Institut für industrielle Informationstechnik
Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Prof. Dr.-Ing. Uwe Meier

Institut für Telekommunikation und Hochfrequenztechnik
Universität Bremen
Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy

Institut für Automation und Kommunikation e.V.
Magdeburg
Dr.-Ing. Lutz Rauchhaupt

Kognitive Mediumzugangsalgorithmen für industrielle Funkanwendungen - KoMe

Cognitive Medium Access Algorithms for Industrial Wireless Systems

Förderkennzeichen: IGF 18350 BG

Laufzeit: 1.07.2015 - 30.04.2018

Abschlussbericht

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18350 BG der Forschungsvereinigung FKM / DFAM wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kurzfassung:

Neue Konzepte zur Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten fordern die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller am Wertschöpfungsprozess beteiligten Instanzen. Ein maßgeblicher und zukünftig noch zunehmender Bestandteil dieser Vernetzung ist die Funkkommunikation.

Ziel dieses Projektes war, dass für möglichst viele industrielle Funkanwendungen ein begrenztes Funkspektrum effizient und kollisionsfrei nutzbar sein soll, wobei sich der Kommunikationsbedarf und der Funkkanal dynamisch ändern können, aber die Anforderungen an Verfügbarkeit und Determinismus stets zu erfüllen sind.

Der Lösungsweg basiert auf einer zweistufigen Migrationsstrategie. In einer ersten Phase wurden Lösungsansätze für ein zentrales Koexistenzmanagement entwickelt, welche die heute eingesetzten Funkkommunikationslösungen berücksichtigen. Für das Koexistenzmanagement wurden zunächst neuartige Quality-of-Coexistence-Kenngrößen (QoC) definiert. Bei der Ressourcenzuweisung wurden der Frequenzkanal und die Sendeleistung berücksichtigt. Eine Variation der Sendeleistung beeinflusst die Versorgungs- und Störreichweite und adressiert damit die räumliche Dimension. Der entwickelte Algorithmus 'Kassandra' optimiert die Ressourcenverteilung innerhalb eines Netzwerkgraphen zugunsten eines optimalen Koexistenzzustands. In der zweiten Phase wurden neuartige Lösungsvorschläge für einen systemspezifischen Mediumzugriff eines neuen KoMe-Funksystems und dessen Integration in das Konzept des zentralen Koexistenzmanagements erarbeitet. Die durchgeführten Arbeiten haben zu neuen und vielversprechenden Konzepten geführt: Die Spektralformung wurde mit dem Konzept 'Generalized Frequency Division Multiplex' (GFDM) adressiert, die Spektralerfassung wurde durch die Entwicklung von Compressive-Edge-Spectrum-Sensing (CESS) wesentlich verbessert und die umfassende Bewertung existierender Verfahren zum Mediumzugriff ermöglichte die Entwicklung des neues Schedulingkonzepts „Fair Error“.

Die Lösungen wurden exemplarisch auf einer Validierungsplattform implementiert und unter realen Einsatzbedingungen bezüglich ihrer Effizienz für Anwendungen in Maschinen und Anlagen getestet. Die erzielten Forschungsergebnisse sind wesentliche Bestandteile eines neuen Verfahrens zur Realisierung eines automatisierten Koexistenzmanagements nach IEC 62657-2.

Das Vorhaben wurde von drei Forschungsstellen bearbeitet und von neun KMUs, vier weiteren Unternehmen und einem Industrieverband im projektbegleitenden Ausschuss unterstützt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	132 S., 102 Abb., 36 Tab., 57 Lit.
Beginn der Arbeiten:	1.07.2015
Ende der Arbeiten:	30.04.2018
Zuschussgeber:	BMWi / IGF-Nr. 18350 BG
Forschungsstellen:	Institut für industrielle Informationstechnik (inIT), Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Leiter: Prof. Lohweg Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak), Leiter: Prof. Jumar Institut für Telekommunikation und Hochfrequenztechnik (ITH), Universität Bremen, Leiter: Prof. Dekorsy
Bearbeiter und Verfasser:	Dr.-Ing. C. Bockelmann, Prof. Dr.-Ing. A. Dekorsy, Prof. Dr.-Ing. U. Meier, Dr.-Ing. L. Rauchhaupt, M. Sc. Darina Schulze, B. Sc. N. Wiebusch
Vorsitzender des Projekt-	

begleitenden Ausschusses:	Dipl.-Ing. Thomas Neugebauer, Götting KG
Vorsitzender wiss. Beirat:	Thomas Pilz, Pilz GmbH & Co. KG, Ostfildern

[Leerseite für doppelseitigen Druck]

Inhaltsverzeichnis

1 Management Report ... 7
2 Einleitung ... 11
3 Anforderungsanalyse ... 13
3.1 Anforderungen der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses ... 13
3.2 Anforderungen an das Zeitverhalten ... 15
3.3 Notation der Anforderungen ... 16
3.4 Zusammenfassung der Anforderungen ... 17
3.5 Kenngrößen für die Bewertung von Koexistenz und Mediumseffizienz ... 26
4 Konzept ... 34
5 Koexistenzmanagement ... 35
5.1 Bewertung der existierenden Lösungen ... 35
5.2 Bestehende Netzwerkmanagementlösungen in KoMe ... 40
5.3 Konzeptentwicklung für das Koexistenzmanagement ... 42
5.4 Koexistenzmanagement - Konzeptprüfung ... 48
5.5 Koexistenzmanagement - Implementierung und Test ... 52
5.6 Zusammenfassung ... 57
6 Kognitiver Mediumzugriff ... 59
6.1 KoMe-Funksystem ... 59
6.2 KoMe-Scheduling ... 61
6.3 Modellierung der Bitübertragungsschicht ... 63
6.4 Spectral Sensing Unit ... 69
7 Validierungsplattform ... 81
7.1 Definition der Validierungsziele ... 81
7.2 Validierung KoMe-System ... 81
7.3 Validierung KoMe-Funkkommunikationssystem ... 86
7.4 Spezifikation von Interferenzprofilen ... 89
7.5 Spezifikation von Testreihen ... 102
7.6 Methoden zur Bewertung des Spektrum Sensings ... 103
8 CCP Kommunikation ... 106
8.1 Allgemeines ... 106
8.2 CCP- Architektur ... 106
8.3 Analyse von IT Kommunikationskonzepten ... 109
8.4 Implementierung der CCP- Kommunikation ... 111
9 Systemvalidierung ... 112
9.1 Architektur der Validierungsplattform ... 112
9.2 Implementierungen für die KoMe-Validierungsplattform ... 112
9.3 Validierung ... 123

10 Zusammenfassung und Ausblick 130
11 Anhang 131
11.1 Literaturverzeichnis 131
11.2 Begriffsdefinitionen 133
11.3 Abkürzungsverzeichnis 134

1 Management Report

New concepts for the organization and control of the entire value chain along the life cycle of products require the availability of all relevant information in real time by means of networking of all instances involved in the value chain. A central component of this network, and one which will become even more important in the future, is radio communication.

The objective of this project was to utilize a radio spectrum efficiently and collision free for as many industrial radio applications as possible, allowing both the communication need and the radio channel to change dynamically while constantly meeting all requirements of availability and determinism.

The solution is based on a two-step migration strategy (Figure 1-1). During the first phase approaches for a central coexistence management were developed, taking into account radio communication solutions that are currently in use. As part of the analysis of existing solutions, network management solutions were examined for their applicability in the coexistence management of industrial radio systems based on the parameters found in the requirements analysis. It has been determined that none of the existing solutions are optimally suited for the application.

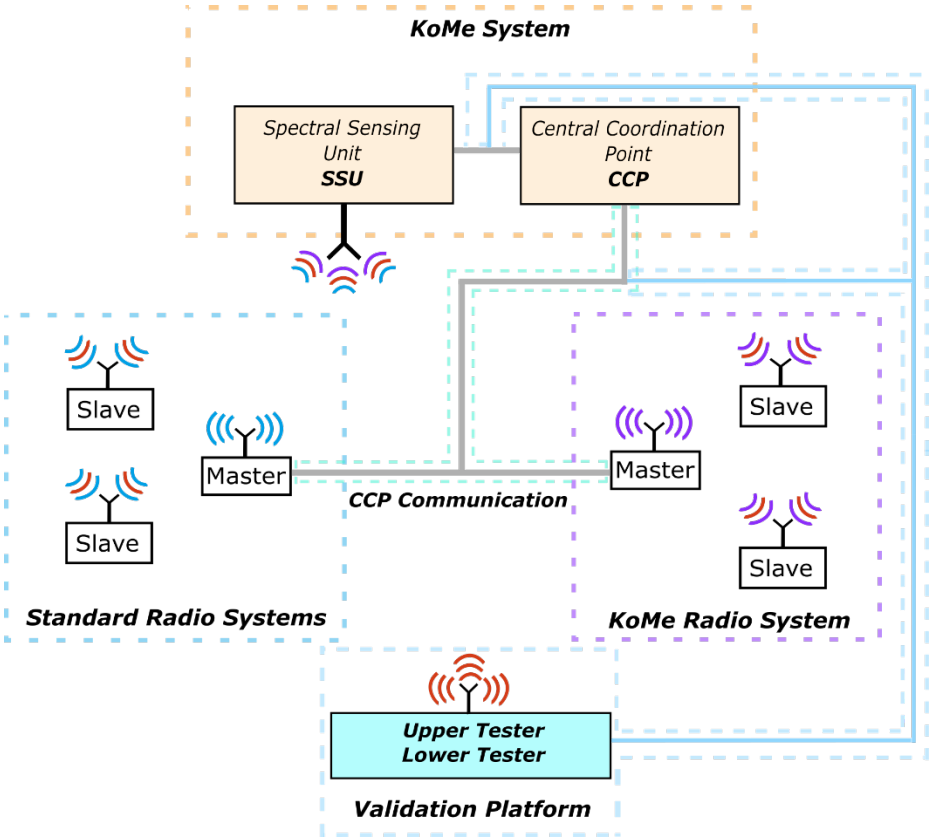

Figure 1-1 Solution approach

The coexistent management requires data exchange between management instances, wireless devices and systems, and spectrum sensing units. This can be served best by a central coordination point (CCP) architecture. Communication concepts such as NETCONF/YANG, OPC UA, REST and SNMP were analyzed with respect to their usability for implementing CCP communication services. Exemplary implementations disclosed problems with available software tools and frameworks. Although the basic CCP services could be successfully realized with NETCONF / YANG, REST and SNMP, the overall performance is not yet satisfactory. A stable standard is required for specifying the use of one of the investigated concepts.

For the coexistence management, new quality-of-existence parameters (QoC) were defined first. Spectral sensing is based on a previously developed NFSC classifier (neuro-fuzzy signal

classifier) which has been improved so that a significantly increased classification rate of interference systems could be achieved (Figure 1-2): 93 % of present and 5 % of absent WLAN signals were classified correctly.

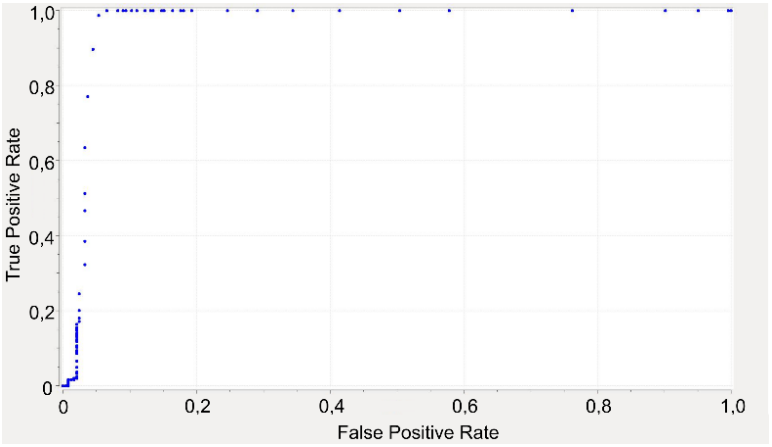

Figure 1-2: Receiver operation curve of the improved NFSC spectral sensing unit: WLAN signal, SNR = 10 dB

The resource allocation considered the frequency channel and the transmission power. Adjusting the transmission power defines the coverage und interference range, thus addresses the spatial dimension. The algorithm "Kassandra" was developed to optimize the distribution of both resources frequency and transmit power within a network graph (Figure 1-3).

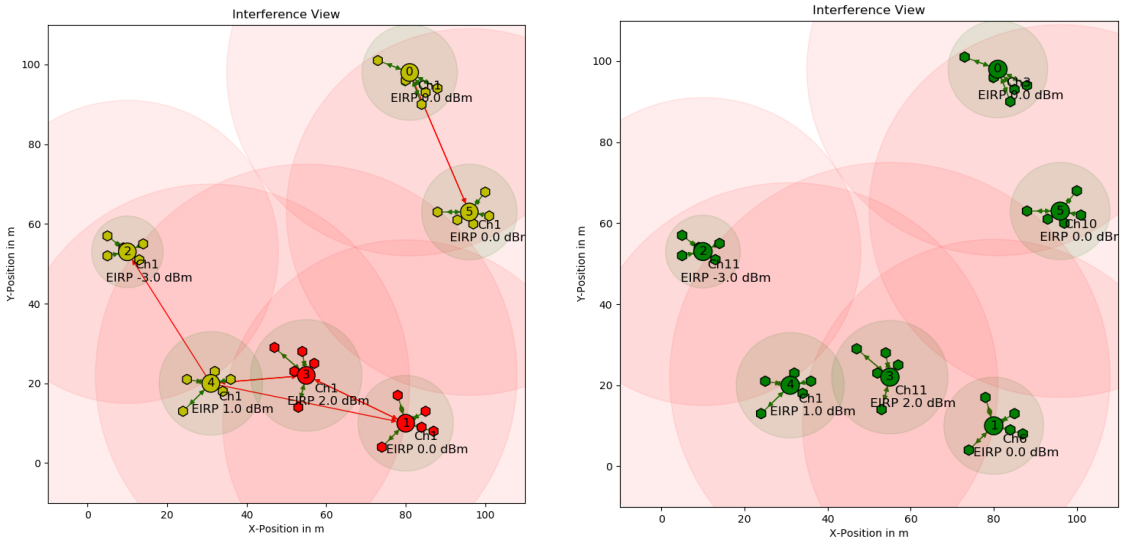

Figure 1-3: Representation of a typical network graph (left) with initial resource distribution; optimized resource distribution (right). Coexistence states: good (green), medium (yellow), bad (red)

The second phase comprised the development of new approaches for a system-specific media access of a new KoMe radio system and its integration into the concept of central coexistence management. The work carried out has led to new and promising concepts: Spectral shaping was addressed with the concept of ‘Generalized Frequency Division Multiplex’ (GFDM), spectral acquisition was significantly improved by the development of 'Compressive Edge Spectrum Sensing' (CESS), and the extensive evaluation of existing methods of media access allowed for the development of the new scheduling concept 'Fair Error'.

The CESS sensing method reduces the sampling rate by 85 % with no performance impairments compared to Nyquist sampling (Figure 1-4). Further improvements can be achieved with cooperative sensing of several sensing units.

It could be shown that optimal media access with respect to high reliability and minimal latency requires a joint parameter optimization of the physical layer, i.e. GFDM parameters, and the

MAC layer for prioritized traffic classes, i.e. real-time (RT) and non-real-time (NRT) applications (Figure 1-5).

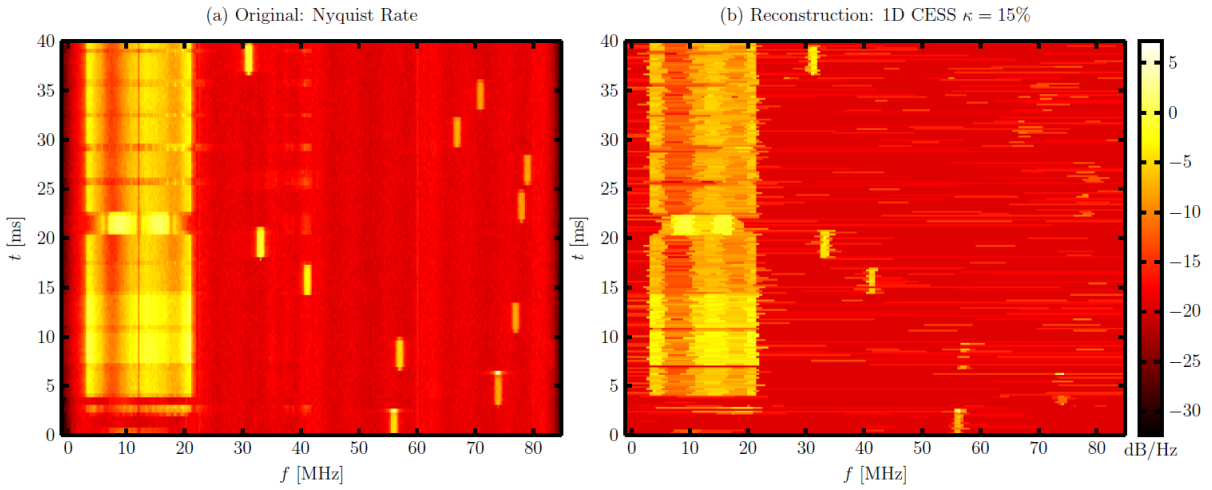

Figure 1-4 Computed spectrograms of WLAN and Bluetooth signals within the 2.4 GHz bands based on previous sensing: a) sampling with Nyquist rate, b) sampling with 15 % of the Nyquist rate.

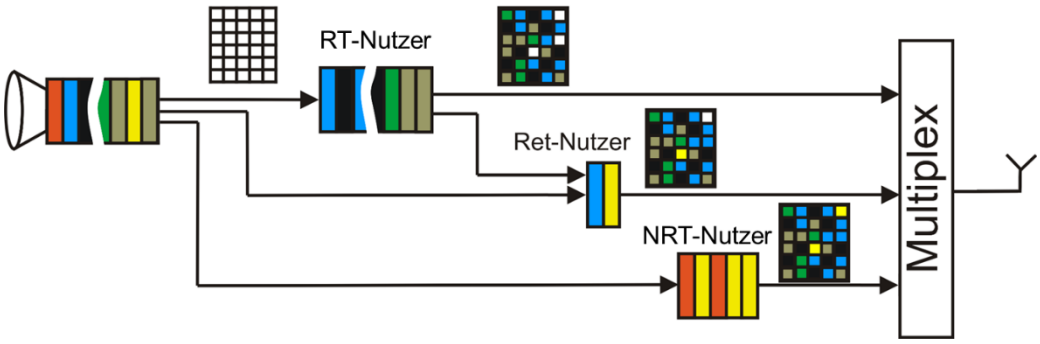

Figure 1-5 Schematic representation of the Fair Error Scheduler

The methodical evaluation of the developed coexistence algorithms turned out to be a challenge. The behavior of wireless devices and systems, interferers and passive environments need to be characterized appropriately, in order to be able to assess the results of the coexistence management algorithms. Therefore, a validation concept has been developed for validating the coexistence state determination, including spectrum sensing and resource allocation. These functions can be evaluated separately before testing the completed KoMe system. According to the coexistence definition of IEC 62657-1 not only the spectrum parameters are considered but also the fulfilment of the communication requirements of the wireless applications. Interference profiles have been developed based on interference sources typical for industrial production environments.

The developed validation platform considers the most relevant functions for testing coexistence management functions. It includes

- the emulation of communication requirements of automation applications that use wireless communication;
- the emulation of interferers using the specified profiles;
- the emulation of passive environmental influences between the interferer and the wireless transmitters and receivers;
- measurement and visualization functions in order to represent the results of coexistences management algorithms.

The developed KoMe solutions were exemplarily implemented on a validation platform and tested under real operating conditions with reference to their efficiency for application in machines and plants. The research results are central components of a new method for the realization of an automated coexistence management in accordance with IEC 62657-2 and IEC 62657-4.

The project was carried out by three research units and supported by nine SMBs, four large companies and one industry association in a project-accompanying committee.

The objective of the research project has been achieved.

2 Einleitung

Produktionsmaschinen und -anlagen sind bereits heute durch eine breite Palette von Anwendungen industrieller Funkkommunikation geprägt. Sie gewährleisten eine vereinfachte Inbetriebnahme, Bedienung und Wartung und sorgen letztlich für geringere Produktionskosten. So wird der Warentransport in Hochregallagern per Funkkommunikation automatisiert oder die Positionierung von Endprodukten auf Produktträger und die Verpackung in Kartons. Das erfordert für einige Automatisierungsanwendungen eine hochverfügbare, deterministische und schnelle Funkkommunikation. Trotz der schwierigen Funkausbreitungsbedingungen in Fertigungszellen, Industriehallen oder Prozessanlagen bestehen hohe Anforderungen an Produktionsausstoß und Produktqualität. Konkrete Anforderungen und Bedingungen sind beispielsweise in [2-1, 2-2] für Anwendungsprofile der industriellen Automation zu finden.

