mittels des Ablaufplans in Abbildung 5.11 beschrieben.

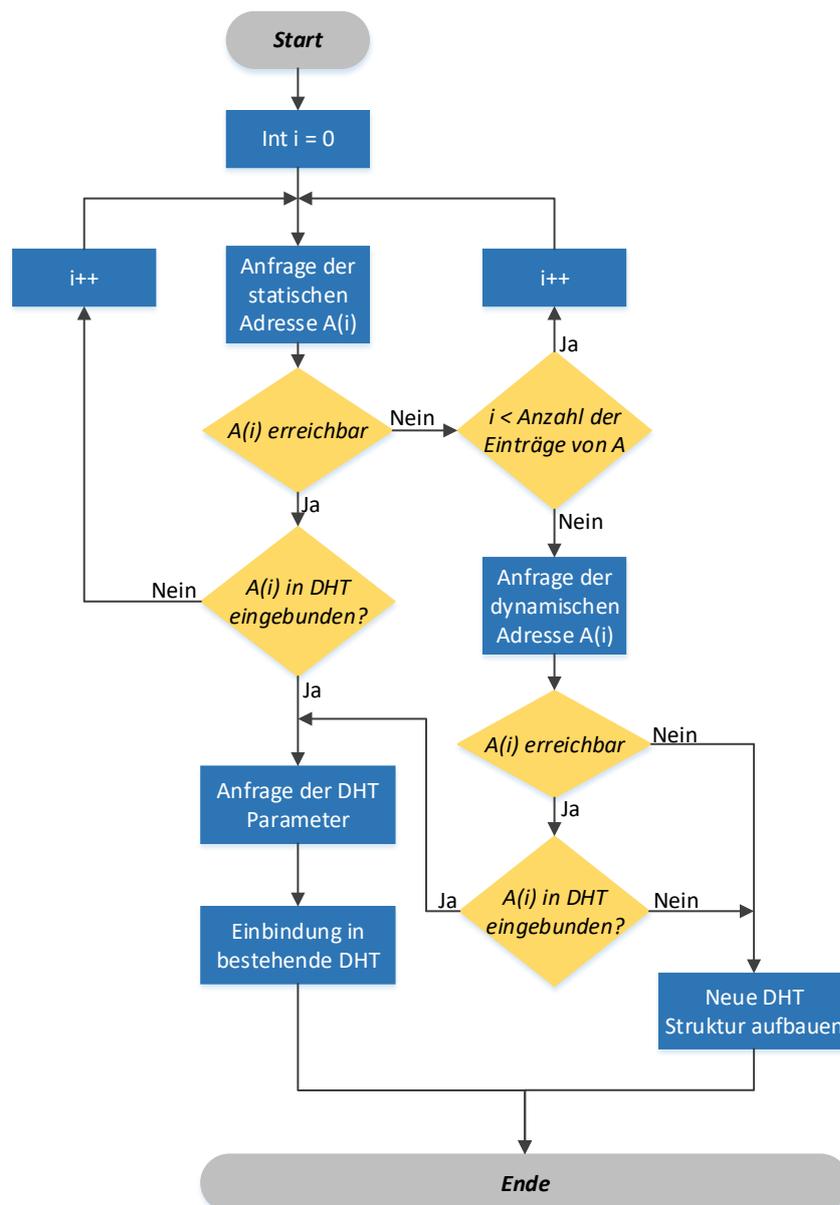


Abbildung 5.11. Ablauf des Bootstrap-Vorgangs

Wird eine neue DHT Struktur aufgebaut, so fungieren der erste sowie auch die vier nachfolgenden Knoten automatisch als *SuperPeers*, und diese sind somit auch für die Integration in die darüber beziehungsweise darunter liegenden Schichten verantwortlich.

5.3.1.2 Datenredundanz

Für die Gewährleistung eines stabilen Systems spielt die sichere und zuverlässige Speicherung der Spektrumsinformationen eine zentrale Rolle. Bei der Betrachtung des konventionellen Chord-Ansatzes fällt auf, dass hier keinerlei Redundanz der Daten aufgebaut wird. Fällt ein Knoten aus, so sind die dort hinterlegten Informationen unwiederbringlich verloren. Zur Reduktion der Verlustwahrscheinlichkeit von Daten wird, wie bereits in Abschnitt 4.3.2 eine zweite, versetzte Adressierungsschicht als Overlay in das System eingebracht. Jede SME ist somit für zwei unabhängige Frequenzbereiche zuständig. Um dies zu gewährleisten wird der Speicherbereich einer SME in zwei gleich große Bereiche aufgeteilt, welche als Primär- und Sekundär-Speicher bezeichnet werden. Das Handling der Speicherbereiche obliegt dem Spektrum Management Einheit-Speicher Manager (SME-SM), welcher ein Bestandteil jeder SME ist. In Abbildung 5.12 ist der Aufbau eines SME-SM dargestellt.

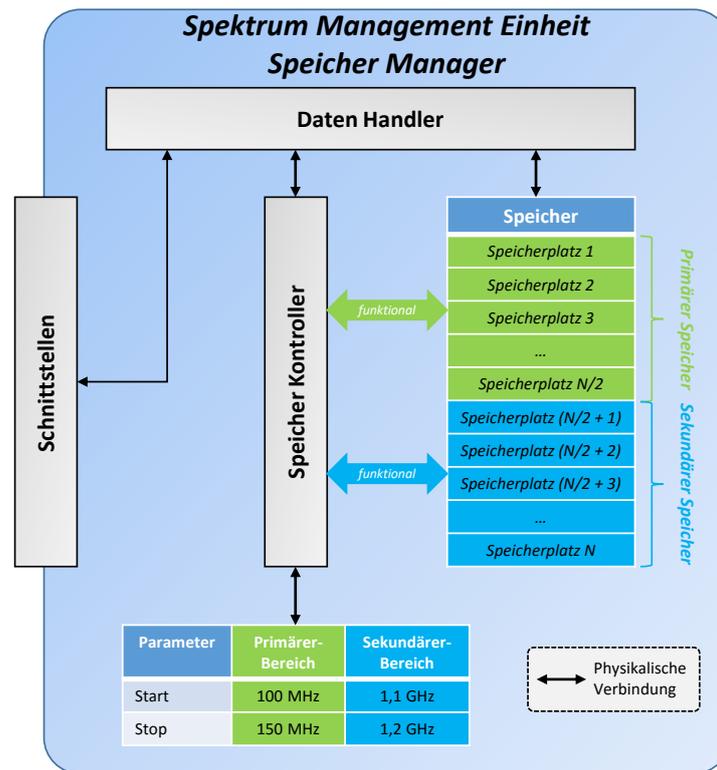


Abbildung 5.12. Aufbau eines Spektrum Management Einheit-Speicher Managers (SME-SMs)

Der benötigte Offset für die Adressierung beziehungsweise Festlegung der Zuständigkeitsbereiche wird immer von der initialen SME festgelegt. Hierzu wird von einem zufälligen String ein SHA-1 Hash gebildet und daraus mit Formel 4.3 die resultierende Offset-Frequenz berechnet. Zur Sicherstellung einer möglichst hohen Datensicherheit sollte der Wert im Bereich $\frac{2^{160}}{4} \leq \Delta f \leq \frac{3}{4} \cdot 2^{160}$ liegen. Der generierte Offsetwert bleibt für die Lebensdauer des Rings unverändert bestehen.

5.3.1.3 Zeitsynchronisation

Innerhalb des Systems ist es wichtig, dass die Zeiten der Knoten sowie auch die der Clients miteinander synchronisiert werden. Dies ist gerade in Bezug auf Spektrumsinformation mit einer kurzen Gültigkeitsdauer (hier im Bereich von einigen Minuten) von hoher Relevanz. Zu diesem Zweck wurde ein spezielles Zeit-Synchronisierungsprotokoll namens Lightwight Time Sync (LT-Sync) entwickelt, um eine möglichst genaue Synchronisation der Systemuhren zu erzielen. Das entwickelte Verfahren zur Zeitsynchronisierung kombiniert die Eigenschaften des PariSync-Protokolls

[189] für P2P Netzwerke sowie des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 1588 Protokolls [190], welches in die Kategorie der Precision Time Protokolle (PTP) einzuordnen ist. Hierbei übernimmt PariSync die Aufgabe der Paketkoordination und IEEE 1588 dient zur Schätzung vorhandener Verzögerungen in der Übertragung. Im Nachfolgenden werden die relevanten Eigenschaften der beiden Verfahren vorgestellt.

Für die Kommunikation innerhalb der DHT wird PariSync, welches speziell zur Synchronisierung von Chord-basierten [168] P2P-Netzwerken entwickelt worden ist, verwendet. Das Protokoll arbeitet zur Kommunikation mit vorhandenen Fingertables (vergleiche Abschnitt 3.4.4.3) in den einzelnen Knoten anstelle von Broadcast-Nachrichten um eine „Flutung“ des Netzwerks zu vermeiden. Jeder Knoten innerhalb der DHT ist für die Synchronisierung einer definierten Teilmenge benachbarter Knoten verantwortlich. Zur Festlegung des Zuständigkeitsbereiches eines Knotens beinhaltet jede Nachricht einen „limit“ Parameter, welcher sich aus dem nächsten Eintrag in der Fingertable $limitID = NodeID(i + 1)$ ergibt. Das Limit beschreibt die obere Grenze des Zuständigkeitsbereiches bezüglich des Adressbereiches (NodeID). Erhält somit ein Knoten k (mit der NodeID $ownID$) eine Nachricht mit dem Limit $limit$, so ergibt sich der Zuständigkeitsbereich für k zu $ownID < ID < limit$. Zusätzlich enthält jede Synchronisationsnachricht eine maximale Anzahl von Hops $hops_{max}$, die diese Nachricht durchlaufen dürfen. Ist die Anzahl erreicht und das Paket immer noch nicht beim Empfänger, wird dieses verworfen, um Endlosschleifen zu vermeiden. Bei der Wahl von $hops_{max}$ muss allerdings die Größe der DHT berücksichtigt und aus diesem Grund auch ausreichend groß gewählt werden. Abbildung 5.13 zeigt als Beispiel einen Chord Ring mit acht Knoten.

Die resultierende Struktur der Nachrichten ergibt eine baumartige Struktur und ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

Jeder Synchronisationsvorgang wird von einem sogenannten „ROOT“-Knoten initiiert, der für alle Knoten in der Fingertable verantwortlich ist.

Das IEEE 1588 Protokoll wurde speziell zur Zeitsynchronisierung in verteilten Ethernet-basierten Netzwerken entwickelt. Bei der Übertragung von Paketen innerhalb eines solchen Netzes kann es zu variierenden Verzögerungszeiten aufgrund des angewendeten Carrier Sense Multiple

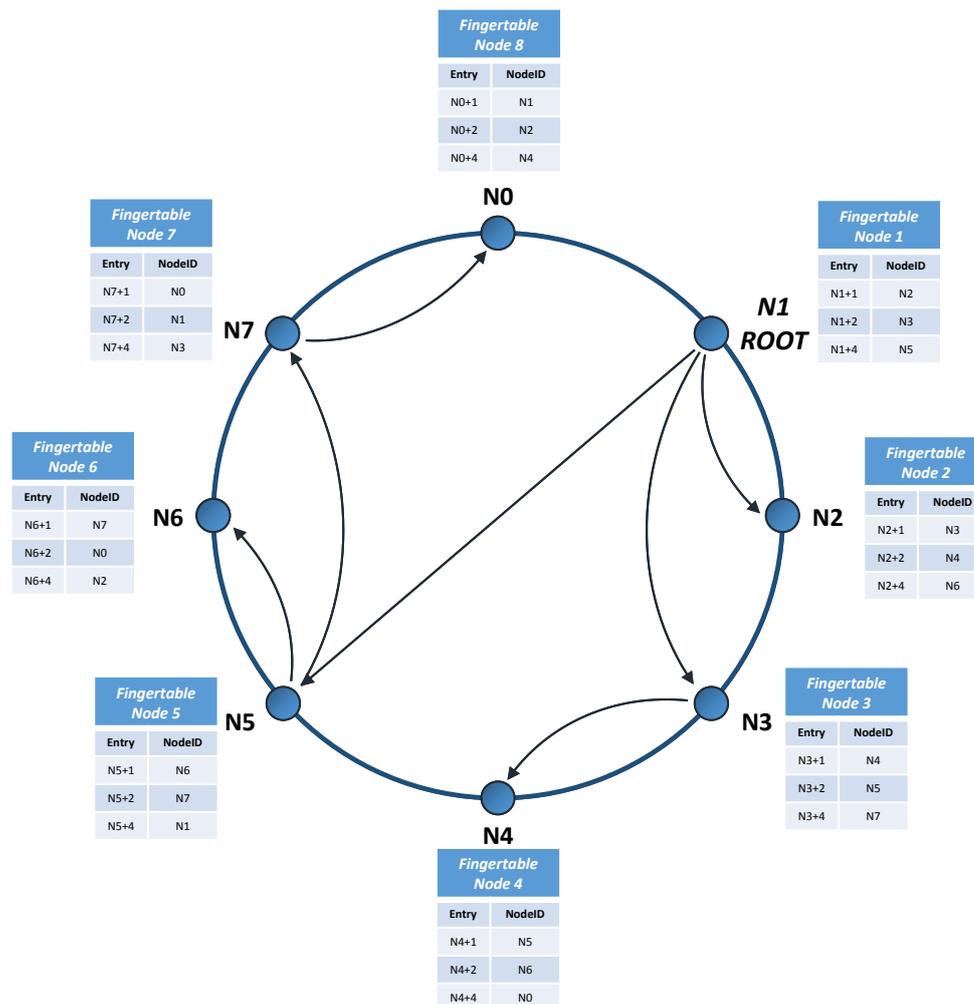


Abbildung 5.13. Chord Ring mit acht Knoten und den zugehörigen Fingertables [191]

Access/Collision Detection (CSMA/CD) Verfahrens kommen. Des Weiteren haben Routingvorgänge, das heißt die Route, die ein Paket im Netzwerk nimmt, einen Einfluss auf die Verzögerungszeit. In Abbildung 5.15 ist der vollständige Ablauf eines Synchronisierungsvorgangs dargestellt.

Die Synchronisierung lässt sich in zwei Abschnitte einteilen. Im ersten Teil erfolgt eine Bestimmung, wie in Formel 5.24 [190] dargestellt, des Offsets zwischen Master und Client.

$$\theta = T_{S2} - T_{M2} \quad (5.24)$$

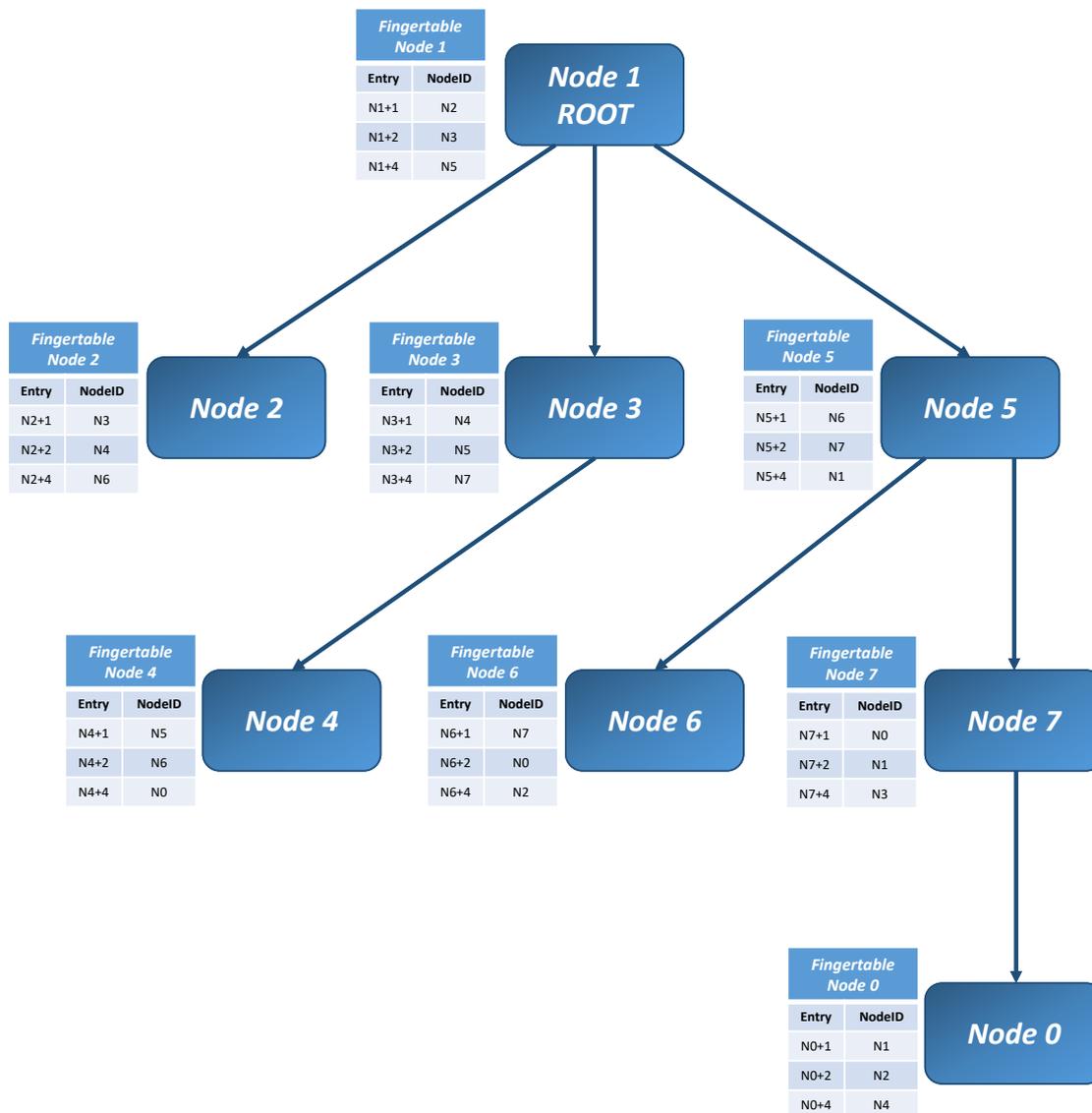


Abbildung 5.14. PariSync Nachrichten Struktur [190]

Hätte die Übertragungstrecke keine Verzögerung, also $t_{\text{übertragung}} = 0$ ms, wären die Uhren vom Master und Slave bereits vollständig synchron. Da dies aber im realen System nicht der Fall ist, folgt eine Bestimmung der Übertragungsverzögerung. In Abbildung 5.15 ist dieser Bereich als grün hinterlegt. Die Bestimmung der Verzögerung erfolgt mit Hilfe von Formel 5.25 [190].

$$T_{\text{Delay}} = \frac{T_{S2} - T_{M2} + T_{M3} - T_{S3}}{2} \quad (5.25)$$

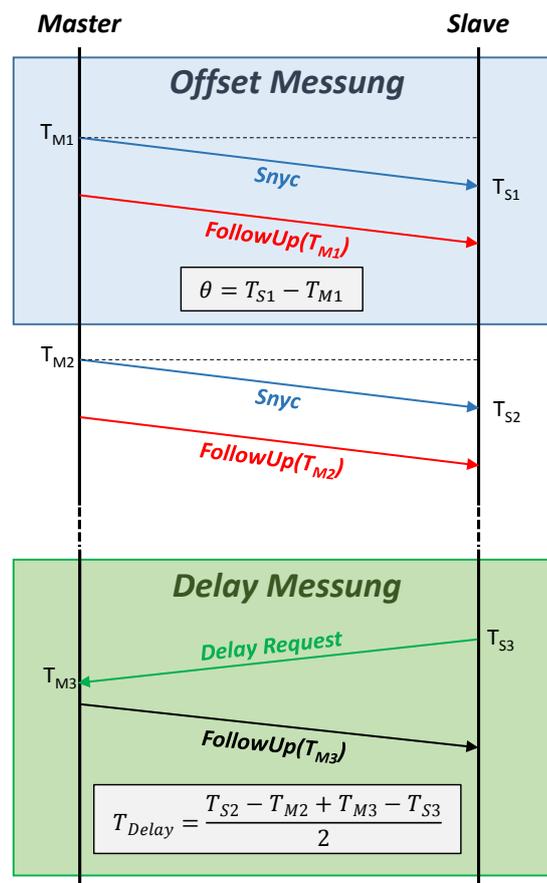


Abbildung 5.15. Kommunikation im IEEE 1588 Protokoll [190]

Eine vollständige Korrektur der Abweichung kann jedoch nur erfolgen, wenn eine absolut symmetrische Verzögerung vorliegt. Mit steigender Asymmetrie steigt auch der Fehler bei der Synchronisierung.

Die Ermittlung geeigneter Synchronisationsintervalle wurden mittels einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Als Grundlage für die Simulation dient ein Chord Ring mit 50 Teilnehmern. Um möglichst realistische Ergebnisse zu erzielen, wurden Abweichungen von drei Knoten ausgemessen um die Simulationsparameter entsprechend anpassen zu können. In Abbildung 5.16 ist der Drift von drei Knoten über eine Laufzeit von 5 Tagen dargestellt.

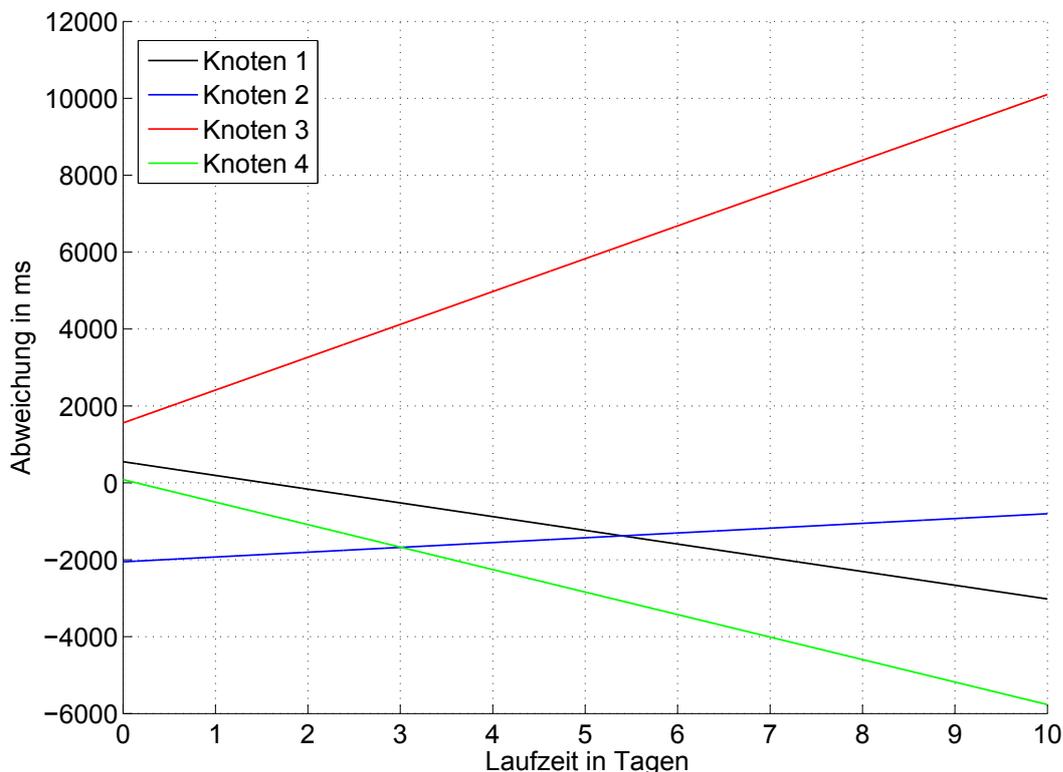


Abbildung 5.16. Abweichung vier Knoten

Es ist deutlich erkennbar, dass der Drift $d(t)$ ein lineares Verhalten aufweist, wodurch eine Modellierung der Art $d(t) = a_{\text{off}} + b \cdot t$ verwendet werden kann. Der Offset a_{off} ist hierbei ein zufälliger Wert, der von der letzten Synchronisierung abhängt. Zur Bestimmung der entstehenden Übertragungsverzögerungen, wurde eine Messung der Paketumlaufzeit (Pingzeit) für verschiedene Server (www.google.de, www.t-online.de und www.reichelt.de) vorgenommen. Die Pingzeit, auch Round trip time (RTT), beschreibt die Zeitpanne zwischen der Aussendung eines Paketes und dem Empfangszeitpunktes der Antwort des Hosts. Exemplarisch ist in Abbildung 5.17 die Messung mit 1000 Anfragen an den T-Online Server dargestellt.

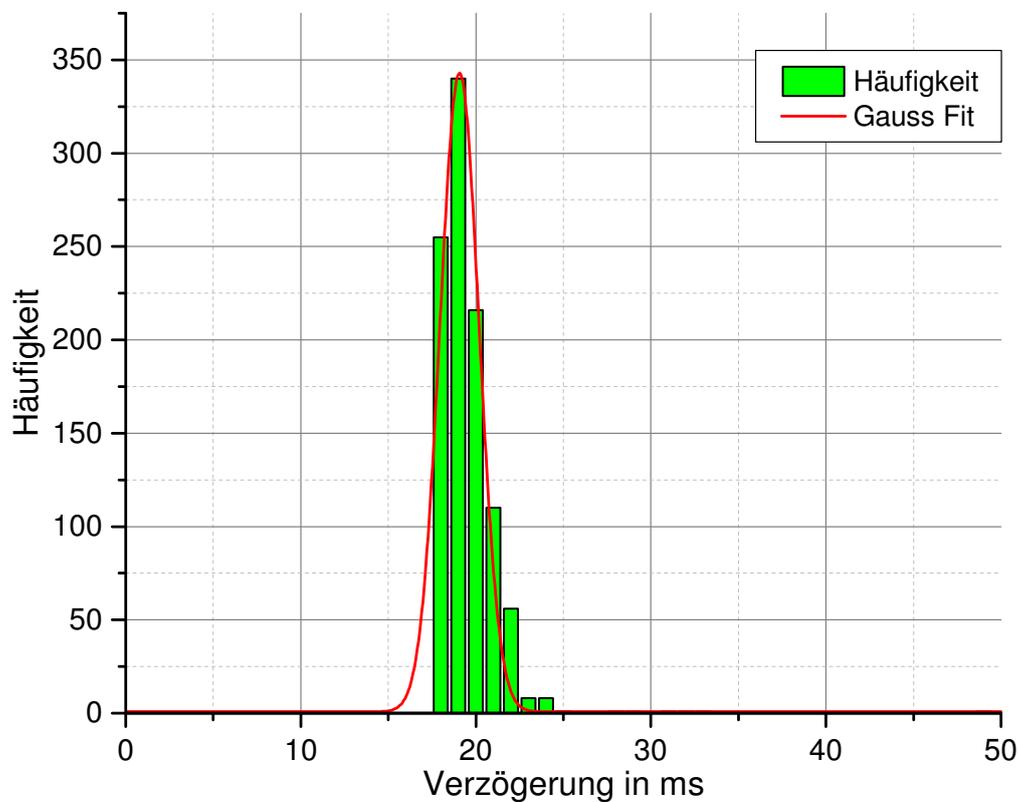


Abbildung 5.17. Round trip time (RTT)-Verteilung des T-Online Servers

Es hat sich gezeigt, dass die RTT mit Hilfe einer Gaußkurve ausreichend gut modelliert werden kann. In Abbildung 5.17 wurde bereits ein Annäherung mit Hilfe einer Gaußfunktion vorgenommen. Die verwendete Funktion ist folgender Formel dargestellt:

$$f(t) = \frac{963}{2,24 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{t-19}{2,24}\right)^2} \quad (5.26)$$

Hieraus lässt sich die normierte Darstellung, welche die Wahrscheinlich-

keitsdichtefunktion wiedergibt, angeben:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{1,12 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(t-19)^2}{2 \cdot 1,2544}} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 1,2544}} \cdot e^{-\frac{(t-19)^2}{2 \cdot 1,2544}} \quad (5.27)$$

Aus der Verteilungsfunktion lassen sich die folgenden Parameter ablesen:

- Erwartungswert: $\mu = 19$
- Varianz: $\sigma^2 = 1,2544$

Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass der Mittelwert meist zwischen 15 ms und 25 ms liegt. Daher wurden für die Simulation die in Tabelle 5.5 angegebenen Parameter gewählt:

Tabelle 5.5. Verwendete Simulationsparameter

| <i>Parameter</i> | <i>Bezeichnung</i> | <i>Min.</i> | <i>Max</i> | <i>Einheit</i> | <i>Verteilung</i> |
|------------------|--------------------|-------------|------------|----------------|-------------------|
| Offset | t_{off} | -100 | 100 | s | gleichverteilt |
| Steigung | b | -100 | 100 | - | gleichverteilt |
| Delay | f | - | - | s | gaußverteilt |

Für die Simulation der Verzögerungen wird angenommen, dass die Übertragungsverzögerungen durch eine Gaußverteilung $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ angenähert werden können. Als Mittelwert wird $\mu = 15$ ms und für die Varianz $\sigma^2 = (2,5 \text{ ms})^2$ verwendet. Somit ergibt sich die in Abbildung 5.18 dargestellte Dichtefunktion für $f(t)$.