Neue Konzepte zur Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten fordern die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen, um aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Ein maßgeblicher Bestandteil dieser Vernetzung ist die Funkkommunikation, weshalb deren Verbreitung künftig überproportional zunehmen wird. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen sollen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke entstehen, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.

Daraus ergeben sich folgende Herausforderungen an künftige Funkkommunikationslösungen für industrielle Automatisierungsanwendungen:

- Die Funkanwendungen der industriellen Automation unterscheiden sich stark bezüglich Topologie, Netzausdehnung, Mediumbedarf, Determinismus und Rechtzeitigkeit [2-3].
- Da es keine Funktechnologie gibt, die alle Kommunikationsanforderungen gleich gut erfüllen kann, muss der Parallelbetrieb mit mehreren Funkkommunikationslösungen unterschiedlicher Technologien berücksichtigt werden. Dieser Parallelbetrieb wird als heterogen bezeichnet.
- Für einen störungsfreien heterogenen Parallelbetrieb ist ein Koexistenzmanagement erforderlich. Das bisherige Koexistenzmanagement der verschiedenen Funktechnologien ist lediglich gerätebezogen und anwendungsunabhängig.
- Die globale Vermarktung der Produktionsmaschinen und -anlagen beschränkt das nutzbare Spektrum auf wenige weltweit einheitlich regulierte Frequenzbänder.
- Regional abweichende Frequenzregulierungen erfordern spezielle Anpassungen der Funkkommunikationslösung.
- Die Funkkommunikation muss auf die Dynamik der Anforderungen der Produktion bezüglich Ressourcenbedarf und Echtzeitverhalten flexibel reagieren können. Dabei kann sich das Netzverhalten sprunghaft ändern, so dass eine gewünschte allmähliche Einschränkung aller Kommunikationsdienste (graceful degradation of service) nicht garantiert werden kann.

Der Schlüssel, um diese Herausforderungen zu beherrschen, ist die Art und Weise mit der der Zugang zum Funkmedium (medium access) und dessen Nutzung organisiert wird. Die Regulierungsbehörden der Staaten verlangen, dass Funkanwendungen das Funkmedium effizient nutzen. Im Kontext industrieller Funkanwendungen bedeutet dies, dass das Verhältnis zwischen erfolgreich übertragenen Nutzdaten und Mediumnutzung mit Blick auf die spezifischen Anforderungen und Bedingungen zu optimieren ist.

Bei der Erforschung von Algorithmen für einen optimalen Mediumzugang und eine effiziente Mediumnutzung sind die in Abbildung 2-1 dargestellten Randbedingungen zu berücksichtigen, die sich aus den oben genannten Herausforderungen ergeben.

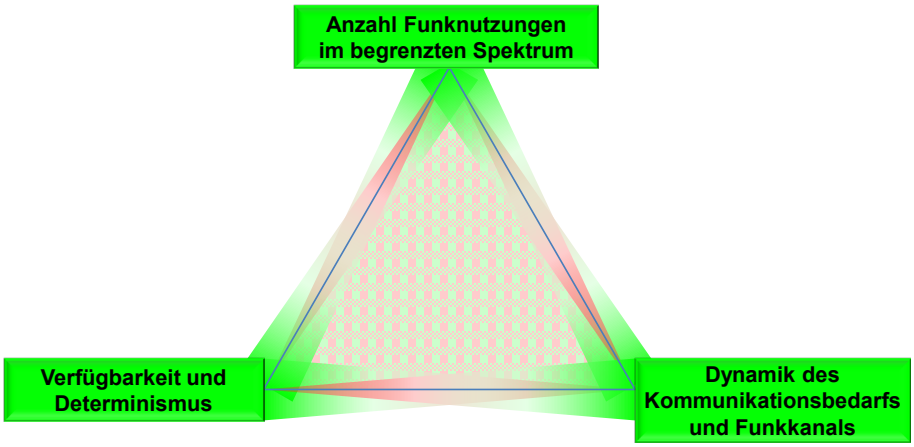

Abbildung 2-1: Randbedingungen bei der Erforschung zukunftsträchtiger Mediumzugangsalgorithmen

Es geht darum, dass für möglichst viele Funkanwendungen das begrenzte Funkspektrum kollisionsfrei nutzbar sein soll, wobei sich der Kommunikationsbedarf und der Funkkanal dynamisch ändern können, aber die Anforderungen an Verfügbarkeit und Determinismus stets zu erfüllen sind.

Zukunftweisende Konzepte zur Umgestaltung der Produktion, die auf leistungsfähigen Informationsnetzen basieren, stellen eine große Herausforderung für Hersteller und Anwender industrieller Automatisierungstechnik dar. Die Kommunikationsfunktionen stellen dabei nur einen kleinen Anteil dar, dessen Einfluss auf den Erfolg der Gesamtkonzepte aber nicht unerheblich ist. Das für die Zielstellung dieses Forschungsvorhabens erforderliche Wissen über die vielen verschiedenen Funktechnologien und deren Übertragungsverhalten, über Konzepte des Koexistenzmanagements und über zukunftsweisende Methoden zur Organisation der Mediumnutzung liegen bei den Firmen, insbesondere bei den KMU, meist nicht vor. Dieses Wissen soll durch dieses Vorhaben zielgerichtet aufbereitet und die Nutzbarkeit nachgewiesen werden.

Für Anwender ergeben sich durch die verbesserten Eigenschaften der funkbasierten Produkte noch breitere und flexiblere Einsatzmöglichkeiten, wodurch die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit industrieller Anwender gesteigert werden kann. Im Gegenzug können Hersteller industrieller Funksysteme einen erhöhten Absatz ihrer Produkte, geringerer Serviceaufwendungen und eine höhere Kundenzufriedenheit erwarten.

KMUs übernehmen als Hersteller wie auch als Anwender von Komponenten eine wichtige Rolle im wichtigen Wirtschaftszweig der industriellen Automatisierungstechnik. Mit der zunehmenden Nutzung industrieller Funktechnologien werden die Fragen des koexistenzgerechten Funknetzmanagements zunehmend wichtiger. Die angestrebten Ergebnisse des beantragten Forschungsvorhabens werden eine konkrete Steigerung der Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsvorteile für KMU der herstellenden und anwendenden Branche bedeuten.

3 Anforderungsanalyse

3.1 Anforderungen der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

3.1.1 Fragen an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurden folgenden Fragen gestellt, um Schwerpunkte bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens zu identifizieren. Die Antworten werden zunächst in diesem Kapitel zusammengefasst. Bei den folgenden Ausarbeitungen in diesem Dokumente werden die Angaben entsprechend aufbereitet und bei der Anforderungsspezifikation berücksichtigt.

An die Hersteller von Funkkommunikationsprodukten: Welche Informationen würden Ihre Produkte benötigen, um Anpassungen im Sinne eines Koexistenzmanagements durchführen zu können?
Welche Informationen sollten in zukünftigen Funkkommunikationskonzepten zur Verbesserung der Koexistenzfähigkeit bzw. der effektiven Spektrumsnutzung berücksichtigt werden?
An die Hersteller von Funkkommunikationsprodukten: Sollen Funkkommunikationsprodukte aus Ihrem Hause im KoMe-Projekt berücksichtigt werden? Wenn ja, welche?
Welche sporadischen Störungen der Funkübertragung sollen berücksichtigt werden? Durch welche Mediumsnutzung sind diese charakterisiert?
Welche wesentlichen Anforderungen werden an eine technische Lösung zum automatischen Koexistenzmanagement gestellt?

3.1.2 Erste Auswertung der Fragen

3.1.2.1 Informationen zur Anpassungen gegenwärtig eingesetzter Funkgeräte im Sinne eines Koexistenzmanagements

Folgende gerätebezogenen Einflussgrößen wurden genannt, die zur Anpassung der Spektrumsnutzung genutzt werden können:

- Frequenzkanal (Kanalnummer, Mittenfrequenz)
- max. Bandbreite
- Frequenzbereich
- max. Sendeleistung (EIRP)
- max. Sendeleistungsdichte
- Zeitschlitz
- zeitliche Beschränkungen
- statistische Belegung des Frequenzbandes
- Frequenzabhängige Schätzung der Störenergie
  - Vorhersagezeitraum bis zu einigen Sekunden
  - Periodische oder anderweitig nicht-stationäre Störprozessen mit vorhersagbaren Statistiken
  - Diskretisierung der Störenergie in ausgewählten Frequenzunterbändern, keine spektrale Leistungsdichte erforderlich
- Klassifizierung eines Funkanwendung oder
- Mediumsbelegung durch einen Funkanwendung nach Zeit, Frequenz und Ort
- Definition der Schnittstelle zum CCP

Es wurde darauf hingewiesen, dass für die oben genannten Einflussgrößen der Anwendungsbezug zu berücksichtigen ist.

Die Zuarbeiten wurden diskutiert und folgende Festlegungen getroffen:

Maximale Sendeleistung (EIRP)

Die Ausgangsleistung kann bei gegenwärtig eingesetzten Funkgeräten angepasst werden und damit mittelbar die abgestrahlte Sendeleistung (EIRP). Eine automatisierte Beeinflussung eines Antennensystems ist nicht geplant.

Maximale Sendeleistungsdichte

Die Übergabe eines Sollwertes für eine maximale Sendeleistungsdichte an gegenwärtig eingesetzte Funkgeräte zur Anpassung der Mediumsnutzung ist in diesem Forschungsvorhaben nicht geplant.

Frequenzabhängige Schätzung der Störenergie

Die Übergabe einer frequenzabhängigen Schätzung der Störenergie an gegenwärtig eingesetzte Funkgeräte zur Anpassung der Mediumsnutzung ist in diesem Forschungsvorhaben nicht geplant.

Klassifizierung einer Funkanwendung

Die Übergabe einer Klassifizierung von Funkanwendungen an gegenwärtig eingesetzte Funkgeräte zur Anpassung der Mediumsnutzung ist in diesem Forschungsvorhaben nicht geplant.

Mediumsbelegung durch eine Funkanwendung nach Zeit, Frequenz und Ort

Die Übergabe der Mediumsbelegung durch eine Funkanwendung nach Zeit, Frequenz und Ort an gegenwärtig eingesetzte Funkgeräte zur Anpassung der Mediumsnutzung ist in diesem Forschungsvorhaben nicht geplant.

Definition der Schnittstelle zum CCP

Es wird in Betracht gezogen die Anpassung der Mediumsnutzung gegenwärtig eingesetzter Funkgeräte über eine einheitlich spezifizierte Schnittstelle zu ermöglichen.

3.1.2.2 Informationen zur Anpassungen künftiger Funkgeräte zur Verbesserung der Koexistenzfähigkeit bzw. der effektiven Spektrumsnutzung

Folgende gerätebezogenen Einflussgrößen sollten künftig zur Anpassung der Spektrumsnutzung verwendet werden:

- verbindlich abgestimmtes Pattern (Zeit/Frequenz/Leistung) der Sendefolge
- Freigabe der Funkgeräte bzw. des Funksystems nach Anmeldung

Des Weiteren wurde vorgeschlagen, statt eines Koexistenzmanagements die Koexistenzfähigkeit der beteiligten Funkgeräte und Funktechnologien zu verbessern beispielsweise durch Transmit Power Control, Dynamic Frequency Selection, Adaptive Modulation Coding Schemes (MCS), Bandwidth, Cognitive/Cooperative Behaviour und Information Sharing.

Die Zuarbeiten wurden diskutiert und folgende Festlegungen getroffen:

Die Koexistenzfähigkeit eines Funkgerätes allein reicht nicht aus, um Koexistenz der Funklösungen für das betrachtete Anwendungsfeld zu gewährleisten. Ein einzelnes Funkgerät kann lediglich auf der Basis der selbst ermittelten Daten über die eigene Nutzung des Mediums und über die Nutzung durch beliebige andere Geräte entscheiden, ob die eigene Mediumsnutzung angepasst werden muss. Schon das oben erwähnte Cognitive/Cooperative Behaviour und das

Information Sharing sind Funktionen eines Koexistenzmanagements. Allerdings ist ein wesentliches Merkmal des Koexistenzmanagements, dass für die Mediumsnutzung aller diesem Management unterliegenden Funkkommunikationsgeräte auch anwendungsbezogene Entscheidungskriterien herangezogen werden sollen. Das ist erforderlich, um die Koexistenz gemäß der oben angeführten Definition herstellen und aufrechterhalten zu können.

Deshalb soll mit der hier zu erarbeitenden Lösung ein Koexistenzmanagement nach [2-3] unterstützt werden.

Die in diesem Forschungsvorhaben nicht berücksichtigten Informationen zur Anpassungen von Funkgeräten im Sinne eines Koexistenzmanagements wie maximale Sendeleistungsdichte, frequenzabhängige Schätzung der Störenergie, Klassifizierung einer Funkanwendung oder Mediumsbelegung durch eine Funkanwendung nach Zeit, Frequenz und Ort sollten bei der koexistenzgerechten Entwicklung künftiger Funkgeräte berücksichtigt werden.

3.1.2.3 Relevante sporadischen Interferenzen und deren Mediumsnutzung

Zu den allgemeinen Anforderungen an das KoMe-System bzw. an das KoMe-Funkkommunikationssystem gehört, dass eine konstante Belegung des Mediums (zumindest in einem stabilen Betriebszustand) bzw. Änderungen durch Anlagenerweiterungen oder durch betriebsbedingtes Hinzufügen und Entfernen von Funkgeräten erkannt werden und entsprechend reagiert wird.

Beim Auftreten sporadischer Interferenzen könnte eine schnelle Reaktion die falsche Entscheidung sein. Statt einer kurzzeitigen Störung für eine Funkanwendung könnte eine umfangreiche Umorganisation der Mediumsbelegung die Folge sein, mit damit verbundenen Auswirkungen auf mehrere Funkanwendungen. Ist die sporadische Interferenz nicht mehr vorhanden, kann es durch "Optimierung" der Koexistenz zur Rückorganisation kommen, was ebenfalls wieder Auswirkungen zur Folge haben könnte.

Deshalb ist die Frage zu klären, was sporadische Interferenzen sind, die keine Reaktion des KoMe-Systems bzw. des KoMe-Funkkommunikationssystems hervorrufen und durch welche Eigenschaften sie gekennzeichnet sind.

Das Vorhandensein und die Eigenschaften sporadischer Interferenzen richtet sich nach dem genutzten Frequenzband.

Hierzu konnten zunächst keine Anforderungen formuliert werden.

3.2 Anforderungen an das Zeitverhalten

In Abschnitt 3.1.2.3 wurde schon auf die Bedeutung zeitlicher Parameter eingegangen. In diesem Kapitel werden Anforderungen an das Zeitverhalten des KoMe-Systems diskutiert.

Unterstützung der Inbetriebnahme durch das KoMe-System

Die Zeitspanne für den Anlauf eines Funkkommunikationssystems hängt maßgeblich von der Funktechnologie, deren Implementierung und von dem Ausbau der Instanz des Funkkommunikationssystems ab. Bei Vorhandensein des KoMe-Systems soll die Anlaufzeit nicht verlängert werden. Sind bereits ander Funkkommunikationssysteme in Betrieb soll der Anlauf ohne gegenseitige Beeinflussung erfolgen und damit schneller der Koexistenzzustand erreicht werden.

Wiederanlaufverhalten bzw. Wiederherstellen des Koexistenzzustandes

Das KoMe-System muss Daten über Funkkommunikationssysteme verwalten, so dass bei einem Wiederanlauf eines Funkkommunikationssystems darauf zurückgegriffen werden kann. Die Mediumsnutzung muss nicht erst vollständig neu ermittelt werden, weshalb der Wiederanlauf mit dem KoMe-System schneller ablaufen sollte als ohne. Das gleiche gilt für das Wiederherstellen des Koexistenzzustandes nach einer Störung.

Unterstützung des Echtzeitverhaltens durch das KoMe-System

Das Zeitverhalten des KoMe-Systems im Normalbetrieb soll sich an der Funkanwendung mit dem kritischsten Echtzeitverhalten aus Anwendungssicht orientieren. Es soll ein Anlagenstillstand verhindert werden. Dafür sollen die Festlegungen zu Anforderungsprofilen und der Performance-Bewertung in [3-1] berücksichtig werden.

3.3 Notation der Anforderungen

Die Anforderungen werden in diesem Vorhaben mithilfe folgender Übersicht zusammengetragen und die Maßnahmen zur Erfüllung im Projektverlauf protokolliert. Trotz der kompakten Darstellung soll jederzeit der Grund für eine Anforderung nachvollziehbar sein sowie die Gründe für den Grad der Erfüllung.

ID Titel

Beschreibung				
Historie				
Datum	*Berücksichtigung der Anforderung im Projektverlauf*			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt

Nachfolgend sind die einzelnen Felder und ihre Bedeutung beschrieben.

ID

Der Anforderung wird ein eindeutiger Identifier eingetragen. Er besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil beinhaltet das Kürzel für Requirement (Anforderung). Der zweite Teil ist eine fortlaufende Nummer. Sie enthält zwei Stellen und beginnt mit 01.

Titel

Der Titel benennt die Anforderung in Kurzform.

Beschreibung

In diesem Feld wird die Anforderung ausführlich beschrieben.

Historie

In diesem Feld wird die Historie der Behandlung der Anforderung festgehalten. Hier werden Details zu den einzelnen Bearbeitungsschritten notiert. Jeder Eintrag beginnt mit dem aktuellen Datum.

Typ	Beschreibung
angestrebt	angestrebtes Ergebnis des Vorhabens
berücksichtigt	bei der Konzeption berücksichtigt, möglicherweise nicht implementiert
nicht berücksichtigt	aus Kapazitätsgründen im Projekt nicht berücksichtigt
nicht angestrebt	keine Relevanz

Autor

Dieses Feld beinhaltet ein Kürzel für den Autor der Anforderung.

Typ

Die folgenden Anforderungstypen werden unterschieden.

Typ	Beschreibung
Funktional	Anforderung, die das Gerät bzw. System zu erfüllen hat.
Nicht-funktional	Anforderung, die eine Eigenschaft vom Gerät bzw. System fordert (z. B. Performance, Qualität, Security).
Randbedingungen	Randbedingungen sind eine spezielle Form nicht-funktionaler Anforderungen, die mehr oder weniger Umstände beschreiben, die nicht oder nur aufwendig zu umgehen sind.

Feature

Das Feld Feature bezeichnet eine konkrete Funktionalität, die der Anforderung zugeordnet werden kann. Dieses Feld ist optional.

Feature	Short Form	Beschreibung
General	GE	Generelle Anforderung
Engineering	EN	Anforderungen an das Engineering
Bedienbarkeit	US	Anforderungen an die Bedienbarkeit
Kosten	KO	Anforderungen an die Kosten

Abhängigkeit

Dieses Feld enthält die ID einer Anforderung, zu der eine Abhängigkeit besteht. Diese Anhängigkeit ist detailliert in der Beschreibung der Anforderung zu spezifizieren (z. B. diese Anforderung kann nicht erfüllt werden, wenn Anforderung ID nicht erfüllt wird.).

Konflikt

Dieses Feld enthält die ID einer Anforderung, zu der ein Konflikt besteht. Der Konflikt ist detailliert in der Beschreibung der Anforderung zu spezifizieren (z. B. schließt sich diese Anforderung und die Anforderung ID gegenseitig aus).

3.4 Zusammenfassung der Anforderungen

3.4.1 Anforderungen an das KoMe-System

R_01 Investitionskosten

Die Kosten müssen zum Preisgefüge der beteiligten Funktechnologien passen, d. h. Low Cost für die LoRa Funktechnologie.				
Historie				
13.10.2015	New			
16.12.2015	nicht berücksichtigt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
IMST	Nicht-funktional	Kosten		

3.4.2 **Anforderungen an das KoMe-Funkkommunikationssystem**

R_02 Kommunikationsanforderungen

Es sollen Kommunikationsanforderungen eines WLAN Systems bedient werden können.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	nicht angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

3.4.3 **Anforderungen an KoMe-System und KoMe-Funkkommunikationssystem**

R_03 Echtzeitverhalten

Die Einhaltung des Koexistenzzustandes gemäß Definition in [2-3] soll gewährleistet werden. Das erfordert ein an der Funkanwendung mit den kritischsten Echtzeitanforderungen orientiertes Zeitverhalten.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_04 Wiederherstellen des Koexistenzzustandes

Die Wiederherstellung des Koexistenzzustandes soll unterstützt werden und innerhalb einer Übergangszeit erfolgen.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_05 Inbetriebnahmeunterstützung

Die Einhaltung bzw. die Einnahme des Koexistenzzustandes bei Inbetriebnahme eines Funkkommunikationssystems soll unterstützt werden und innerhalb einer Anlaufzeit erfolgen.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Berücksichtigt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_06 Wiederanlauf

Die Einhaltung bzw. die Einnahme des Koexistenzzustandes bei Wiederanlauf eines Funkkommunikationssystems soll unterstützt werden und innerhalb einer Wiederanlaufzeit erfolgen.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Berücksichtigt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_07 Automatisierung

Das Koexistenzmanagement soll weitestgehend automatisiert ablaufen.				
Historie				
13.10.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
IMST	Randbedingung	General		

R_08 Frequenzbereich

Der Frequenzbereich soll 2,4 GHz ISM-Band sein.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Randbedingungen	General		

R_09 Erfassungsbereich für die Ermittlung der Mediumsnutzung

Im Freifeld muss eine Distanz von mehreren Kilometern abgedeckt werden können (Reichweite der LoRa Funktechnik).				
Historie				
13.10.2015	New			
16.12.2015	nicht angestrebt			
28.11.2016	Anmerkung 1: LoRa ist derzeit nur für Sub-1 GHz spezifiziert. Anmerkung 2: Mehrere Kilometer könnte bedeuten, dass viel mehr Geräte (Funkanwendungen) als nötig erfasst und berücksichtigt werden, und damit eine Kommunikation unmöglich wird, obwohl weit entfernte Geräte praktisch kaum Einfluss haben.			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
IMST	Funktional	General		R_10

R_10 Einsatzbereich

Einsatzbereich soll die Fertigungshalle sein, in der aber auch Prozessanwendungen vorkommen können.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Randbedingungen	General		R_09

R_11 Mediumsbelegung durch einen Mediumsnutzer nach Zeit, Frequenz und Ort

Es ist die Mediumsbelegung durch einen Mediumsnutzer nach Zeit, Frequenz und Ort zu ermitteln.				
Historie				
03.11.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
Götting	Funktional	General		

R_12 Klassifizierung eines Mediumsnutzer

Es ist die Klasse eines Mediumsnutzer zu ermitteln, z. B. Funkkommunikationstechnologie oder Art eines anderen Frequenznutzers (z. B. Mikrowellenanwendung).				
Historie				
03.11.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
Götting	Funktional	General		

R_13 IEEE 802.11

Die Mediumsnutzung von Funkkommunikationssystemen basierend auf IEEE 802.11 sollen erkannt werden.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_14 IEEE 802.15.1

Die Mediumsnutzung von Funkkommunikationssystemen basierend auf IEEE 802.15.1 sollen erkannt werden.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
28.11.2016	Bluetooth 4.0 und IO-Link wireless sollen berücksichtigt werden.			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_15 IEEE 802.15.4

Die Mediumsnutzung von Funkkommunikationssystemen basierend auf IEEE 802.15.4 sollen erkannt werden.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_16 Sporadische Interferenzen

Auf kurze, zufällig auftretende Interferenzen ist nicht zu reagieren. Eine Aussage über Werte von Parametern (z. B. Zeit, Signalleistung) wird nicht getroffen.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Berücksichtigt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_17 Umgebungseinflüsse

Es werden nur aktive Umgebungseinflüsse berücksichtigt. Passive Umgebungseinflüsse werden von den Funkkommunikationssystemen berücksichtig, was mittelbar zur Änderung der Mediumsnutzung führen kann.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Randbedingungen	General		

R_18 Ableitung von Ressourcenempfehlungen

Es sind Sendefolgen zwischen allen beteiligten Funkkommunikationssystemen abzustimmen und zu den Funkgeräten zu übertragen, die in der Lage sind Sendefolgen anzupassen.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
28.11.2016	Die Ressourcenempfehlungen ergeben sich aus den Anwendungsanforderungen an die Kommunikation. Es wird angestrebt die			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_19 Freigabe von Funkkommunikationssystemen bzw. von Funkgeräten

Es ist eine Möglichkeit vorzusehen die Funkkommunikation von Funkkommunikationssystemen bzw. Funkgeräten freizugeben, wenn eingeschätzt wird, dass der Koexistenzzustand schnellst möglich erreicht wird bzw. erhalten bleibt.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_20 Definition der Schnittstelle zum CCP

Es ist eine Schnittstelle zum Austausch relevanter Informationen zum Koexistenzmanagement zu spezifizieren.				
Historie				
03.11.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
Götting	Funktional	General		

R_21 Informationen herkömmlicher Funkkommunikationssysteme

Informationen, die herkömmliche Funkkommunikationssysteme über die Mediumsnutzung zur Verfügung stellen, sollen genutzt werden.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_22 Informationsbereitstellung

Informationen für das Monitoring und die Diagnose der involvierten Funkkommunikationssysteme sollen bereitgestellt werden.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	General		

R_23 Konfigurierbarkeit

Eine weitestgehende Konfigurierbarkeit ist zu gewährleisten.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	nicht berücksichtigt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Randbedingungen	General		

R_24 Bedienbarkeit

Die Bedienung soll einfach sein und ohne spezielle Kenntnisse über Funkkommunikationssysteme oder Hochfrequenztechnik.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	nicht angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Funktional	Bedienbarkeit		

R_25 Normen

Es ist auf die Konformität zu Normen, insbesondere zur IEC/EN 62657 Teil 2 zu achten.				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
ifak	Randbedingungen	General		

R_26 Management von Funkkommunikationssystemen

SCALANCE, PxC WLAN, Alle Funkkommunikationssysteme die sich anpassen wollen (das Protokoll implementieren) KoMe-Funkkommunikationssystem WLAN-Produkte: inIT Bluetooth-Produkte: ifak 15.4-Geräte: ifak				
Historie				
09.12.2015	New			
16.12.2015	Angestrebt			
Autor	Typ	Feature	Abhängigkeit	Konflikt
IHT	Randbedingungen	General		

3.4.4 Anforderungen als Gegenstand der Forschung

Es lassen sich nicht alle relevanten Anforderungen in dieser Phase des Forschungsvorhabens konkret formulieren. Diese Anforderungen sollen im Laufe des Vorhabens untersucht werden, um sinnvolle Festlegungen treffen zu können. Zu diesen Anforderungen gehören:

- die Methode zum Erfassen der Mediumsnutzung (zentral oder dezentral)
- das Zeitverhalten (Erfassungs- und Reaktionszeiten, Hysterese bei schnellen Zustandswechseln)

- die Eigenschaften zu ignorierender sporadischer Funkanwendungen (Einhaltung von Stabilität)
- das Lernen über die Betriebsphase, um gegenüber unbedeutenden kurzen Störungen robust zu sein

3.5 Kenngrößen für die Bewertung von Koexistenz und Mediumseffizienz

3.5.1 **Allgemeines**

In diesem Kapitel sind Kenngrößen definiert, anhand derer die Bewertung von Koexistenz und Mediumseffizienz durch die Mediumszugangsalgorithmen vorgenommen wird. Des Weiteren sind ihre Testbarkeit und Relevanz bezogen auf die Automatisierungstechnik bewertet. Dieses Kapitel bezieht sich hauptsächlich auf das Richtlinienblatt 4 der VDI/VDE Richtlinie 2185 [3-1], an deren Erstellung ifak und inIT maßgeblich mitgewirkt haben.

Das Modell in [3-2] definiert eine Schnittstelle zwischen Anwendungsfunktionalität, mit Kommunikationsbedarf, und Kommunikationsfunktionalität, die Daten übernimmt und sendet bzw. empfangene Daten übergibt. Diese Schnittstelle wird als Referenzschnittstelle bezeichnet, da sich die Kenngrößenwerte auf diese Datenübergabeschnittstelle beziehen.

Neben den in [3-2] definierten Kenngrößen werden zusätzliche Kenngrößen eingeführt, die durch den Zusatz "Kommunikationskenngröße" gekennzeichnet sind. Die Werte dieser anwendungsunabhängigen Kenngrößen werden innerhalb der Kommunikationsfunktionalität ermittelt.

3.5.2 **Übertragungszeit**

3.5.2.1 Definition

Die Übertragungszeit (Transmission Time) ist eine grundlegende Kenngröße, die zur Bewertung des Koexistenzzustandes herangezogen werden kann. Dabei ist von Interesse wie lange die Übertragung eines Nutzdatums von einer Quelle (z. B. einem Sensor) bis zu einem Ziel (z. B. eine Steuerung) dauert. Ein einheitliches Verständnis dieser Zeitspanne erfordert die genaue Festlegung des Starts der Messung und deren Ende. Gemäß [3-2] ist die Übertragungszeit T_{TT} (TT: transmission time) der Zeitabschnitt von der Übergabe des ersten atomaren Bestandteils der Nutzdaten (Bit, Oktet) an der Schnittstelle zwischen Anwendung und Funkkommunikation (Referenzschnittstelle) einer Quelle und der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils derselben Nutzdaten an der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung eines Ziels (siehe Abbildung 3-1). Die Art der Schnittstelle zwischen Funkkommunikation und Anwendung sowie deren Charakteristik ist bei der Veröffentlichung der Kenngrößenwerte immer anzugeben, da es keine einheitliche Anwendungsschnittstelle gibt.

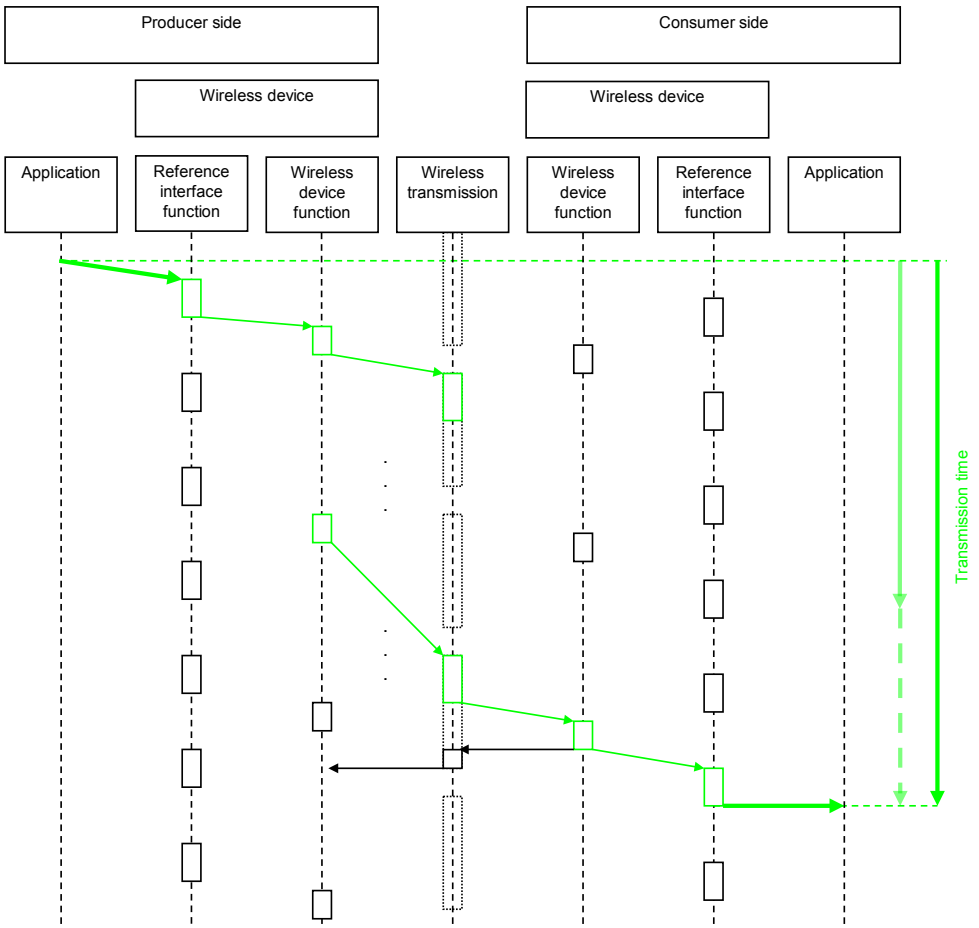

Abbildung 3-1: Definition der Übertragungszeit

Aufgrund der Abhängigkeit der Übertragungszeit von der gewählten Funklösung, wird für die Übertragungszeit ein technologiebezogener Referenzwert gewählt. Ausgehend von den einzelnen Übertragungszeiten $T_{\mathrm{TT},i}$ sind somit für eine normierte Bewertung nur die relativen Abweichungen der Übertragungszeit $T_{\mathrm{TT},i}$ bezogen auf den Referenzwert $T_{\mathrm{TT,Ref}}$ zu betrachten:

$$\varepsilon T_{\mathrm{TT},i} = \frac{T_{\mathrm{TT},i} - T_{\mathrm{TT,Ref}}}{T_{\mathrm{TT,Ref}}}$$

Des Weiteren besitzt die Übertragungszeit ein Minimum, welches aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Funklösung und des Funkkanals nie unterschritten werden kann. Der Referenzwert $T_{\mathrm{TT,Ref}}$ kann beispielhaft auf dieses Minimum festgelegt werden, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Hieraus resultiert, dass die relativen Abweichungen der Übertragungszeit ausschließlich positiv sind.

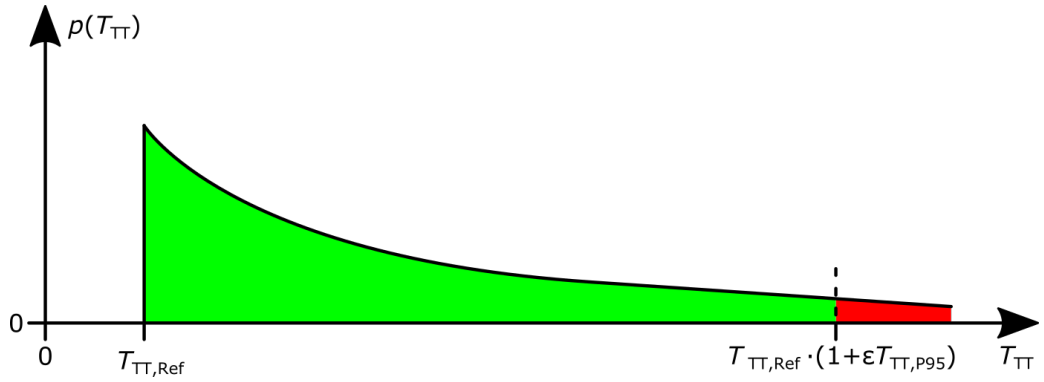

Abbildung 3-2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Übertragungszeit T_{TT} mit Referenzwert $T_{TT,Ref}$ und 95-stem Perzentil $\varepsilon T_{TT,P95}$

Die aus den einzelnen Übertragungszeiten $T_{TT,i}$ resultierenden relativen Abweichungen der Übertragungszeiten $\varepsilon T_{TT,i}$ werden als Zufallsvariable $\boldsymbol{\varepsilon T_{TT}}$ betrachtet, wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

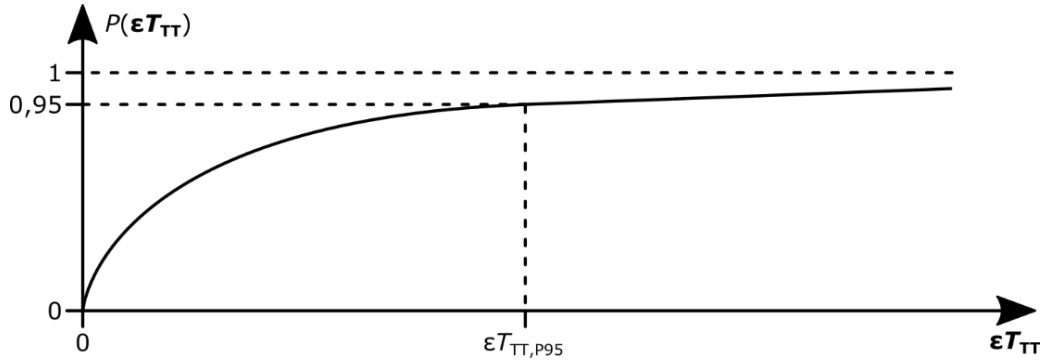

Abbildung 3-3: Kumulative Verteilungsfunktion der relativen Abweichung der Übertragungszeit $\boldsymbol{\varepsilon T_{TT}}$

Um ein statistisches Maß der Zuverlässigkeit der Kommunikationsschicht zu erhalten, wird aus der Häufigkeitsverteilung der Zufallsvariable das 95-ste Perzentil $\varepsilon T_{TT,P95}$ dieser ermittelt.

3.5.2.2 Testbedingung

Für den Übertragungszeitwert $\varepsilon T_{TT,P95}$ wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer erfolgreichen Kommunikation vorgeschlagen.

Die Übertragungszeitwert $\varepsilon T_{TT,P95}$ wird durchgehend beim Empfänger anhand der 20 zuletzt erfolgreich empfangenen Pakete ermittelt. Der Wert der Kenngröße, mit einer Auflösung der Kenngröße von 5%, wird somit bei jedem neu erfolgreich empfangenen Paket aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn die Übertragungszeitwert $\varepsilon T_{TT,P95}$ einen zuvor festgelegten Schwellwert $\varepsilon T_{TT,P95,TH}$ (TH: *threshold*) nicht überschreitet. Bei einem positiven Testergebnis liegen die Übertragungszeiten von 20 erfolgreich empfangenen Paketen 19 Pakete unterhalb des festgelegten Schwellwerts.

3.5.3 **Nachrichtenverlustquote**

3.5.3.1 Definition

Die Nachrichtenverlustquote (Rate of Information Loss - RIL) ist definiert als Verhältnis der Anzahl der verlorenen Nachrichten zur Gesamtzahl gesendeter Nachrichten

$$RIL = \frac{N_{LM}}{N_{Tx}}$$

wobei N_{TX} der Anzahl der gesendeten Nachrichten und N_{LM} der Anzahl der verlorenen Nachrichten entspricht (DKE Wörterbuch – IEV 371-08-07 [3-3]).

3.5.3.2 Testbedingung

Für die Nachrichtenverlustquote RIL wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer gestörten Kommunikation vorgeschlagen.

Die Nachrichtenverlustquote wird am Ziel durchgehend anhand der 20 zuletzt empfangenen Nachrichten ermittelt. Daraus resultiert eine Auflösung der Kenngröße von 5%. Der Wert der Kenngröße wird bei jeder neu erfolgreich empfangenen Nachricht aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn 95% der zuletzt ausgesendeten Nachrichten erfolgreich empfangen wurden, das heißt 19 von 20.

3.5.4 **Aktualisierungszeit**

3.5.4.1 Definition

Die Aktualisierungszeit (Update time) entspricht im Idealfall dem Sendezeitabstand (siehe Abbildung 3-4). Das heißt, die übertragenen Nutzdaten werden an der Referenzschnittstelle der Senke in denselben zeitlichen Abständen übernommen, wie sie an der Referenzschnittstelle der Informationsquelle übergeben wurden. Die Aktualisierungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt von der Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der Nutzdaten einer Informationsquelle an der Referenzschnittstelle einer Informationssenke bis zur Übergabe des letzten atomaren Bestandteils der unmittelbar nachfolgend übertragenen Nutzdaten von der gleichen Informationsquelle.