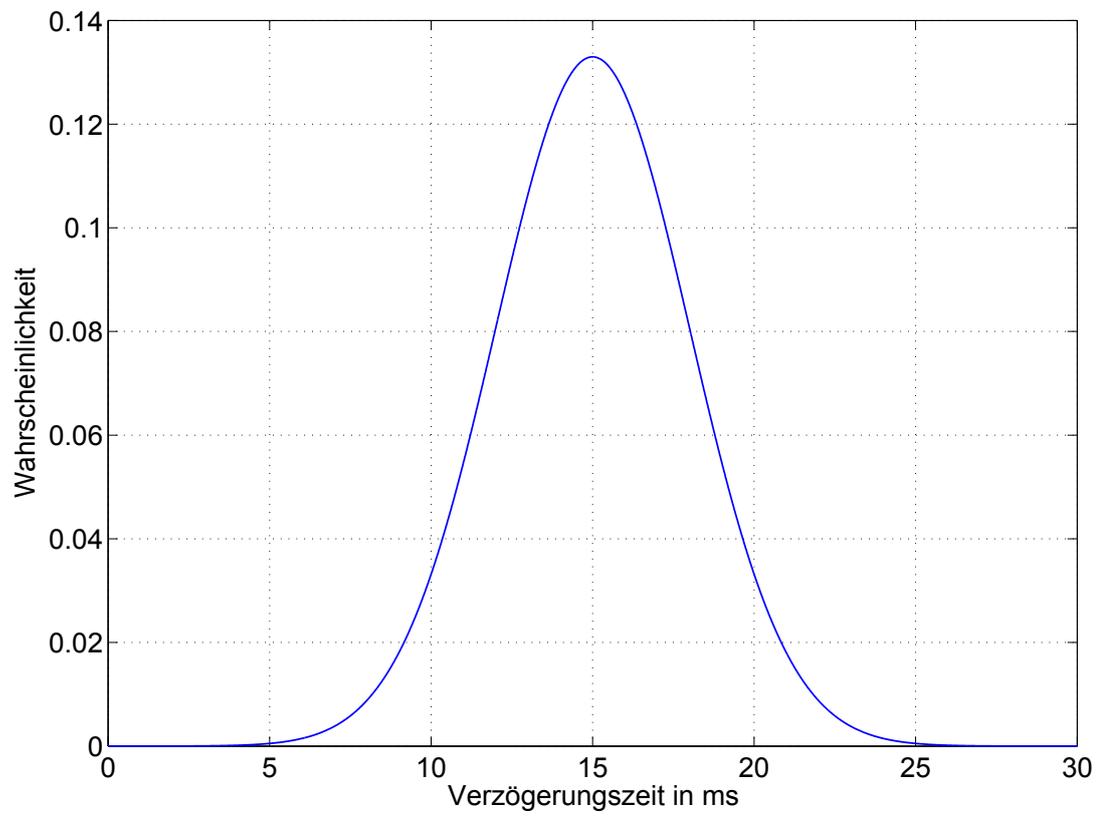


Abbildung 5.18. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(t)$ für $\mu = 15$ ms und $\sigma^2 = (3 \text{ ms})^2$

In den Abbildungen 5.19, 5.20 und 5.21 sind die resultierenden Genauigkeiten für Synchronisierungsintervalle von einer Stunde, drei Stunden und einem Tag dargestellt. Bei den dargestellten Abweichungen handelt es sich um die zum Zeitpunkt t auftretenden Abweichungen zwischen der Master Clock und der Slave Clock.

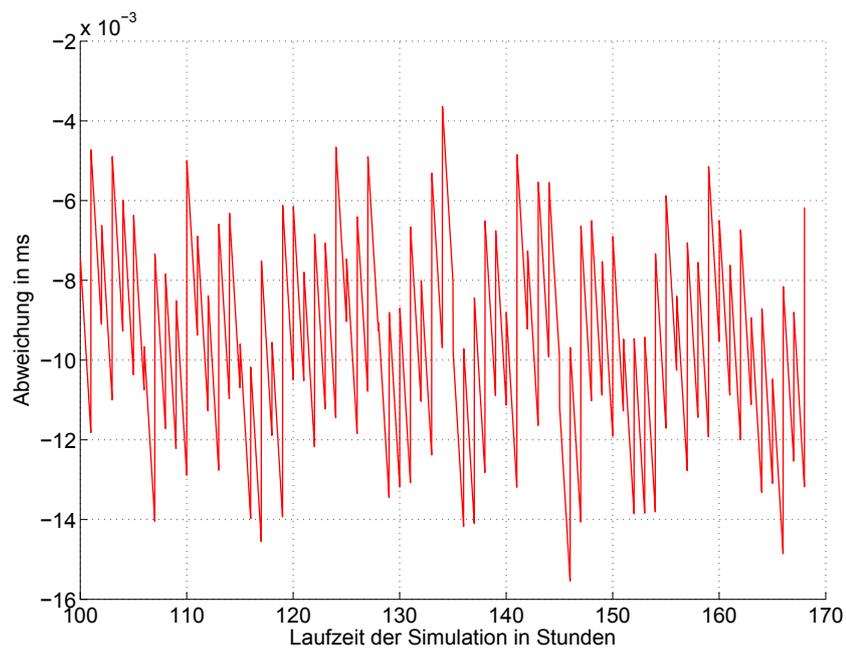


Abbildung 5.19. PariSync mit Synchronisierungsintervall von einer Stunde

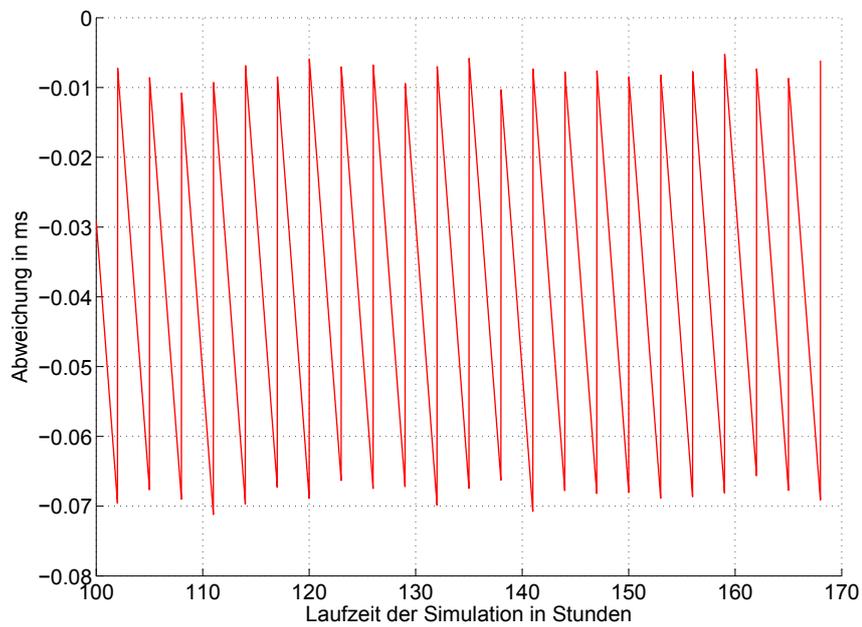


Abbildung 5.20. PariSync mit Synchronisierungsintervall von drei Stunden

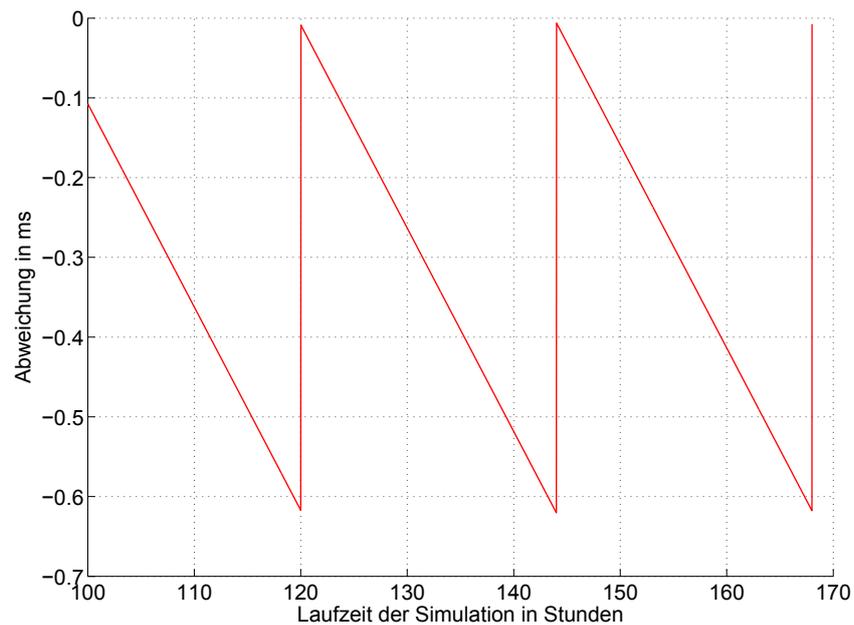


Abbildung 5.21. PariSync mit Synchronisierungsintervall von 24 Stunden

Die entstehenden negativen Abweichungen liegen darin begründet, dass Knoten 1 (vergleiche Abbildung 5.16) hier betrachtet wurde. Dieser weist eine negative Abweichung gegenüber der Referenzzeit auf, was eine negative Abweichung zur Konsequenz hat.

In Abbildung 5.22 ist der Zusammenhang zwischen dem Synchronisierungsintervall und dem Betrag der resultierenden Abweichung dargestellt. Für die Simulation wurden jeweils über 50 Einzelmessungen gemittelt.

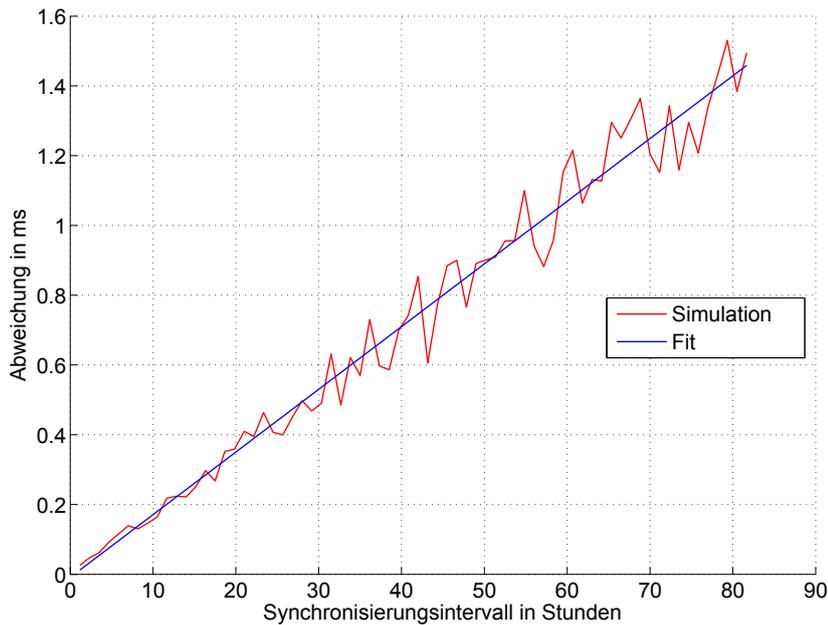


Abbildung 5.22. Zusammenhang zwischen Synchronisierungsintervall und resultierendem Betrag der maximalen Abweichung

Aus Abbildung 5.22 wird ersichtlich, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Synchronisierungsintervall t_{sync} und der resultierenden maximalen Abweichung besteht. Um eine Genauigkeit von $\Delta t < 1$ ms zu erzielen, ist eine Synchronisierungszeit $t_{\text{sync}} < 55$ min zu wählen. Dieser Wert ist natürlich auch abhängig von den Verzögerungszeiten im Netzwerk und kann somit noch variieren, das heißt t_{sync} ist eine Funktion von t_d . Aus diesem Grund sollte vor der Festlegung eine Messung der durchschnittlichen Verzögerungszeiten vorgenommen werden. Für die Synchronisierung zwischen den einzelnen Schichten sind die SuperPeers verantwortlich, wobei immer eine Top-Down Synchronisierung erfolgt, das heißt der Synchronisierungsvorgang zwischen zwei Schichten wird immer von der höheren Ebene initiiert.

5.4 Multilayer Struktur

Wie auch beim Aufbau der DHT-Struktur ist die Interaktion in einer bestehenden Multilayer-Struktur von entscheidender Bedeutung. Im Unterschied zur DHT ist hier allerdings die Ebene beziehungsweise der Layer, in welchen die Einbindung stattfinden soll, entscheidend. Um eine solche Struktur betreiben zu können ist es notwendig eine a-priori Information

über die Struktur sowie auch die Organisation zu besitzen. In Kapitel 4 wurde bereits der hierarchische Aufbau sowie die Organisation der Daten beschrieben. Hierbei erfolgt die Unterteilung der Äste nach geografischen Koordinaten, das heißt die Auflösung steigt mit der Tiefe der Baumstruktur. In Abbildung 5.23 ist schematisch der Zusammenhang zwischen der geografischen und hierarchischen Organisation dargestellt.

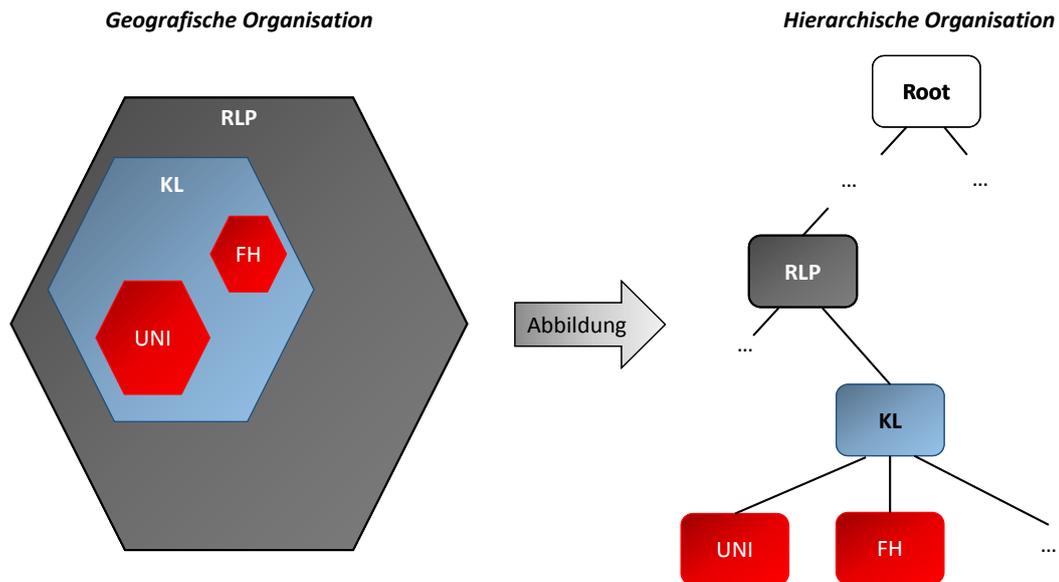


Abbildung 5.23. Zusammenhang zwischen der geografischen und hierarchischen Organisation

Ein völlig autonomer Aufbau einer derartigen Struktur ist ohne Festlegung beziehungsweise Übergabe von Startparametern nicht realistisch. Hierzu zählen insbesondere der Betrieb der Root-Schicht, welche für die Verknüpfung auf Länderebene verantwortlich ist. Eine weitere Besonderheit der Root-Schicht ist, dass diese keine Nutzdaten speichern kann, sondern ausschließlich für das Weiterleiten von Daten verwendet wird. Somit gibt es für den Aufbau keine explizite Festlegung bezüglich der Struktur. Alle Schichten, die sich unterhalb der Root-Schicht befinden, sind als DHT organisiert und müssen alle aufgeführten Spezifikationen erfüllen. Um eine bessere Lastverteilung speziell in den oberen Schichten zu erhalten, müssen bis einschließlich Schicht 2 (Bundesland beziehungsweise Region) alle Knoten in der DHT als Superpeers fungieren. Der Autor hat die Ergebnisse bereits publiziert [191].

5.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden alle, für den Aufbau des System notwendigen, Protokolle und Algorithmen beschrieben. Basierend auf der Bewertung bereits vorhandenen Sharing-Verfahren erfolgte ein Entwurf eines hybriden Algorithmus (lizenziert und nicht lizenzierte Frequenzbereiche) zur Selektion eines geeigneten Verfahrens. Des Weiteren wurde im Zusammenhang mit nicht lizenzierten Frequenzbereichen das Verhalten verschiedener Detektionsverfahren betrachtet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgte der Entwurf des in Abbildung 5.2 dargestellten Verfahrens zur Auswahl eines geeigneten Sharingverfahrens. Für die konkrete Implementierung des Systems wurden im Rahmen dieses Kapitels Protokolle entwickelt, welche im nachfolgenden Kapitel evaluiert werden. Abschließend erfolgt eine Betrachtung und Bewertung der in Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen. Die in Tabelle 5.6 abgebildete Auflistung beinhaltet alle, in den vorangegangenen Kapiteln, vorgestellten Konzepte und Implementierungsansätze. Eine Bewertung der Performanz erfolgt in Kapitel 6.

Tabelle 5.6. Bewertung der Architektur; - keine Unterstützung; o unterstützt mit Einschränkungen; + vollständige Unterstützung

| <i>Nummer</i> | <i>Anforderung</i> | <i>Bewertung</i> | <i>Bemerkung</i> |
|---------------|--|------------------|---|
| 1 | Frequenzunabhängig | + | Mittels Einbindung von externen Entscheidern durch entsprechende Schnittstelle |
| 2 | Latenzzeit | o | Performance ist abhängig von Netzwerk |
| 3 | Einbindung Spektrumsinformation | + | Mittels Einbindung von Datenbanken durch entsprechende Schnittstelle |
| 4 | Einbindung von Sensorinformation | + | Mittels Einbindung von Sensoren durch entsprechende Schnittstelle |
| 5 | Automatisches An- und Abmelden von Systemkomponenten | + | Kombination aus Chord und Bootstrap Algorithmen |
| 6 | Überprüfung der Gültigkeit der Daten | + | Grundfunktionalität im Broker |
| 7 | Synchronisierung | + | Funktionalität des Chord Protokolls sowie Publish/Subscribe |
| 8 | Zeitsynchronisierung | + | Verwendung des entwickelten LT-Sync Protokolls |
| 9 | Kompatibilität zu bestehenden Netzstrukturen | + | Implementierung erfolgt vollständig als Overlay |
| 10 | Vollständige Mobilitätsunterstützung | + | Implementierung als hierarchisches System, einzelne Chord-Gruppen sind eigenständig lauffähig |
| 11 | Definition von exclusion, restriction und protection Zonen | + | Beschreibung mittels Polygonzügen möglich; Ermittlung mittels externer Entscheider |

6 Evaluierung

In diesem Kapitel erfolgt die Evaluierung des erarbeiteten Systems anhand eines urbanen Areals. Für Entwicklung eines repräsentativen Szenarios wurde zu Beginn ein Campus aus insgesamt zehn Wohnhäusern und sechs Firmengebäuden betrachtet. Aufgrund des hohen Datenaufkommens und der damit verbundenen Simulationszeit bei diesem Szenario wurden zwei vereinfachte Szenarien mit den identischen Parametern simuliert. Hierbei hat sich gezeigt, dass das resultierende Ergebnis unabhängig von der Größe des hier betrachteten Areals ist. Basierend auf diesem Ergebnis wird in der weiteren Evaluierung ein vereinfachtes Szenario verwendet, welches aus einem Firmengebäude und vier umliegenden Wohnhäusern besteht. Für die Abdeckung mittels Mobilfunk wird angenommen, dass das Areal vollständig von drei Anbietern versorgt wird (Mobilfunkbetreiber A, B und C) mit je einer Basisstation. Das Bürogebäude besteht aus sechs Stockwerken, wobei innerhalb jedes Stockwerkes einen WLAN-AP besitzt. Der Zugriff auf die WLAN-APs ist auf die Mitarbeiter des Unternehmens beschränkt. Des Weiteren ist in jedem Wohngebäude ein WLAN-AP vorhanden, welcher ebenfalls nur von einem ausgewählten Nutzerkreis verwendet werden kann. Für die Evaluierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten SMA werden zwei Szenarien betrachtet:

- *Betrieb ohne SMS*

In diesem Szenario wird eine starre Zuteilung der Frequenzen und der diesbezüglichen Eigentumsverhältnisse angenommen.

- *Betrieb mit SMS*

In diesem Szenario erfolgt die Koordination und Ressourcenverteilung seitens des SMSs. Zusätzlich werden noch Mikro-BS in das Szenario eingebracht, welche ebenfalls auf 2,4 GHz arbeiten und somit eine Kollision mit WLAN erzeugen könnten.

Im ersten Teil des Kapitels erfolgt eine Beschreibung des Anwendungsfalls sowie eine Erläuterung bezüglich des Aufbaus des Simulators. An-

schließlich werden relevante Daten wie Nutzerprofile und -verhalten klassifiziert und mit Hilfe entsprechender Modelle in die Simulation eingebunden. Basierend auf diesen Informationen erfolgt eine Simulation des Netzes mit und ohne SMS um geeignete Referenzdaten zu erhalten. Abschließend erfolgt eine Reflexion der ermittelten Resultate.

6.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

Die Evaluierung des hier vorgestellten Konzeptes erfolgt, wie bereits erwähnt, an dem Beispiel eines Mischgebietes, welches aus insgesamt fünf Gebäuden besteht. In Abbildung 6.1 ist die Anordnung der Gebäude dargestellt.

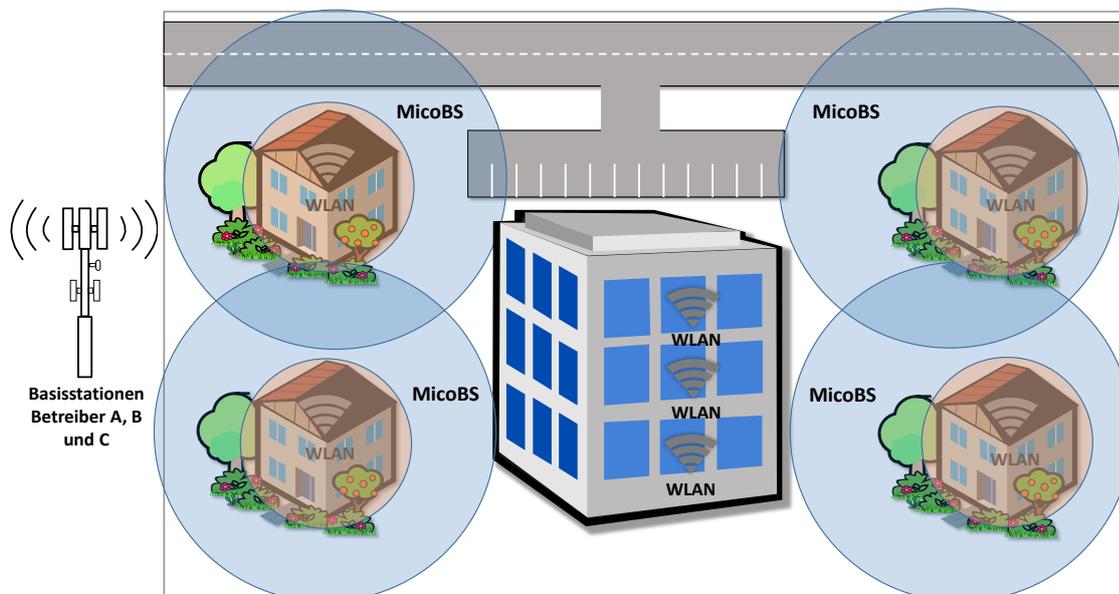


Abbildung 6.1. Simuliertes Areal mit fünf Gebäuden

Des Weiteren wird innerhalb der Gebäude eine vollständige LTE Netzwerkabdeckung von drei unabhängigen Mobilfunkbetreibern A, B und C vorausgesetzt. Für die Simulation wird angenommen, dass alle drei LTE-BSen vergleichbare Spezifikationen aufweisen. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das betrachtete Areal jeweils komplett in einer Zelle eines Netzwerkbetreibers liegt. Die Betreiber verwenden die in Tabelle 6.1 angegebenen Frequenzbereiche.

Tabelle 6.1. LTE Frequenzen

| <i>Betreiber</i> | <i>Downlink in MHz</i> | <i>Uplink in MHz</i> |
|------------------|------------------------|----------------------|
| A | 811 - 821 | 852 - 862 |
| B | 801 - 811 | 842 - 852 |
| C | 791 - 801 | 832 - 842 |

Für die Evaluierung des Systems ist die Betrachtung der Nutzerversorgung, im Speziellen die erfolgreiche Zuweisung von Ressourcen, sowie eine möglichst gleichmäßige Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen ausschlaggebend.

Im ersten Simulationsszenario werden die LTE-BSen sowie auch WLAN-Netze völlig unabhängig voneinander betrieben, das heißt ohne Anwendung eines SMSs. Die so gewonnenen Ergebnisse werden im Folgenden als Referenz für die weitere Bewertung der Architektur herangezogen. Im zweiten Szenario kommt ein SMS zum Einsatz, welche für die Steuerung beziehungsweise die Koordination der Basisstationen (LTE und WLAN) verantwortlich ist. Zusätzlich werden hier noch weitere Mikro-BS für den Aufbau von Mikrozellen betrieben, welche in ihren spektralen Eigenschaften bezüglich Kanalbandbreite und Mittenfrequenz äquivalent zu WLAN angesehen werden.

In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt eine eingehende Beschreibung der beiden Simulationsszenarien.

6.2 Beschreibung der Szenarien

Zur Sicherstellung einer Vergleichbarkeit der beiden Szenarien ist es notwendig definierte Randparameter für beide Fälle vorab festzulegen. Um diese eindeutig zu identifizieren muss der Aufbau sowie der Ablauf des Simulators¹ näher betrachtet werden. In Abbildung 6.2 ist der prinzipielle Aufbau des Simulators dargestellt.

¹Detaillierte Information sowie auch die entsprechenden Softwarepakete des Simulators sind unter „Joerg.Schneider@dfki.de“ erhältlich. Die zugehörigen Programmablaufpläne befinden sich im Anhang E.

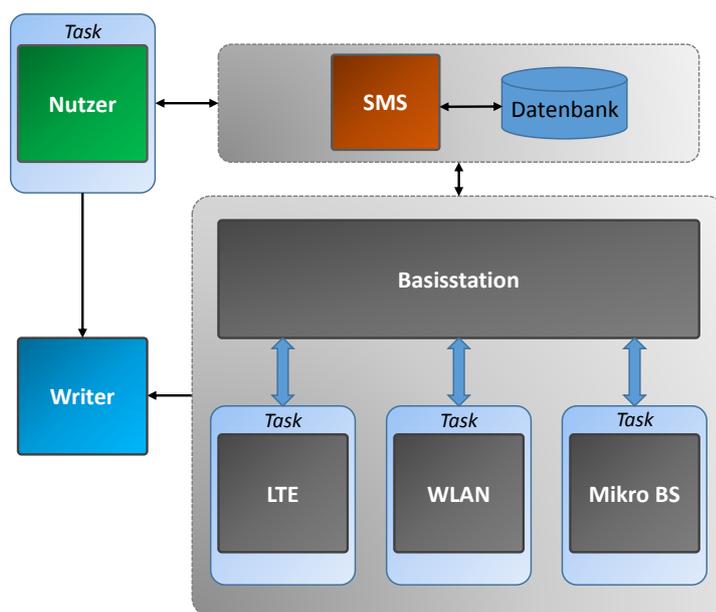


Abbildung 6.2. Schematischer Aufbau des Simulators

Funktional lässt sich der Aufbau des Simulators in drei Gruppen von Klassen einteilen. In der ersten Gruppe werden die Nutzer und deren Verhalten und in der zweiten Gruppe werden die drei verschiedenen Typen von Basisstationen (LTE, Mikro und WLAN) modelliert. Das eigentliche SMS stellt die dritte Gruppe dar. Die zugehörigen Ablaufdiagramme befinden sich im Anhang E der Arbeit.

Um die beiden zu betrachtenden Fälle abdecken zu können, besitzt das SMS die Möglichkeit einer statischen sowie auch dynamischen Zuleitung der Nutzer zu den entsprechenden Basisstationen.

Für die weitere Beschreibung des Szenarios ist die Betrachtung des Nutzerverhaltens von entscheidender Bedeutung. Ein Verkehrsmodell, welches das im konkreten Anwendungsfall zu erwartende Nutzerverhalten hinreichend gut beschreibt, war leider nicht verfügbar. Für die Belange der Simulation wurde daher mit Erfahrungswerten gearbeitet, welche in einschlägigen Forschungsprojekten gesammelt wurden. Um dennoch möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten, werden die Nutzer in drei Klassen eingeteilt, wobei jeder Nutzer zwischen vier unterschiedlichen Diensten wählen kann. Nachfolgend werden die verschiedenen Dienste und die zugehörigen Randbedingungen beschrieben:

1. Das Nutzerverhalten eines Mitarbeiters kann die vier Zustände *Stre-*

aming, *Chat*, *Web* oder *idle* annehmen, wobei diese mit den Wahrscheinlichkeiten $p_{\text{Streaming}}$, p_{Web} , p_{Chat} und p_{idle} eintreffen. Für jede Simulation werden die Wahrscheinlichkeiten zufällig bestimmt, wobei die Summe $\sum_{i=0}^3 p_i = 1$ sein muss. Hierbei werden alle Zustände mit gleichen Wahrscheinlichkeiten angenommen.

- Die Datenraten für die jeweiligen Anwendungsfälle sind ebenfalls Zufallsvariablen, mit der in Tabelle 6.2 aufgeführten Randbedingungen. Die Verweildauer eines Nutzers im jeweiligen Zustand ergibt sich aus der Datenmenge und dem angeforderten Datenvolumen zu $t = \frac{\text{Datenvolumen}}{\text{Datenrate}}$.

Tabelle 6.2. Randbedingungen

| <i>Parameter</i> | <i>Einschränkung</i> | | |
|---------------------|---|--|---|
| | Streaming | Web | Chat |
| Datenrate | $d \leq 100 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ | $d \leq 20 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ | $d \leq 1 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ |
| Datenvolumen | $\leq 5\text{GB}$ | $\leq 10\text{MB}$ | $\leq 5\text{MB}$ |
| Echtzeitanforderung | Ja, abhängig von Caching | Nein | Nein |

Zur Darstellung der variierenden Empfangsbedingungen, das heißt der schwankenden Empfangspegeln (RSSI)- und SNR-Werte erfolgt eine unterschiedliche Limitierung der Datenrate für die einzelnen Nutzer. Wird für die Übertragung eine optimale Verbindung vorausgesetzt, so ergeben sich exemplarisch die in Abbildung 6.3 dargestellten Verläufe für den Datendurchsatz.

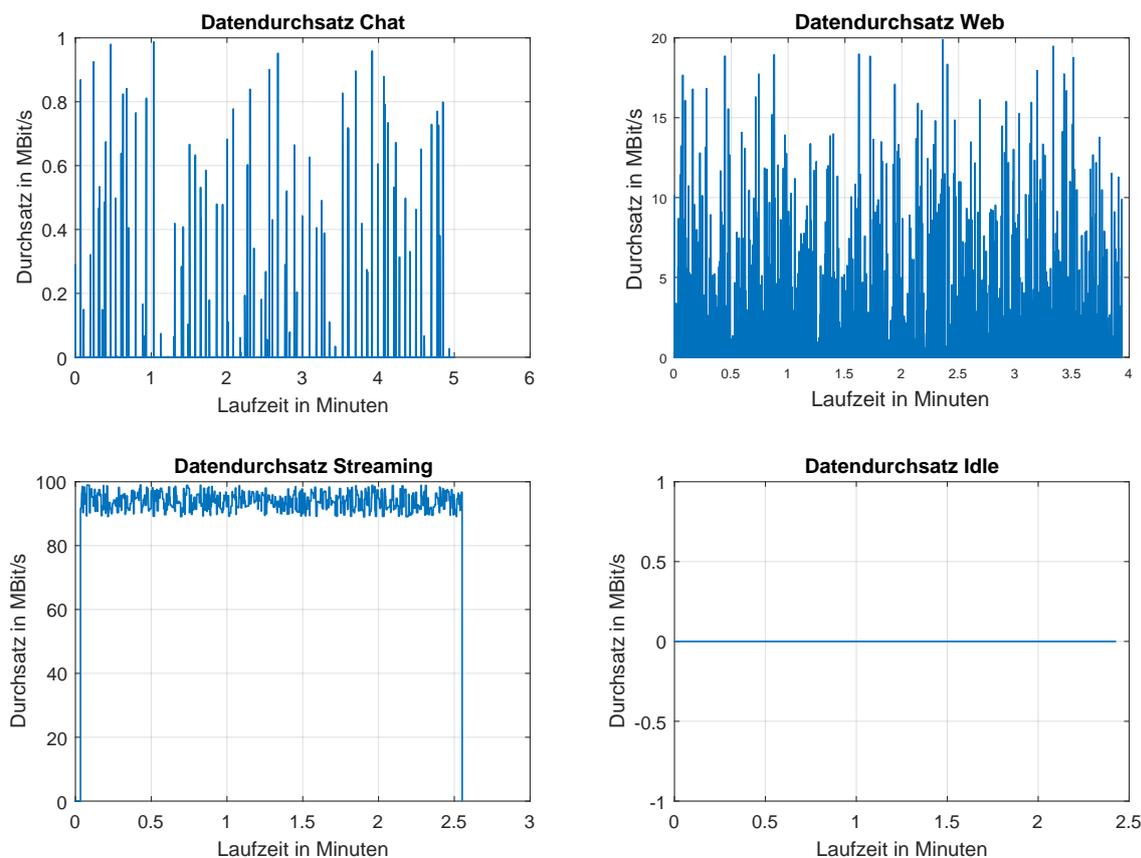


Abbildung 6.3. Durchsatz unter idealen Bedingungen für die vier betrachteten Zustände

Die Modellierung der Nutzerprofile ist eine Funktion der verschiedenen Dienste über der Zeit. Innerhalb der Simulation kann diese nur die diskreten Werte *Streaming*, *Chat*, *Web* oder *Idle* annehmen. Um ein möglichst heterogenes Nutzungsumfeld zu simulieren, erfolgt eine Einteilung in drei Nutzer-Profile. Als Initial-Wert für die einzelnen Nutzer-Profile wird die Wahrscheinlichkeit p_{idle} für das Auftreten des *Idle*- also des „Leerlauf“ Zustandes herangezogen. Die Wahrscheinlichkeiten für $p_{\text{Streaming}}$, p_{Web} und p_{Chat} werden unter der oben genannten Bedingung mittels gleichverteilter Zufallszahlen ermittelt.

Erste Simulationen haben gezeigt, dass die in Tabelle 6.3 aufgeführten Initialwerte für die Wahrscheinlichkeit p_{idle} geeignete Resultate liefern.

Tabelle 6.3. Initialisierungsparameter für p_{idle}

| <i>Parameter</i> | <i>Profile</i> | | |
|-------------------|----------------|---------------|--------------|
| | Viel-Nutzer | Normal-Nutzer | Wenig-Nutzer |
| p_{idle} | 0,2 | 0,5 | 0,8 |

Das resultierende exemplarische Nutzerverhalten für die drei verschiedenen Profile ist in den Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6 dargestellt. Die einzelnen Abbildungen zeigen, welcher Dienst zum Zeitpunkt t von dem entsprechenden Nutzer ausgeführt wird. Hierbei sind nur die vier auf der Ordinate markierten Zustände möglich.



Abbildung 6.4. Profil des Nutzerverhaltens bei geringer Verwendung

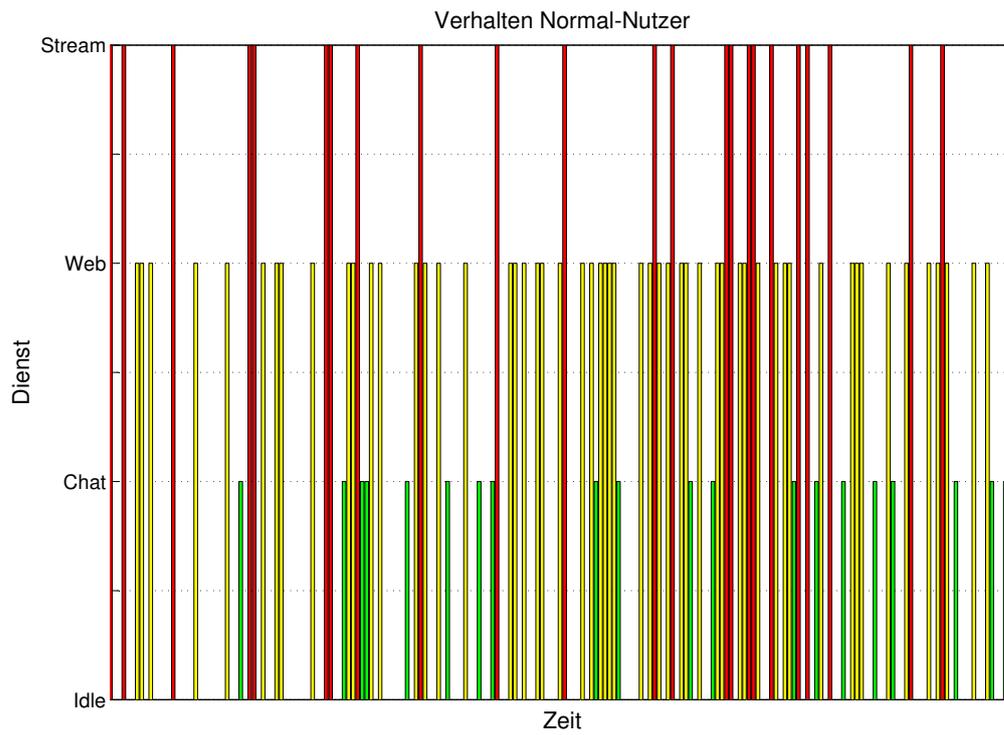


Abbildung 6.5. Profil des Nutzerverhaltens bei durchschnittlicher Verwendung

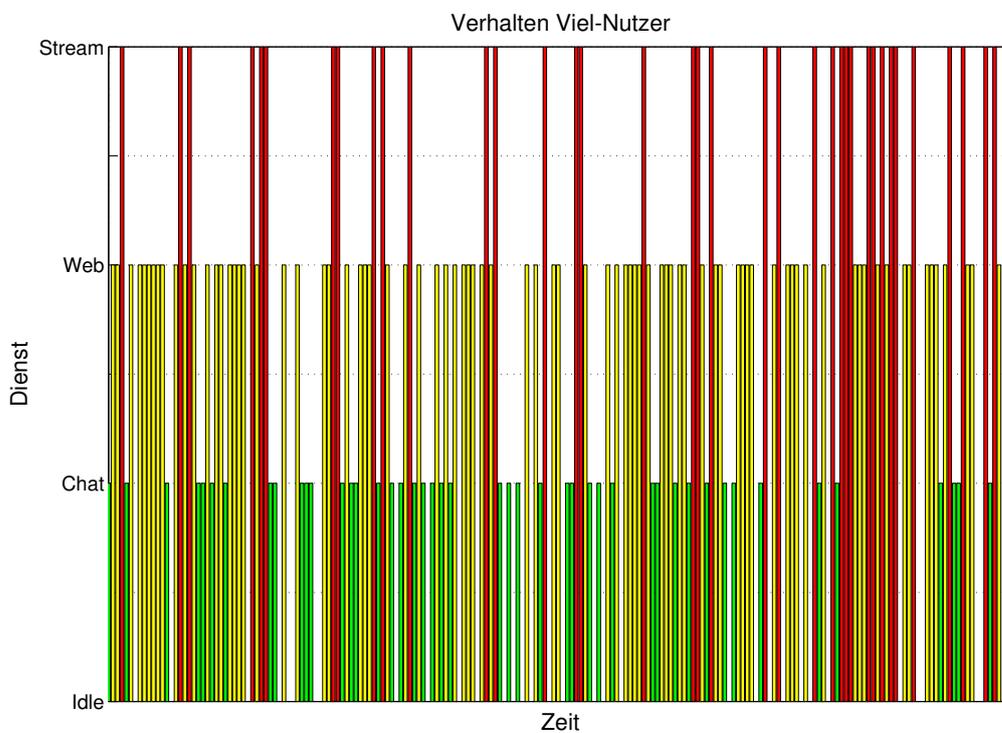


Abbildung 6.6. Profil des Nutzerverhaltens bei häufiger Verwendung

Um ein realistisches Szenario zu erhalten, erfolgt zusätzlich eine Gewichtung in Abhängigkeit der Tageszeit. In Abbildung 6.7 ist die verwendete Gewichtungsfunktion dargestellt. Die Arbeitszeit wird im Folgenden zwischen 7:00 Uhr und 17:00 Uhr angenommen.

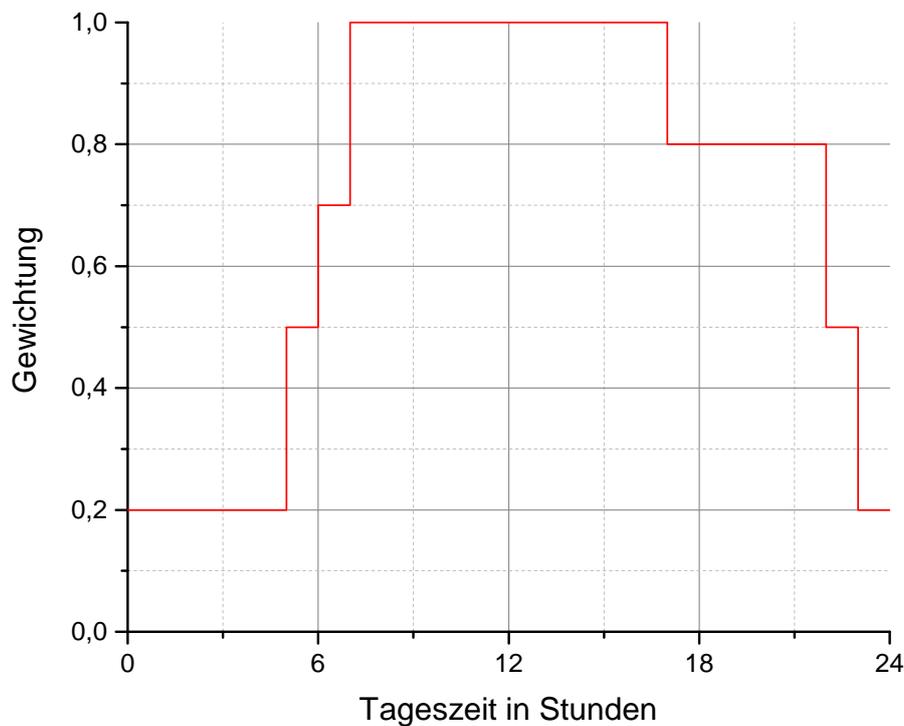


Abbildung 6.7. Tageszeit abhängige Gewichtung des Nutzerverhaltens

Für die Simulation werden die Start- und Stop-Zeiten auf die entsprechenden Nutzer angepasst. Es hat sich gezeigt, dass eine Variation der verschiedenen Parameter keinen Einfluss auf das qualitative Verhalten des Gesamtsystems aufweist. Die hier aufgeführten und auch für die weiteren Simulationen verwendeten Werte haben die besten Ergebnisse geliefert. Diese wurden durch Variation ermittelt.

6.3 Systeme ohne SMS

Als Referenz für die Untersuchung und Bewertung des vorgestellten SMSs werden die Lastverteilungen innerhalb der drei Netzbetreiber sowie der vorhandenen WLANs für den Fall betrachtet, dass keine SMS-Funktionalität vorhanden ist. Bezogen auf den Simulator entspricht dies einer statischen Zuteilung der vorhandenen Ressourcen, was in etwa dem gegenwärtigen Sachverhalt innerhalb von Mobilfunknetzen repräsentiert.

Für die Simulation werden somit die nachfolgenden Bedingungen angenommen beziehungsweise vorausgesetzt:

1. Eine Lastverteilung ist nur innerhalb des Netzes eines Betreibers möglich.
2. Es erfolgt keine „übergeordnete Steuerung“ der Funknetze, das heißt jeder Betreiber ist autonom für sein Netz verantwortlich.
3. Der Zugriff auf verfügbare WLAN Netzwerke erfolgt ausschließlich durch den Nutzer, das heißt es findet kein automatisches Offloading statt.

In dem betrachteten Szenario wird angenommen, dass das Unternehmen 300 Mitarbeiter beschäftigt, welche sich in dem Firmengebäude aufhalten und über die sechs Stockwerke zufällig verteilt sind. Zusätzlich befinden sich noch 100 Gäste in dem Gebäude. Das firmeninterne WLAN-Netz kann ausschließlich von den Mitarbeitern genutzt werden und ist für Gäste nicht zugänglich. Des Weiteren sind alle Mitarbeiter mit einem Mobilfunkvertrag für Telefonie und Internet vom Netzbetreiber A ausgestattet. Die Auswahl der Verbindungsart der Mitarbeiter erfolgt zufällig (gleichverteilt). Jedes der anliegenden Wohngebäude hat eine feste Anzahl von mindestens fünf Personen, welche zur Nutzung des WLANs berechtigt sind. Die resultierende Auslastung der LTE-BSen der Netzbetreiber A, B und C ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

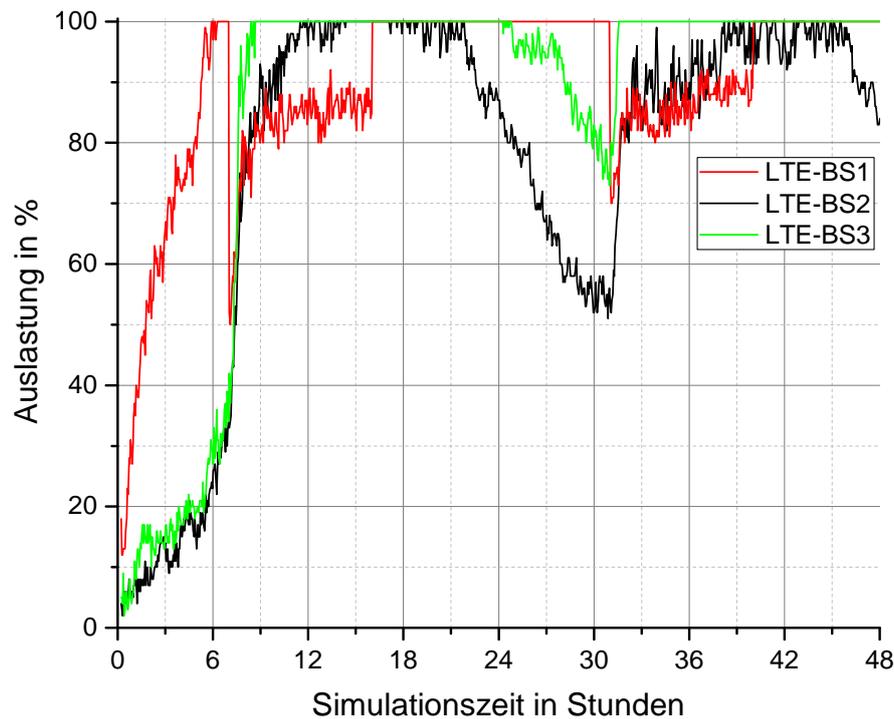


Abbildung 6.8. Auslastung der LTE-BSen ohne SMS bezogen auf die Tageszeit

Es ist deutlich erkennbar, dass alle Basisstation eine hohe Auslastung bis hin zur Überlastung aufweisen. Während der Arbeitszeit ist eine deutliche Lastreduktion bei Betreiber A erkennbar. Dies ist auf die Nutzung des firmeninternen WLANs durch die Mitarbeiter zurückzuführen.

Während dieser Phase können keine zusätzlichen Anfragen bearbeitet werden und müssen zurückgewiesen werden. Zur Visualisierung sind in Abbildungen 6.9 bis 6.11 die Anzahl der zurückgewiesenen Anfragen (sogenanntes Dropping) für die drei LTE-Basistationen dargestellt.

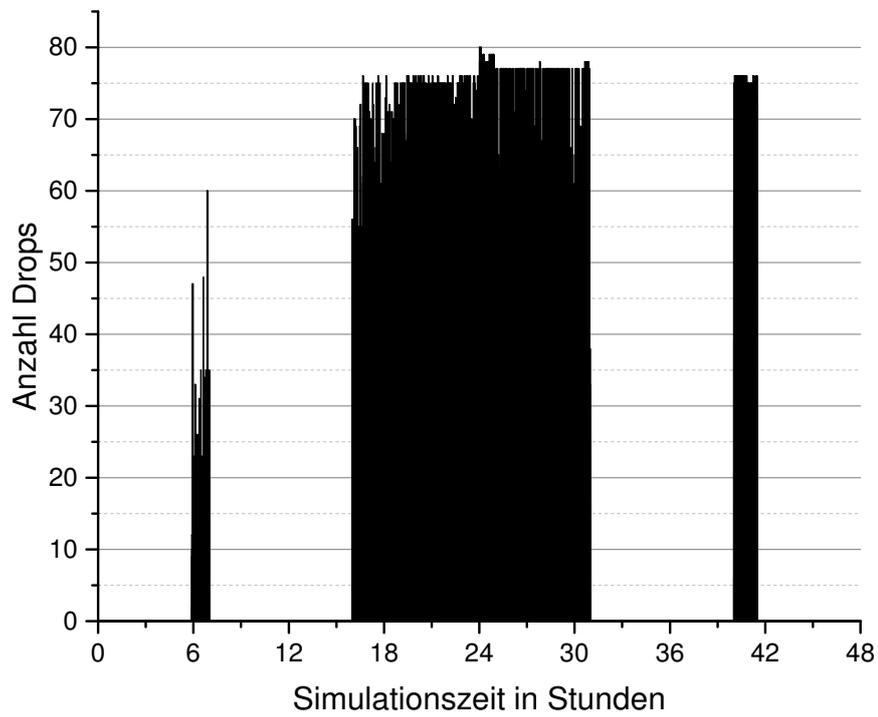


Abbildung 6.9. Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS1 bezogen auf die Tageszeit

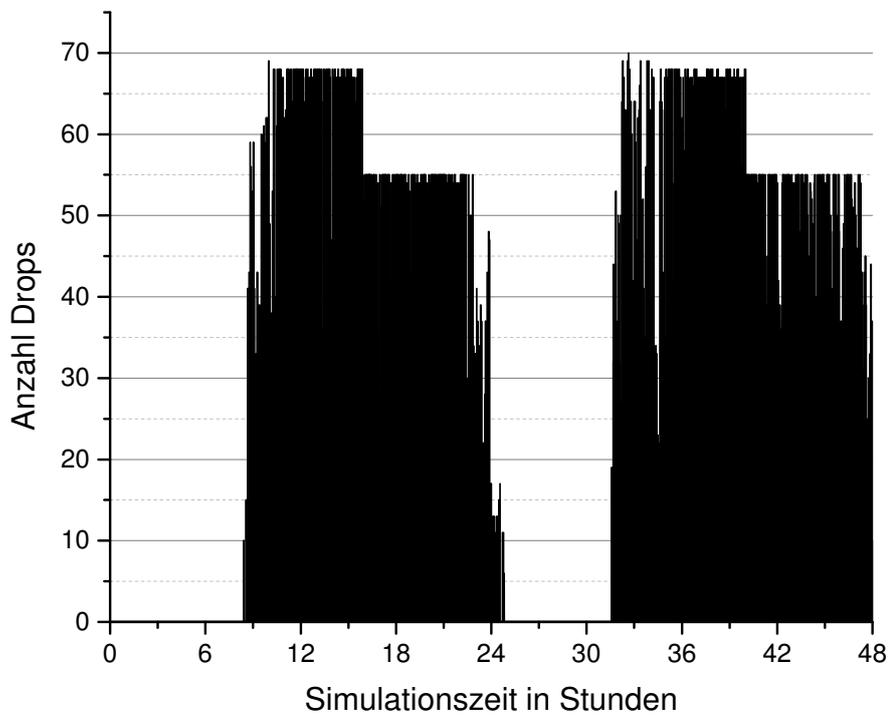


Abbildung 6.10. Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS2 bezogen auf die Tageszeit

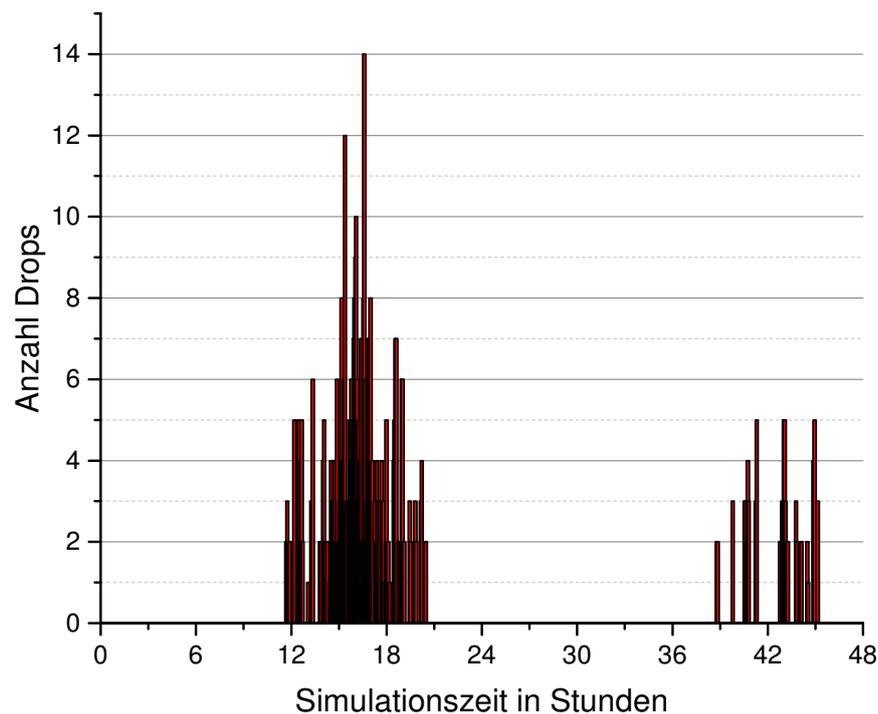


Abbildung 6.11. Zurückgewiesene Anfragen der LTE-BS3 bezogen auf die Tageszeit

Wie bereits Abbildung 6.8 vermuten lässt, zeigen die Abbildungen 6.9 bis 6.11 die zeitweise Überlastung aller LTE-BSen. Speziell die LTE-BS von Betreiber A ist die Anzahl der abgewiesenen Anfragen höher als die der erfolgreich bearbeiteten. Des Weiteren ist auffällig, dass die Auslastung erst deutlich später abnimmt als bei Betreiber A und B. Dies liegt an der Tatsache, dass gestellte Anfragen seitens des Clients solange aufrecht erhalten werden bis diese erfolgreich abgearbeitet sind. Um einen Überblick bezüglich des Gesamtsystems zu erhalten müssen auch die Auslastungen sowie die Anzahl der abgewiesenen Anfragen für die einzelnen WLAN-APs betrachtet werden. In Abbildung 6.12 ist die Auslastung der firmeninternen WLAN-APs dargestellt.