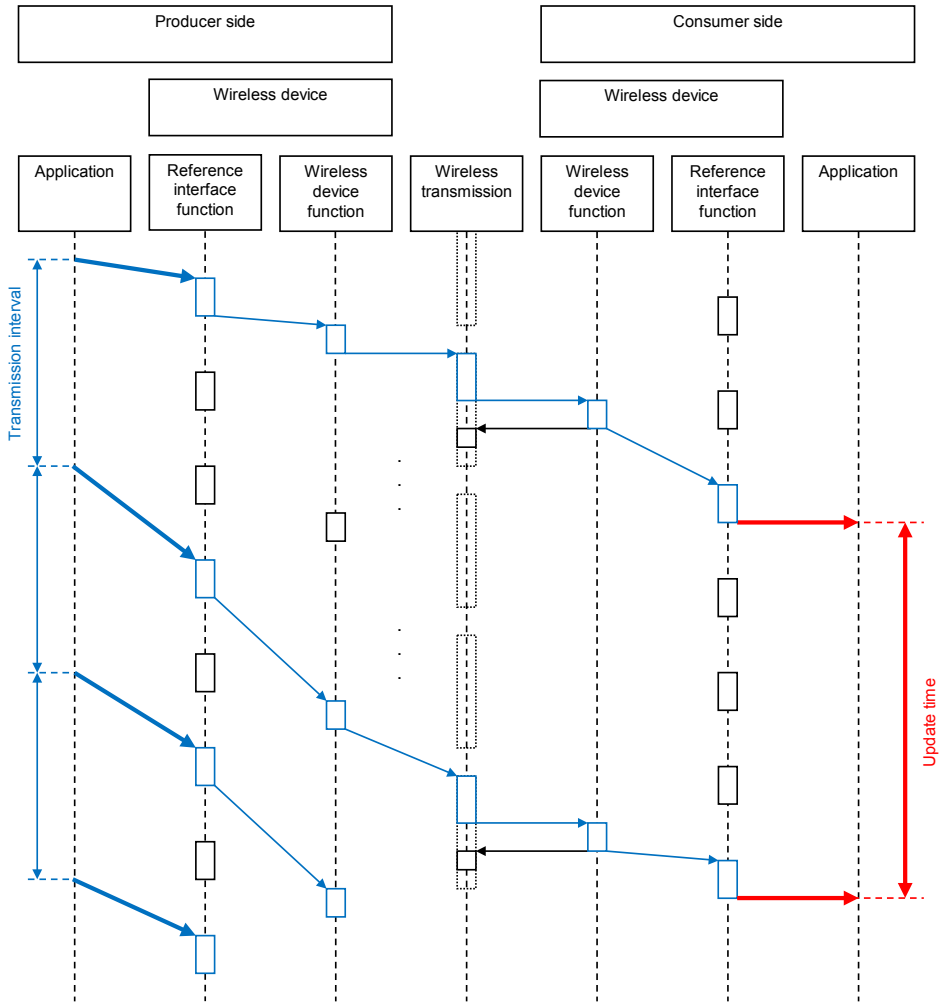

Abbildung 3-4: Definition der Aktualisierungszeit

Aufgrund der Abhängigkeit der Aktualisierungszeit von der automatisierungstechnischen Anwendung, wird das Sendezeitintervall der automatisierungstechnischen Anwendung als anwendungsbezogener Referenzwert für die Aktualisierungszeit gewählt. Ausgehend von den einzelnen Aktualisierungszeiten $T_{UT,i}$ sind für eine normierte Bewertung der Zuverlässigkeit der Kommunikationsschicht nur die relativen Abweichungen der Aktualisierungszeit $\varepsilon T_{UT,i}$ bezogen auf den Referenzwert $T_{UT,Ref}$ betrachtet:

$$\varepsilon T_{\mathrm{UT},i} = \frac{T_{\mathrm{UT},i} - T_{\mathrm{UT,Ref}}}{T_{\mathrm{UT,Ref}}}$$

Aus den einzelnen Aktualisierungszeiten $T_{UT,i}$ resultierenden relativen Abweichungen der Aktualisierungszeiten $\varepsilon T_{UT,i}$ werden als Zufallsvariable εT_{UT} betrachtet.

Da eine Abweichung der Aktualisierungszeit in beiderlei Richtungen vom Sendezeitintervall die automatisierungstechnische Anwendung in gleicher Weise beeinträchtigt, ist nur der Betrag der einzelnen Abweichungen von Relevanz.

3.5.4.2 Testbedingung

Für die Aktualisierungszeit $\varepsilon T_{UT,i}$ wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer erfolgreichen und periodischen Kommunikation vorgeschlagen.

Die Aktualisierungszeit $\varepsilon T_{UT,i}$ wird durchgehend beim Empfänger anhand der 20 zuletzt erfolgreich empfangenen Pakete ermittelt. Der Wert der Kenngröße, mit einer Auflösung der Kenngröße von 5%, wird somit bei jedem neu erfolgreich empfangenen Paket aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn die Aktualisierungszeit $\varepsilon T_{UT,i}$ einen zuvor festgelegten Schwellwert $\varepsilon T_{UT,i,TH}$ nicht überschreitet. Bei einem positiven Testergebnis liegen die Aktualisierungszeiten von 20 erfolgreich empfangenen Paketen 19 Pakete unterhalb des festgelegten Schwellwerts.

3.5.5 **Kommunikationskenngröße Paketverlustrate**

3.5.5.1 Relevanz

Die Paketverlustrate ist auch eine Kommunikationskenngröße, welche innerhalb der Funklösung bewertet wird. Sie quantisiert gestörte Kommunikation.

3.5.5.2 Definition

Die Paketverlustrate (PLR) ist definiert als

$$PLR = \frac{N_{\mathrm{TX}} - N_{\mathrm{RX}}}{N_{\mathrm{TX}}},$$

wobei N_{Tx} der Anzahl der ausgesendeten Pakete und N_{Rx} der Anzahl der erfolgreich empfangenen Pakete entspricht. Es charakterisiert somit das Verhältnis von verlorenen Paketen zu den ausgesendeten Paketen.

3.5.5.3 Testbedingung

Für die Kommunikationskenngröße PLR wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer gestörten Kommunikation vorgeschlagen.

Das Paketverlustverhältnis wird beim Empfänger durchgehend anhand der 20 zuletzt empfangenen Pakete ermittelt. Daraus resultiert eine Auflösung der Kenngröße von 5%. Der Wert der Kenngröße wird somit bei jedem neu erfolgreich empfangenen Paket aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn 95% der zuletzt ausgesendeten Pakete erfolgreich empfangen wurden, somit 19 erfolgreich empfangene Pakete von 20 ausgesendeten Paketen.

3.5.6 **Kommunikationskenngröße Bitfehlerrate**

3.5.6.1 Relevanz

Eine weitere Kommunikationskenngröße ist die Bitfehlerrate. Sie wird auch innerhalb der Funklösung bewertet und quantisiert gestörte Kommunikation.

3.5.6.2 Definition

Die Bitfehlerrate BER (BER: bit error rate) ist definiert als:

$$BER = \frac{\text{Anzahl der Bitfehler im Zeitintervall}}{\text{Gesamtanzahl der empfangenen Bits im Zeitintervall}}$$

Mit anderen Worten, die BER charakterisiert innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls das Verhältnis von fehlerhaft empfangenen Bits zu ausgesendeten Bits.

3.5.6.3 Testbedingung

Für die Kommunikationskenngröße BER wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer gestörten Kommunikation vorgeschlagen.

Die Bitfehlerrate wird beim Empfänger durchgehend anhand der 20 zuletzt empfangenen Pakete ermittelt. Daraus resultiert eine Auflösung der Kenngröße von 5%. Der Wert der Kenngröße wird somit bei jedem neu erfolgreich empfangenen Paket aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn die Kommunikationskenngröße BER einen zuvor festgelegten Schwellwert BER_{TH} nicht überschreitet. Bei einem positiven Testergebnis liegt die Bitfehlerrate von den gesamten 20 zuletzt empfangenen Paketen unterhalb des festgelegten Schwellwerts.

3.5.7 **Kommunikationskenngröße leistungsbezogenes Signal-Rausch-Verhältnis**

3.5.7.1 Relevanz

Das leistungsbezogene Signal-Rausch-Verhältnis ist eine weitere Kommunikationskenngröße. Es wird innerhalb der Funklösung ermittelt und quantisiert, wie der Name schon impliziert, das Verhältnis von der empfangenen Leistung des Nutzsignals zu der empfangenen Leistung des Rauschsignals.

Definition

Das leistungsbezogene Signal-Rausch-Verhältnis SNR (SNR: signal-to-noise ratio) ist definiert als

$$SNR = \frac{P_S}{P_N},$$

wobei P_S der gemittelten Nutzsignalleistung und P_N (N: noise) der gemittelten Rauschsignalleistung entspricht.

3.5.7.2 Testbedingung

Für die Kommunikationskenngröße SNR wird folgende Testbedingung zur Bewertung einer ungestörten Kommunikation vorgeschlagen.

Das Signal-Rausch-Verhältnis wird beim Empfänger durchgehend anhand des zuletzt empfangenen Pakets ermittelt. Der Wert der Kenngröße wird somit bei jedem neu erfolgreich empfangenen Paket aktualisiert. Der Test gilt als erfolgreich, wenn die Kommunikationskenngröße SNR einen zuvor festgelegten Schwellwert SNR_{TH} nicht unterschreitet. Bei einem positiven Testergebnis ist die Nutzsignalleistung des zuletzt empfangen Pakets größer als die Summe von dem Rauschsignal und dem Signal-Rausch-Verhältnis.

3.5.8 **Kommunikationskenngröße energiebezogenes Signal-Interferenz-und-Rausch-Verhältnis**

3.5.8.1 Relevanz

Das energiebezogene Signal-Interferenz-und-Rausch-Verhältnis [3-4] ist eine neuartige Kommunikationskenngröße. Es wird innerhalb der Funklösung ermittelt und quantisiert die Interferenz von Störsignalen und Rauschsignal bezogen auf das Nutzsignal. Da es den Einfluss von Störsignalen und Rauschsignal auf das Nutzsignal charakterisiert, ist es ein guter Indikator für die Koexistenz.

3.5.8.2 Definition

Das energiebezogene Signal-Interferenz-und-Rausch-Verhältnis ESINR (ESINR: energy-based signal-to-interference-and-noise ratio) ist definiert als

$$ESINR = \frac{E_S}{E_{IX} + E_N},$$

wobei E_S der Nutzsignalenergie, E_{Ix} (IX: interference) der Störsignalenergie und E_N der Rauschenergie entspricht, wie in Abbildung 3-5 dargestellt. Die hier dargestellte Definition von ESINR ist eine simplifizierte Form ohne die Integration der Energie über der Zeit. Die exakte Definition ist [3-2] zu entnehmen.

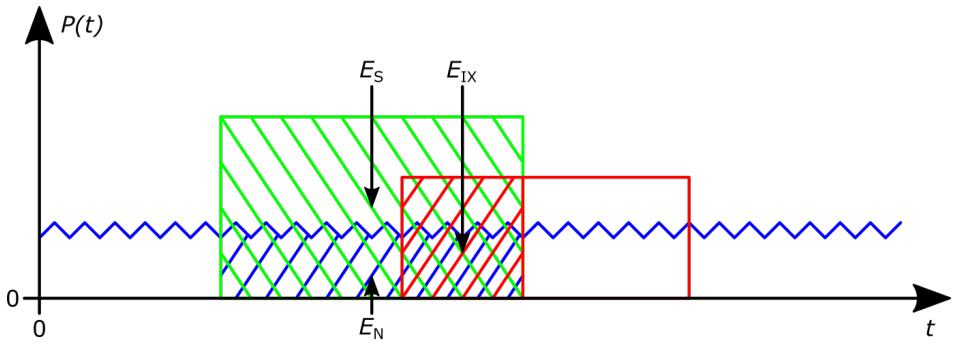

Abbildung 3-5: Leistungen über die Zeit von Nutzsignal (grün), Störsignal (rot) und Rauschsignal (blau). Einfluss der anteiligen Signalenergien auf ESINR: Nutzsignalenergie E_S (grüne Schraffur), Störsignalenergie E_{Ix} (rote Schraffur) und Rauschenergie E_N (blaue Schraffur)

3.5.8.3 Testbedingung

Für die Kommunikationskenngröße ESINR wird noch keine Testbedingung zur Bewertung der Koexistenz vorgeschlagen, da diese Kenngröße noch Gegenstand der Forschung ist.

3.5.9 **Mediumnutzung**

3.5.9.1 Definition

Medium utilization ist eine weitere Kenngröße, welche die effiziente Nutzung des Mediums charakterisiert. Diese wird aus den vier nachfolgenden Verhältnissen gebildet, welche sich auf die vier genutzten Ressourcen Leistung, Zeit, Bandbreite und Raum beziehen.

Die medium utilization (MU) ist z.B. für das 2,4-GHz-ISM-Band definiert als

$$MU = \frac{EIRP}{100\ \mathrm{mW}} \times DC \times \frac{BW}{83{,}5\ \mathrm{MHz}} \times \frac{HPBW}{2\pi}$$

Hierbei ist: $EIRP$: äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP: equivalent isotropically radiated power); *DC:* Tastverhältnis (DC: *duty cycle*). Des Weiteren wurde *MU*, ausgehend von [6] erweitert um das Verhältnis der belegten Frequenzbandbreite *BW* (BW: *band width*) zu der 2,4-GHz-ISM-Bandbreite (ISM: *industrial, scientific, medical*), sowie um das Verhältnis der

Halbwertsbreite *HPBW* (HPBW: *half-power beamwidth*) der Hauptkeule der Antenne zum isotropen Kugelstrahler.

3.5.9.2 Testbedingung

Nicht spezifiziert

4 Konzept

Die Abbildung 4-1 zeigt den Lösungsansatz: Bestehende Funksysteme und ein neuartiges KoMe-Funksystem werden mittels einer leitungsgebundenen Schnittstelle über die jeweiligen Master-Systeme an einen zentralen Funkknoten CCP (central coordination point) angebunden. Der CCP übernimmt somit die Aufgaben des bisherigen humanen Koexistenzmanagers. Dieses Konzept ermöglicht bisherigen Funksystemen einen optimalen Koexistenzbetrieb. Für das neuartige KoMe-Funksystem werden neue kognitive Mediumzugangsmechanismen erforscht.

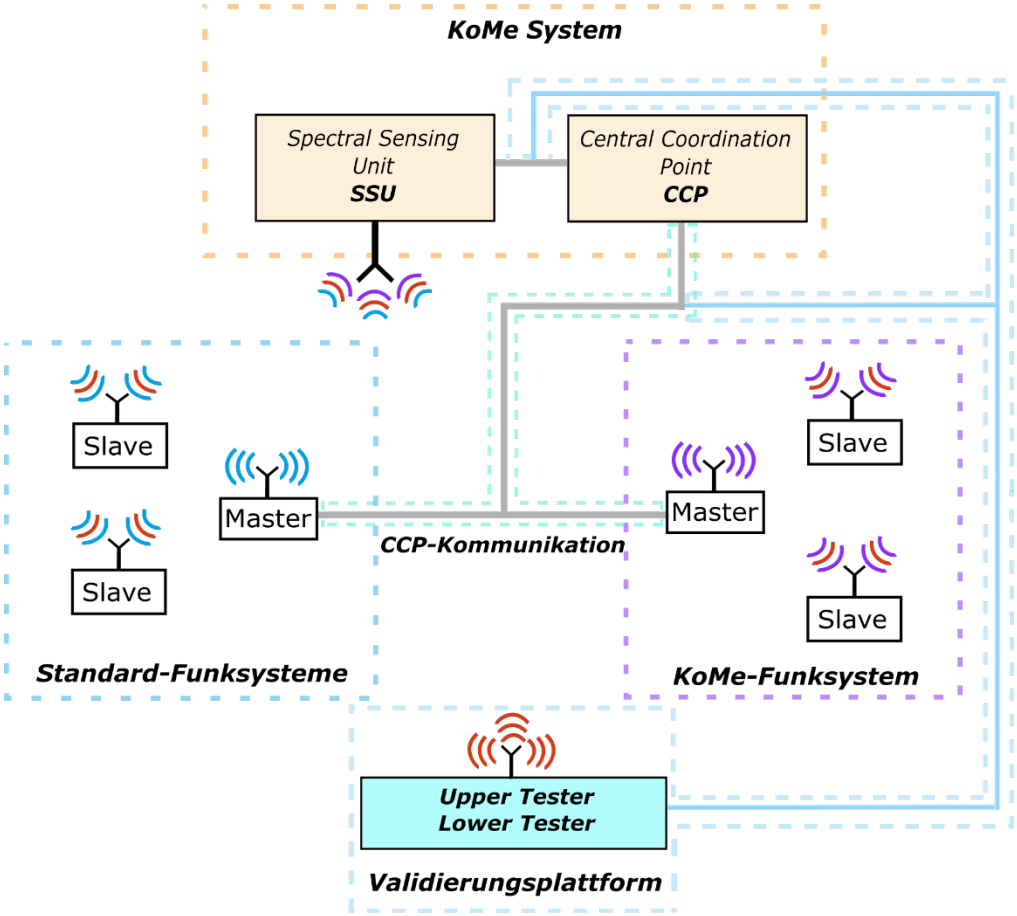

Abbildung 4-1: Lösungsansatz

Der CCP erfasst das Kollisionspotenzial und die verfügbaren Ressourcen in einem Raumbereich mit Hilfe einer oder mehrerer Abtast-Einheiten (spectral sensing unit, SSU) und durch zusätzliche Zustandsinformationen der angebundenen Funksystemen. Daraus leitet das Koexistenzmanagement des CCPs optimale Ressourcenzuweisungen ab und stellt diese den angebundenen Funksystemen geeignet zur Verfügung.

Die erforschten Lösungsansätze wurden mit einer Validierungsplattform umfassend getestet.

5 Koexistenzmanagement

In diesem Kapitel werden die existierenden Netzwerk- und Koexistenzmanagementlösungen anhand der in AP 1 [5-1] gefundenen Kriterien überprüft und bewertet. Für die Bewertung werden nur die Kriterien herangezogen, die in AP 1 angestrebt bzw. berücksichtigt werden. Ferner werden bestehende Lösungen für einen zentralen Koexistenzmanager betrachtet. Weiterhin werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Konzeptentwicklung der Forschungsstelle inIT dargestellt. Die gefundenen Konzepte werden geprüft, sodass die gestellten Anforderungen an zu entwickelnde Algorithmen extrahiert werden können. Anhand der gefundenen Anforderungen wird die dem Koexistenzmanagement zugehörige Ressourcenverteilung in ein Optimierungsproblem überführt, sodass folgend geeignete Kernkonzepte für einen Verteilungsalgorithmus ausgewählt und verglichen werden können. Der entworfene Verteilungsalgorithmus wird anschließend dargestellt. Abschließend werden die Simulationsergebnisse des Algorithmus dargestellt und bewertet

5.1 Bewertung der existierenden Lösungen

In diesem Abschnitt werden die betrachteten, bereits existierenden Lösungen für das Koexistenzmanagement vorgestellt.

5.1.1 Bewertungskriterien

In diesem Abschnitt werden die Kriterien für die Bewertung aufgelistet.

Für die Bewertung der bestehenden Koexistenz- und Netzwerkmanagementlösungen werden die folgenden Kriterien als zwingende Voraussetzung angesehen, damit mit diesen Systemen eine gewünschte Koexistenz industrieller Funksysteme hergestellt werden kann.

Tabelle 5-1: Auflistung der angestrebten Kriterien

Kriterium	Referenz in AP 1	Typ des Kriteriums
Echtzeitverhalten	(R_03)	Funktional
Wiederherstellung der Koexistenz	(R_04)	Funktional
Inbetriebnahmeunterstützung	(R_05)	Funktional
Wiederanlauf	(R_06)	Funktional
Automatisierung	(R_07)	Randbedingung
Nutzung des 2,4-GHz-ISM-Bands	(R_08)	Randbedingung
Einsatzbereich (Industrieumgebung)	(R_10)	Randbedingung
Erkennung von Mediumsnutzern	(R_11)	Funktional
Klassifizierung von Mediumsnutzern	(R_12)	Funktional
IEEE 802.11	(R_13)	Funktional
IEEE 802.15.1	(R_14)	Funktional
IEEE 802.15.4	(R_15)	Funktional
Sporadische Interferenzen	(R_16)	Funktional
Umwelteinflüsse	(R_17)	Randbedingung
Ableitung von Ressourcenempfehlungen	(R_18)	Funktional
Freigabe von Funkkommunikationssystemen	(R_19)	Funktional
Definition der Schnittstelle zum CCP	(R_20)	Funktional
Informationen über Funkkommunikationssysteme	(R_21)	Funktional

Informationsbereitstellung	(R_22)	Funktional
Normenkonformität	(R_25)	Randbedingung
Management von Funkkommunikationssystemen	(R_26)	Randbedingung

5.1.2 **Betrachtete Netzwerkmanagementlösungen**

In diesem Abschnitt werden die betrachteten Lösungen für das Netzwerkmanagement vorgestellt. Im folgenden Abschnitt werden diese dann anhand der in Abschnitt 5.1.1 gefundenen Kriterien bewertet. Es wird zwischen quelloffenen und proprietären Lösungen unterschieden.

5.1.3 **Vorstellung der proprietären Netzwerkmanagementlösungen**

In diesem Abschnitt werden die betrachteten proprietären Netzwerkmanagementsysteme aufgelistet. Diese sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Die Liste der betrachteten Systeme erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 5-2: Betrachtete proprietäre Systeme

Hersteller	**Name des Systems**
Cisco [5-2]	CleanAir
Zebra (früher Motorola) [5-3, 5-4]	AirDefense
Aruba Networks [5-5]	AirWave, Adaptive Radio Management
Meru Networks [5-6]	Spectrum Manager
Hewlett Packard [5-7, 5-8, 5-9]	Enterprise Network Management
MicroNova [5-10]	ManageEngine OpManager
Ericsson [5-11, 5-12, 5-13]	ServiceOn Microwave

Einige der hier genannten Lösungen umfassen sowohl Hardware- als auch Softwarekomponenten (Cisco CleanAir, Zebra AirDefense). Diese Lösungen sind stark spezialisiert und auf spezielle Hardware angewiesen. Andere Ansätze wie z.B. Hewlett-Packard Enterprise Network Management sind Softwarelösungen, die auch Komponenten von anderen Herstellern verwalten können. Alle untersuchten Netzwerkmanagementsysteme nutzen für die Kommunikation mit den Geräten mindestens SNMP. Darüber hinaus werden auch Weboberflächen und andere Protokolle angeboten. Das Hauptaugenmerk der meisten Systeme mit Ausnahme von Cisco CleanAir ist auf das Netzwerkmanagement, nicht auf das Koexistenzmanagement gerichtet.