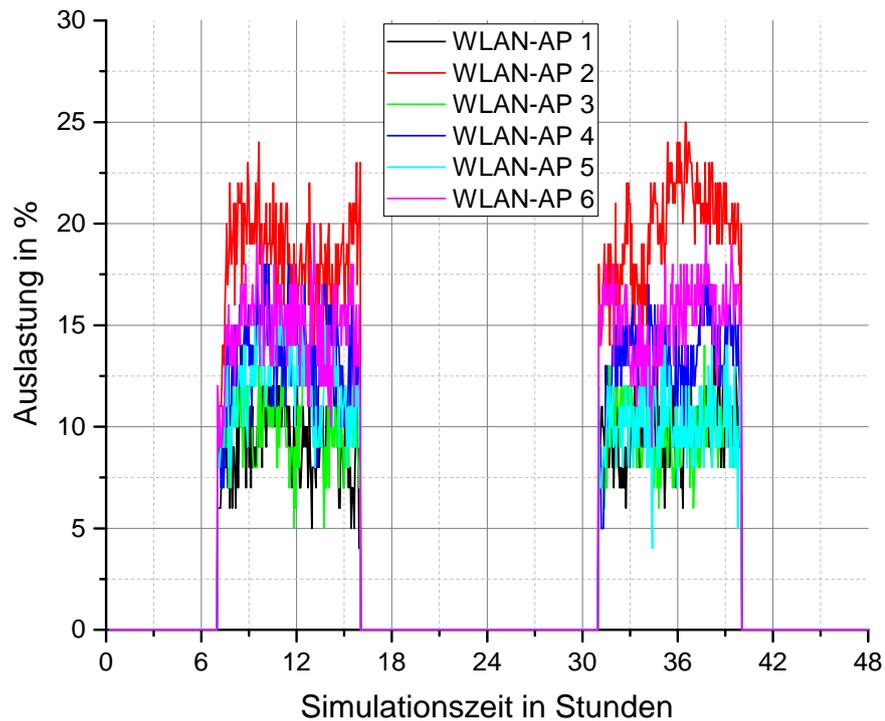


Abbildung 6.12. Auslastung der firmeninternen WLAN-APs bezogen auf die Tageszeit

Es ist deutlich erkennbar, dass keiner der WLAN-APs in der Firma effizient ausgelastet ist. Genauer gesagt lässt sich erkennen dass die Last immer $< 25\%$ liegt. Alle Anfragen werden somit erfolgreich im ersten Durchgang beantwortet. In Abbildung 6.13 ist Auslastung der WLAN-APs in den Privathäusern dargestellt.

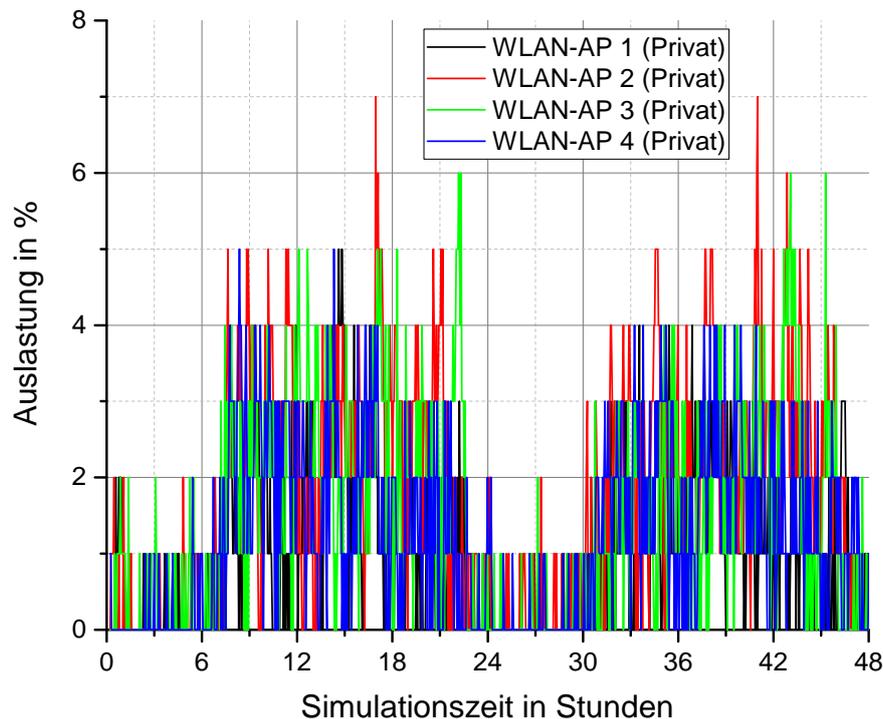


Abbildung 6.13. Auslastung der privaten WLAN-APs bezogen auf die Tageszeit

Hier ist ebenfalls die ineffiziente Auslastung ($< 10\%$) deutlicher erkennbar. Vielmehr ist auch erkennbar, dass zeitweise Lücken vorhanden sind ohne jegliche Kommunikation und somit das Spektrum vollständig ungenutzt ist. Aufgrund der geringen Last werden alle Anfragen erfolgreich im ersten Durchgang beantwortet.

6.4 Systeme mit SMS

Um die beschriebenen Schwachpunkte zu überwinden wird eine übergeordnete Steuerung benötigt, welche im Rahmen dieser Arbeit als SMS vorgestellt worden ist. Bei der Vergabe von Ressourcen beziehungsweise Spektrum ist der Vergabezeitraum von entscheidender Bedeutung. Zur Validierung des SMSs müssen daher die Zugriffszeiten, genauer gesagt die Request-Response-Zeiten betrachtet und analysiert werden.

Als Ausgangspunkt für die Analyse des Systems wird hierzu das Ergebnis aus Kapitel 4 verwendet. In Abbildung 4.5 sind die resultierenden Verzögerungszeiten, bezogen auf die Anzahl der parallel anfragenden Clients dargestellt. Hierbei ist die SME als Overlay-System auf einem JBOSS Application Server aufgesetzt und in Java implementiert. Wie

bereits in Kapitel 4 erörtert wurde, weist die Zugriffszeit kein lineares Verhalten bezüglich der Anzahl der Anfragen auf, sondern folgt einer e-Funktion. Hieraus resultiert, dass eine Skalierung nicht sichergestellt werden kann, das heißt, die Zugriffszeiten steigen exponentiell mit der Anzahl der Anfragen. Für die weitere Betrachtung des Systems wird das Verhalten der SME durch Gleichung 6.1 modelliert werden, wobei n die Anzahl der gleichzeitig anfragenden Einheiten repräsentiert (vergleiche Kapitel 4).

$$t = 7,813 \cdot e^{0,02009 \cdot n} \quad (6.1)$$

Für den Betrieb eines Systems mit einer unbekanntenen Anzahl von Clients ist die Frage der Skalierbarkeit von entscheidender Bedeutung. In Kapitel 4 wurde bereits eine DHT (Chord) basierte Architektur vorgestellt, welche in der Lage ist dieses Problem zu lösen und die somit skalierbar ist.

Im Folgenden wird für die Analyse vorausgesetzt, dass es sich um ein heterogenes System handelt und alle SMEen identische Eigenschaften bezüglich der Performanz und somit der Zugriffszeit aufweisen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass alle Fingertables vollständig gefüllt sind, wodurch sich die maximal notwendige Anzahl von Hops für eine Anfrage zu $\mathcal{O}(\log(n))$ genauer $\text{hops} = \log_2(n)$ ergibt. Für die Beurteilung der Umsetzbarkeit werden zunächst Netzwerke aus 100, 1000, 10000 und 100000 Knoten betrachtet mit 100 gleichzeitigen Anfragen. Für ein Netzwerk aus 100000 Knoten ist die maximale Anzahl der Hops im idealen Fall auf 9 begrenzt (bei einer vollständigen Fingertable). In Abbildung 6.14 ist die Häufigkeitsverteilung der benötigten Hops dargestellt.

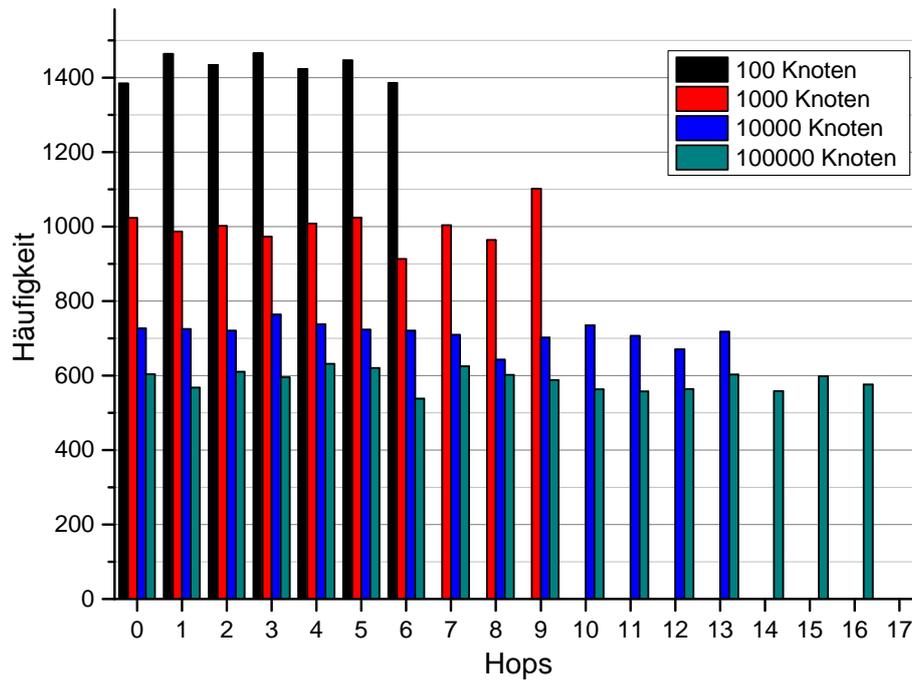


Abbildung 6.14. Häufigkeit der benötigten Anzahl von Hops bei 100 Anfragen

Des Weiteren ist die maximal auftretende Verzögerungszeit, welche vom Zeitpunkt der Anfrage bis zur Rückgabe der angefragten Daten an den Client, von entscheidender Bedeutung. Für bereits oben genannten Parameter ergeben sich die Werte in Abbildung 6.15.

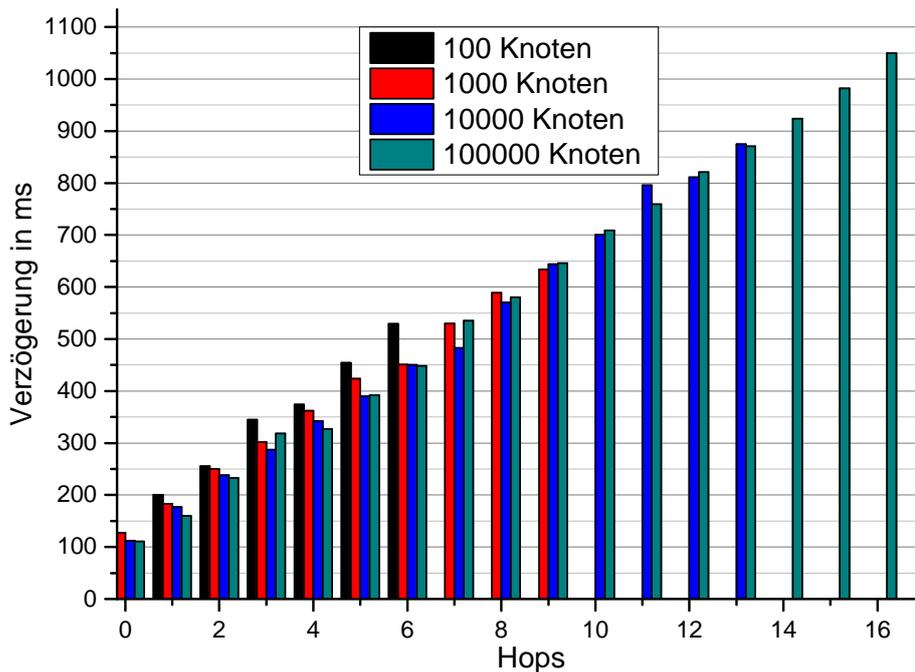


Abbildung 6.15. Maximale Verzögerung bei 100 Anfragen

Die resultierende Verzögerung ist kleiner als 0,7 Sekunden für ein Netzwerk aus 1000 Knoten und mit einer zufälligen Anzahl von Anfragen n im Bereich $0 \leq n \leq 100$ gleichzeitigen Anfragen pro Knoten. Beim Betrieb von realen Systemen müssen allerdings noch zwei wichtige Faktoren berücksichtigt werden, welche einen deutlichen Einfluss auf die Antwortzeit haben können. In der obigen Betrachtung wird vorausgesetzt, dass die Fingertables vollständig aufgebaut sind, was beim realen Betrieb nicht zwingend der Fall sein muss. Somit kann dies zu einer Verschlechterung der Performanz führen. Dies resultiert in einer größeren Anzahl der benötigten Hops und somit einer ansteigenden Verzögerungszeit. Der zweite entscheidende Faktor wird durch die Leistungsfähigkeit der einzelnen SME bestimmt. Da es sich bei dem hier verwendeten Referenzaufbau um ein sehr leistungsschwaches System handelt, ist davon auszugehen, dass die Performanz durch die Verwendung eines angepassten Anwendungsservers noch deutlich gesteigert werden kann.

Für den Aufbau eines übergreifenden SMSs ist es, wie bereits beschrieben, erforderlich eine mehrschichtige Struktur anzuwenden. Die resultierende Gesamtverzögerung ergibt sich somit aus der Summe der Ver-

zögerungen der involvierten Schichten zuzüglich der Übertragungsverzögerung, wie in Formel 6.2 dargestellt. Des Weiteren muss noch eine Verzögerungszeit t_{response} berücksichtigt werden, welche die Übertragung der Informationen von der SME an die anfragende Einheit repräsentiert. Bezogen auf die eigentliche Dauer der Anfrage kann dieser Wert wesentlich geringer sein, da eventuell eine direkte Kommunikation zwischen der zuständigen SME und der anfragenden Einheit vorhanden sein kann.

$$\Delta t_{\text{sum}} = \left(\sum_{m=1}^{m=|\text{Layer}|} \left(\sum_{n=1}^{n=|\text{Knoten}|} (\Delta t(m, n) + t(m, n)_{\text{Delay}}) \right) \right) + t_{\text{response}} \quad (6.2)$$

Bezogen auf das betrachtete Szenario wird nun ein System mit $m = 6$ Schichten betrachtet. Die Anfrage wird aus der Ebene *europa.de.rlp.lk-kl.kl.Betreiber_A* gestellt um eine Entlastung der betrachteten Basisstation zu erzielen. Für die Ermittlung der Zugriffszeit ist es somit entscheidend auf welcher Ebene die Registrierung des eigentlichen Spektrumnutzers beziehungsweise Lizenzesigentümers stattgefunden hat. Da es sich in diesem Fall um ein WLAN handelt, gibt es keinen dedizierten Spektrumseigentümer und die Anfrage muss bis auf Landesebene weitergereicht werden, wo dann die Ermittlung des zuständigen Sharingverfahrens erfolgt (siehe Abbildung 5.2). Somit müssen insgesamt 5 Ebenen in die Anfrage involviert werden und es ergibt sich für die Anfrage die in Formel 6.3 dargestellte Verzögerungszeit.

$$\Delta t_{\text{sum}} = \left(\sum_{m=0}^6 \left(\sum_{n=0}^{|\text{Knoten}|} (\Delta t(m, n) + t(m, n)_{\text{Delay}}) \right) \right) + t_{\text{response}} \quad (6.3)$$

Unter der Voraussetzung, dass alle Fingertabes vollständig aufgebaut sind, ergibt sich die in Formel 6.4 dargestellte Gesamtverzögerung.

$$\Delta t_{\text{sum}} = \left(\sum_{m=0}^6 \left(\sum_{n=0}^{\text{ceil}(\log(|\text{Knoten}|))} (\Delta t(m, n) + t(m, n)_{\text{Delay}}) \right) \right) + t_{\text{response}} \quad (6.4)$$

Die Bestimmung der Verzögerungszeit innerhalb einer DHT erfolgt in der zweiten Summe. Bei der Berechnung wird an dieser Stelle eine vollstän-

dig besetzte Fingertable angenommen, wodurch sich die obere Grenze der Summe zu $\text{ceil}(\log(|\text{Knoten}|))$ ergibt. Hierbei beschreibt ceil die Aufrundungsfunktion in Formel 6.5.

$$\lceil x \rceil := \text{ceil}(x) = \{ \min k \in \mathbb{Z} k \geq x \} \quad (6.5)$$

Um die Perfomanz der Architektur beurteilen zu können, müssen die Auslastungen der LTE-BSen und WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs betrachtet werden. In Abbildung 6.16 sind die Auslastungen der drei LTE-BSen dargestellt.

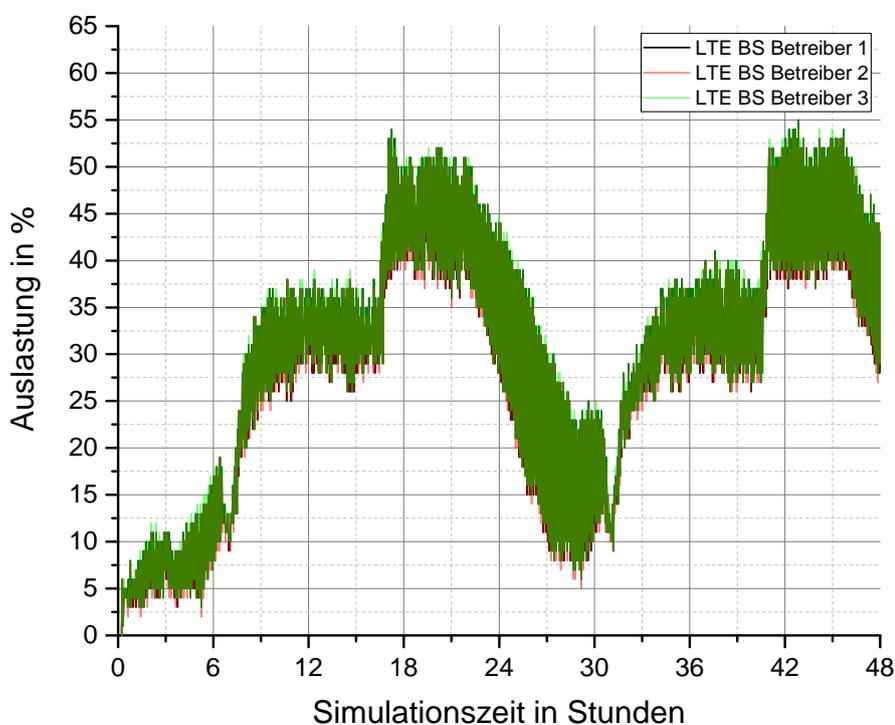


Abbildung 6.16. Auslastung der LTE-BSen mit SMS bezogen auf die Tageszeit

Es ist deutlich erkennbar, dass eine Entlastung der LTE-BSen stattgefunden hat, genauer gesagt ist die Auslastung aller drei Stationen immer kleiner als 60 %. Die resultierende Anzahl an Anfragen welche abgewiesen worden sind ist in Abbildung 6.17 dargestellt.

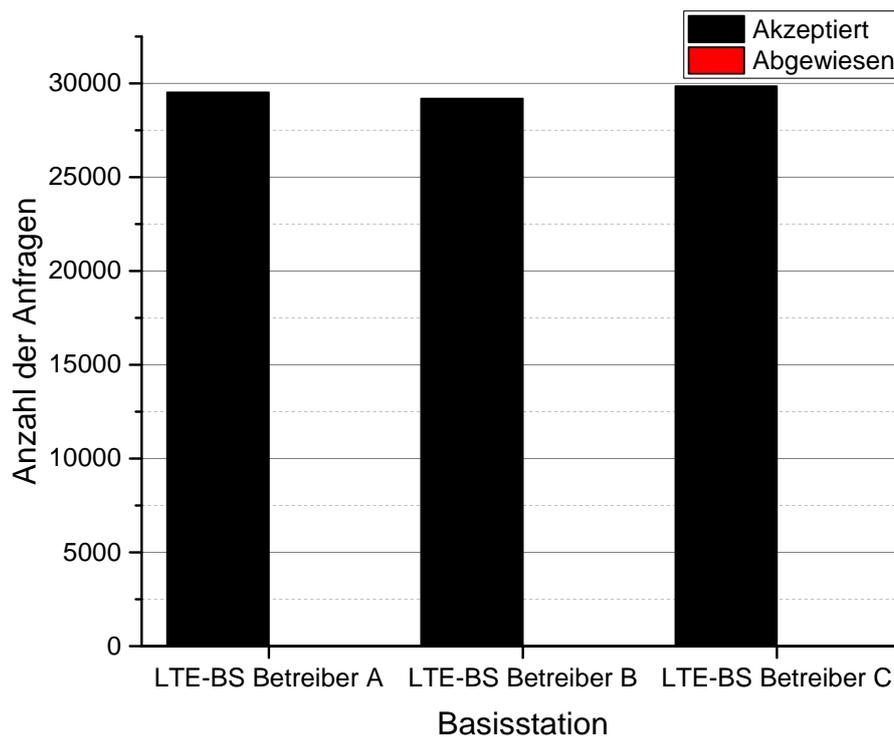


Abbildung 6.17. Anzahl der zurückgewiesenen Anfragen bezogen auf die Tageszeit

Aufgrund der gesunkenen Auslastung kann auch die Anzahl der abgewiesenen Anfragen auf null reduziert werden, was eine deutliche Reduktion der Verzögerungszeit bewirkt. Ein weiterer Aspekt der sich daraus ergibt, ist eine verbesserte Kundenzufriedenheit.

In Abbildung 6.19 ist die Auslastung der firmeninternen WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs dargestellt.

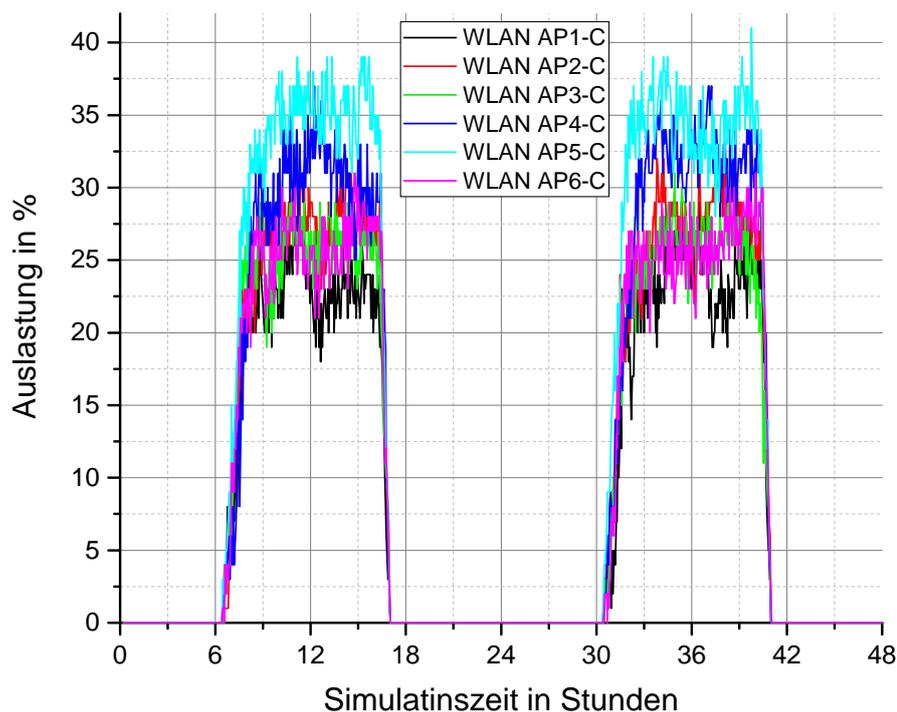


Abbildung 6.18. Auslastung der firmeneigenen WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs bezogen auf die Tageszeit

Auch hier ist eine deutlich effizientere beziehungsweise gleichmäßigere Ressourcenverteilung erkennbar. Das System ist in der Lage alle Anfragen beim ersten Durchlauf abzuarbeiten. Noch deutlicher ist dieser Einfluss des SMSs bei den vier WLAN-APs in den privaten Häusern erkennbar. Hier werden, soweit möglich, alle Verbindungen den jeweiligen WLAN-APs zugewiesen um eine Entlastung der LTE-BSen zu erzielen. In Abbildung 6.19 ist der Verlauf der Auslastung der privaten WLAN-APs dargestellt.

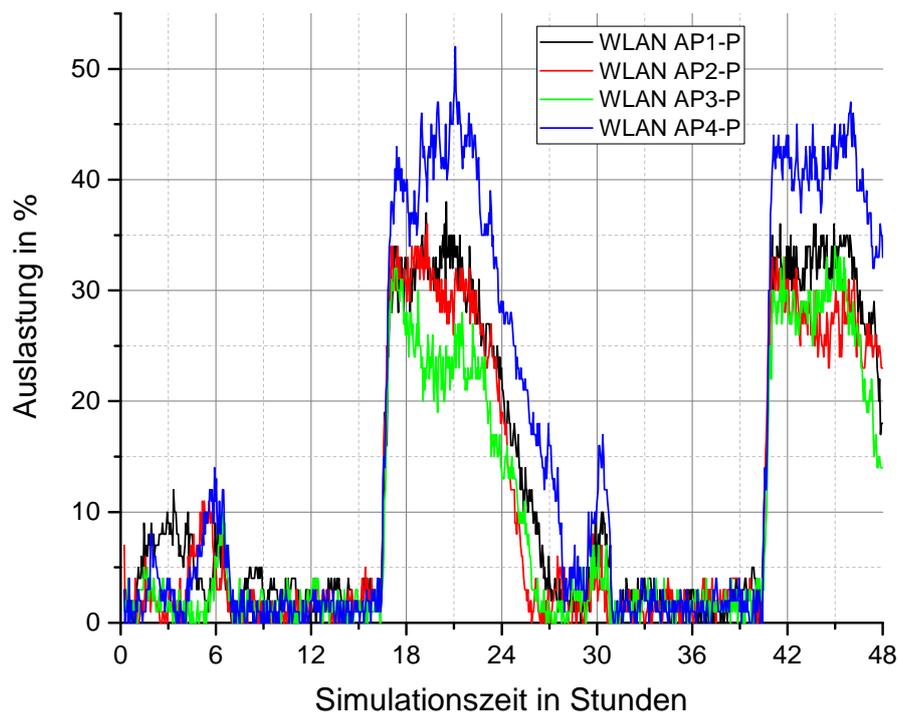


Abbildung 6.19. Auslastung der privaten WLAN-APs unter Verwendung eines SMSs bezogen auf die Tageszeit

Wie zu erwarten liegt die maximale Auslastung der WLAN-APs zwischen 17:00 Uhr und 24:00 Uhr und ist immer $< 50\%$. Somit können alle Anfragen unmittelbar abgearbeitet werden. Eine wichtige Rolle in diesem Szenario spielen die Mikro-BS welche, wie bereits erwähnt, von ihrer Spezifikation vergleichbar zu WLAN sind. Mit Hilfe dieser Mikro-BS werden zeitliche Lücken im 2,4 GHz Bereich „aufgefüllt“. In Abbildung 6.20 ist die Auslastung der Mikro-BSen dargestellt. An dieser Stelle muss noch angemerkt werden, dass keine Netzabdeckung seitens dieser BSen für das Firmengebäude erfolgt. Dies soll eine Sicherheit für den Betrieb gewährleisten.