5.1.4 **Vorstellung der quelloffenen Netzwerkmanagementlösungen**

Für das Netzwerkmanagement sind bereits einige Open-Source Lösungen erstellt worden. Gegenüber den proprietären Lösungen sind die Open-Source-Varianten nicht an spezielle Hardware und Komponenten gebunden, bzw. auf diese limitiert. Quelloffene Lösungen sind allerdings reine Netzwerkmanagementlösungen, die keine native Unterstützung für Funksysteme aufweisen. Diese Lösungen werden im Weiteren darauf untersucht, ob sie durch eine API oder durch Programmierung (Open-Source Quellcode) an die Anforderungen in KoMe angepasst werden können.

Tabelle 5-3: Betrachtete quelloffene Systeme

Name des Systems
OpenNMS [5-14]
Nagios [5-15]

BigSister [5-16]
Munin [5-17]
Cacti [5-18]

5.1.5 **Bewertung der betrachteten Lösungen**

In diesem Abschnitt werden nun die betrachteten Lösungen mit den Kriterien aus Abschnitt 5.1.1 tabellarisch verglichen. Es werden die einzelnen Systeme dahingehend überprüft, in wie weit die Anforderungen erfüllt werden. Die Bewertung wurde anhand der verfügbaren Literatur der Hersteller vorgenommen.

Ein Feld ist grün markiert, wenn das Kriterium teilweise oder vollständig erfüllt ist. Als teilweise Erfüllt werden hier Kriterien betrachtet, die in der jeweiligen Literatur erwähnt aber nicht detailliert beschrieben wurden. Eine rote Markierung bedeutet, dass ein Kriterium nicht erfüllt ist. Bei einer gelben Markierung konnten keine Informationen diesbezüglich gefunden werden.

Tabelle 5-4: Bewertung der betrachteten Lösungen: grün --> erfüllt; gelb --> teilweise erfüllt; rot --> nicht erfüllt

	Proprietär						Quelloffen					
	Cisco CleanAir	Zebra Air Defense	Aruba Networks AirWave	Meru Networks Spectrum Manager	HP Enterprise Network Management	MicroNova ManageEngine OpManager	Ericsson ServiceOn Microwave	OpenNMS	Nagios	BigSister	Munin	Cacti
(R_03)												
(R_04)												
(R_05)												
(R_06)												
(R_07)												
(R_08)												
(R_10)												
(R_11)												
(R_12)												
(R_13)												
(R_14)												
(R_15)												
(R_16)												
(R_17)												
(R_18)												
(R_19)												
(R_20)												
(R_21)												
(R_22)												
(R_25)												
(R_26)												

Wie aus Tabelle 5-4 hervorgeht, erfüllt noch kein bestehendes System sämtliche Anforderungen des Koexistenzmanagements.

5.1.6 **Detaillierte Bewertung der proprietären Lösungen**

Cisco Clean Air ist aktuell das System, welches die Anforderungen am ehesten erfüllt. Dieses System ist eine Kombination aus Hard- und Software, bestehend aus Access Points und Web-

Frontend. Im Unterschied zu anderen Systemen kann dies nicht durch Plugins erweitert werden. Außerdem können keine Systeme der Standards IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 kontrolliert werden.

Zebra Air Defense ist ein System, dessen Fokus auf der Störsicherheit der Funkübertragung liegt. Es kommen Algorithmen zum Einsatz, die einen Angriff auf die Funksysteme erkennen und automatisiert Schutzmaßnahmen ergreifen können. Dieses System betrachtet WLAN und fasst im Speziellen Bluetooth-Systeme als Störer auf. Für den Einsatz wird spezielle Hardware der Firma Zebra benötigt.

Aruba Networks AirWave kann eingesetzt werden, wenn die Qualität und Dichte der WLAN-Netzabdeckung von Interesse ist. Für diesen Einsatzzweck sind eine Visualisierung sowie eine automatische Erkennung von WLAN-Netzwerken integriert. Eine Kontrolle von Systemen der Standards IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 ist nicht vorgesehen.

Meru Networks Spectrum Manager versucht eine WLAN-Verfügbarkeit von 99.99% zu erreichen. Zu diesem Zweck ist eine spezielle Hardware nötig, die das Spektrum überwacht. Diese Hardware ist in der Lage eine Detektion und Klassifizierung der möglichen Störer durchzuführen. Weiterhin werden verrauschte Kanäle proaktiv durch simultane Messungen vermieden. Das Management von Systemen der Standards IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 ist nicht vorgesehen.

HP Enterprise Network Management ist ein Netzwerkmanagementsystem, welches für gesamte Netzwerkinfrastrukturen ausgelegt ist. Eine Spezialisierung für Funknetzwerke besteht nicht. Es ist jedoch möglich diese proprietäre Lösung durch eine API an bestimmte Anforderungen anzupassen. Diese Option ist ab der Lizenzform „Ultimate“ zugänglich. Dieses System unterstützt Hardware mehrerer Hersteller.

MicroNova ManageEngine OpManager ist darauf ausgerichtet eine allgemein hohe Performanz des Netzwerks sicherzustellen. Diesbezüglich werden einige Überwachungsfunktionen bereitgestellt. Außerdem ist eine Skriptausführung integriert. Der Fokus liegt auf kabelgebundenen Netzwerken.

Ericsson ServiceOn Microwave ist ein Subsystem aus dem Produktkatalog von Ericsson ServiceOn, dessen Fokus auf Funksystemmanagement liegt. Dies ist für spezielle Hardware der Firma Ericsson angelegt. Die angebotenen Produkte arbeiten nicht im 2,4-GHz-ISM-Band.

5.1.7 Detaillierte Bewertung der quelloffenen Lösungen

Die quelloffenen Systeme finden ihre Anwendungen nicht im 2,4-GHz-ISM-Band. Durch eine spezielle Adaption per Programmierung können diese Systeme allerdings an die Anforderungen aus AP1 angepasst werden.

OpenNMS ist ein quelloffenes Netzwerkmanagementsystem, das nicht Speziell für Funkanwendungen entwickelt wurde. OpenNMS nutzt SNMP und bietet die Möglichkeit verschiedene Management Information Bases (MIBs) zu nutzen. Eine spezielle Hardware ist nicht notwendig. Das System kann auf Windows- und Linuxdistributionen genutzt werden.

Nagios ist ein Netzwerkmanagementsystem, dessen Kern quelloffen angeboten wird. Weitere Services können kostenpflichtig hinzugefügt werden. Der Kern kann auf Unix-Derivaten genutzt werden.

BigSister ist die Open Source-Variante der Monitoring-Software BigBrother der Firma Quest. Es existieren Versionen für Unix-Derivate und Microsoft Windows. Ein Nachteil (bezüglich Echtzeitfähigkeit) dieser Software ist die Kommunikation über TCP zwischen Agent und Client.

Munin ist eine Monitoring-Software, die für Unix-Derivate entwickelt wurde. Der Fokus dieser Software liegt auf der Überwachung von Netzwerkknoten und der grafischen Darstellung der gesammelten Daten. Eine Einbindung von SNMP-fähigen Geräten sowie eine Programmierung bedarfsgerechter Plugins in verschiedenen Programmiersprachen sind möglich.

Cacti ist eine freie Software, die für die periodische Sammlung von Messwerten entwickelt wurde. Die gewonnenen Daten lassen sich mit dieser Software darstellen. Die Abfrage der Daten erfolgt über SNMP. Diese Software ist nicht für das Netzwerkmanagement konzipiert.

5.2 Bestehende Netzwerkmanagementlösungen in KoMe

Die folgenden Netzwerkmanagementlösungen werden im Forschungsprojekt KoMe für das Koexistenzmanagement in der dargestellten Reihenfolge herangezogen:

1. OpenNMS
2. Munin
3. Nagios

Zunächst wird das System OpenNMS auf Anwendbarkeit im Forschungsprojekt KoMe untersucht. Diese bestehende Lösung ist vielversprechend, da insbesondere die Einbindung der SNMP-MIBs möglich ist. Die Möglichkeit der Anpassung durch gezielte Programmierung ist ein weiterer erheblicher Vorteil gegenüber den proprietären Lösungen. Diese könnten – wenn überhaupt – nur mit intensiver Kooperation des Herstellers angepasst werden.

Falls die Adaption von OpenNMS nicht möglich ist wird als zweites das System Munin betrachtet. Letztlich wird, falls auch Munin nicht an die Anforderungen angepasst werden kann, der Kern von Nagios überprüft.

5.2.1 Bestehende Lösungen für einen zentralen Koexistenzmanager

In diesem Abschnitt werden die bestehenden Konzepte für einen zentralen Koexistenzmanager betrachtet. Anschließend werden diese Konzepte auf einen neuen Koexistenzmanager für das 2,4-GHz-ISM-Band übertragen.

5.2.2 „Central Control Point" aus ETSI TR 102 864:2012

In [5-19], Kapitel 5.2 wird ein Konzept für einen Koexistenzmanager vorgeschlagen. Dieser Manager wird Central Control Point (CCP) genannt. Dieser CCP soll die Informationen aus überlappenden Funknetzwerken der angeschlossenen Systeme sammeln und anhand dieser Informationen Entscheidungen über die Koexistenz in den Ressourcen Frequenz, Zeit und Raum treffen. Abschließend soll der CCP die Entscheidungen an die Radio Access Technologie (RAT) Master (z.B. WLAN Access Point oder Router, Bluetooth Master…) mitteilen. Die RAT Master haben diese Entscheidungen umzusetzen.

5.2.3 „Dynamic Spectrum Management" aus ETSI TR 102 862:2009

In [5-20], Kapitel 7.1 wird das Konzept des „Dynamic Spectrum Management" (DSM) vorgestellt. Die Kernaussage dieses Konzeptes ist, dass das Frequenzspektrum nicht mehr statisch ab die Funktechnologien verteilt wird, sondern dynamisch neu verteilt werden kann. Dieser Ansatz wird für eine erhöhte Flexibilität sowie ökonomische Aspekte gewählt. Die Verantwortlichkeiten des DSM sind wie folgt spezifiziert:

a) Kenntnis über die Richtlinien der spektralen Ressourcenverteilung.
b) Kenntnis über die aktuelle spektrale Ressourcenverteilung.
c) Mitteilung und Verwaltung des Frequenzspektrums an die angeschlossenen RAT Master.
d) Kenntnis über freie Frequenzbereiche.
e) Fähigkeit das Frequenzspektrum mit anderen DSM-Instanzen zu verteilen.

5.2.3.1 „Network Reconfiguration Manager" aus IEEE 1900.4:2009

In [5-21] wird ein Konzept vorgeschlagen, in dem die Aufgaben eines Koexistenzmanagements unter mehreren Funktionsblöcken aufgeteilt werden.

1) Network Reconfiguration Manager (NRM)

2) Operator Spectrum Manager (OSM)
3) RAN Measurement Collector (RMC)
4) RAN Reconfiguration Controller (RRC)
5) Terminal Measurement Collector (TMC)
6) Terminal Reconfigruation Manager (TRM)
7) Terminal Reconfiguration Controller (TRC)

Der NRM verwaltet das Frequenzspektrum. Außerdem sammelt er die Informationen vom OSM und führt eine Bewertung des Spektrums durch. Die getroffenen Entscheidungen werden vom NRM an die angeschlossenen RRCs verteilt. Der OSM kontrolliert Sensoren und gibt Informationen für die Verwaltung des Frequenzspektrums an den NRM, der auf Basis dieser Informationen die Ressourcen verteilt. Der RMC sammelt Informationen über das Radio Access Network (RAN) und teilt sie dem NRM mit. Der RRC rekonfiguriert das RAN nach Anweisungen des NRM. Der TMC sammelt Informationen über das RAN und leitet sie an den TRM. Der TRM hat die Aufgabe die vom NRM verteilen Anweisungen über die spektrale Nutzung umzusetzen. Der TRC steuert die Rekonfiguration des Terminals auf Basis der Informationen des TRM.

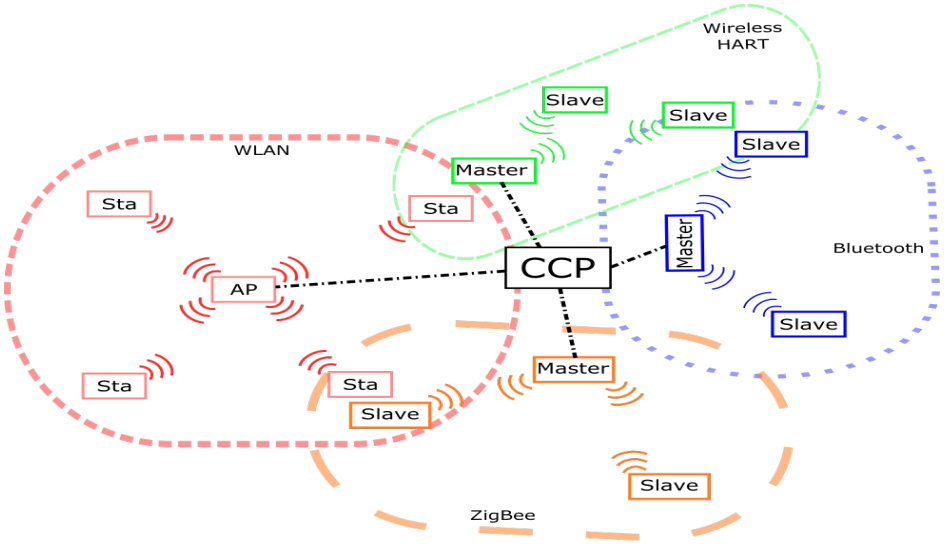

Abbildung 5-1: "CCP" nach ETSI TR 102 864

5.2.3.2 **Anwendung bestehender Konzepte in KoMe**

Für einen Koexistenzmanager im Forschungsprojekt KoMe können die bestehenden Konzepte kombiniert, und so ein entsprechender Manger als CCP erstellt werden. Das Konzept aus 5.2.2 auf das 2,4-GHz-ISM-Band angewendet ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Die Bereiche der Funksysteme sind überlappend dargestellt, um eine Konkurrenzsituation zu verdeutlichen.

Der CCP kann Einfluss auf die Master der einzelnen Funksysteme nehmen um den Zustand der Koexistenz der heterogenen Funksysteme herzustellen. Welche Aufgaben der CCP erfüllt ist Gegenstand von Abschnitt 5.2.3 und 5.2.3.1. Die Aufgabenverteilung für das Koexistenzmanagement ist in Abbildung 5-2 am Beispiel eines WLAN-Systems dargestellt.

In dieser Darstellung übernimmt der CCP die Aufgaben des OSM und NRM. Er verwaltet die Sensoren und wertet die gewonnen Informationen aus. Aus diesen Informationen werden Entscheidungsgrundlagen generiert, die dann vom NRM an die angeschlossenen RAT Master (z.B. einen WLAN Access Point) verteilt.

Die RAT Master übernehmen die Aufgaben des RRC und des RMC. Sie sammeln Informationen über ihr eigenes Radio Access Network (RAN) und teilen diese dem NRM mit. Weiterhin übernehmen sie die vom NRM erstellten Entscheidungen und wenden sie auf das eigene RAN an.

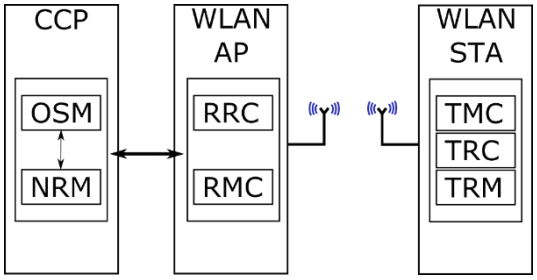

Abbildung 5-2: Aufgaben des CCP nach IEEE 1900.4

Die Terminals eines RAN (z.B. ein WLAN Endgerät) übernehmen die Aufgaben des TMC, des TRC und des TRM. Sie sammeln ebenfalls Informationen über das eigene RAN im TMC und nutzen diese Informationen im TRM. Der TRC ist für die Rekonfiguration des Terminals verantwortlich.

5.3 Konzeptentwicklung für das Koexistenzmanagement

In diesem Abschnitt werden zunächst die in AP2 ermittelten Anforderungen an die zu entwickelnden Algorithmen anhand der in AP2 gefundenen Randbedingungen dargestellt. Nachfolgend werden die Konzepte für die Verteilung der Ressourcen dargestellt. Anschließend wird die Ressourcenverteilung in ein Optimierungsproblem überführt, sodass geeignete Basisalgorithmen angeführt und verglichen werden können.

5.3.1 Anforderungen an die Algorithmen

Das in diesem Forschungsprojekt betrachtete Koexistenzmanagement erfordert Algorithmen, die die folgenden Randbedingungen erfüllen:

1. Echtzeitfähigkeit des gesamten Koexistenzmanagements
2. Berücksichtigung der Anwendungsparameter (vgl. [5-1])
3. Berücksichtigung nicht-beeinflussbarer Systeme (vgl. [5-22])
4. Anwendungsabhängige Priorisierung der kontrollierten Systeme
5. Verteilung der Ressourcen
    a. Raum
    b. Zeit
    c. Frequenz
    d. Codierung
    e. Polarisierung

Aus 1. folgt, dass die zu entwickelnden Algorithmen als Teil des Koexistenzmanagements ebenfalls die Anforderung der Echtzeitfähigkeit erfüllen müssen. Um dies zu garantieren ist es notwendig, dass die Algorithmen für den Mediumszugriff deterministisch sind.

Da wie in 2. beschrieben die Anwendungsparameter (Bandbreitenbedarf, Zeitbedarf und räumliche Ausdehnung) berücksichtigt werden müssen, ist es von Vorteil, wenn die möglichen Anwendungsparameter von den Algorithmen simulativ vorhergesagt werden können. Daher ist es von Vorteil die Algorithmen als Model Predictive Control-Algorithmen (MPC) auszulegen.

Die so ermittelten Verteilungsmöglichkeiten können so errechnet und gespeichert und bei Bedarf genutzt werden. Durch ein geeignetes Sensing kann der aktuelle Zustand mit dem Zielzustand abgeglichen und nachgeregelt werden.

Aus [5-22] folgt der Punkt 3, nach dem auch nicht-beeinflussbare Systeme berücksichtigt werden sollen. Daher sollten die Algorithmen derart ausgelegt werden, dass bestimmte Ressourcen blockiert und nicht für die Verteilung genutzt werden.

Punkt 4 beinhaltet eine Priorisierung der angeschlossenen Funksysteme, die abhängig von ihrer Anwendung eine höhere oder niedrigere Priorität in der Verteilung bekommen können.

In Punkt 5 sind die zu verteilenden Ressourcen aufgelistet, die vom Koexistenzmanagement verwaltet werden sollen. Für die Verteilung der genannten Ressourcen werden angepasste Konzepte vorgeschlagen und für die Entwicklung der Algorithmen verwendet.

Auf die Ressource Codierung kann bei bestehenden Funksystemen kein Einfluss genommen werden. Die Polarisierung der eintreffenden Wellen kann in einer vorwiegend metallischen Umgebung nicht vorhergesagt werden, insbesondere, wenn sich metallische Objekte bewegen (z.B. ein Roboterarm). Daher wird diese Ressource nicht als kontrollierbar angesehen.

5.3.2 **Konzepte für die Verteilung der Ressourcen**

In diesem Abschnitt werden die gefundenen Konzepte für die Ressourcenverteilung dargestellt. Die Verteilung der Ressource Zeit wird in diesem Forschungsprojekt jedoch nicht weiter betrachtet, da eine Zeitsynchronisation zwischen den heterogenen Funksystemen erforderlich ist. Dies ist in den aktuellen Funktechnologiestandards nicht vorgesehen.

5.3.2.1 **Konzept für die Ressource Zeit**

Für ein Koexistenzmanagement, das die Anforderung der Echtzeit erfüllen soll, müssen die kontrollierten Funksysteme ebenfalls diese Anforderung erfüllen. Andernfalls kann nicht bestimmt werden, wann eine Ressourcenzuweisung ihre Gültigkeit hat. Daher wird ein übergeordnetes Zeitschlitzverfahren, vergleichbar mit TDMA (Time Division Multiple Access) vorgeschlagen. Die Struktur ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

Über die bestehenden Funksysteme soll ein Frequenz-Zeit-Raster gelegt werden, sodass eine gemeinsame Basis für die Verteilung entsteht. Die Funksysteme bekommen vom CCP einen Zeit-Frequenz-Slot zugeteilt. Innerhalb dieses zugewiesenen Slots kann die normale Funktion der Funksysteme aufgenommen werden. Diese Zuweisung ist für einen Superslot gültig und wird anschließend neu verteilt. So kann auch eine priorisierte Zuweisung erfolgen.

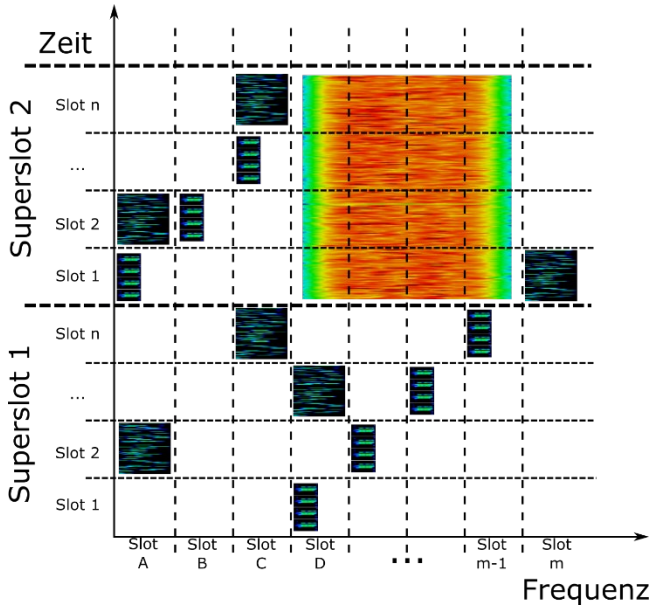

Abbildung 5-3: Frequenz-Zeit-Raster (Konzeptionell)

Da für die Synchronisierung auf einen gemeinsamen Metazeitschlitz eine zeitliche Synchronisierung der einzelnen Geräte erforderlich ist, kann dieses Konzept innerhalb dieses Forschungsprojektes nicht implementiert werden.

5.3.2.2 **Konzept für die Verteilung der Ressource Frequenz**

Die bestehenden heterogenen Funksysteme benutzen bereits ein Kanalraster unterschiedlicher Bandbreite. Diese Bandbreiten betragen 20 MHz für WLAN nach IEEE 802.11g, 1 MHz für Bluetooth nach IEEE 802.15.1 und 2 MHz für WirelessHART nach IEEE 802.15.4. Daher wird ein 1-MHz-Raster zugrunde gelegt. Das zugrundeliegende Konzept wird Frequency Division Multiple Access (FDMA) genannt. In Konsequenz entstehen für die 83,5 MHz des 2,4-GHz-ISM-Band 83 Rasten. So können alle Funksysteme auf Basis des gleichen Rasters verteilt werden; eine Fallunterscheidung entfällt. In der in Abbildung 5-3 gezeigten Skizze besteht ein Frequenz-Slot aus circa 5 solcher Rasten.

Die Funksysteme unterstützen bereits eine Kanalwahl. Bei WLAN-Systemen können die Kanäle bestimmt werden. Bei Bluetooth- und WirelessHART-Systemen können Kanäle von der Verwendung ausgenommen werden (Blacklisting wie z.B. AFH).

5.3.2.3 **Konzept für die Verteilung der Ressource Raum**

Die Ressource Raum kann ungleich den Ressourcen Frequenz und Zeit nicht zugewiesen werden. Die Position der Funksysteme ist zumeist Ortsfest und durch die Infrastruktur der industriellen Umgebung gegeben. Durch ein Pfadverlustmodell kann die räumliche Ausdehnung bzw. die Reichweite der Funksysteme über die Sendeleistung zu beeinflusst werden. Ein solches Konzept ähnelt der Transmission Power Control (TPC), welches in [5-23] Abschnitt 10.8 vermerkt ist.

Pfadverlustmodell

Das hier genutzte Pfadverlustmodell ist [5-24] entlehnt und ist in Abbildung 5-4 gezeigt. Der Pfadverlustexponent wird für Strecken kleiner als 8 m mit 2 angenommen. Das Pfadverlustmodell wurde für unsere Bedarfe auf 10 m angepasst. Die Berechnungsvorschrift ergibt sich zu

$$D_{\mathrm{dB}} = \begin{cases} 40{,}16 + 20\log_{10}(l/\mathrm{m}), & \text{für } l \leq 10\mathrm{m} \\ 60{,}16 + 33\log_{10}(l/10\mathrm{m}), & \text{für } l > 10\mathrm{m} \end{cases} \quad (1)$$

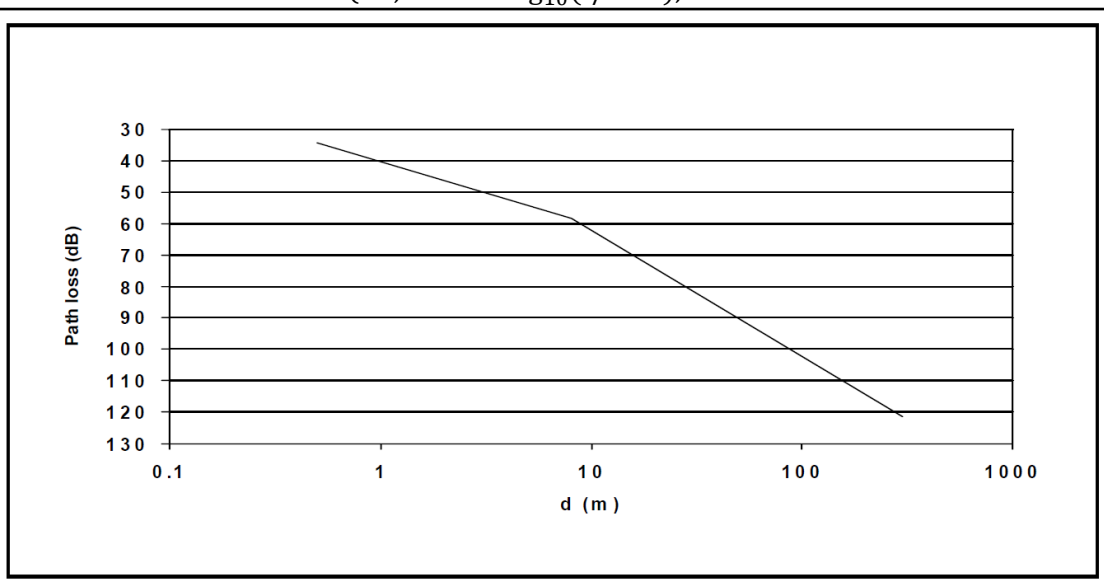

Figure C.2— Path loss (dB) versus distance (m) for empirical indoor model

Table C.1—Equations for path loss (dB) at 2.4 GHz versus distance (m)

Equation	Condition
Path loss = 40.2 + 20 $\log_{10}$(d),	0.5 m <= d <= 8 m
Path loss = 58.5 + 33 $\log_{10}$(d/8)	d > 8 m

Abbildung 5-4 Pfadverlustmodell (aus [5-4], S. 60)

wobei D_{dB} die Dämpfung über die Strecke l darstellt. Dies lässt sich nach l umstellen, sodass eine Reichweitenschätzung abgeleitet werden kann.

$$l/\mathrm{m} = \begin{cases} 10^{\frac{D_{\mathrm{dB}}-40{,}16}{20}}, & \text{für } D_{\mathrm{dB}} \leq 60{,}16 \\ 10^{\frac{D_{\mathrm{dB}}-60{,}16}{33}+1}, & \text{für } D_{\mathrm{dB}} > 60{,}16 \end{cases} \quad (2)$$

Reichweitenschätzung

Mit der Annahme, dass der Sende- und Empfangsantennengewinn $G_{SA} = G_{EA} = 1$ beträgt, kann eine Abschätzung für die Versorgungs- und Interferenzreichweite der Funksysteme angegeben werden.

Die Versorgungsreichweite gibt das Areal an, in welchem ein Funksystem die funktechnologiespezifische minimale Sendeleistung emittiert, mit welcher die spezifische minimale Übertragungsqualität sichergestellt werden kann. Diese kann wie folgt berechnet werden:

$$P_{\mathrm{C,\,dBm}} = \mathrm{MDS_{dBm}} + 10\,\mathrm{dB} \;\; = \mathrm{EIRP_{dBm}} - D_{\mathrm{dB}} \quad (3)$$

Die Interferenzreichweite bezeichnet das Areal, in dem die interferierenden Funksysteme (Tätersystem) am interferierten Funksystem (Opfersystem) eine Eingangsempfangsleistung verursachen, die bei dem betroffenen System zu einer positiven Detektion einer Kanalbelegung führen kann. Die Berechnung folgt der Gl. (4).

$$P_{\mathrm{I,\,dBm}} = \mathrm{MDS_{dBm}} - 10\,\mathrm{dB} \;\; = \mathrm{EIRP_{dBm}} - D_{\mathrm{dB}} \quad (4)$$

Die errechneten Werte aus den Gln. (3) und (4) können in die Gl. (2) für die Variable D_{dB} eingesetzt werden. Das Resultat entspricht der jeweiligen Distanz. Da die Funktechnologien unterschiedliche Signalbandbreiten nutzen, müssen für die Ermittlung der wirksamen Störempfangsleistung die spektralen Bandbreiten der Empfangsfilter berücksichtigt werden. Aus den Standards können die folgenden Werte entnommen werden:

Tabelle 5-5: Spektrale Eigenschaften der betrachteten Funktechnologien

	Symbol	IEEE 802.11g	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Spektrale Filterbandbreite	Δf_F	22 MHz	2 MHz	7 MHz
Maximale Sendeleistung	$P_{S,\,\max}$	20 dBm	10 dBm	10 dBm
Signalbandbreite	Δf_S	16,25 MHz	1 MHz	2 MHz
Spektrale Leistungsdichte	P'_{dBm}	7,89 dBm/MHz	10 dBm/MHz	6,99 dBm/MHz
Empfängerempfindlichkeit	$\mathrm{MDS_{dBm}}$	-82 dBm	-70 dBm	-91 dBm

Die wirksame Störempfangsleistung im Opfersystem $P_{E,\,\mathrm{Opfer}}$ kann nun wie folgt berechnet werden:

$$P_{E,\mathrm{Opfer}} = \begin{cases} \Delta f_{F,\,\mathrm{Opfer}} \times P'_{\mathrm{Stör}} & \text{, für } \Delta f_{F,\,\mathrm{Opfer}} \leq \Delta f_{S,\,\mathrm{Stör}} \\ \Delta f_{S,\,\mathrm{Stör}} \times P'_{\mathrm{Stör}} & \text{, für } \Delta f_{F,\,\mathrm{Opfer}} > \Delta f_{S,\,\mathrm{Stör}} \end{cases} \quad (5)$$

Mit Gl. (5) können die in Tabelle 5-6 dargestellten Überdeckungs- und Interferenzreichweiten berechnet werden. Auf der Hauptdiagonalen der Tabelle 5-6 sind die Überdeckungsreichweiten eingetragen (fett markiert).

Tabelle 5-6: Versorgungs- und Interferenzreichweiten der betrachteten Funktechnologien

Opfer / Störer	IEEE 802.11g	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
IEEE 802.11g	**56,59 m**	42,51 m	268,97 m
IEEE 802.15.1	92,22 m	**9,89 m**	172,81 m
IEEE 802.15.4	92,22 m	39,92 m	**56,59 m**

Transmission Power Control

Die Diskretisierung und Mehrfachzuweisung von Frequenz und Zeit innerhalb einer Raumzelle werden um das TPC-Konzept erweitert. Die Reichweite der Funksysteme kann über das in Abbildung 5-4 gezeigte Pfadverlustmodell mittels der Sendeleistung variiert werden. Damit die Funksysteme weiterhin ihre geforderten Anforderungen erfüllen (vgl. [5-2]), darf die Sendeleistung nur soweit reduziert werden, dass alle Clients eine ausreichende Empfangsleistung empfangen. Dies soll über die Recieved Signal Strength Indicator-Werte (RSSI) gegengeprüft werden. Falls weiterhin eine Verschlechterung der in [5-1] genannten Parameter eintritt, muss die Sendeleistung sukzessive angepasst werden.

Ressourcenverteilung als Optimierungsproblem

Die von den Funksystemen für eine Übertragung genutzten Ressourcen können wie Folgt abgegrenzt werden (vgl. [5-5]):

- Frequenz
- Zeit
- Raum
- Code
- Polarisation

Die für dieses Forschungsprojekt relevanten Ressourcen sind allerdings nur die Ressourcen Frequenz, Zeit und Raum. Auf den Code der jeweiligen Funktechnologie kann direkt kein Einfluss genommen werden, da dieser von den Funksystemen selbst gewählt wird. Die Polarisation kann in einer industriellen Umgebung nicht als Ressource genutzt werden, da eine vorwiegend metallische Umgebung angenommen werden muss. Die entstehenden Reflexionen der elektromagnetischen Wellen führen zu ungewollten Veränderungen der Polarisation, sodass nicht definiert ist, mit welcher Polarisation die Welle am Empfänger empfangen wird.

Die Koexistenz von Funksystemen wird in [5-2] folgendermaßen definiert:

“Coexistence (wireless communication coexistence): state in which all wireless communication solutions of a plant using shared medium fulfil all their application communication requirements.”

In [5-3] wird die Koexistenz folgendermaßen definiert:

„Coexistence: The ability of one system to perform a task in a given shared environment where other systems have an ability to perform their tasks and may or may not be using the same set of rules.”

Die Definitionen besagen, dass der Zustand der Koexistenz dann vorliegt, wenn alle Funksysteme ihre applikationsbezogenen Anforderungen erfüllen können. Mit diesen Definitionen ist der Zustand bivalent; eine qualitative Bewertung ist hiermit nicht möglich. Daher wird der Begriff wie folgt erweitert:

> **Vollständige (Absolute) Koexistenz** von Funkkommunikationssystemen beschreibt den Zustand, in dem alle Funkkommunikationssysteme in einem geteilten Medium ihre spezifischen Applikationsparameter vollständig erfüllen (vgl. IEEE 802.15.2 und ETSI 103 329). Vollständige Koexistenz kann erfüllt oder nicht erfüllt sein.
>
> **Teilweise (Partielle) Koexistenz** von Funkkommunikationssystemen beschreibt den Zustand, in dem alle Funkkommunikationssysteme in einem geteilten Medium ihre spezifischen Applikationsparameter ausreichend erfüllen. Teilweise Koexistenz kann qualitativ zwischen 0% (vollständige gegenseitige Störung) und 100% (absolute Koexistenz) bewertet werden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen ungestörte Übertragungen erfolgen. Übertragungen werden dann gestört, wenn in einem geteilten Medium mehrere Sender zum gleichen Zeitpunkt im gleichen Frequenzbereich in relativer Nähe zueinander das Medium nutzen. Durch die gleichzeitige Mehrfachnutzung kann die Übertragung vom Empfänger nicht korrekt interpretiert werden. Um dies zu vermeiden, sollte die Nutzung des Mediums möglichst derart zugewiesen werden, dass Funkkommunikationen sich in wenigstens einer der Ressourcen Frequenz, Zeit oder Raum soweit unterscheiden, dass keine Überlappung vorliegt. In diesem Fall kann eine absolute Koexistenz erreicht werden. Die Verteilung der Ressourcen muss dahingehend optimiert werden, um den Fall der absoluten Koexistenz zu erreichen.

Für die Optimierung gibt es eine Reihe von Konzepten, die für die Lösung solcher Optimierungsprobleme herangezogen werden. Die Ressourcenverteilung auf ein Optimierungsproblem mit einer endlich abzählbaren Lösungsmenge überführt. Für ein solches Optimierungsproblem wurden folgende Lösungsansätze betrachtet:

1. Simplex-Verfahren

2. Downhill-Simplex-Verfahren
3. Lokale Suche
4. Spanning-Tree-Heuristik
5. Simmulated Annealing
6. Rank and Select-Verfahren
7. Evolutionäre Algorithmen

Für die Ressourcenbewertung wurde ein Rank-and-Select-Ansatz gewählt. Dieser ist für die Ressourcenbewertung geeignet, da die Vorverarbeitung durch den Klassifikationsalgorithmus „NFSC“ bereits eine geeignete Bewertung der Einzelressourcen durchführt. Daher muss anschließend nur eine kontextsensitive Betrachtung der benachbarten Ressourcen durchführen.

Für die Ressourcenverteilung wurde ein Algorithmus auf Basis von Evolutionären Algorithmen gewählt. Diese Art von Algorithmen wird für die Untersuchung von globalen Optima eingesetzt. Außerdem können hier beliebige Abbruchbedingungen sowie Bewertungsmetriken eingesetzt werden. Bei unendlicher Laufzeit konvergiert der Algorithmus gegen die exhaustive Suche aller Optima (Brute-Force).

Eine Lösung gilt als optimal, wenn sich die verteilten Ressourcen jeweils in mindestens einer Dimension (Frequenz, Zeit oder Raum) unterscheiden.

Der entwickelte Algorithmus für die Ressourcenbewertung wurde „Rank-and-Select-based Coexistence Management“-Algorithmus (RaSCoM-Algorithmus) genannt. Dieser wurde in [5-26] vorgestellt. Der Algorithmus für die Ressourcenverteilung trägt den Arbeitstitel „Kassandra“.

5.4 Koexistenzmanagement - Konzeptprüfung

In diesem Abschnitt werden die entwickelten Algorithmen „NFSC“, „RaSCoM“ [5-26] und „Kassandra“ dargestellt. Zunächst wird der Ablauf des Algorithmus „RaSCoM“ erläutert. Anschließend wird die Funktionsweise des Algorithmus „Kassandra“ erläutert.

5.4.1 Beschreibung der Funktionsweise des Algorithmus „RaSCoM“

Der Algorithmus wurde auf die Ressource Frequenz angelegt und entwickelt. Der Ablauf gliedert sich in die folgenden Aufgabenabschnitte:

1. Aktuelle Belegung berechnen
2. Berechnung der potentiellen Belegung
3. Sortierung der potentiellen Belegungen
4. Auswahl der n minimalen Belegungen
5. Betrachtung der direkt angrenzenden Ressourcen
6. Bewertung der m minimalen Belegungen
7. Auswahl der besten Belegung

1) Aus den Werten der angeschlossenen Sensing Unit (SU) wird die aktuelle Belegung extrahiert. Die Werte werden in ein Kanalraster geschrieben, abhängig von den erkannten Funksystemen im Medium. Die Bewertung bezieht sich auf eine prozentuale Mediumbelegung über einen Messzeitraum der SU.
2) Für jedes zu verteilende Funksystem werden die potentiellen Belegungen des Mediums errechnet. Dies wird erreicht, in dem für jede Ressource eines Funksystems die Belegung mit dem Wert 1 gespeichert wird. Die errechneten Belegungen werden zu der aktuellen Belegung addiert. Anschließend werden die Einzelwerte pro Ressourceneinheit akkumuliert.
3) Die Belegungen werden aufsteigend nach ihren akkumulierten Werten sortiert.
4) Die ersten n Minima werden extrahiert und in eine Liste geschrieben.
5) Die angrenzenden Ressourcen werden ebenfalls in die Liste geschrieben. Wenn keine angrenzende Ressource existiert, wird der Wert 0 in die Liste geschrieben.
6) Die Minima werden mit ihren m angrenzenden Ressourcen über eine Gewichtungsfunktion bewertet und gemittelt.

7) Die Ressourcen mit dem geringsten Gewicht werden für die Verwendung empfohlen und dem Verteilungsalgorithmus mitgeteilt.

Der Ablauf wird in folgendem Beispiel verdeutlicht.

Exemplarische Verteilung der Ressource Frequenz für ein WLAN-System

In diesem Beispiel werden die ersten drei Kanäle der Technologie WLAN betrachtet. Die Ressourcen Zeit und Raum werden nicht weiter betrachtet.

Schritt 1: Aktuelle Belegung berechnen

Die Sensing Unit liefert die folgenden Werte :

- Kanal 1: [00001 11111 00011 11100]
- Kanal 2: [11111 00000 01000 00000]
- Kanal 3: [00000 00000 11111 00000]

Schritt 2: Berechnung der potentiellen Belegung

Zu diesen Kanälen wird jeweils die Liste der Belegung eines WLAN-Kanals addiert. Diese Liste hat die Form [00000 11111 11111 00000]. Die resultierenden potentiellen Belegungen sind in folgender Form:

- Kanal 1: [01111 22222 11122 00000]
- Kanal 2: [00011 11111 11111 00000]
- Kanal 3: [00000 11111 22222 00000]

Diese werden Aufsummiert und in der Form (Bewertung, Kanalnummer) gespeichert.

- [(20, #1), (12, #2), (15, #3)]

Schritt 3: Sortierung der potentiellen Belegungen

Die Belegungen werden anschließend in aufsteigender Reihenfolge nach ihrer Bewertung sortiert.