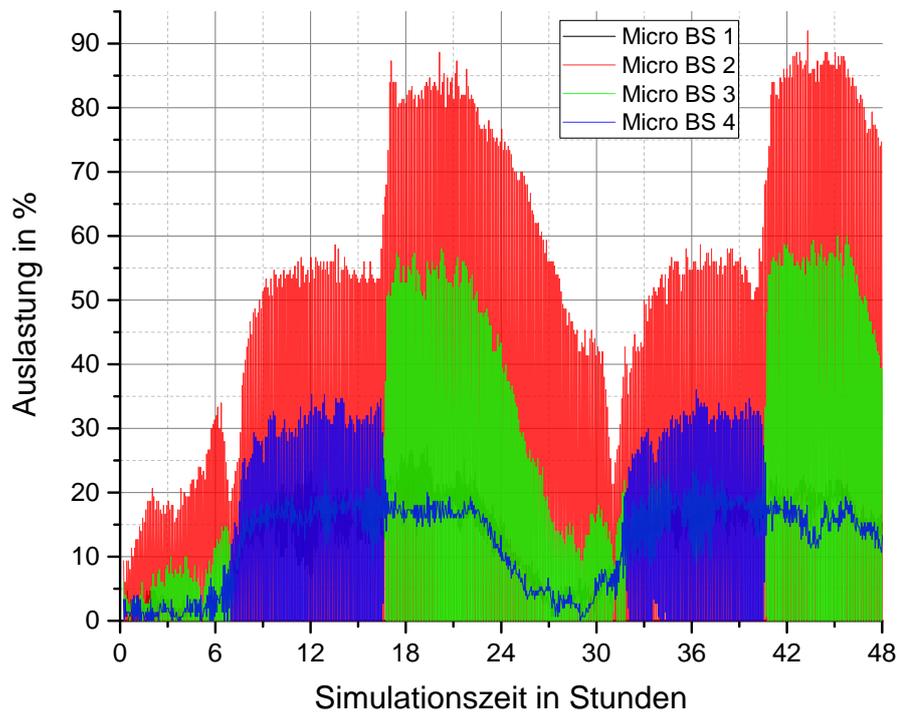


Abbildung 6.20. Auslastung der Micro-Basisstationen unter Verwendung eines SMSs bezogen auf die Tageszeit

Es ist ersichtlich, dass die Mikro-BSen nicht durchgängig aktiv sind, da ausschließlich freie Ressourcen zugeteilt werden. Des Weiteren ist ersichtlich dass die Mikro-BSen eine Auslastung von $< 95\%$ aufweisen und somit vom dem SMS effizient eingesetzt werden. Die Anzahl der abgewiesenen Anfragen ist somit ebenfalls null.

6.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde anhand eines konkreten Szenarios gezeigt, dass die Anwendung des entwickelten SMSs eine deutlich effizientere Ausnutzung der vorhandenen spektralen Ressourcen ermöglicht. Vielmehr ist es sogar möglich temporär stark überlastete Bereiche, beziehungsweise in diesem Fall eine LTE-BSen, zu entlasten. Des Weiteren ermöglicht das System die Einbindung zusätzlicher Basisstationen, welche auf bereits zeitweise verwendeten Frequenzbereichen arbeiten. In dem hier betrachteten Szenario konnte gezeigt werden, dass der Betrieb von zusätzlichen Mikro-Basisstationen im Frequenzbereich von WLAN für eine zusätzliche Entlastung der LTE-BSen sorgt.

7 Gesamtergebnis und Ausblick

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine Zusammenfassung der Vorgehensweise sowie der daraus entstandenen Ergebnisse. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird anschließend ein Gesamtfazit gezogen und ein Ausblick gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Die stetig steigenden Anforderungen an die funkbasierte Datenübertragung bezüglich Verfügbarkeit und Datendurchsatz, sowie die zunehmende Heterogenität der Systeme resultieren in einem kontinuierlich wachsenden Bedarf an Spektrum. Trotz der immer weiter voranschreitenden Technologie bestehen Einschränkungen aufgrund physikalisch vorhandenen Grenzen. Speziell für die Übertragung von Daten über längere Strecken eignet sich nur der Bereich bis circa 6 GHz. Durch die derzeit relativ starren und unflexiblen Frequenzzuteilungen entstehen White- und Grey-Spaces, welche ungenutzte spektrale Ressourcen zur Folge haben. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Gesamtkonzept und eine entsprechende Systemarchitektur entwickelt und evaluiert, welche die dynamische Zuteilung von spektralen Bereichen ermöglicht. Als Ausgangspunkt für die Konzipierung des Systems wurden die bisher bekannten Lösungsansätze zum Spektrum Sharing betrachtet und entsprechend ihrer Anwendung kategorisiert. Es hat sich gezeigt, dass eine Unterscheidung zwischen lizenzierten und nicht lizenzierten Frequenzbereichen notwendig ist um die unterschiedlichen Anforderungen an das System bedienen zu können. Für die nicht lizenzierten Frequenzbereiche ist die Zielsetzung die Minimierung der Interferenz beziehungsweise die Maximierung der QoS der Teilnehmer unter Verwendung geeigneter Detektionsverfahren und Algorithmen. Eine Sicherstellung eines vorgegebenen QoS ist hierbei allerdings nicht möglich. In den lizenzierten Frequenzbereichen ist hingegen eine dedizierte Beeinflussung und Steuerung möglich, da die Verwendung dieser Bereiche nur unter koordinierten Bedingungen gestattet ist. Eine unkoordinierte beziehungsweise

unerlaubte Verwendung wird an dieser Stelle als Verstoß gegen die Lizenzbedingungen angesehen. Die hierfür benötigten Parameter sind in Datenbanken hinterlegt und können bei Bedarf vom System erfragt werden. Im ersten Schritt der Untersuchung erfolgte eine detaillierte Analyse der Anforderungen unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Konzepte. Es hat sich herausgestellt, dass ein frequenzübergreifendes System aus einer Kombination verschiedener Sharing-Ansätze bestehen muss um alle Anforderungen zu erfüllen. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die hier verwendeten Spektrumsdaten von den Eigenschaften vergleichbar zu Kontextinformationen in Kontext-Management-Systemen angesehen werden können. Dieser Sachverhalt ermöglicht die Anwendung von bereits aus dem Kontext-Management bekannten Verfahren bezüglich des Umgangs (Verwaltung und Speicherung) sowie auch der Darstellung solcher Daten. Speziell für die Darstellung der Daten wurde auf XML-Derivate zurückgegriffen. Erste zentralisierte Ansätze haben gezeigt, dass die Zugriffszeiten exponentiell mit der Anzahl der anfragenden Einheiten steigen. Ein skalierendes System kann somit nicht mit einer einzelnen SME erreicht werden. Um der Skalierbarkeits-Anforderung gerecht zu werden musste daher das System als verteilte Architektur umgesetzt werden. Aus der Informatik sind bereits diverse verteilte Speicherarchitekturen bekannt. Im Zusammenhang mit dieser Problemstellung hat sich die DHT-basierte Chord-Implementierung als geeignet erwiesen. Das bei Chord verwendete Hashing wird durch eine Abbildungsvorschrift zwischen dem SHA1-Adressraum und dem verwendeten Frequenzbereich ersetzt, um die beschriebene Korrelation zu erhalten. Zusätzlich wird mit Hilfe eines Offset eine zweite Abbildungsvorschrift generiert, wodurch eine Datenredundanz erzeugt werden kann. Für die Sicherstellung der Selbstorganisation des Systems, als auch Plug-and-Play Funktionalität wurde ein Bootstrap-Algorithmus entwickelt, welcher eine automatische Integration und Exklusion von Knoten sowie auch Clients ermöglicht. Innerhalb der ersten Tests hat sich gezeigt, dass die kurze Gültigkeitsdauer der Spektrumsdaten eine hohe Genauigkeit an die Synchronizität der einzelnen Systemuhren stellt. Um diesem Problem gerecht zu werden wurde das LT-Sync Protokoll entwickelt und implementiert. Hiermit kann, in einem System von bis zu 1000 Knoten, eine Genauigkeit von $\Delta t \leq 70$ ms erzielt werden. Eine weitere Anforderung an das SMS ist der Betrieb von Teilen als sogenannte Insellösungen, also Teile des Netz-

werks welche nicht mit dem Internet verbunden sind. Um diesen Fall zu ermöglichen wurde eine hierarchische Struktur entwickelt, die auf einer räumlichen Trennung in Teilgebiete basiert. Mit Hilfe dieses Konzeptes ist der autonome Betrieb von einzelnen Teilbereichen möglich.

7.2 Ergebnisse

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte SMS wird anhand eines virtuellen Areals evaluiert. Dieses besteht aus 5 Gebäuden, ein Firmengebäude mit 6 Stockwerken und vier umliegenden Privathäusern. Das komplette Areal wird von drei Netzbetreibern (A, B und C) mit je einer LTE-BS versorgt. Zusätzlich ist im Firmengebäude in jedem Stockwerk ein WLAN-AP vorhanden, welches ausschließlich von den Mitarbeitern der Firma verwendet werden kann. Des Weiteren besitzt jedes Privathaus einen eigenen WLAN-AP. Auch hier wird von einem kontrollierten Zugang ausgegangen. Als Referenz für die Evaluierung des Systems wird im ersten Durchlauf ein Szenario komplett ohne SMS betrachtet. Aus den Ergebnissen ist deutlich erkennbar, dass die LTE-BSen deutlich überlastet sind und die WLAN-APs nicht effizient verwendet werden. Dies zeigt sich auch in der Anzahl der abgewiesenen Anfragen von den LTE-BSen, die speziell bei Betreiber A deutlich über 50 % liegt. Im folgenden Schritt wird das System mit einem SMS betrieben. Aufgrund der Anwendung des SMSs ist eine definierte und koordinierte Zuweisung der Ressourcen möglich, was die Einbindung von zusätzlichen Mikro-BSen ermöglicht. Diese sind bezüglich ihrer Spezifikation vergleichbar zu WLAN und müssen daher mit diesen koordiniert werden. Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass mit Hilfe des SMSs eine deutliche Umverteilung der Auslastung erzielt werden kann. Zusätzlich werden ungenutzte Ressourcen durch die Mikro-BSen aufgefüllt. Durch den Betrieb des SMSs kann die Auslastung aller BSen immer unter 95 % gehalten und somit auch die Anzahl der abgewiesenen Anfragen auf Null reduziert werden.

7.3 Fazit

Durch die Anwendung eines SMSs wird die QoS des Nutzers deutlich verbessert und die Ausnutzung des Spektrums wird effizienter. Gerade in Bereichen mit starker Auslastung können somit temporär wenig oder ungenutzte Bereiche, sogenannte Gray oder White Spaces, für andere Dienste zugänglich gemacht werden. Das im Rahmen dieser Arbeit

entwickelte SMS mit den zugehörigen Protokollen ist in der Lage die Anforderungen bezüglich Plug and Play, Redundanz und Skalierbarkeit zu erfüllen. Speziell die Anforderung der Skalierbarkeit ergibt sich aus der hierarchischen Anordnung der DHT Strukturen. Des Weiteren ermöglicht dieses Vorgehen eine geografisch strukturierte Organisation der Daten.

Als Fazit kann somit gezogen werden, dass die Anwendung eines SMSs als sinnvoll zu erachten ist.

7.4 Ausblick

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass die Anforderungen an die Funknetze stetig steigenden Erwartungen ausgesetzt sind. Aufgrund der physikalischen Ausbreitungseigenschaften resultiert eine Limitierung des verfügbaren Spektrums, wodurch eine Diskrepanz zwischen den Anforderungen und den vorhandenen Ressourcen entsteht. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass mit Hilfe eines SMSs eine verbesserte Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen erzielt werden kann. Ansätze wie beispielsweise die Einbindung von Mikro- oder Picozellen oder die Nutzung nicht belegter ISM Frequenzen können in Verbindung mit einem SMS zusätzliche Verbesserungen bei Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen erzielen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Einbindung von nicht lizenzierten Frequenzbereichen einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung leistet. Um dies jedoch auch effizient anzuwenden bedarf es zuverlässiger Detektionsalgorithmen.

Die Anwendung eines SMSs ist derzeit ein brisantes Thema im Kontext I4.0. Grundlage hierfür bildet die von der BNetzA geplante Neuzuteilung der Frequenzbereiche um 2 GHz (bis 31.12.2020 beziehungsweise 31.12.2025 zugeteilt) und die Frequenzen im Bereich (3,4 – 3,8) GHz (bis 31.12.2021 beziehungsweise 31.12.2022 zugeteilt) [192]. Hierbei ist insbesondere der Aufbau von Pico- und Micro-Zellen an Hotspots geplant, welche für den Ausbau der 5G Netze eine entscheidende Rolle spielen. Für die Zuteilung der Frequenzen im Bereich (3700 – 3800) MHz ist eine nachfragegerechte gebietsbezogene Zuteilung angedacht [192].

Des Weiteren bietet die Verwendung von Frequenzen aus den ISM-Bändern eine kostengünstige Alternative, da hier keine Lizenzkosten anfallen. Jedoch ist die Verwendung dieser Frequenzbereiche mit den bereits bekannten Interferenz-Problemen behaftet und somit derzeit ledig-

lich für nicht sicherheitsrelevante Anwendungen geeignet. Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte SMS bietet hierfür einen geeigneten Lösungsansatz um sowohl eine effiziente Nutzung der ISM-Bänder als auch die Einbindung von Pico- und Micro-Zellen an Hotspots zu gewährleisten.

Ein zentraler Aspekt von I4.0 ist die Verwendung von intelligenten, digitalen vernetzten Systemen, um eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion zu ermöglichen. Dies bedingt eine Kommunikation und Kooperation von Mensch, Maschine, Anlagen, Logistik und Produkten mit sich. Im Rahmen von I4.0 soll dieser Prozess so flexibel wie nur möglich gestaltet werden. Um dies zu gewährleisten bedarf es einer flexiblen Infrastruktur, welche eine adaptive Anpassung der Produktion beziehungsweise der Produktionsanlagen und Abläufe ermöglicht. Zum Betrieb solcher Anlagen sollte daher der Aufwand an kabelgebundener Kommunikation so gering wie möglich gehalten werden. Des Weiteren wird im Zuge der Flexibilisierung der Anteil an ortsfesten Baugruppen deutlich sinken. Aus diesem Grund wird der Anteil der per Funk angebotenen Baugruppen deutlich ansteigen. [193]

Des Weiteren werden neue 5G-Architekturen eine hohe Dynamik hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen aufweisen müssen. Das im aktuellen System umgesetzte Paradigma „one system fits all services“ muss durch einen adaptiven Ansatz ersetzt werden, welche Anpassung an die benötigten Anforderungen erlaubt. Für die Realisierung solcher Netze sind daher Architekturen mit Context-Awareness geeignet.[121]

Speziell im Zusammenhang mit I4.0 ergeben sich neue Herausforderungen an die Verwendung von spektralen Ressourcen. Im Zuge der Einführung von Pico- und Micro-Zellen an Hotspots in 5G Netzen sowie der Nutzung von ISM-Frequenzen im industriellen Umfeld ergibt sich eine zeit- und ortsabhängige Auslastungen, welche bei der Zuteilung beziehungsweise Verwendung der Frequenzen berücksichtigt werden muss. Vielmehr resultiert hieraus der Bedarf einer dynamische Zuteilung, für die eine übergeordnete Koordination benötigt wird. Des Weiteren müssen im industriellen Umfeld sicherheitsrelevante Aspekte mit einer hohen Relevanz eingestuft werden (beispielsweise Notaus). Dies ist entscheidend für die Auswahl der verwendeten Frequenzbänder. Speziell für die Frequenzbänder im 2 GHz und (3,4 – 3,8) GHz Bereich sind derzeit keine Schutzbänder vorgesehen wodurch bei der Verwendung dieser Bereiche

hohe Anforderungen an die Einhaltung der festgelegten Bandbreiten gestellt werden. In diesem Zusammenhang erlangt die Lokalisierung von Objekten innerhalb von Gebäuden beziehungsweise Werkshallen eine hohe Relevanz. Diesbezüglich wurden funkbasierte als auch optische Verfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit getestet [194] [195].

Ein hierfür geeigneter Lösungsansatz kann mit Hilfe eines SMSs erzielt werden und ist in Abbildung 7.1 exemplarisch dargestellt. Auf die Darstellung der einzelnen Baugruppen wie beispielsweise SME und DBen wurde im Zuge der Übersichtlichkeit verzichtet.

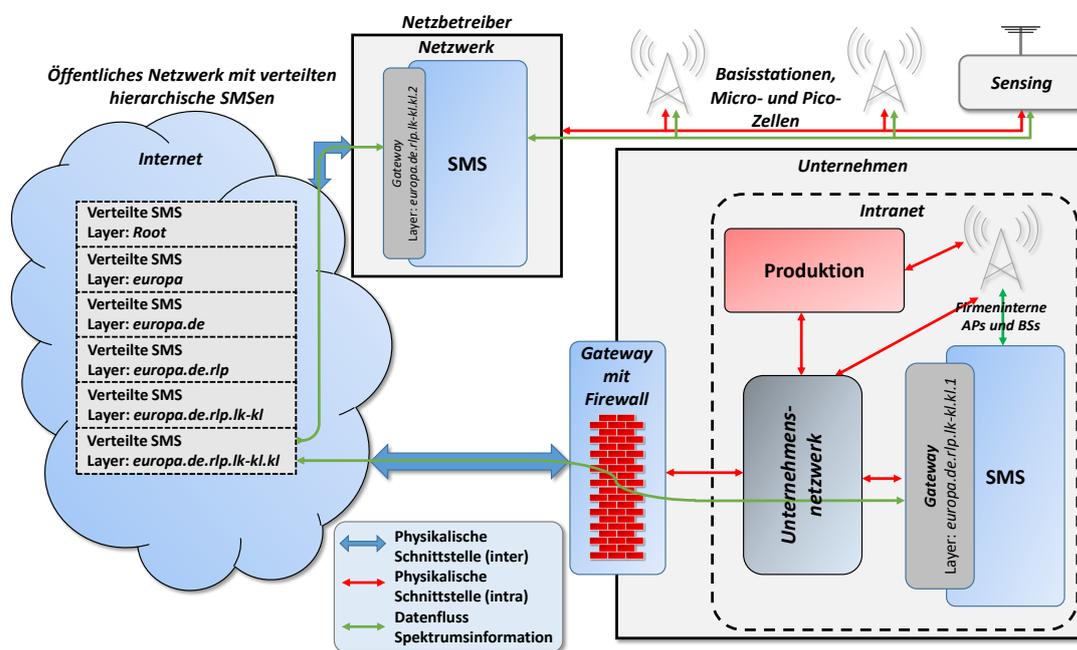


Abbildung 7.1. Exemplarischer Aufbau eines SMSs im I4.0-Umfeld

Mit Hilfe des SMSs und den einzelnen BSen und APs kann eine effiziente Verteilung der spektralen Ressourcen erfolgen. Dies ist insbesondere für den Betrieb von Pico- und Micro-Zellen von großer Relevanz. Durch den Betrieb von Spektrum-Monitoring Einheiten, welche im Rahmen der nicht lizenzierten Frequenzbänder sowieso benötigt werden, wird die Detektion von Störern ermöglicht und ein Wechsel auf verfügbare spektrale Ressourcen ermöglicht. In dem aufgeführten I4.0 Szenario ist erkennbar, dass der Datenfluss der für Spektrumsinformation für eine vollständige Systemkoordination verantwortlich ist, also netzwerkübergreifend, nicht auf das Subnetz eines Unternehmens oder Netzwerkbetreibers beschränkt werden kann. Mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickel-

ten SMSs wird eine hierarchische Architektur angeboten, welche eine geeignete Struktur zum Datenaustausch bereitstellt. Der Einsatz entsprechender Gateways ermöglicht eine selektive Freigabe der Daten und ermöglicht beispielsweise Netzbetreibern sensible Informationen nur intern zu verwenden.

Literaturverzeichnis

- [1] Dave Evans. Das Internet der Dinge - So verändert die nächste Dimension des Internet die Welt. May 2011.
- [2] Jim Chase . The Evolution of the Internet of Things, 2013.
- [3] Cisco Systems, Inc. Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2011–2016 - White Paper. 2012.
- [4] Nokia Siemens Networks Policy and Government Relations. Optimised Spectrum Use by Authorised Shared Access, April 2012.
- [5] Qualcomm. LTE Advanced: Authorized Shared Access (ASA), 2013.
- [6] Qualcomm. 1000x: More spectrum—especially for small cells, May 2013.
- [7] Qualcomm. Authorized Shared Access, 2011.
- [8] Ericsson. More Than 50 Billion Connected Devices. 2011.
- [9] Helmut G. Bauer. EU-Ratsbeschluss zum Funkspektrum für drahtlose Produktionen: Planungssicherheit bis 2030 – aber... , 2016.
- [10] FCC. Spectrum Policy Take Force (SPTF) Report, 2002.
- [11] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, and Shantidev Mohanty. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *COMPUTER NETWORKS JOURNAL (ELSEVIER)*, 50:2127–2159, 2006.
- [12] Menguc Oner and Friedrich K. Jondral. On the extraction of the channel allocation information in spectrum pooling systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25:558–565, 2007.
- [13] FCC. Notice of Proposed Rule Making and Order (ET docket no 03-322), 2003.
- [14] Simon Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(2):201–220, Feb 2005.
- [15] Tevfik Yucek and Huseyin Arslan. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *Commun. Surveys Tuts.*, 11(1):116–130, January 2009.
- [16] Daniel Willkomm. *Enabling Sensing-based Opportunistic Spectrum Re-usage with Secondary QoS Support*. PhD thesis, 2011.
- [17] Ericsson. Spectrum Sharing. Oktober 2013.
- [18] European Commission . RSPP: the roadmap for a wireless Europe, 2012.
- [19] CEPT ECC Electronic Communications Committee. RM 52 on 2300-2400 MHz band, 2014.

- [20] CEPT ECC Electronic Communications Committee. FM 53 - RRS and LSA, 2014.
- [21] Andreas Klein, Christian Lottermann, Christian Mannweiler, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. A Novel Approach for Combined Joint Call Admission Control and Dynamic Bandwidth Adaptation in Heterogeneous Wireless Networks. In *Proceedings of 7th EURO-NF Conference on Next Generation Internet - NGI*, Kaiserslautern, Germany, June 2011.
- [22] Christophe Janneteau, Jose Simões, Josephine Antoniou, Christophoros Christophorou, Mounir Kellil, Andreas Klein, Augusto Neto, F Pinto, Pierre Roux, Susana Sargento, Hns D. Schotten, and Jörg Schneider. Context-aware multiparty networking. In *Conference Proceedings of ICT MobileSummit*, volume N/A, pages N/A–N/A, June 2009.
- [23] Andreas Klein, Christian Mannweiler, and Hans D. Schotten. A Framework for Intelligent Radio Network Access Based on Context Models. In *Proceedings of the 22nd WWRF Meeting*, Paris, France, May 2009.
- [24] Andreas Klein, Nandish P. Kuruvatti, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. Fuzzy Q-Learning for Mobility Robustness Optimization in Wireless Networks. In *Proceedings of IEEE Globecom Workshop on Emerging Technologies for LTE-Advanced and Beyond 4G*, Atlanta, GA, USA, December 2013.
- [25] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans Schotten. Erfassung von Umgebungskontext und Kontextmanagement. In *Proceedings of the 14th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2009.
- [26] Christian Mannweiler, Jörg Schneider, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. From Context to Context-Awareness: Model-based User Classification for Efficient Multicasting. In *Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems - KES 2011*, Kaiserslautern, Germany, September 2011.
- [27] Christian Mannweiler, Ronald Raulefs, Joerg Schneider, Benoit Denis, Andreas Klein, Bernard Uguen, Mohamed Laaraiedh, and Hans Schotten. A Robust Management Platform for Multi-Sensor Location Data Interpretation. In *Proceedings of the Future Network & Mobile Summit 2010*, Florence, Italy, June 2010.
- [28] Jörg Schneider, Andreas Klein, Christian Mannweiler, and Hans Schotten. Environmental Context Detection for Context-Aware Systems. *ICaST - ICST's Global Community Magazine*, 2010.
- [29] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jeremias Weinreich, Christian Lottermann, and Hans D. Schotten. A Testbed for Efficient Multicasting and Seamless Mobility Support. Demonstration at the 11th Würzburg Workshop on IP: Joint ITG, ITC, and Euro-NF Workshop Visions of Future Generation Networks - EuroView2011, August 2011.
- [30] Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. Integration von Kontextmodellen für intelligenten Funknetzzugang. In *Proceedings of the 14th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2009.
- [31] Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jörg Schneider, and Hans Schotten. Exploiting User and Network Context for Intelligent Radio Network Access. In *Proceedings of the*

- International Conference on Ultra Modern Telecommunications - ICUMT*, St. Petersburg, Russia, October 2009.
- [32] Stefano Carrella, Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jörg Schneider, and Hans Schotten. A Concept for Context-aware Multihoming with Heterogeneous Radio Access Technologies. In *Proceedings of the 5th Annual International Wireless Internet Conference - WICON*, Singapore, March 2010.
- [33] Andreas Klein, Christian Mannweiler, Jörg Schneider, and Hans Schotten. Access Schemes for Mobile Cloud Computing. In *Proceedings of the First International Workshop on Mobile Cloud Computing at Mobile Data Management 2010*, Kansas City, USA, May 2010.
- [34] Christian Mannweiler, Bernd Amann, Jörg Schneider, Andreas Klein, and Hans Schotten. A Distributed Context Service Architecture for Heterogeneous Radio Environments. In *Proceedings of the 15th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2010.
- [35] Barbara Staehle, Florian Wamser, Rastin Pries, Dirk Staehle, Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. Application- and Context-Aware Radio Resource Management for Future Wireless Networks. *Proceedings of the 10th Workshop on IP: Joint ITG, ITC, and Euro-NF Workshop Visions of Future Generation Networks - EuroView2010*, August 2010.
- [36] Andreas Klein, Christian Mannweiler, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. A Concept for Context-Enhanced Heterogeneous Access Management. In *Proceedings of the Workshop on Seamless Wireless Mobility at GLOBECOM 2010*, Miami, USA, December 2010.
- [37] Christian Mannweiler, Andreas Klein, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. Context-based User Grouping for Multi-Casting in Heterogeneous Radio Networks. *Advances in Radio Science*, 9, 2011.
- [38] Andreas Klein, Christian Lottermann, Christian Mannweiler, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. Ein Neuartiger Ansatz für Gemeinsame Funk-Zugangskontrolle und Dynamische Bandbreiten-Anpassung in Heterogenen Funknetzwerken. In *Proceedings of the 16th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2011.
- [39] Christian Mannweiler, Jörg Schneider, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. A Distributed Broker System Enabling Coordinated Access Schemes in Autonomous Wireless Networks. In *Proceedings of the 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference - IWCMC 2013*, Cagliari, Italy, July 2013.
- [40] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. Einbindung von Sensoren und Sensornetzwerken in das Future Internet. Presented at the 5th Fachgespräch der GI/ITG-Fachgruppe Kommunikation und Verteilte Systeme - KuVS, June 2010.
- [41] Jörg Schneider, Andreas Klein, Christian Mannweiler, and Hans D. Schotten. An Efficient Architecture for the Integration of Sensor and Actuator Networks into the Future Internet. *Advances in Radio Science*, 9, 2011.