- [(12, #2), (15, #3), (20, #1)]

Schritt 4: Auswahl der n minimalen Belegungen

In diesem Beispiel werden n = 3 Minima für den Vergleich ausgewählt.

Schritt 5: Betrachtung der direkt angrenzenden Ressourcen

Es werden drei Einzellisten mit den direkt angrenzenden Ressourcen angelegt:

- Kanal 1: [(16, #0), (20, #1), (12, #2)]
- Kanal 2: [(20, #1), (12, #2), (15, #3)]
- Kanal 3: [(12, #2), (15, #3), (13.5, #4)]

Da die Kanäle „0“ und „4“ nicht existieren, werden die Mittelwerte der angrenzenden Kanäle gespeichert. Dies verändert den Mittelwert der Liste nicht.

Schritt 6: Bewertung der m minimalen Belegungen

In diesem Schritt werden die Belegungen mit ihren angrenzenden Ressourcen gewichtet. In diesem Beispiel wird der Mittelwert der Belegungen gebildet.

- Kanal 1: [(16, #0), (20, #1), (12, #2)] -> Mittelwert: 16
- Kanal 2: [(20, #1), (12, #2), (15, #3)] -> Mittelwert: 15,667 $\approx$ 16
- Kanal 3: [(12, #2), (15, #3), (13.5, #4)] -> Mittelwert: 13.5

Schritt 7: Auswahl der besten Belegung

In diesem Schritt wird die Belegung mit dem geringsten Mittelwert empfohlen. In diesem Beispiel wird also Kanal 3 für die Nutzung vorgeschlagen und dem Verteilungsalgorithmus übergeben.

5.4.2 Funktionsweise des Algorithmus „Kassandra“

Der Algorithmus „Kassandra“ ist ein Ressourcenverteilungsalgorithmus, der ein globales Optimum der Ressourcenverteilung sucht. Er wurde als Evolutionärer Algorithmus ausgelegt, da sich diese Klasse von Algorithmen sich zur Suche von globalen Optima eignet. Die Evolutionären Algorithmen sind ein naturanaloges iteratives Optimierungsverfahren.

Im Folgenden wird der Ablauf des Algorithmus im Detail erklärt.

1. **Initiale Ressourcenbelegung ermitteln:** Die initiale Ressourcenbelegung stellt den Startwert da, von dem aus die Optimierung durchgeführt wird. Hierzu gehören Sendeleistung, Frequenzbereich und die Nutzung der Ressource Zeit. Auf Basis der initialen Belegung werden nun durch Mutation mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von 75% zwei neue Belegungen generiert, welche als „Generation 1“ bzw. „Elterngeneration“ bezeichnet werden.

2. **Start der Evolution:** In diesem Schritt wird die Evolution der Belegungen gestartet. Die Evolution hat hier zwei Abbruchbedingungen. Sobald ein globales Optimum gefunden wurde, oder die maximale Anzahl an Generationen erreicht wurde, wird die Evolution abgebrochen. Es wird die jeweils letzte Lösung zurückgegeben. Für jede Evolutionsstufe wird die Kindergeneration der vorangegangenen Evolutionsstufe zur Elterngeneration der aktuellen Evolutionsstufe.

3. **Rekombination:** Basierend auf der Elterngeneration wird durch Rekombination eine Kindergeneration erzeugt. Hierzu wird ein simpler Cross-Over-Ansatz gewählt. Es werden zu jeder Ressourcenbelegung in der Elterngeneration zwei Ressourcenbelegungen in der Kindergeneration erzeugt. Dies ist in Abbildung 5-5 am Beispiel einer Kanalbelegung dargestellt.

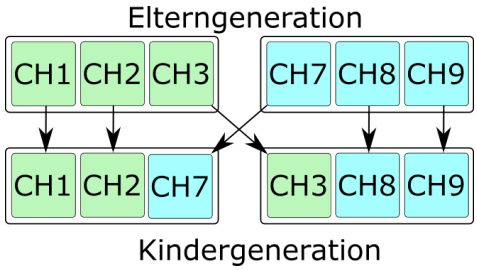

Abbildung 5-5: Darstellung des Cross-Over-Ansatzes

4. **Mutation:** Jede erzeugte Ressourcenbelegung in der Kindergeneration wird mit einer definierten Mutationswahrscheinlichkeit mutiert. In Abbildung 5-6 ist dies schematisch gezeigt. Aus dieser Generation werden zunächst die originalen und die mutierten Ressourcenbelegungen übernommen, um im nächsten Schritt bewertet und selektiert zu werden.

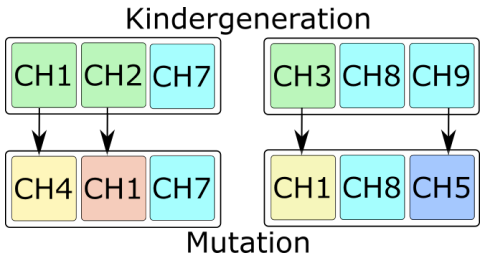

Abbildung 5-6 Darstellung des Mutationsprozesses

5. **Selektion:** Innerhalb der Selektion wird der Fitnesswert jeder Ressourcenbelegung der Kindergeneration berechnet. Die Fitnessfunktion wurde hier derart erstellt, dass die Interferenz der Funknetzwerke bewertet wird. Ein Fitnesswert ist gut, wenn er besonders niedrig ist; also wenn eine minimale Anzahl von Interferenzen auftreten. Ein globales Optimum ist dann gefunden, wenn keine Interferenzen Auftreten, also der Fitnesswert 0 ist. In diesem Fall wird die Evolution abgebrochen.
   Diese Bewertung ist in folgende Einzelschritte unterteilt:
   a. **Frequenzbereiche:** Falls die Frequenzbereiche der Funksysteme überlappen wird davon ausgegangen, dass Interferenzen auftreten können. Diese Prüfung wird von jedem Funksystem (Access Point bzw. Master) zu jedem anderen Funksystem durchgeführt.
   b. **Raum:** In diesem Fall wird über das in Abschnitt 5.3.2.3 dargestellte Pfadverlustmodell jeweils pro Funksystem (Access Point bzw. Master) die Interferenz zu jedem anderen Funksystem ermittelt. Wie auch die Prüfung der Frequenzen wird diese Prüfung von jedem Funksystem bidirektional geprüft.
   c. **Zeit:** Im Falle der zeitlichen Überlappung wird von einem Zeit-Frequenz-Raster ausgegangen. In diesem Fall wird genau die gleiche Metrik wie im Fall der spektralen Überlappung zur Bewertung genutzt.

Abhängig von der Anzahl der Generationen g, Anzahl der Funksysteme f, sowie der maximalen Anzahl von Lösungen pro Generation l variiert der Rechenaufwand des Algorithmus.

5.4.3 Funktionsweise des Neuro-Fuzzy Signal Classifier (NFSC)

Der Neuro-Fuzzy Signal Classifier wird im Forschungsprojekt KoMe als Signalklassifizierer innerhalb der Sensing Unit verwendet (vgl. Abbildung 5-7). Der NFSC ist in sechs Schichten unterteilt, von denen hier die ersten vier Schichten zum Einsatz kommen.

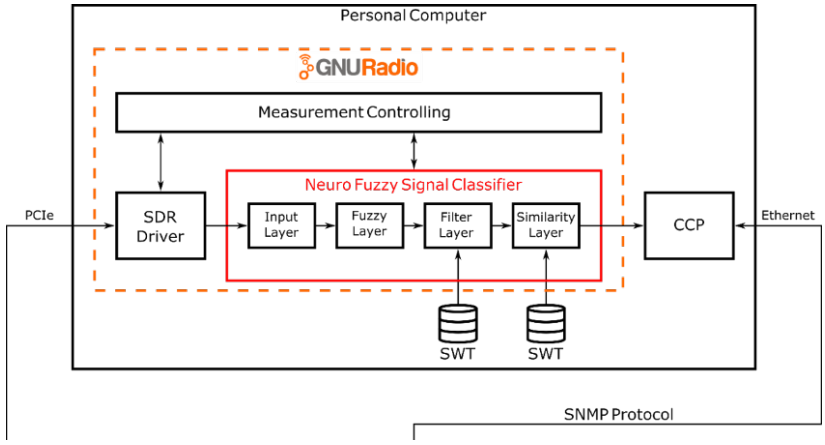

Abbildung 5-7 Übersicht des NFSC

Die Aufgaben dieser vier Schichten sind wie folgt gegliedert:

1. **Input Layer:** Im Input Layer werden die aufgenommen Signale mit einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Für die Auswertung werden die Daten als spektrale Leistungsdichte weiterverarbeitet

2. **Fuzzification Layer:** Im Fuzzification Layer werden die Daten des Input Layer normiert, sodass sie im Wertebereich [0, … ,1] liegen. Dabei sind der zu erwartende Threshold und die Link Margin als Grenzwerte anzugeben.
3. **Filtering Layer:** Im Filtering Layer werden die zuvor fuzzifizierten Signale gemäß einer spektralen Filtermaske gefiltert. Die Filtermaske ist als Parameter anzugeben.
4. **Similarity Layer:** Im Similarity Layer werden die gefilterten Daten mit einer weiteren spektralen Maske verglichen. Diese Maske sollte den erwarteten Bandbreiten der zu klassifizierenden Signale entsprechen. Als Ausgang ergeben sich Werte zwischen 0 und 1, wobei der Wert 1 eine maximale Ähnlichkeit zu der spektralen Maske angibt

Die Ausgangsdaten des NFSC werden als Eingangsdaten im Algorithmus „RaSCoM“ genutzt.

5.5 Koexistenzmanagement - Implementierung und Test

In diesem Abschnitt werden die Algorithmen „RaSCoM“ und „Kassandra“ evaluiert.

5.5.1 Implementierung und Test des Algorithmus „RaSCoM“

Der Algorithmus „RaSCoM“ wurde in der Programmiersprache Python implementiert. In diesem Abschnitt werden zunächst die Simulationsergebnisse gezeigt. Die Implementierung wurde in der Softwareumgebung GnuRadio eingebettet, um eine Verbindung zu einem Software Defined Radio zu schaffen.

5.5.1.1 Simulationen des Algorithmus in Python ohne GnuRadio

Zeitmessung

Der in 5.4.1 beschriebene Algorithmus wurde mit dem Python-Modul „timeit“ untersucht. Die Ausführungszeit beträgt im Mittel bei 100 000 aufrufen 1 ms.

5.5.1.2 Simulationen des Algorithmus in Python mit GnuRadio

Der Algorithmus wurde in die Softwareumgebung GnuRadio implementiert, um eine Verbindung zu einem Software Defined Radio herzustellen. Die übergeordnete Struktur ist in Abbildung 5-8 eingefügt.

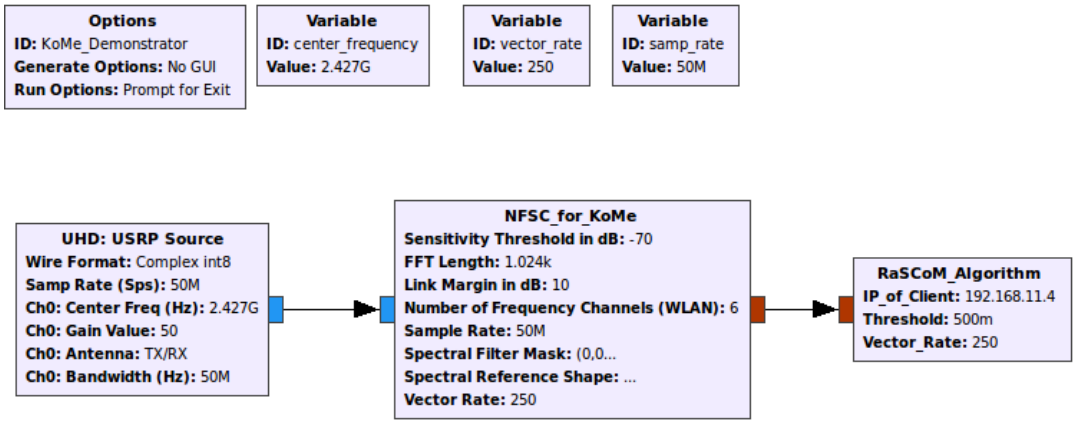

Abbildung 5-8 Struktur der Simulation

Die Implementierung des Blocks „RaSCoM_Algorithm“ wurde in Abbildung 5-9 dargestellt.

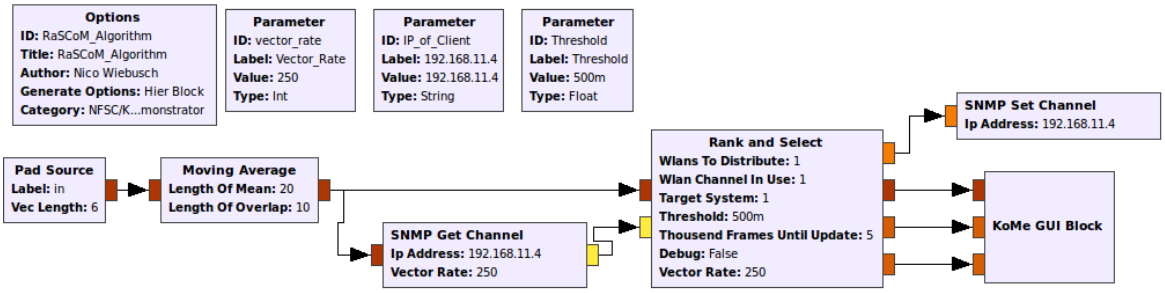

Abbildung 5-9 Darstellung der Auswertung mit RaSCoM-Algorithmus

Die Bewertung des besten Kanals wird in der unteren Zeile angezeigt. Ab einem Wert von 0,5 des aktuell genutzten Kanals wird ein Wechsel vorgeschlagen.

5.5.2 Implementierung und Test des Algorithmus „Kassandra“

Der Algorithmus „Kassandra“ wurde in Abschnitt 5.4.2 prinzipiell bereits erläutert. In diesem Abschnitt werden nun die Implementierung und die Testergebnisse gezeigt.

5.5.2.1 Implementierung des Algorithmus „Kassandra“

Der Algorithmus Kassandra wurde in der Programmiersprache Python (Version 3.6.4) implementiert. Es ist ein Evolutionärer Algorithmus, der ein graphentheoretisches Problem löst. Als Grundlage für die Berechnungen dient ein Graph, der die vom CCP kontrollierten Netzwerke-Master repräsentiert. Die Netzwerk-Master haben die Eigenschaften, welche in Tabelle 5-7 gezeigt sind. Ein typisches Szenario ist in Abbildung 5-10 (links) gezeigt.

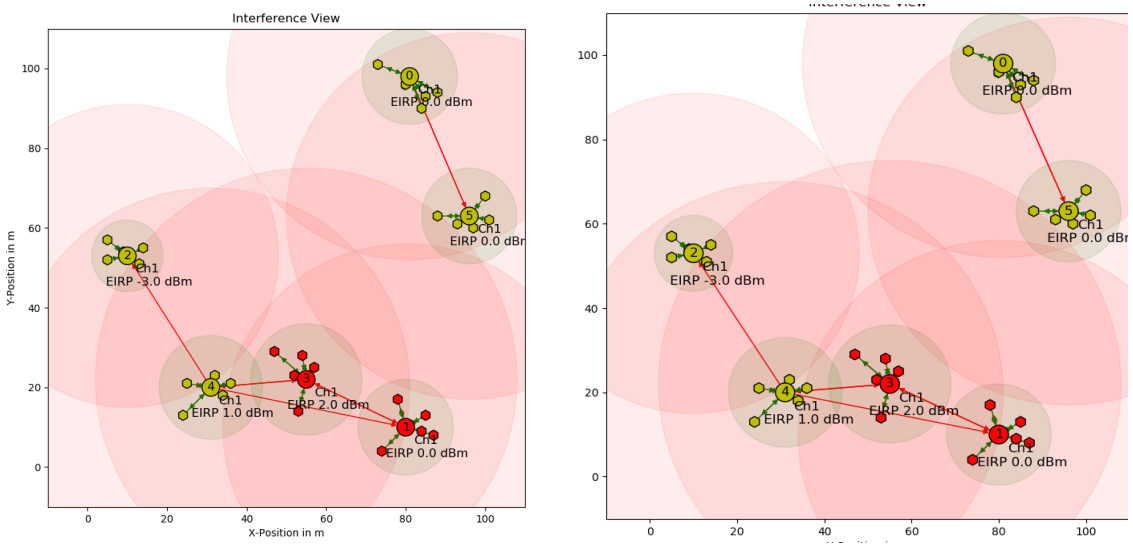

Abbildung 5-10 Darstellung eines typischen Netzwerkgraphen (links) mit initialer Ressourcenverteilung; optimierte Ressourcenverteilung (rechts). Koexistenzzustand: gut (grün), medium (gelb), schlecht (rot)

Tabelle 5-7 Eigenschaften der Netzwerkknoten

Eigenschaft	Einheit	Typische Werte
Frequenzbereich	MHz	2402 – 2422
Sendeleistung EIRP	dBm	20
Position	m	(15,20,4)
Spektrale Filterbandbreite	MHz	22

Spektrale Signalbandbreite	MHz	16,25
Signal-to-Interference-Ratio	dB	20
Technologietyp	-	WLAN
Netzwerkname	-	WLAN 1
MDS	dBm	-82

In diesem Szenario sind sechs Netzwerke mit je fünf angeschlossenen Clients vorhanden. Die großen roten Kreise deuten die in Abschnitt 5.3.2.3 dargestellte Interferenzreichweite; die kleineren grünen Kreise die Überdeckungsreichweite. Innerhalb der Überdeckungsreichweite befinden sich die dem Netzwerk zugehörigen Clients. Die Überdeckungsreichweite folgendermaßen ausgelegt worden:

$$P_E = \mathrm{MDS} + \mathrm{SIR} + 3\ \mathrm{dB}$$

Über die Formel (2) in Abschnitt 5.3.2.3 kann hieraus eine minimale Überdeckungsreichweite berechnet werden. Aus der eingestellten Sendeleistung ergibt sich die Interferenzreichweite. In dieser Implementierung wurde davon abgesehen eine Berechnung der Störleistung aller jeweiligen Tätersysteme am Punkt der jeweiligen Opfersysteme durchzuführen. Es wurde die Funktionsfähigkeit der Netzwerke an sich als Maßgabe für die Ermittlung genutzt. Unterhalb der minimal notwendigen Sendeleistung ist die Funktion der Netzwerke n icht weiter sichergestellt. In zukünftigen Berechnungen kann dies als untere Grenze angesehen werden. Der Algorithmus versucht durch Evolution der Verteilung der Frequenzkanäle derart zu optimieren, dass keine Störverbindungen (rote Pfeile) zwischen den Netzwerken existieren. Ungestörte Systeme erscheinen grün, einfach gestörte Systeme gelb und mehrfachgestörte Systeme rot. Im beispielhaft gezeigten Szenario ist es möglich eine optimale Lösung zu finden. Diese ist in Abbildung 5-10 (rechts) gezeigt.

5.5.2.2 **Evaluationsergebnisse des Algorithmus „Kassandra“**

Die Laufzeit des Algorithmus „Kassandra“ ist abhängig von mehreren Faktoren:

1. Anzahl der Netzwerke bzw. Netzwerk-Master, die eine Ressource benötigen
2. Größe der Population per Generation
3. Mutationswahrscheinlichkeit der Kind-Generationen
4. Packungsdichte der Netzwerke

Die genannten Faktoren 1-3 wurden in 7 Szenarien untersucht, die zufällig generiert worden sind. Dabei wurden nur Szenarien untersucht, die ein globales Optimum besitzen, welches keinerlei Störungen beinhaltet (absolute Koexistenz). Jedes Szenario wurde in 100 Durchläufen analysiert. Dabei wurden die Parameter für die Simulation genutzt, die in Tabelle 5-8 dargestellt sind.

Tabelle 5-8 Parameter der Evaluation

Nummer des Szenarios	0	1	2	3	4	5	6
Anzahl der Netzwerke	2	3	4	5	6	7	8
Größe der Population per Generation	[8,16,32,64]						
Mutationswahrscheinlichkeit	[10%, 20%, ..., 90%, 100%]						
Packungsdichte der Netzwerke	gering	gering	gering	mittel	mittel	hoch	mittel

Die **Anzahl der Netzwerke** gibt die Anzahl der Netzwerk-Master im jeweiligen Szenario an. Jeder Netzwerk-Master hat einen zugehörigen Client im Abstand von 8 m.