- [42] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. A Coordination Protocol for Distributed Context Management Systems. In *Proceedings of the 12th Würzburg Workshop on IP: Joint ITG, ITC, and Euro-NF Workshop Visions of Future Generation Networks - EuroView2012*, Würzburg, Germany, July 2012.
- [43] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans Schotten. Einbindung von Sensoren und Sensornetzwerken in das Future Internet. In *Proceedings of the 15th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2010.
- [44] Jörg Schneider, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. A Context Management System for a Cost-efficient Smart Home Platform. *Advances in Radio Science*, 10, 2012.
- [45] Michael Karrenbauer, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. A Simple Chord Implementation for Distributed Context Management. In *Proceedings of the 19th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2014.
- [46] Jörg Schneider, Lianghai Ji, Christian Mannweiler, and Hans D. Schotten. Context-based Cognitive Radio for LTE-Advanced Networks. In *Proceedings of the 18th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2013.
- [47] Jörg Schneider, Michael Karrenbauer, Marcos Rates Crippa, and Hans Dieter Schotten. Efficient spectrum sharing in heterogeneous wireless environments. *Frequenz - Journal of RF-Engineering and Telecommunications*, 70(5-6):261ff, 5 2016.
- [48] Michael Karrenbauer, Jörg Schneider, Marcos Rates Crippa, and Hans D. Schotten. A Flexible Spectrum Management Solution. In *Proceedings of the 20th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2015.
- [49] CEPT ECC Electronic Communications Committee. ECC Recommendation (15)04 - Guidance for the implementation of a sharing framework between MFCN and PMSE video links within 2300-2400 MHz. ECC Recommendation (15)04, 2015.
- [50] CEPT ECC Electronic Communications Committee. LSA Demonstration carried out in the Mobile World Congress, Barcelona. ECC LSA Demonstration carried out in the Mobile World Congress, Barcelona, 2015.
- [51] ECC. ECC Report 58 - Technical sharing solutions for the shared use of the 2300-2400 MHz band for WBB and PMSE video links. ECC Report 58, 2009.
- [52] ECC. ECC Report 24 - Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend. ECC Report 24, Juni 2008.
- [53] ECC. ECC Report 159 - TECHNICAL AND OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR THE POSSIBLE OPERATION OF COGNITIVE RADIO SYSTEMS IN THE 'WHITE SPACES' OF THE FREQUENCY BAND 470-790 MHz . ECC Report 159, Januari 2011.
- [54] ECC. ECC Report 186 - Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach. ECC Report 186, 2013.
- [55] ITU. What is IMT-2000. Technical report, 2002.
- [56] IMT-Advanced. Technical report, Last Access: 05.12.2014.

- [57] ITU RADIOCOMMUNICATION STUDY GROUPS. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Technical report, 2007.
- [58] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Rückblick wrc-15. Website, 2016. Online erhältlich unter http://www.bmvi.de/DE/DigitalesUndRaumentwicklung/International/Weltfunkkonferenz/RueckblickWRC15/rueckblick-wfk-15_node.html; abgerufen am 10. September 2016.
- [59] Save Or Spectrum Helmut G. Bauer. Weltfunkkonferenz verschiebt digitale dividende 3 vorerst bis 2026 - aufgeschoben ist nicht aufgehoben. Website, 2015. Online erhältlich unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/aufgeschoben-nicht-aufgehoben/>; abgerufen am 10. September 2016.
- [60] C-PMSE. C-PMSE: Cognitive Program Making and Special Event, 2013.
- [61] GSM-R Operators Group. UIC Project EIRENE System Requirements Specification. Technical report, 2006.
- [62] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Radio transmission and reception (Release 9). Technical report, 2009.
- [63] ETSI. Extension of the current GSM-R spectrum, called E-GSM-R at 873-876 MHz paired with 918-921 MHz. Technical report, 2009.
- [64] Joseph Mitola. *Cognitive Radio — An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*. DTech thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Kista, Sweden, May 2000.
- [65] Milan. World mobile telecommunication market forecas. Technical report, 2006.
- [66] Telecommunication Union Radiocommunication Sector. Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications. Technical report, 2011.
- [67] International Telecommunication Union. World radiocommunication conference 2015 (wrc-15). Website, 2015. Online erhältlich unter https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/12/01/R12010000014A01PDFE.pdf; abgerufen am 8. Januar 2005.
- [68] Volker Blaschke, Holger Jaekel, Tobias Renk, Clemens Kloeck, and Friedrich K. Jondral. Occupation Measurements Supporting Dynamic Spectrum Allocation for Cognitive Radio Design. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, pages 50–57, Aug 2007.
- [69] Joseph Mitola and Gerald Q. Maguire Jr. Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4):13–18, Aug 1999.
- [70] Emmanuel Faussurier. Introduction of new spectrum sharing concepts:LSA and WSD, 2014.
- [71] ECC. ECC Report 205 - Licensed Shared Access (LSA). ECC Report 205, 2014.
- [72] ECC. ECC Report 132 - LIGHT LICENSING, LICENCE-EXEMPT AND COMMONS. ECC Report 132, 2009.

- [73] Sahin Albayrak. Introduction to Agent Oriented Technology for Telecommunications - Intelligent Agents for Telecommunications Applications. *Amsterdam: IOS Press*, 1999.
- [74] Ettus Research. Ettus SDR, 2014.
- [75] GNU Radio. GNU Radio, 2014.
- [76] Maria Stella Iacobucci. *Reconfigurable Radio Systems: Network Architectures and Standards*. Wiley, 2013.
- [77] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Technical report, 2004.
- [78] Maria Stella Iacobucci. IEEE 802.22: The First Standard Based on Cognitive Radio. Technical report, 2013.
- [79] IEEE 802.11 WG. Draft Amendment to STANDARD FOR Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS), IEEE 802.11e/ D8.0., 2004.
- [80] SSC Shared Spectrum Company. Darpa next generation communications program, 2014.
- [81] BBN Technologies. The XG Vision, 2007.
- [82] Mark McHenry, Karl Steadman, Alexe E. Leu, and Ed Melick. XG DSA Radio System. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*, pages 1–11, Oct 2008.
- [83] Filip Perich. Policy-Based Network Management for NeXt Generation Spectrum Access Control. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, pages 496–506, April 2007.
- [84] Filip Perich and Mark McHenry. Policy-based spectrum access control for dynamic spectrum access network radios. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 7(1):21 – 27, 2009. The Semantic Web and Policy.
- [85] Tim Irnich, Jonas Kronander, Yngve Selén, and Gen Li. Spectrum sharing scenarios and resulting technical requirements for 5G systems. In *PIMRC Workshops*, pages 127–132. IEEE, 2013.
- [86] Robert W. Brodersen, Adam Wolisz, Danijela Cabric, and Shridhar Mubaraq Mishra. Corvus: A Cognitive Radio Approach For Usage Of Virtual Unlicensed Spectrum, 2004.
- [87] Danijela Čabrić, Shridhar Mubaraq Mishra, Daniel Willkomm, Robert Brodersen, and Adam Wolisz. A Cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum. In *In Proc. of 14th IST Mobile Wireless Communications Summit 2005*, 2005.
- [88] Thorsten A. Weiss and Friedrich K. Jondral. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *Communications Magazine, IEEE*, 42(3):S8–14, Mar 2004.

- [89] Lars Berlemann, Stefan Mangold, and Bernhard H. Walke. Policy-based reasoning for spectrum sharing in radio networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 1–10, Nov 2005.
- [90] FCC. Initial evaluation of the performance of prototype TV- band white space devices, 2007.
- [91] Milind M. Buddhikot, Paul J. Kolodzy, Stephen Miller, Kathy Ryan, and John L. Evans. DIMSUMnet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum. In *World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a*, pages 78–85, June 2005.
- [92] Milind M. Buddhikot and Kathy Ryan. Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 299–307, Nov 2005.
- [93] Omer Ileri, Dragan Samardzija, and Narayan Mandayam. Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, pages 194–202, Nov 2005.
- [94] Prabhu Subramanian and Himanshu Gupta. Fast spectrum allocation in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks. In *in Proc. 2nd IEEE Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007)*, pages 320–330, 2007.
- [95] IEEE. IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks: Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology, 2010.
- [96] L.F. Cranor and S.S. Wildman. *Rethinking Rights and Regulations: Institutional Responses to New Communication Technologies*. Published in association with the Telecommunications policy research conference. MIT Press, 2003.
- [97] Arthur S. de Vany, Ross D. Eckert, Charles J. Meyers, Donald J. O'Hara, and Richard C. Scott. A Property System for Market Allocation of the Electromagnetic Spectrum: A Legal-Economic-Engineering Study. *Stanford Law Review*, 21(6), 1969.
- [98] Robert Matheson and Adele C. Morris. The Technical Basis for Spectrum Rights: Policies to Enhance Market Efficiency. *Telecommun. Policy*, 36(9):783–792, October 2012.
- [99] R. Paul Margie. Can You Hear Me Now? Getting Better Reception from the FCC's Spectrum Policy. *Stanford Technology Law Review*, 5, 2003.
- [100] RADIO SPECTRUM POLICY GROUP 2011. Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches, 2011.
- [101] DIGITALEUROPE. DIGITALEUROPE Position Paper on Licensed Shared Access (LSA) Common Understanding, Status and Next Steps, Februar 2013.

- [102] Bill Schilit, Norman Adams, and Roy Want. Context-Aware Computing Applications. In *Proceedings of the 1994 First Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, WMCSA '94, pages 85–90, Washington, DC, USA, 1994. IEEE Computer Society.
- [103] European Commission. Advanced Dynamic spectrum 5G mobile networks Employing Licensed shared access, 2014.
- [104] European Telecommunications Standards Institute. Reconfigurable radio systems (rrs); system architecture and high level procedures for operation of licensed shared access (lsa) in the 2 300 mhz - 2 400 mhz band. ETSI TS 103 235 V1.1.1, 2015.
- [105] European Telecommunications Standards Institute. Reconfigurable Radio Systems (RRS); System requirements for operation of Mobile Broadband Systems in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band under Licensed Shared Access (LSA) . ETSI TS 103 154 V1.1.1, 2015.
- [106] NSN. NSN demonstrates world's first Authorized Shared Access field trial with TD-LTE spectrum, 2013.
- [107] VTT Technical Research Centre of Finland 2012. TEKES Trial - Cognitive Radio Trial Environment (CORE), 2014.
- [108] Europäische Parlament. Directive 2002/20/EC of the European Parliament and of the Council on the authorisation of electronic communications networks and services, 2015.
- [109] Nokia. FutureWorks - optimising spectrum utilisation towards 2020, 2014.
- [110] ECC and CEPT. LIGHT LICENSING, LICENCE-EXEMPT AND COMMONS, 2009.
- [111] Sourangsu Banerji and Rahul Singha Chowdhury. ON IEEE 802.11: WIRELESS LAN TECHNOLOGY, 2013.
- [112] CEPT ECC. Report 159: TECHNICAL AND OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR THE POSSIBLE OPERATION OF COGNITIVE RADIO SYSTEMS IN THE 'WHITE SPACES' OF THE FREQUENCY BAND 470-790 MHz. Technical report, 2011.
- [113] METIS. Deliverable D5.1: Intermediate description of the spectrum needs and usage principles, 2013.
- [114] Lars Berlemann and Bernhard H. Walke. Spectrum load smoothing for optimized spectrum utilization - rationale and algorithm. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, volume 2, pages 735–740 Vol. 2, March 2005.
- [115] Lars Berlemann, Stefan Mangold, Guido R. Hiertz, and Bernhard H. Walke. Spectrum load smoothing for cognitive medium access in open spectrum. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*, volume 3, pages 1951–1956 Vol. 3, Sept 2005.
- [116] Stefan Mangold. *Analysis of IEEE 802.11e and Application of Game Models for Support of Quality-of-Service in Coexisting Wireless Networks*. PhD thesis, Aachen University, Jun 2003.

- [117] Ericsson. LTE License Assisted Access, 2015.
- [118] 3GPP - Dino Flore. Evolution of LTE in Release 13, 2015.
- [119] Sari Nielsen and Antti Toskala. LTE in Unlicensed Spectrum: European Regulation and Co-existence Considerations, 2014.
- [120] CoMoRa - Cognitive Mobile Radio (BMBF gefördertes Projekt), 2015.
- [121] Albert Banchs, Markus Breitbach, Xavier Costa, Uwe Doetsch, Simone Redana, Cinzia Sartori, and Hans D. Schotten. A novel radio multiservice adaptive network architecture for 5g networks. In *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, May 2015.
- [122] Afif Osseiran, Volker Braun, Taoka Hidekazu, Patrick Marsch, Hans D. Schotten, Hugo Tullberg, Mikko A. Uusitalo, and Malte Schellman. The foundation of the mobile and wireless communications system for 2020 and beyond: Challenges, enablers and technology solutions. In *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2013.
- [123] Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcão, and Jonathan Gibbons. The Active Badge Location System. In *IN PROCEEDINGS OF ACM Transactions on Information Systems*, pages 91–102, 1992.
- [124] Keith Cheverst, Nigel Davies, Keith Mitchell, Adrian Friday, and Christos Efstratiou. Developing a Contextaware Electronic Tourist Guide: Some Issues and Experiences. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 17–24, 2000.
- [125] Harry Chen, Tim Finin, and Anupam Joshi. An Ontology for Context-aware Pervasive Computing Environments. In *The Knowledge Engineering Review*, pages 197–207, 2003.
- [126] CoBrA: Context Broker Architecture. An intelligent broker for context-aware systems in smart spaces. Webside, March 2014. <http://cobra.umbc.edu/>; letzter Access: 27. March 2014.
- [127] Patrik Floreen, Michael Przybilski, Petteri Nurmi, Johan Koolwaaij, Anthony Tarlano, Matthias Wagner, Marko Luther, Fabien Bataille, Mathieu Boussard, Bernd Mrohs, and SianLun Lau. Towards a Context Management Framework for MobiLife. 2005.
- [128] Anna V. Zhdanova, Josip Zoric, Marco Marengo, Herma Van Kranenburg, Niels Snoeck, Michael Sutterer, Christian Räck, Olaf Droegehorn, and Stefan Arbanowski. Context Acquisition, Representation and Employment in Mobile Service Platforms. 2006.
- [129] C-CAST. C-CAST: Context Casting, 2008.
- [130] German-Lab. G-Lab: German Lab, 2008.
- [131] Bill Schilit and Marvin Theimer. Disseminating active map information to mobile hosts. *Network, IEEE*, 8(5):22–32, 1994.
- [132] Anind K. Dey. Context-aware computing: The CyberDesk project. In *AAAI 1998 Spring Symposium on Intelligent Environments*, pages 51–54, Palo Alto, 1998. AAAI Press.

- [133] Anind Kumar Dey. *Providing Architectural Support for Building Context-aware Applications*. PhD thesis, Atlanta, GA, USA, 2000. AAI9994400.
- [134] Guanling Chen and David Kotz. A survey of context-aware mobile computing research. Technical report, Dartmouth College, Computer Science, Hanover, NH, 2000.
- [135] Albrecht Schmidt, Michael Beigel, and Hans-Werner Gellerson. There is more to context than location: Environment sensing technologies for adaptive mobile user interfaces. Technical report, Computers and Graphics, 1998.
- [136] John McCarthy and Sasa Buvac. Formalizing Context (Expanded Notes). *Computing Natural Language*, pages 13–50, 1998.
- [137] Peter Brown, John Bovey, and Xian Chen. Context-aware applications: from the laboratory to the marketplace. *Personal Communications, IEEE [see also IEEE Wireless Communications]*, 4(5):58–64, 1997.
- [138] William Noah Schilit. *A System Architecture for Context-Aware Mobile Computing*. PhD thesis, Columbia University, 1995.
- [139] Nick Ryan, Jason Pascoe, and David Morse. Enhanced Reality Fieldwork: the Context-aware Archaeological Assistant. In V. Gaffney, M. van Leusen, and S. Exxon, editors, *Computer Applications in Archaeology 1997*, British Archaeological Reports, Oxford, October 1998. Tempus Reparatum.
- [140] Martin Brown. Supporting User Mobility. In *In Proceedings of IFIP World Conference on Mobile Communications*, pages 69–77. Chapman and Hall, 1996.
- [141] Jeremy R. Cooperstock, Koichiro Tanikoshi, Garry Beirne, Tracy Narine, and William A. S. Buxton. Evolution of a Reactive Environment. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '95*, pages 170–177, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [142] Scott Elrod, Gene Hall, Rick Costanza, Michael Dixon, and Ji des Rivières. Responsive Office Environments. *Commun. ACM*, 36(7):84–85, 1993.
- [143] Jun Rekimoto, Yuji Ayatsuka, and Kazuteru Hayashi. Augment-able Reality: Situated Communication through Physical and Digital Spaces. In *IN PROCEEDINGS OF THE 2 ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEARABLE COMPUTERS*, pages 68–75, 1998.
- [144] Stephen Fickas, Gerd Kortuem, and Zary Segall. Software Organization for Dynamic and Adaptable Wearable Systems. In *ISWC*, pages 56–64, 1997.
- [145] Boris Moltchanov, Christian Mannweiler, Jose Simoes, and Hans D. Schotten. Context-Awareness Enabling New Business Models in Smart Spaces. In *Proceedings of the 3rd Conference on Smart Spaces - ruSMART*, St. Petersburg, Russia, August 2010.
- [146] Christian Mannweiler. A Revenue Model for Context-aware Services. Presentation at University of St. Gallen Workshop on Business Modelling, September 2009.
- [147] Stephen S. Yau, Fariaz Karim, Yu Wang, Bin Wang, and Sandeep K. S. Gupta. Reconfigurable Context-Sensitive Middleware for Pervasive Computing. *IEEE Pervasive Computing*, 1(3):33–40, 2002.

- [148] Jason I. Hong and James A. Landay. An Architecture for Privacy-sensitive Ubiquitous Computing. In *Proceedings of the 2Nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '04, pages 177–189, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [149] Karen Henriksen, Jadwiga Indulska, Ted McFadden, and Sasitharan Balasubramaniam. Middleware for Distributed Context-Aware Systems. In *International Symposium on Distributed Objects and Applications (DOA)*, pages 846–863. Springer, 2005.
- [150] Vagner Sacramento, Markus Endler, Hana K. Rubinsztein, Luciana S. Lima, Kleider Gonçalves, Fernando N. Nascimento, and Giulliano A. Bueno. MoCA: A Middleware for Developing Collaborative Applications for Mobile Users. *IEEE Distributed Systems Online*, 5(10), 2004.
- [151] Sape Mullender. *Distributed Systems*. Addison-Wesley, December 1993.
- [152] Andrew D. Birell and Bruce Jay Nelson. Implementing remote procedure calls. *ACM Transactions on Computer Systems*, (2):39–59, February 1993.
- [153] Andrew S. Tanenbaum and Maarten van Steen. *Distributed Systems: Principles and Paradigms (2Nd Edition)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2006.
- [154] Michael Stal. Web Services: Beyond Component-based Computing. *Commun. ACM*, 45(10):71–76, October 2002.
- [155] Object Management Group (OMG). COBRA notification service. Document telecom/99-07-01, 1999.
- [156] Oracle. Java EE at a Glance. Website, March 2014. <http://www.oracle.com/technetwork/java/javaee/overview/index.html>; last access: 27. March 2014.
- [157] Douglas C. Schmidt and Steve Vinoski. Time-independent invocation and interoperable routing. *C++ report*, (11), April 1999.
- [158] Douglas C. Schmidt and Steve Vinoski. Programming asynchronous method invocations with cobra messaging. *C++ report*, (11), Februar 1999.
- [159] Sun Microsystems, Inc. Java Message Service (JMS) Specification 1.1, 2002.
- [160] Ralf Steinmetz and Klaus Wehrle, editors. *Peer-to-Peer Systems and Applications*, volume 3485 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- [161] Qin Lv, Pei Cao, Edith Cohen, Kai Li, and Scott Shenker. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks. In *Proceedings of the 16th International Conference on Supercomputing*, ICS '02, pages 84–95, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [162] Dimitrios Tsoumakos and Nick Roussopoulos. A comparison of peer-to-peer search methods. In Vassilis Christophides and Juliana Freire, editors, *WebDB*, pages 61–66, 2003.
- [163] Tsungnan Lin, Pochiang Lin, Hsinping Wang, and Chiahung Chen. Dynamic search algorithm in unstructured peer-to-peer networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 20(5):654–666, 2009.

- [164] Amina Chaabane, Fatma Abdennadher, Wassef Louati, and Mohamed Jmaiel. Handling churn in dht-based publish/subscribe systems. In *Network of the Future (NOF), 2012 Third International Conference on the*, pages 1–5, Nov 2012.
- [165] Jörg Eberspächer and Rüdiger Schollmeier. First and second generation of peer-to-peer systems. In *Peer-to-Peer Systems and Applications*, pages 35–56, 2005.
- [166] Ben Y. Zhao, John Kubiawicz, Anthony D. Joseph, Ben Y. Zhao, John Kubiawicz, and Anthony D. Joseph. The gnutella protocol specification v0.4. Technical report, letzter Zugriff: 03.12.2014.
- [167] Sylvia Ratnasamy, Paul Francis, Mark Handley, Richard Karp, and Scott Shenker. A scalable content-addressable network. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 31(4):161–172, August 2001.
- [168] Ion Stoica, Robert Morris, David Karger, M. Frans Kaashoek, and Hari Balakrishnan. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. pages 149–160, 2001.
- [169] Ben Y. Zhao, John Kubiawicz, Anthony D. Joseph, Ben Y. Zhao, John Kubiawicz, and Anthony D. Joseph. Tapestry: An infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing. Technical report, 2001.
- [170] Mihajlo A. Jovanovic, Fred S. Annexstein, and Ken Berman. Scalability issues in large peer-to-peer networks - a case study of gnutella. 01 2001.
- [171] Michael Knappmeyer, Saad Liaquat Kiani, Cristina Frà, Boris Moltchanov, and Nigel Baker. ContextML: A light-weight context representation and context management schema. In *Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 2010 5th IEEE International Symposium on*, pages 367–372, May 2010.
- [172] Harry Chen. An Intelligent Broker Architecture for Context-Aware Systems. Technical report, 2003.
- [173] Andreas Klein, Christian Mannweiler, Jörg Schneider, and Hans D. Schotten. An Advanced System Concept for Cognitive Spectrum Management and Utilization. In *Proceedings of the 10th Workshop Electrical and Electronic Engineering for Communication - EEEfCOM*, Ulm, Germany, May 2011.
- [174] Jeff Erickson. The Jordan Polygon Theorem, 2009.
- [175] Bundesnetzagentur, 2015.
- [176] Edward F. Drocella Jr., James C. Richards, Robert L. Sole, Fred Najmy, April Lundy, and Paul M. McKenna. 3.5 GHz Exclusion Zone Analyses and Methodology, 2015.
- [177] Abid Ullah, Sudeep Bhattarai, Jung-Min Park, Jeffery Reed, David Gurney, and Behnam Bahrak. Multi-Tier Exclusion Zones for Dynamic Spectrum Sharing. 2015.
- [178] Danijela Cabric, Artem Tkachenko, and Robert W. Brodersen. Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection. In *MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference*, pages 1–7, Oct 2006.

- [179] Danijela Cabric, Shridhar Mubaraq Mishra, and Robert W. Brodersen. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In *in Proc. the 38th. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, pages 772–776, 2004.
- [180] Ian F. Akyildiz, Brandon F. Lo, and Ravikumar Balakrishnan. Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey. *Phys. Commun.*, 4(1):40–62, March 2011.
- [181] Ghurumuruhan Ganesan and Ye Li. Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio. In *GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005*, volume 5, pages 5 pp.–2509, Dec 2005.
- [182] Yuan Yuan, Paramvir Bahl, Ranveer Chandra, Philip A. Chou, John I. Ferrell, Thomas Moscibroda, Srihari Narlanka, and Yunnan Wu. KNOWS: Cognitive Radio Networks Over White Spaces. In *2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 416–427, April 2007.
- [183] Sai Shankar N, Lucas Carvalho Cordeiro, and Kiran. Challapali. Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005*, pages 160–169, Nov 2005.
- [184] Harry Urkowitz. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523–531, April 1967.
- [185] Milton Abramowitz. *Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, Incorporated, 1974.
- [186] Marc P. Olivieri, Gregory Barnett, Alex Lackpour, Albert Davis, and Phuong Ngo. A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios. In *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005*, pages 170–179, Nov 2005.
- [187] DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT OTTAWA - Eric April. The Advantage of Cyclic Spectral Analysis, 1991. Abgerufen am 10. September 2016.
- [188] Aparna P.s and M. Jayasheela. Cyclostationary Feature Detection in Cognitive Radio using Different Modulation Schemes. *International Journal of Computer Applications*, 47(21):12–16, June 2012. Full text available.
- [189] Paoli Bertasi, Michele Bonazza, Fabian N. Moretti, and Enoch Peserico. Parisync: Clock synchronization in p2p networks. In *Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2009. ISPCS 2009. International Symposium on*, pages 1–6, 2009.
- [190] Andreas Dreher and Dirk Mohl. White paper - präzise uhrzeitsynchronisation. In *Der Standard IEEE 1588*. Hirschmann.
- [191] Jörg Schneider, Michael Karrenbauer, and Hans D. Schotten. LT-Sync: A Lightweight Time Synchronisation Protocol for P2P Networks based on IEEE 1588. In *Proceedings of the 19th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2014.

- [192] Bundesnetzagentur. Frequenz-Kompass: Neue Frequenzen für den weiteren Ausbau digitaler Infrastrukturen. Website, 2017. Online erhältlich unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Mobilfunk2020/Kompasspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1; abgerufen am 18. August 2017.
- [193] Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF). Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen. Website, 2017. Online erhältlich unter https://www.bmbf.de/pub/Industrie_4.0.pdf; abgerufen am 18. August 2017.
- [194] Jörg Schneider, Jeremias Weinreich, Christian Mannweiler, Andreas Klein, and Hans D. Schotten. Kostengünstige Implementierung einer Bluetooth-Indoor-Lokalisierungs-Plattform. In *Proceedings of the 16th ITG Fachtagung Mobilkommunikation*, Osnabrück, Germany, May 2011.
- [195] Daniel Fraunholz, Jörg Schneider, André Wendling, and Hans Dieter Schotten. Localization of objects in cyber physical production systems for industry 4.0 via heterogeneous camera environments. In *Mobilkommunikation. ITG-Fachtagung (ITG-263), Technologien und Anwendungen, May 11-12, Osnabrück*. VDE, VDE-Verlag, 5 2016.

A Aufbau der Datenbanken

Die Datenbanken spielen im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Rolle und lassen sich in drei funktionale Gruppen unterteilen, welche im Folgenden näher beschrieben werden. Hierbei handelt es sich nicht um Datenbanken zur Speicherung von Messwerten, vielmehr handelt es sich um statische Werte welche meist vom Gesetzgeber festgelegt worden sind. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben wurde, ist es für den Aufbau derartiger Datenbanken sinnvoll eine Unterteilung bezüglich der Lizenzierung der Frequenzbereiche vorzunehmen. Aus diesem Grund ist es daher sinnvoll auf der funktionalen Ebene eine hierarchische Ebene anzuwenden. In Abbildung A.1 ist der funktionale Aufbau eines solchen Datenbanksystems dargestellt.

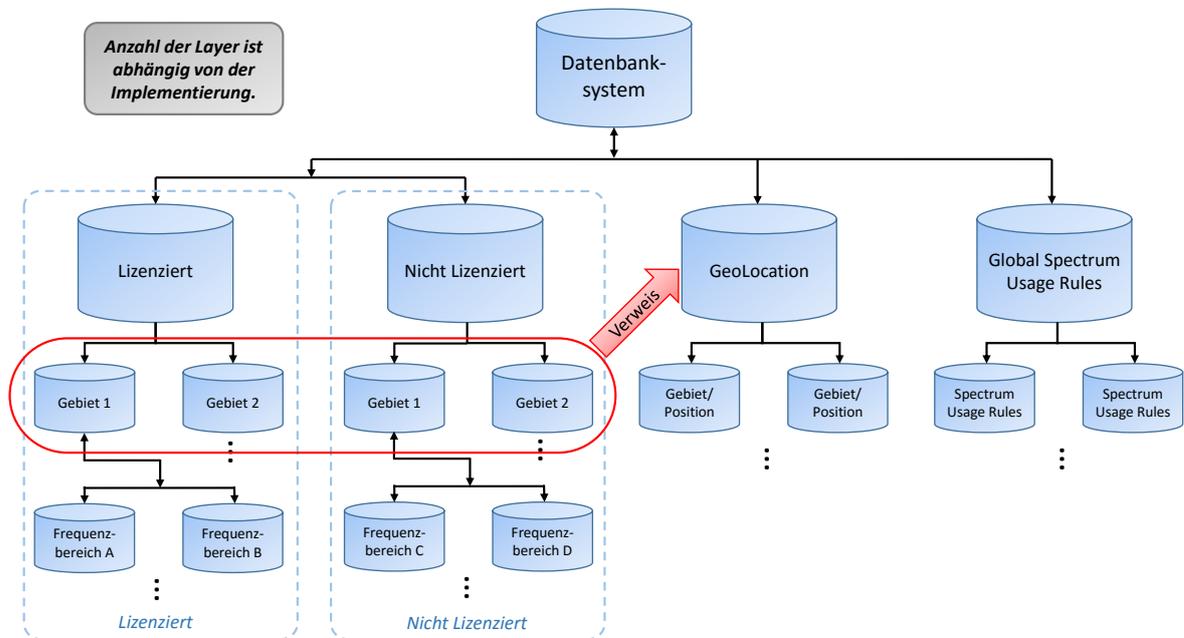


Abbildung A.1. Schematischer Aufbau des Datenbanksystems

A.1 Spektrums Datenbanken

Die Speicherung der Spektrumdaten erfolgt in den beiden linken Spalten von Abbildung A.1. Diese lässt sich funktional in eine Datenbankstruktur für die lizenzierten und für die nicht lizenzierten Frequenzen aufteilen. Eine Übersicht bezüglich der notwendigen Parameter wird in Tabelle A.1 gezeigt.

Tabelle A.1. Datenbank zur Zuordnung der Frequenzbereiche

| Parameter | Datentyp | Optional | Beschreibung |
|---------------------|----------|----------|---|
| ID | String | Nein | Name zur Beschreibung |
| StartFrequency | Double | Nein | Anfangsfrequenz |
| StartFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Frequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| StopFrequency | Double | Nein | Endfrequenz |
| StopFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Endfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| CenterFrequency | Double | Ja | Mittenfrequenz ($f_c = \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{2}$) |
| CenterFrequencyUnit | String | Ja | Einheit der Mittenfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| License | String | Nein | Lizenznehmer bzw. Applikation |
| Type | String | Nein | Art der Lizenzierung (lizenziert oder nicht lizenziert) |
| Link | String | Nein | Verweis auf zuständige Datenbank |
| Date | Date | Nein | Zeitpunkt der Anfrage |
| Expires | Date | Nein | Gültigkeit der hinterlegten Daten |
| Comment | String | Ja | Anmerkungen |

In Abbildung A.2 ist ein Auszug einer solche Datenbank aufgeführt.

| ID | StartFrequency | StartFrequencyUnit | StopFrequency | StopFrequencyUnit | CenterFrequency | CenterFrequencyUnit | License | Type | Link | Date | Expires | Comment |
|----|----------------|--------------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------|----------|------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 832 | MHz | 862 | MHz | 0 | | LTE-Uplink | licensed | | 2014-06-05 16:33:02 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 800MHz Uplink |
| 2 | 791 | MHz | 821 | MHz | 0 | | LTE-Downlink | licensed | | 2014-06-05 16:34:11 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 800MHz Downlink |
| 3 | 1710 | MHz | 1730 | MHz | 0 | | LTE-Uplink | licensed | | 2014-06-05 16:35:20 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 1800MHz Uplink1 |
| 4 | 1758 | MHz | 1780.5 | MHz | 0 | | LTE-Uplink | licensed | | 2014-06-05 16:41:48 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 1800MHz Uplink2 |
| 5 | 1805 | MHz | 1825 | MHz | 0 | | LTE-Downlink | licensed | | 2014-06-06 10:36:29 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 1800MHz Downlink1 |
| 6 | 1853 | MHz | 1875.5 | MHz | 0 | | LTE-Downlink | licensed | | 2014-06-05 16:41:29 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 1800MHz Downlink2 |
| 7 | 2500 | MHz | 2570 | MHz | 0 | | LTE-Uplink | licensed | | 2014-06-11 12:29:35 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 2.6 GHz FDD UL |
| 8 | 2620 | MHz | 2690 | MHz | 0 | | LTE-Downlink | licensed | | 2014-06-11 12:30:00 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 2.6 GHz FDD DL |
| 9 | 2570 | MHz | 2620 | MHz | 0 | | LTE-TDD | licensed | | 2014-06-11 12:40:03 | 0000-00-00 00:00:00 | LTE 2.6 GHz TDD |
| 10 | 876.2 | MHz | 914.8 | MHz | 0 | | GSM 900 UL | licensed | | 2014-06-11 12:48:40 | 0000-00-00 00:00:00 | GSM 900 UL |
| 11 | 921.2 | MHz | 959.8 | MHz | 0 | | GSM 900 DL | licensed | | 2014-06-11 12:50:01 | 0000-00-00 00:00:00 | GSM 900 DL |
| 12 | 1725.2 | MHz | 1730 | MHz | 0 | | GSM 1800 UL | licensed | | 2014-06-11 12:51:44 | 0000-00-00 00:00:00 | GSM 1800 UL |
| 13 | 1820.2 | MHz | 1875.4 | MHz | 0 | | GSM 1800 DL | licensed | | 2014-06-11 12:54:18 | 0000-00-00 00:00:00 | GSM 1800 DL |
| 14 | 1900.1 | MHz | 1920.1 | MHz | 0 | | UMTS DL | licensed | | 2014-06-11 15:34:14 | 0000-00-00 00:00:00 | UMTS DL 1 |
| 15 | 1920.3 | MHz | 1979.7 | MHz | 0 | | UMTS UL | licensed | | 2014-06-11 15:35:08 | 0000-00-00 00:00:00 | UMTS UL |

Abbildung A.2. Auszüge einer Datenbank zur Zuordnung der Frequenzbereiche

A.1.1 Lizenzierte Frequenzbereiche

Für die Verwendung beziehungsweise das Sharing von lizenzierten Frequenzbereichen ist es essentiell die Eigner des Spektrums zu kennen. Zur Erleichterung der Implementierung erfolgt eine Unterteilung in geeignete Frequenzabschnitte. Des Weiteren ermöglicht diese Art des Aufbaus eine Aufspaltung in unabhängige Datenbanken, welche erst durch das SMS zu einer Gesamtheit zusammengefügt werden. Zusätzlich ist eine verbesserte geografische Aufteilung möglich. In Tabelle A.2 ist der Aufbau einer solchen Datenbank dargestellt.

Tabelle A.2. Aufbau der Datenbank für lizenzierte Frequenzbereiche

| <i>Parameter</i> | <i>Datentyp</i> | <i>Optional</i> | <i>Beschreibung</i> |
|---------------------|-----------------|-----------------|---|
| ID | String | Nein | Name zur Beschreibung |
| StartFrequency | Double | Nein | Anfangsfrequenz |
| StartFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Frequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| StopFrequency | Double | Nein | Endfrequenz |
| StopFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Endfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| CenterFrequency | Double | Ja | Mittenfrequenz ($f_c = \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{2}$) |
| CenterFrequencyUnit | String | Ja | Einheit der Mittenfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| License | String | Nein | Server des Lizenzinhabers |
| Area | String | Nein | Beschreibung mittels PolygonID |
| Expires | Date | Nein | Gültigkeitsdauer |
| SharingType | String | Nein | Unterstütztes Sharing Verfahren |
| MaxTxPower | Double | Nein | Maximale Sendeleistung |
| MaxTxPowerUnit | String | Nein | Einheit der maximalen Sendeleistung (z.B. mW oder dBm) |
| MaxEIRP | Double | Nein | Maximales EIRP |
| MaxEIRPUnit | String | Nein | Einheit der maximalen EIRP (z.B. mW oder dBm) |
| MaxERP | Double | Nein | Maximales ERP |
| MaxERPUnit | String | Nein | Einheit des maximalen ERP (z.B. mW oder dBm) |

A.1.2 Nicht lizenzierte Frequenzbereiche

Wie bereits in den vorangehenden Kapiteln beschrieben wurde, gibt es unterschiedliche Anforderungen für die lizenzierten und nicht lizenzierten Frequenzbereiche bezüglich der Eigentumsverhältnisse. Hieraus resultiert eine Anpassung der Struktur der Datenbank bezüglich der verfügbaren Informationen. In Tabelle A.3 ist der Aufbau einer Datenbank für nicht lizenzierte Frequenzbereiche aufgeführt.

Tabelle A.3. Aufbau der Datenbank für nicht lizenzierte Frequenzbereiche

| <i>Parameter</i> | <i>Datentyp</i> | <i>Optional</i> | <i>Beschreibung</i> |
|---------------------|-----------------|-----------------|---|
| ID | String | Nein | Name zur Beschreibung |
| StartFrequency | Double | Nein | Anfangsfrequenz |
| StartFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Frequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| StopFrequency | Double | Nein | Endfrequenz |
| StopFrequencyUnit | String | Nein | Einheit der Endfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| CenterFrequency | Double | Ja | Mittenfrequenz ($f_c = \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{2}$) |
| CenterFrequencyUnit | String | Ja | Einheit der Mittenfrequenz (z.B. Hz, kHz, ...) |
| Area | String | Nein | Beschreibung mittels PolygonID |
| Expires | Date | Nein | Gültigkeitsdauer |
| MaxTxPower | Double | Nein | Maximale Sendeleistung |
| MaxTxPowerUnit | String | Nein | Einheit der maximalen Sendeleistung (z.B. mW oder dBm) |
| MaxEIRP | Double | Nein | Maximales EIRP |
| MaxEIRPUnit | String | Nein | Einheit der maximalen EIRP (z.B. mW oder dBm) |
| MaxERP | Double | Nein | Maximales ERP |
| MaxERPUnit | String | Nein | Einheit des maximalen ERP (z.B. mW oder dBm) |

A.2 Geolocation Datenbanken

Im Gegensatz zur Beschreibung der Geo-Location Datenbank in FM 52 und FM 53 beinhaltet die hier betrachtete Geolocation Datenbank, Abbildung A.1 dritte Spalte von links, ausschließlich Informationen bezüglich der verschiedenen Polygonzüge. Diese werden mittels deren Eckpunkten und der zugehörigen ID gespeichert. In Tabelle A.4 sind die notwendigen Parameter einer solchen Datenbank aufgeführt. Hierbei besteht jeder Eckpunkt aus einem Wertepaar zur Darstellung des Längen- und Breitengrades, sowie der Höhe.

Tabelle A.4. Aufbau der Geolocation Datenbank

| <i>Parameter</i> | <i>Datentyp</i> | <i>Optional</i> | <i>Beschreibung</i> |
|-------------------|------------------------|-----------------|--|
| PolygonID | String | Nein | Geografische Gültigkeit |
| Expires | Date | Nein | Zeitliche Gültigkeit |
| Eckpunkt 1 | <Double,Double,Double> | Nein | Longitude1, Latitude1, Height1 |
| Eckpunkt 2 | <Double,Double,Double> | Nein | Longitude2, Latitude2, Height2 |
| Eckpunkt 3 | <Double,Double,Double> | Nein | Longitude3, Latitude3, Height3 |
| ... | <Double,Double,Double> | Nein | Longitude, Latitude, Height |
| Eckpunkt <i>n</i> | <Double,Double,Double> | Nein | Longitude <i>n</i> , Latitude <i>n</i> , Height <i>n</i> |

Zur Beschreibung eines Polygons sind mindestens drei Eckpunkte notwendig. Um die Organisation zu vereinfachen lassen sich die Datenbanken in zwei Kategorien einteilen. In der Kategorie 1 sind alle Polygonzüge hinterlegt, welche für einen sehr langen Zeitraum als fest angesehen werden können (Größenordnung von Jahren). Beispiele hierfür sind Landesgrenzen. Die Kategorie 2 beinhaltet alle Einträge, welche nur eine beschränkte Gültigkeitsdauer aufweisen, wie beispielsweise Restricted Areas. Zur Handhabung dieses Sachverhaltes wird bei jeder Anmeldung eines Polygonzugs in der Kategorie 2 geprüft, wie dessen Relation zu

den relevanten Polygonzügen in der Kategorie 1 ist. Dies wird entsprechend bei der Kategorie 1 inklusive der Gültigkeitsdauer vermerkt .

A.3 Spektrum Usage Rules Datenbank

In der Spektrum Usage Rules Datenbank (Abbildung A.1 vierte Spalte von links) werden optionale Informationen bezüglich der Spektrumsnutzung hinterlegt. Diese können, zusätzlich zu den von Regulierer vorgegebenen Grenzwerten, vom Spektrumsinhaber definiert werden und müssen vom Lizenznehmer eingehalten werden. Für den Betrieb eines SMS haben sich die in Tabelle A.5 aufgeführten Parameter als relevant herausgestellt.

Tabelle A.5. Aufbau der Spektrum Usage Rules Datenbank

| <i>Parameter</i> | <i>Datentyp</i> | <i>Optional</i> | <i>Beschreibung</i> |
|------------------|-----------------|-----------------|--|
| PolygonID | String | Nein | Geografische Gültigkeit |
| Sharingtype | String | Nein | Liste der unterstützten Sharingverfahren |
| MaxDuration | long | Ja | Maximale zulässige Nutzungsdauer in ms |
| MaxTxPower | Double | Nein | Maximale Sendeleistung |
| MaxTxPowerUnit | String | Nein | Einheit der maximalen Sendeleistung (z.B. mW oder dBm) |
| MaxEIRP | Double | Nein | Maximales EIRP |
| MaxEIRPUnit | String | Nein | Einheit der maximalen EIRP (z.B. mW oder dBm) |
| MaxERP | Double | Nein | Maximales ERP |
| MaxERPUnit | String | Nein | Einheit des maximalen ERP (z.B. mW oder dBm) |

Die hier angegebenen Werte für MaxTxPower, MaxEIRP und MaxERP müssen stets immer klein oder gleich der in Tabelle A.2 sein.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Liste der aufgeführten Parameter nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und dynamisch ergänzt werden kann. Es muss jedoch beachtet werden, dass jeder Lizenznehmer in der Lage sein muss die definierten Parameter beziehungsweise Restriktion interpretieren und umsetzen zu können.

A.4 Einbindung in das SMS

Die Einbindung in das SMS erfolgt über die zuständige SME, wobei sich die Zuordnung aus der Abbildung 4.6 in Kapitel 4, sowie aus dem relevanten Frequenzbereich der Daten ergibt. Im Gegensatz zu der schematischen Darstellung in Abbildung A.1 ist keine physikalische Verbindung zwischen den einzelnen Datenbanken vorhanden. Jegliche Kommunikation wird über die zuständigen SME abgewickelt. In Abbildung A.3 wird der Sachverhalt in einer vereinfachten Darstellung wiedergegeben.

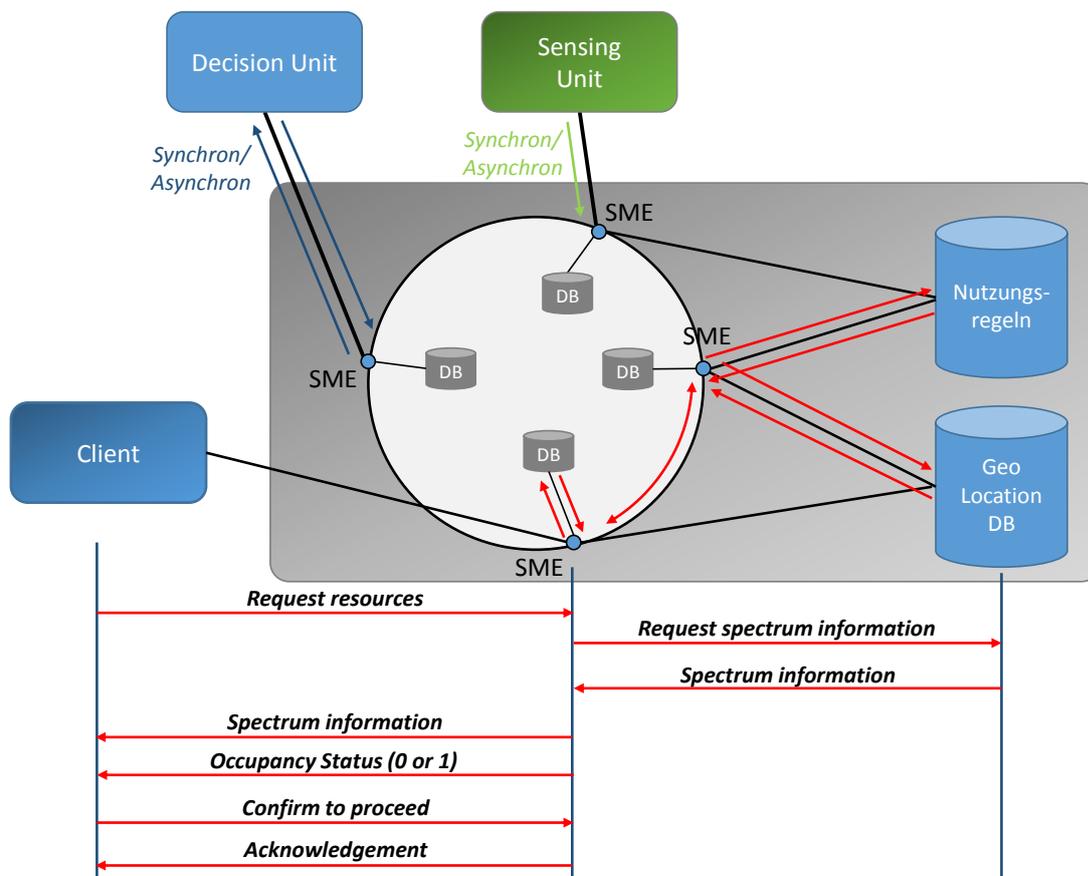


Abbildung A.3. Schematischer Aufbau der Datenbankanbindung an eine SMS

Die Kommunikation zwischen den SMEs und den Datenbanken erfolgt auf SpectrumML Basis.

B Loadbalancing

Bei der Betrachtung des Loadbalancing muss zwischen der Einbindung einer neuen SME und dem Lastausgleich innerhalb der aktiven Knoten unterschieden werden.

B.1 Einbindung eines Knotens

In Abbildung B.1 ist der systematische Ablauf eines Einbindungsprozesses einer neuen SME in ein bestehendes System dargestellt.

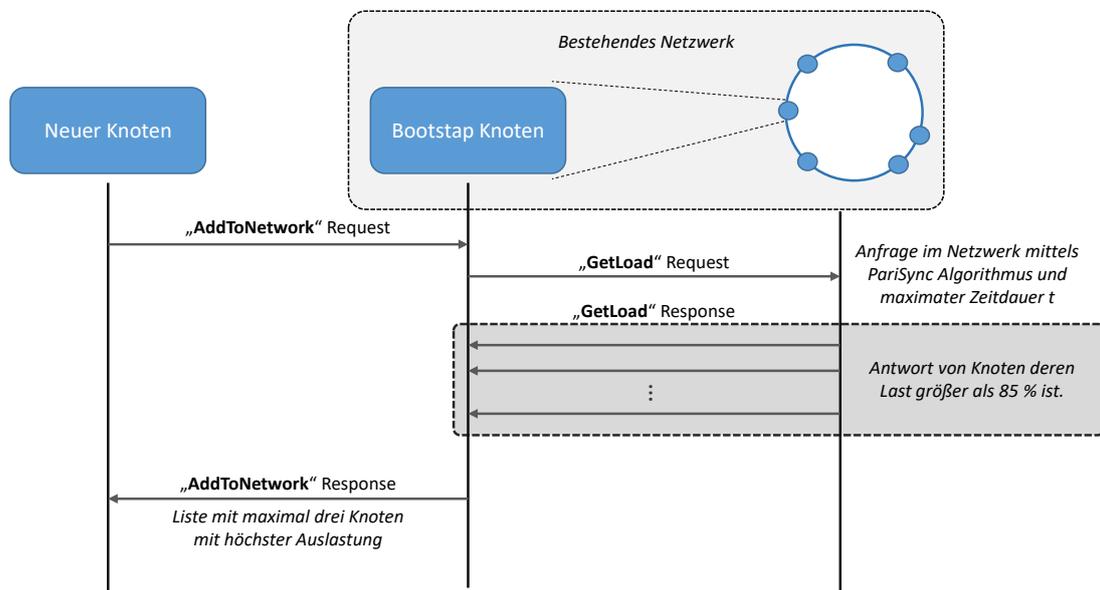


Abbildung B.1. Schematische Darstellung der Einbindung einer zusätzlichen SME

Der korrelierende Programmablaufplan ist in Abbildung B.2 aufgeführt.

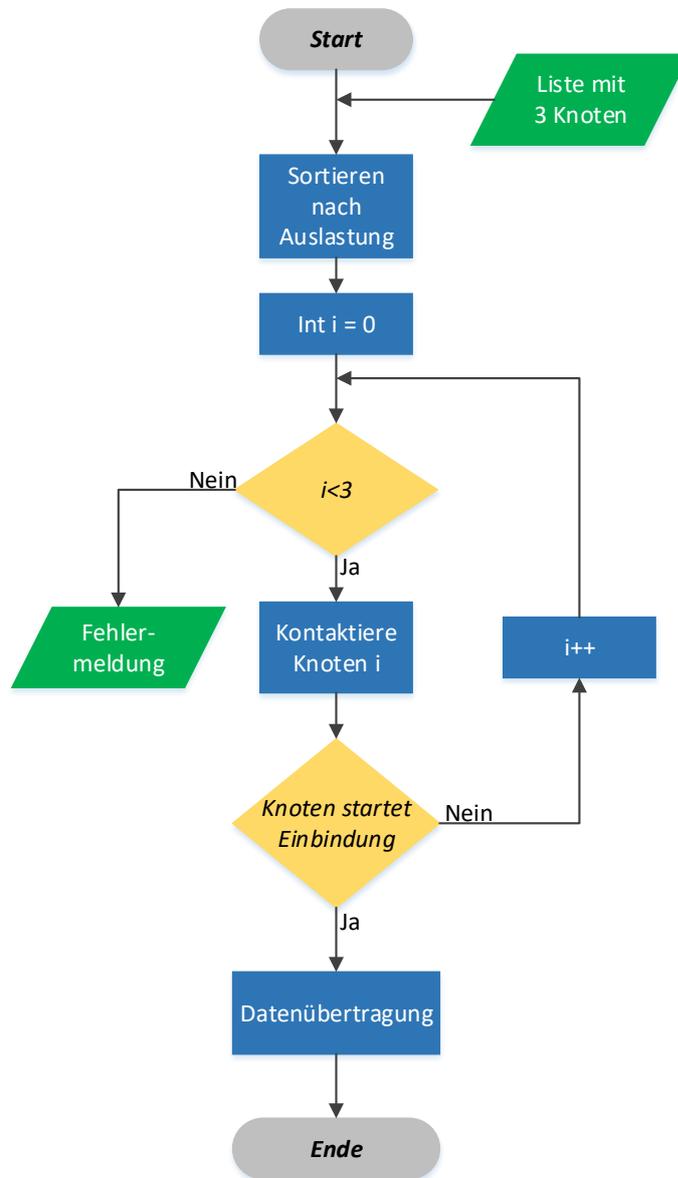


Abbildung B.2. Programmablaufplan zur Einbindung einer zusätzlichen SME

B.2 Lastausgleich innerhalb des Systems

Der Lastausgleich findet immer zwischen den benachbarten Knoten beziehungsweise SMEs statt und wird von dem Knoten initiiert, welcher eine Auslastung größer als 85% aufweist. In Abbildung B.3 ist der Ablauf eines Lastausgleichs dargestellt.

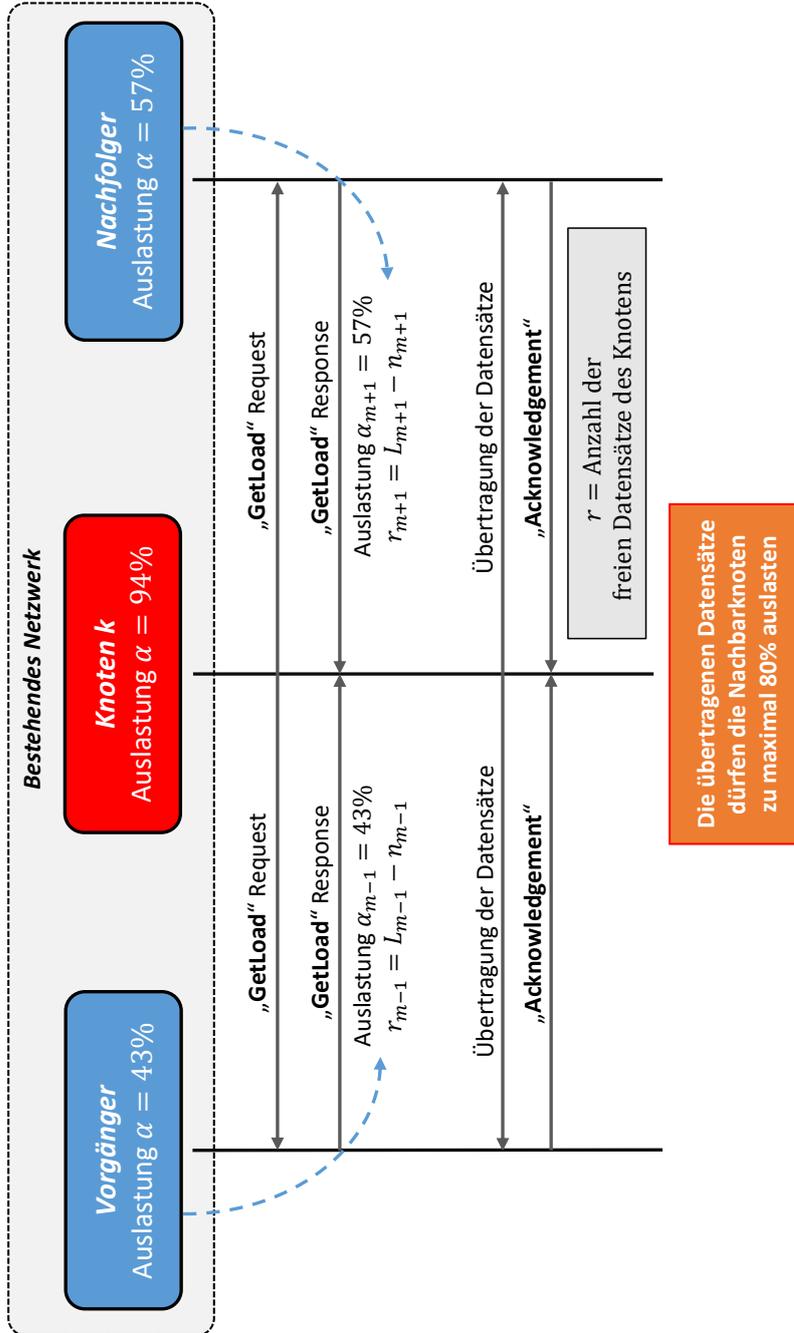


Abbildung B.3. Loadbalancing innerhalb des Netzwerks zwischen den benachbarten Knoten

C Spectrum Markup Language und Data Control Language

Für die Darstellung der eigentlichen Nutzdaten sowie der notwendigen Steuerinformationen werden XML-basierte Darstellungen verwendet. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese beiden XML-Derivate näher beschrieben.

C.1 Spectrum Markup Language

Die Spectrum Markup Language wird für die Darstellung der eigentlichen Nutzinformation sowie Kommunikation zwischen den Clients und der SME verwendet. In den Abbildungen C.1 bis C.6 ist der Aufbau der Daten, basierend auf den Ergebnissen in Kapitel 5, aufgeführt.



Abbildung C.1. Data Entry in SpectrumML

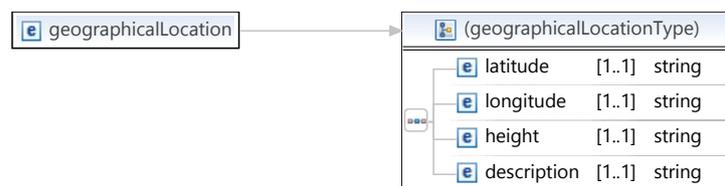


Abbildung C.2. Geographical Location Entry in SpectrumML

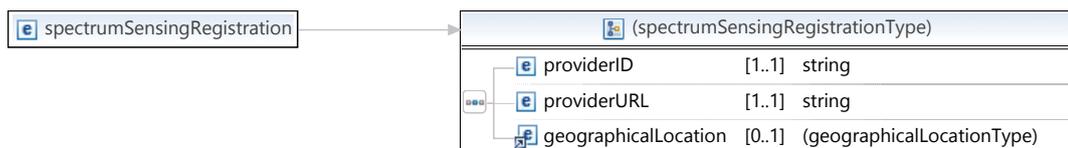


Abbildung C.3. Registration Entry in SpectrumML

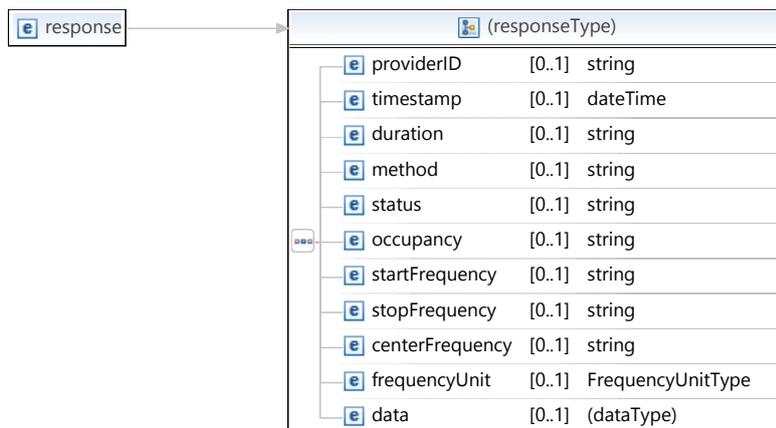


Abbildung C.4. Response Entry in SpectrumML

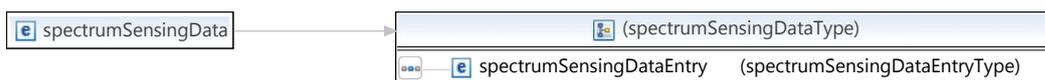


Abbildung C.5. SpectrumSensingData Entry in SpectrumML

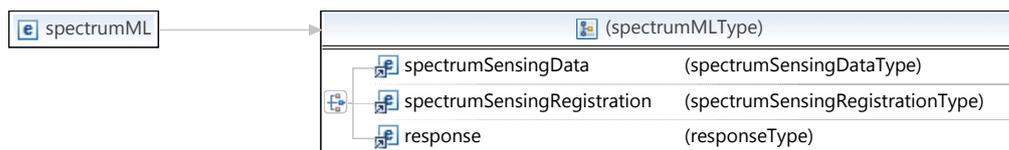


Abbildung C.6. Type Entry in SpectrumML

C.2 Data Control Language

Die DCL ist im Gegensatz zu Spectrum Markup Language nicht XML-basiert. Hierbei handelt es sich um eine eigenständige Protokoll- und Datenstruktur auf Textbasis. Alle übertragenen Daten sind wie folgt aufgebaut:

<Zieladresse>:<Quelladresse>:<RequestID>:<Befehl>:<Sendezeitpunkt>:<Datenlänge>:<Daten>.

In Abbildung C.7 ist der Nachrichtenaufbau dargestellt.

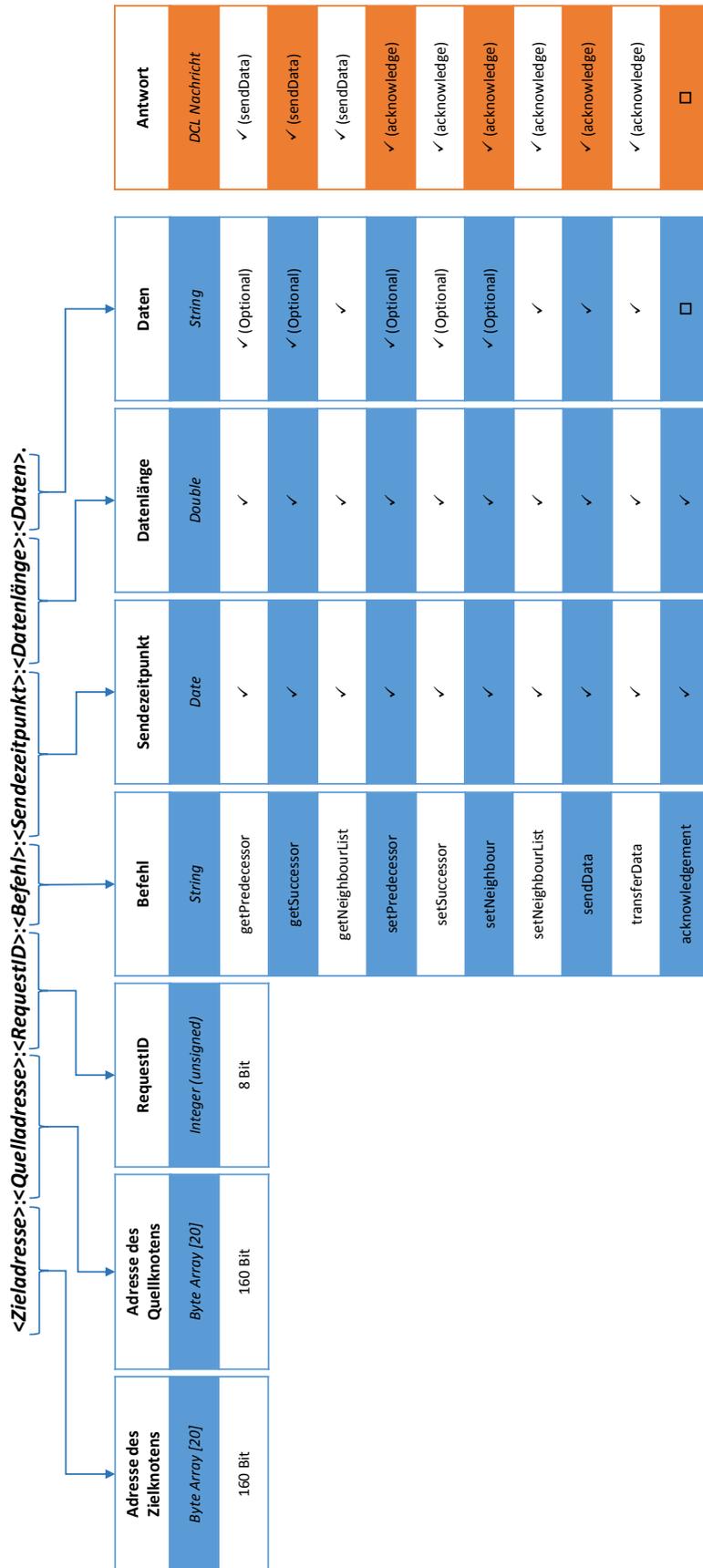


Abbildung C.7. Data Control Language (DCL) Nachrichtenstruktur mit zugehörigen Parametern

D Bootstrapping

Der Bootstrapping-Prozess beschreibt die Einbindung von neuen Knoten in ein SMS. Hierbei beinhaltet jede neue SME beziehungsweise jeder Knoten eine Liste von sogenannten Superpeers und zusätzlich noch eine Liste von dynamischen URL-Adressen welche dann entsprechend auf Superpeers verweisen. Die Superpeers fungieren als „Einwahlpunkte“ für neu in das System eintretende Knoten. In Abbildung D.1 ist der Ablauf eines solchen Bootstrapping-Vorgangs dargestellt.

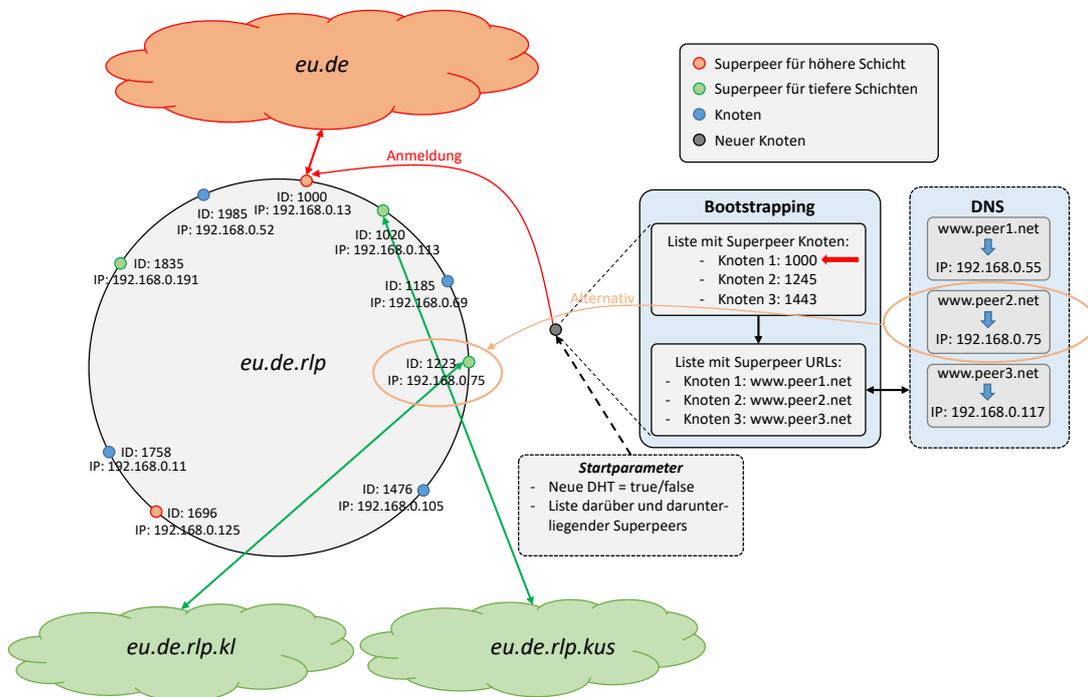


Abbildung D.1. Bootstrapping Prozess

Im ersten Schritt versucht die SME zuerst die fest eingetragenen Superpeers zu erreichen. Erst wenn dies fehlgeschlagen ist erfolgt eine Kontaktierung der DNS Adressen.

Die Integration eines SME-Rings in die hierarchische Struktur beruht auf einem identischen Verfahren. Mit Hilfe der vier Superpeers (vergleiche Kapitel 4) erfolgt die Integration in das System. Hierzu wird beim Start das Hierarchielevel und eine DNS-basierte Liste an darüber- und darunterliegenden Superpeers mit übergeben. Die Superpeer-Node List ist für den „normalen“ Betrieb eines Knotens irrelevant und muss nur beim Neuaufbau eines Ringes bestimmt werden.

E Programmablaufpläne

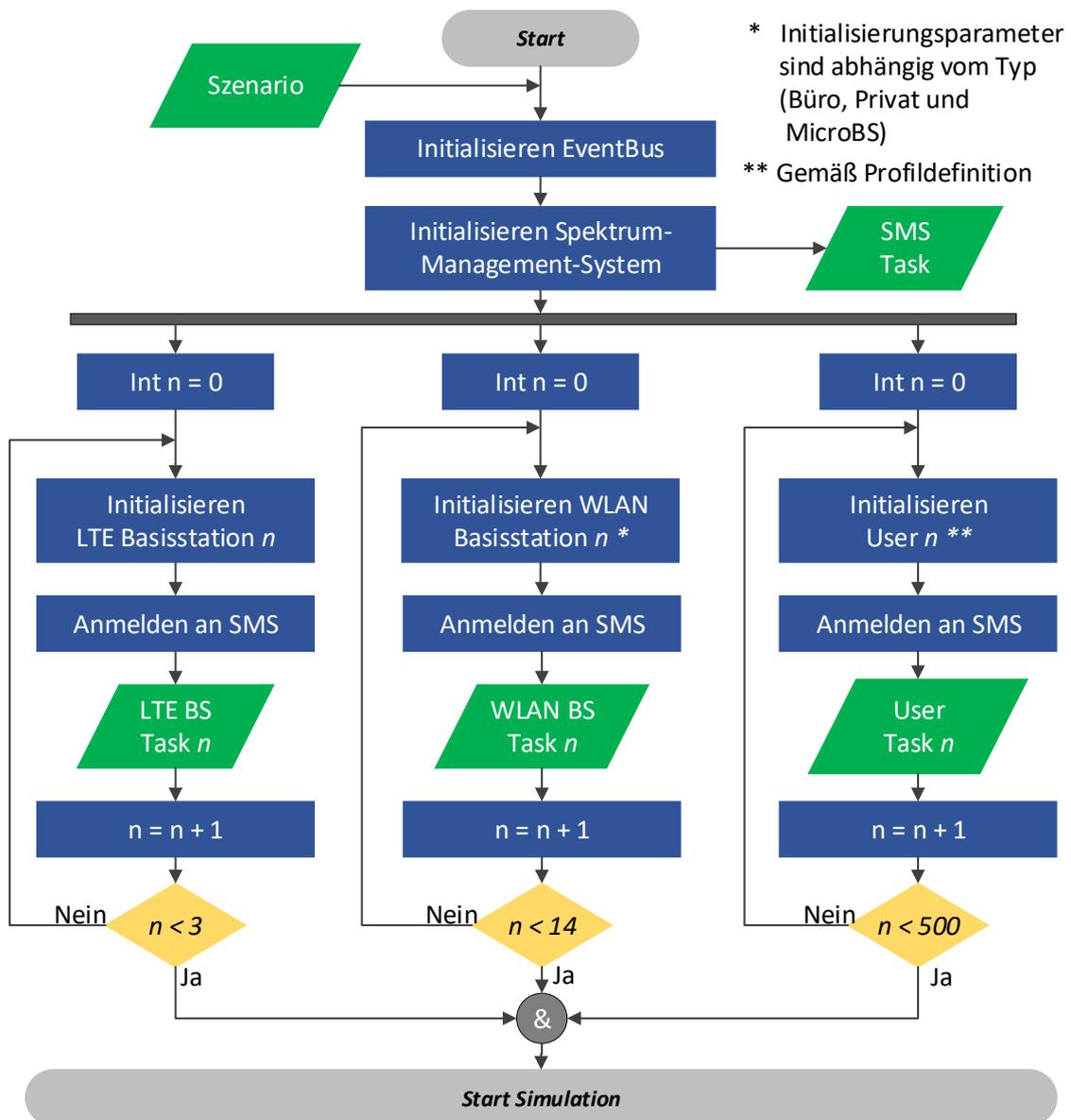
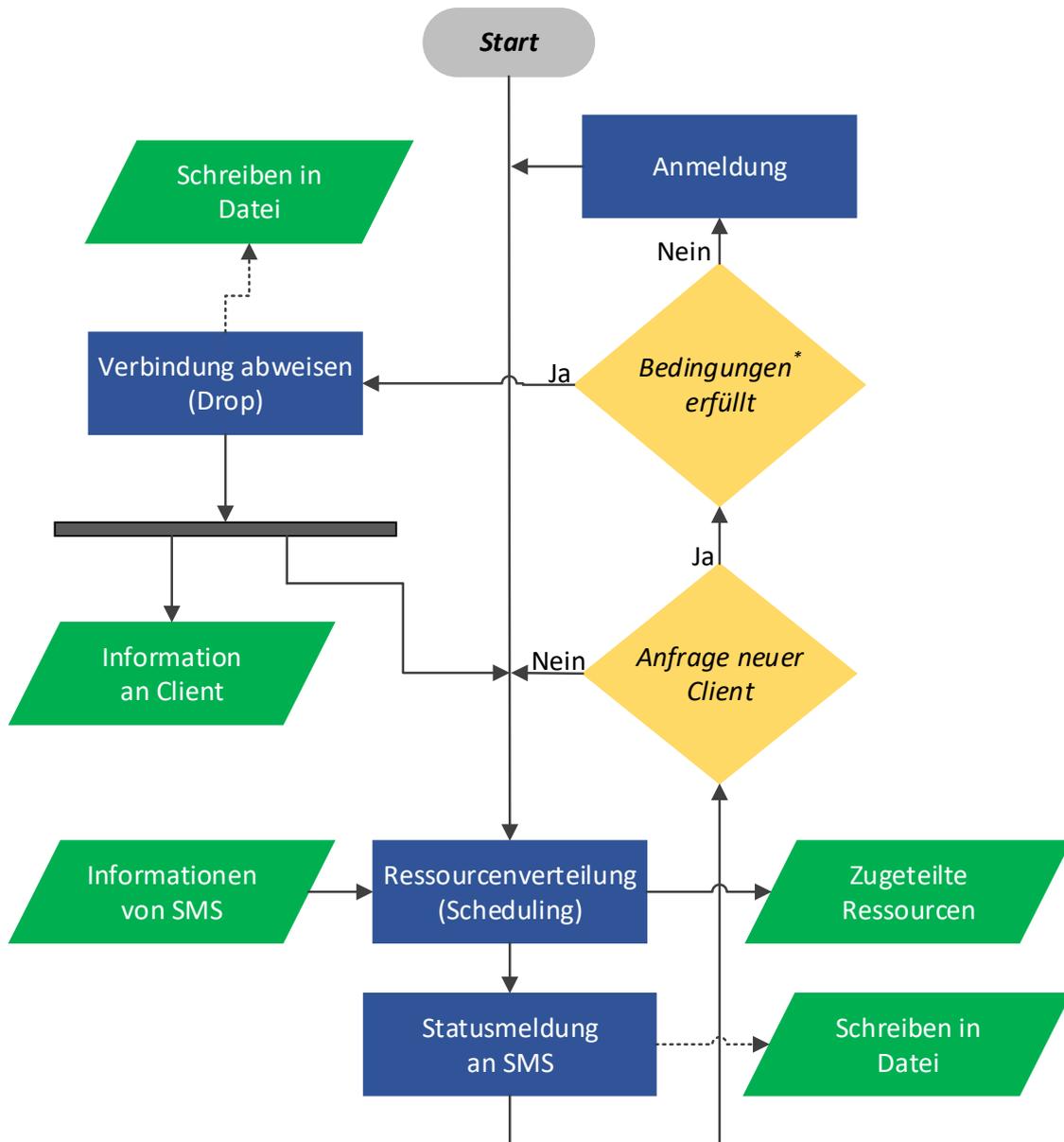


Abbildung E.1. Programmablaufplan der Main Klasse



* Diese Abfrage ist nur für den Betrieb ohne SMS relevant.
Die gestellten Bedingungen beinhalten QoS-Anforderungen wie beispielsweise benötigter Durchsatz. Sind diesbezüglich keine Werte spezifiziert, so bezieht sich dies ausschließlich auf die maximale möglichen Anzahl von Nutzern pro BS.

Abbildung E.2. Programmablaufplan einer Basisstation

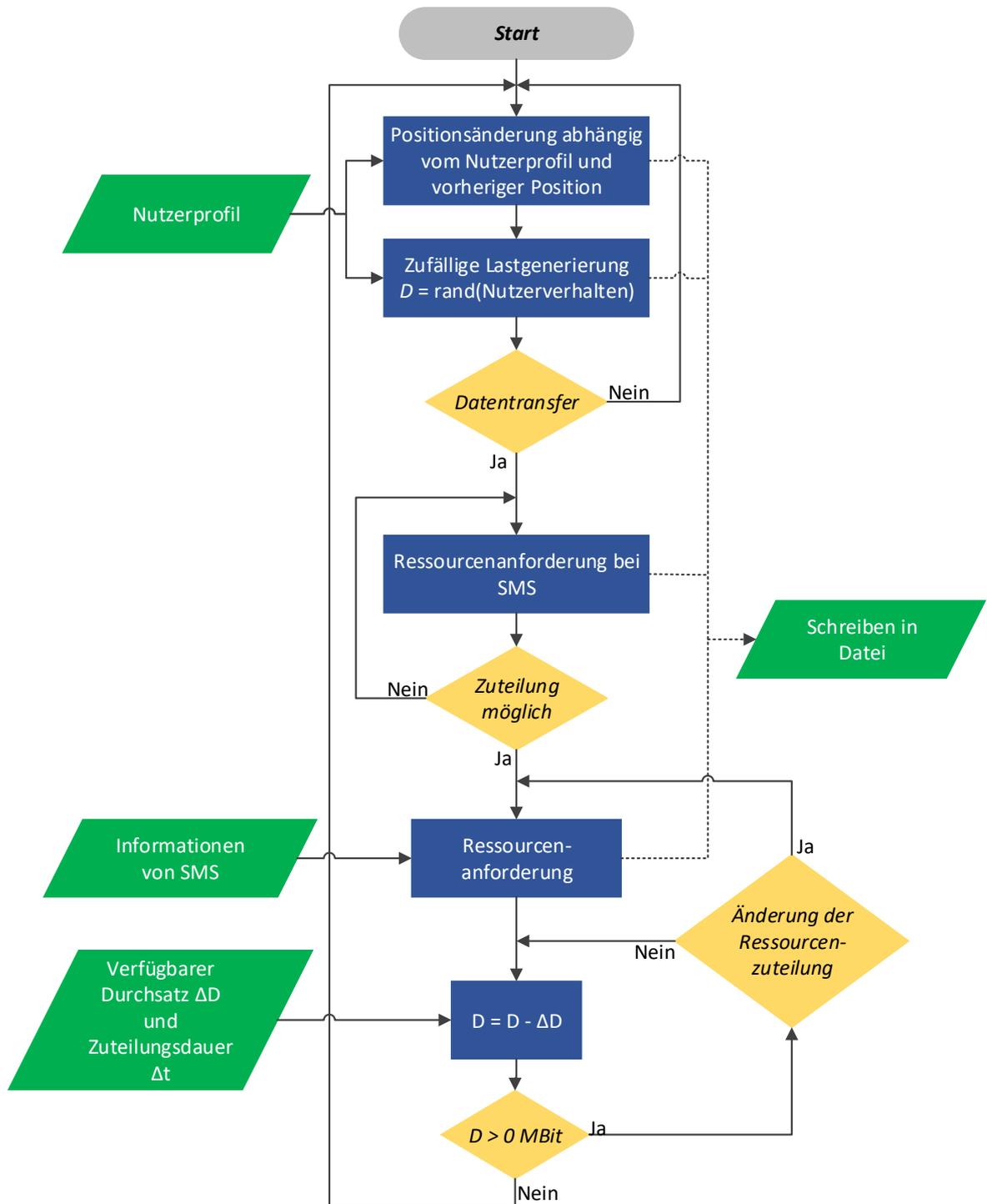


Abbildung E.3. Programmablaufplan eines Clients

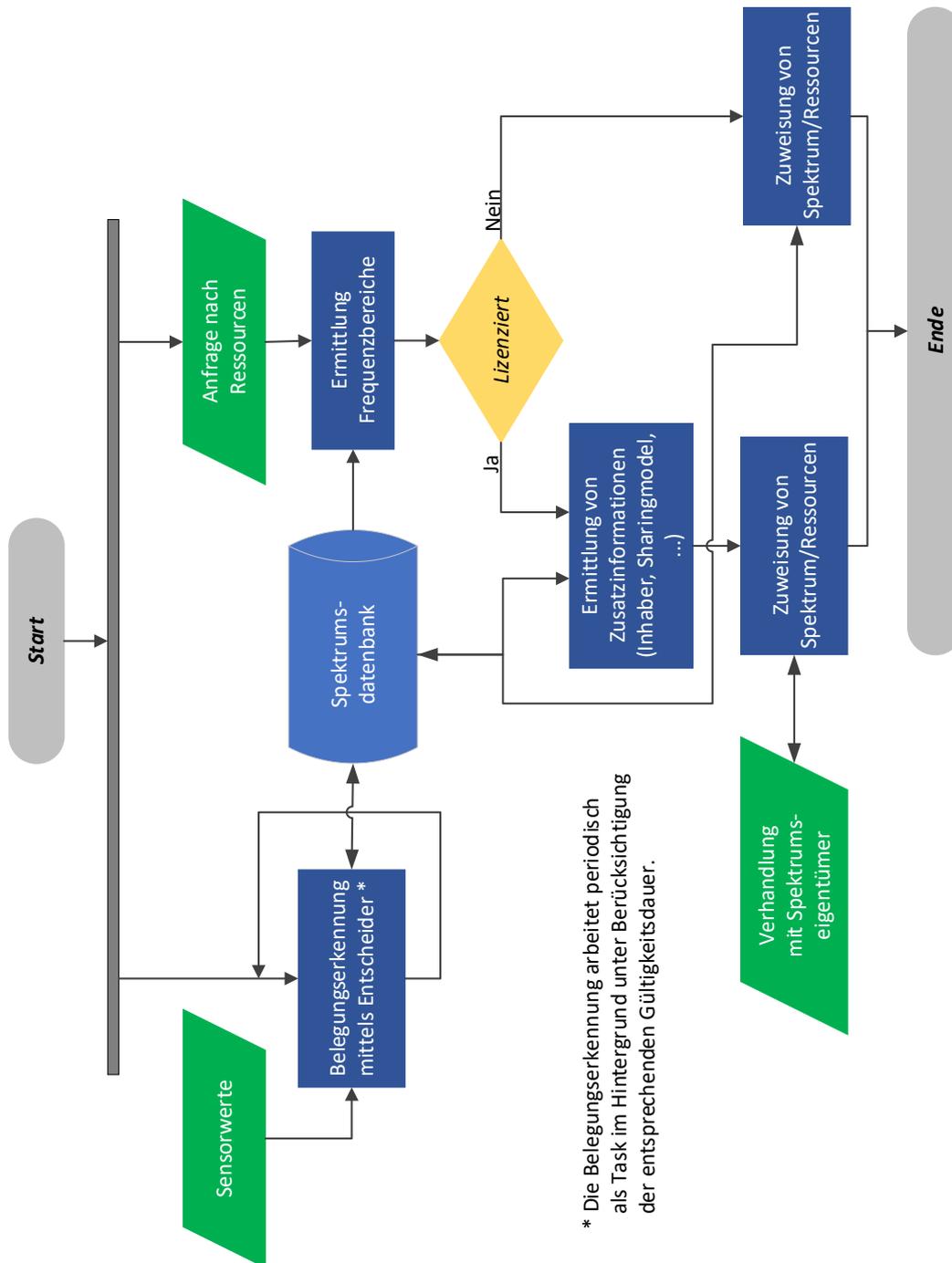


Abbildung E.4. Programmablaufplan des SMSs

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name: Jörg Martin Schneider
Geburtsort: Kaiserslautern

Berufserfahrung

05/2015 - heute
DFKI - Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Forschungsgruppe Intelligente Netze, Kaiserslautern
Researcher & Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Kaiserslautern

10/2008 - 05/2015
Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Funkkommunikation und Navigation
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Ausbildung

04/2006 - 09/2008
Technische Universität Kaiserslautern
Studiengang Informationstechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur

09/2001 - 04/2006
Fachhochschule Kaiserslautern
Studiengang Nachrichten- und Telekommunikationstechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur(FH)

09/1999 - 08/2001
Technische Universität Kaiserslautern
Studium für Lehramt an Realschulen: Mathe und Physik

09/1996 - 06/1999
Technisches Gymnasium Kaiserslautern, BBS 1
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife (Abitur)

09/1990 - 06/1996
Konrad Adenauer Realschule Landstuhl
Abschluss: Qualifizierter Sekundarabschluss I