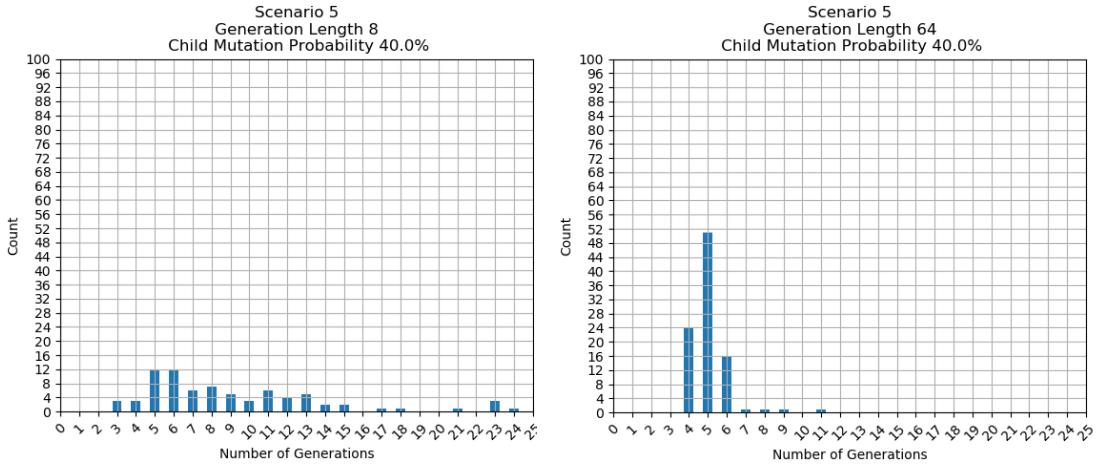

Abbildung 5-11 Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Populationsgrößen

Die **Größe der Population per Generation** gibt die Populationsgröße an, die nach der Selektion verbleibt und in die folgende Kind-Generation übernommen wird. In Abbildung 5-11 ist ein Szenario mit gleicher Mutationswahrscheinlichkeit mit zwei unterschiedlichen Populationsgrößen dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass bei einer sehr kleinen Populationsgröße (links) die Streuung der Anzahl der benötigten Generationen sehr groß ist. Im Gegensatz dazu ist die Streuung bei einer größeren Population sehr gering. Die Balken zeigen an, in welcher Generation das globale Optimum gefunden wurde. Die Mutationswahrscheinlichkeit ist in beiden Abbildungen identisch. Je größer jedoch die Population ist, desto höher ist die Laufzeit. Dies wird durch die Möglichkeit der Parallelisierung aufgewogen.

Die **Mutationswahrscheinlichkeit** gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein einzelnes Element einer Population zufällig mutiert. In Abbildung 5-13 sind zwei Mutationswahrscheinlichkeiten innerhalb eines Szenarios bei konstanter Populationsgröße dargestellt.

Aus der Abbildung 5-13 geht hervor, dass eine zu groß gewählte Mutationswahrscheinlichkeit für eine höhere Anzahl von benötigten Generationen sorgt, und damit auch für eine größere Laufzeit. Dieses Verhalten lässt sich so erklären, dass bei einer zu großen Mutationswahrscheinlichkeit das globale Optimum „übersprungen“ wird.

Die **Packungsdichte** der Netzwerke lässt sich nur qualitativ angeben. Eine hohe Packungsdichte bedeutet, dass in einem gewissen Raumbereich mehrere Netzwerk-Master vorhanden sind, die unterschiedliche Ressourcen benötigen. Bei der Evaluation hat sich allerdings gezeigt, dass die Packungsdichte einen erheblichen Einfluss auf die Laufzeit und das Finden

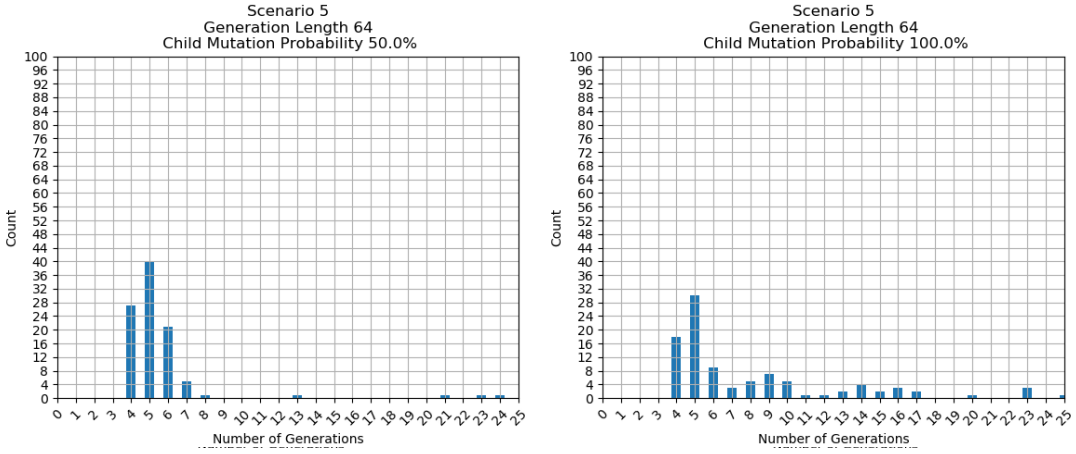

Abbildung 5-12 Anzahl benötigter Generationen in Bezug auf Packungsdichte

eines globalen Optimums hat. Dies ist im exemplarischen Vergleich in den folgenden Abbildungen zu sehen.

In Abbildung 5-12 sind die benötigten Generationen der Szenarien 5 und 6 bei gleicher Generationenlänge (Generation Length 64) und gleicher Mutationswahrscheinlichkeit (Child Mutation Probability 50.0%) gezeigt. Obwohl in Szenario 6 (links) eine größere Anzahl von Netzwerkknoten vorhanden ist, ist die benötigte Anzahl an Generationen sowie deren Streuung im Szenario 5 (rechts) größer.

Als optimale Parameter haben sich eine hohe Populationslänge (64) sowie eine Mutationswahrscheinlichkeit von 0,5 erwiesen. Mit diesen Parametern wurde in den Szenarien die geringste Laufzeit bei geringstmöglicher Generationenanzahl erzielt. Eine hohe Populationslänge lässt sich, im Gegensatz zu einer hohen Anzahl von Generationen, parallelisieren.

5.5.3 **Verbesserungen des Algorithmus „NFSC“ in Version 2**

Der NFSC hat in seiner Grundstruktur relativ schlechte Erkennungsraten von WLAN- und Bluetooth-Signalen erreicht. Im Fall von WLAN war die Erkennungsrate 60 %, im Fall von Bluetooth ca. 10 %. Dies war für den Einsatz in einem Demonstrator zu gering, sodass einige Verbesserungen am Algorithmus vorgenommen wurden. Diese sind gesammelt in die Version 2 eingeflossen und werden hier schichtweise erläutert.

5.5.3.1 **Verbesserungen des Input Layers**

Am Input Layer wurden einige grundlegende Veränderungen durchgeführt. In der Version 1 des NFSC (kurz NFSCv1) wurde das Signal zunächst mit einer FFT transformiert. Anschließend wurde die Magnitude gebildet, sodass das Signal im Frequenzbereich im logarithmischen Maß genutzt wurde.

Im NFSCv2 wurde zunächst eine Energiedetektion vorgeschaltet. So werden nur Daten ausgewertet, bei denen sicher ein Signal enthalten ist. Dies hat zu einer Effizienzsteigerung geführt. Weiterhin wird nach der Fourier-Transformation kein Magnituden-Spektrum, sondern ein lineares Betragsspektrum gebildet. Dies hat den Vorteil, dass das gesamte Rauschen der verschiedenen Quellen einen verschwindend geringen Anteil am Signal haben. Nach dieser Optimierung wurde noch ein Maximum-Pooling-Layer hinzugefügt. Dieser ist den Neuronalen Netzen entlehnt. Er sucht innerhalb einer definierten Segmentlänge das Maximum und wiederholt es, sodass das gesamte Segment diesem Maximum entspricht. Hierdurch wurde überlagertes Rauschen auf dem Signal minimiert.

5.5.3.2 **Verbesserungen des Filtering Layers**

Die Änderungen am Filtering Layer sind minimal. Es wurde lediglich die Eingabeart erheblich vereinfacht, sodass auch Berechnungsvorschriften als Filtermasken dienen können. Es muss im NFSCv2 im Gegensatz zum NFSCv1 keine Liste mit der entsprechenden Anzahl an Einsen und Nullen übergeben werden. Dies ermöglicht auch die Nutzung anderer Filtermasken (z.B. von Hann, Hamming, Kaiser, ö.ä.)

5.5.3.3 **Verbesserungen des Fuzzy Layers**

Der Fuzzy Layer wurde dahingehend verändert, dass nun keine festen Werte für Threshold und Link Margin angegeben werden müssen, weiterhin aber angegeben werden können. Der Fuzzy Layer wurde adaptiv ausgeführt. Für die ersten 10.000 Frames versucht eine interne Adaptionslogik die optimalen Werte zu finden, und hält sie im Anschluss fest.

5.5.3.4 **Verbesserungen des Similarity Layers**

Der Similarity Layer wurde fundamental umgestaltet. Die Berechnung im NFSCv1 basierte darauf, dass die Signale innerhalb einer feineren Referenzmaske liegen und eine Ähnlichkeit zu ihr aufweisen. Dies war eine faltungsbasierte Auswertung.

Da hier aber eine Normierung durch den Fuzzy Layer vorgenommen wurde, wurden auch kleine Signale auf das Maß des größten vorkommenden Signals bezogen. Dies wurde verändert, sodass jedes einzelne Signal auf eine eigene Referenzbasis bezogen wird. Die Nutzung von Referenzmasken wurde entfernt und durch eine normierungsbasierte Auswertung ersetzt. Da im NFSCv1 ohnehin nur die längen der Referenzmasken relevant waren, wurde hier das Verfahren auf die Übergabe der Längen reduziert. Außerdem wurde ein Moving-Average als Option vorgeschaltet.

5.5.3.5 Zusammenfassung der Verbesserungen des NFSC

Die oben beschriebenen Verbesserungen haben zu einer deutlich erhöhten Erkennungsrate geführt. Sowohl WLAN als auch Bluetooth werden mit über 90% erkannt. Dies wurde auch im KoMe-Demonstrator eingesetzt und geprüft. Die Receiver-Operating-Kurven (ROC) sind in Abbildung 5-14 gezeigt. Dargestellt sind die richtige und falsche positive Erkennungsraten (TPR - true positive rate, FPR - false positive rate) bei Variation der Entscheiderschwelle. Die optimale Entscheiderschwelle ergibt einen Arbeitspunkt links oben auf der ROC-Kurve: 93 % der vorhandenen WLAN-Signale werden richtig erkannt; nicht vorhandene WLAN-Signale werden zu 5 % als vorhanden klassifiziert.

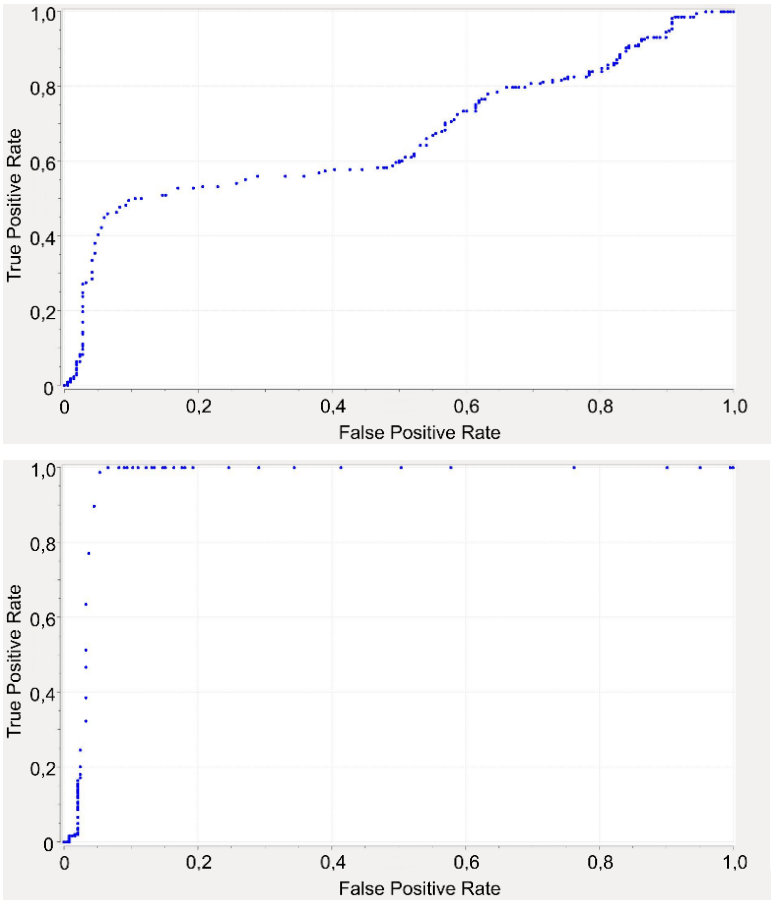

Abbildung 5-14: ROC-Kurve des NFSCv1 (oben) und NFSCv2 (unten); WLAN-Signal, SNR = 10 dB

5.6 Zusammenfassung

In diesem Dokument wurden die Ergebnisse der Konzeptentwicklung, Konzeptprüfung, Implementierung und Test bezüglich kognitiver Verteilungsalgorithmen untersucht. Weiterhin wurden die bereits bestehenden Lösungen auf ihre Anwendbarkeit im Kontext für das Koexistenzmanagement untersucht.

5.6.1 **Untersuchung der bestehenden Lösungen**

Bei der Untersuchung der bestehenden Lösungen wurde festgestellt, dass keine der quelloffenen oder proprietären Lösungen alle Anforderungen erfüllt, die im Forschungsprojekt im Dokument zum Arbeitspaket 1 [1] gefordert werden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die grundlegenden Konzepte zur Ansteuerung und Verwaltung der Funkkommunikationssysteme für die Verwaltung in einem Koexistenz-Management-System geeignet sind. Diese können beispielsweise aus der quelloffenen Software OpenNMS übernommen werden.

5.6.2 **Konzeptenzwicklung**

Innerhalb der Konzeptentwicklung wurden Konzepte für die Funkkommunikationsressourcen Zeit, Frequenz und Raum entwickelt.

Für die Ressource Zeit wurde ein Zeit-Raster ähnlich TDMA vorgeschlagen. Aufgrund der fehlenden Synchronisation der heterogenen Funkkommunikationssysteme war eine weitere Untersuchung der Ressource Zeit nicht möglich. Zu Bedenken ist bei der weiteren Untersuchung, dass bereits eine Aufspaltung der Zeit in zwei zyklisch wiederholte Zeitschlitze die maximale Datenrate halbiert.

Für die Ressource Frequenz wurde ein Konzept entwickelt, nach dem der Kanal bei einer starken Auslastung gewechselt wird. Diese Auslastung wird von einem geeigneten Sensing-Algorithmus (hier NFSC) ermittelt und an den Algorithmus „RaSCoM“ übertragen. Der Algorithmus „RaSCoM“ führt eine Ressourcenbewertung durch, um die minimal belegte Ressource für die Zuweisung an ein angeschlossenes Funkkomunikationssystem vorzuschlagen.

Für die Ressource Raum wurde das bereits bekannte Konzept Transmission Power Control (TCP) übernommen und angepasst [5-27]. Hier werden die Funkkommunikationsteilnehmer angewiesen ihre Sendeleistung auf einen Wert zu reduzieren, der für die Kommunikation ausreichend ist. Für die Bestimmung wurde ein Pfadverlustmodell übernommen und angepasst, sodass mithilfe dieses Modells die Überdeckungs- und Interferenzreichweiten errechnet werden können. Dies wurde, zusammen mit der Belegung von Frequenzen, in ein graphentheoretisches Modell überführt. Um die Ressourcenbelegung zu optimieren wurde ein Algorithmus auf Basis eines Evolutionären Algorithmus entwickelt. Dieser trägt den Arbeitstitel „Kassandra“. Der Algorithmus kann für die Berechnung einer optimalen Ressourcenverteilung für bestehende Infrastrukturen genutzt werden.

5.6.3 **Konzeptprüfung, Implementierung und Test**

Die in Abschnitt 5.3 gefundenen Konzepte wurden implementiert und getestet.

Der entwickelte Algorithmus „RaSCoM“ wurde in Abschnitt 5.5.1 dargestellt und simulativ bewertet. Für die Verteilung einer Ressource bei unterschiedlichen Anzahlen von zu verteilenden Systemen wurde eine mittlere Berechnungszeit von 0,995 ms ermittelt. Diese Implementierung wurde in [26] vorgestellt.

Der Algorithmus „Kassandra“ wurde in Abschnitt 5.5.2 dargestellt. Anhand von 7 Szenarien wurden die Parameter ermittelt und geprüft. Dabei hat sich eine starke Abhängigkeit von der räumlichen Anordnung der Funkkommunikationsinfrastruktur ergeben. Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine größere Population pro Generation recheneffizienter ist, als eine kleinere. Als optimale Mutationswahrscheinlichkeit hat sich ein Wert von 50% gezeigt.

In Abschnitt 5.5.3 wurden die Erweiterungen des NFSCs in der Version 2 dargestellt. Ausgehend vom bestehenden Algorithmus wurden Erweiterungen bezüglich der Vorverarbeitung (Energiedetektion) und der einzelnen Schichten durchgeführt. Die Erkennungsrate wurde so deutlich erhöht.

6 Kognitiver Mediumzugriff

In diesem Kapitel werden sowohl grundlegende Ergebnisse und Konzepte zum KoMe-Funksystem als auch der Spectral Sensing Unit (SSU) dargelegt. Dies umfasst zunächst die grundlegenden Konzepte des KoMe-Funksystems auf der physikalischen Schicht, um ein möglichst flexibles, koexistentes Funksystem zu konzipieren. Auf dieser Basis werden dann die notwendigen Algorithmen zur Ressourcenzuweisung, dem Scheduling, vorgestellt und in einem industriellen Szenario bewertet. Weiterhin wird ein neuer KoMe-Scheduler, der „Fair Error"-Scheduler vorgestellt, welcher die industriellen Anforderungen am besten erfüllt.

Im Anschluss wird die Spectral Sensing Unit behandelt, deren Aufgabe eine schnelle und zuverlässige Erfassung der aktuellen Spektrumsnutzung ist. Hierfür wird zunächst das allgemeine Problem erläutert und dann anschließend vertieft. Die beiden in KoMe entwickelten Verfahren 1D- und 2D-Compressed Edge Spectrum Sensing (CESS) werden ausführlich erläutert und anhand von Ergebnissen bewertet.

Die dargestellten Themen stellen dabei die Arbeiten der Forschungsstelle ITH vollständig dar.

6.1 KoMe-Funksystem

Das KoMe-Funksystem im Vergleich zu existierenden industriellen Funksystemen hat zum Ziel drei Aspekte zu verbessern:

- Bitübertragungsschicht angepasst und die industriellen Anforderungen niedriger Latenz und hoher Robustheit
- Gute Koexistenzeigenschaften für den Betrieb in bestehenden Umgebungen, in denen Spektrallücken genützt werden müssen
- Hohe Ressourceneffizienz durch moderne Schedulingverfahren, die sowohl die geforderten Latenzen berücksichtigen als auch die Datenrate maximieren

Zur Erfüllung dieser Ziele wurden drei Komponenten entwickelt:

- **Bitübertragungsschicht**: Generalized Frequency Division Multiplex mit Polar Codes
- **Koexistenz**: Generalized Frequency Division Multiplex
- **Scheduling**: Fair Error Scheduler

6.1.1 **Koexistenzgerechte Spektralformung - Generalized Frequency Division Multiplex**

Etablierte Systeme wie WLAN benutzen als Spektralformungsansatz ein Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) mit nachgelagerter Filterung, um die geforderten Spektralmasken einzuhalten. Dennoch hat gerade WLAN den Nachteil, eine hohe Außerbandstrahlung in benachbarte Bänder zu streuen, was für die Koexistenz von Funksystemen naturgemäß nachteilig ist. Weiterhin kann OFDM schlechter an Störer oder Bandlücken angepasst werden, da bei Ausblendung einzelner Träger erhebliche Interferenz in der erzeugten Bandlücke verbleibt. Aus diesem Grund sind neuartige Spektralformungskonzepte aus der wissenschaftlichen Literatur hochinteressant, da diese sowohl eine deutlich reduzierte Außerbandstrahlung als auch einfache Ausblendung von Störern versprechen.

Unter den zahlreichen Spektralformungsverfahren aus der Literatur hat sich Generalized Frequency Division Multiplex (GFDM) als vielversprechendster Ansatz herausgestellt, da dieser ein Maximum an Flexibilität verspricht bei der Ausnutzung gegebener Zeit-Frequenz-Ressourcen und darüber hinaus den Ansatz einer Rahmenübertragung verfolgt, so dass sich der Overhead der Bitübertragungsschicht für sehr kurze Pakete reduzieren lässt. Diese beiden Eigenschaften machen GFDM zu einem guten Kandidaten für industriellen Funk.

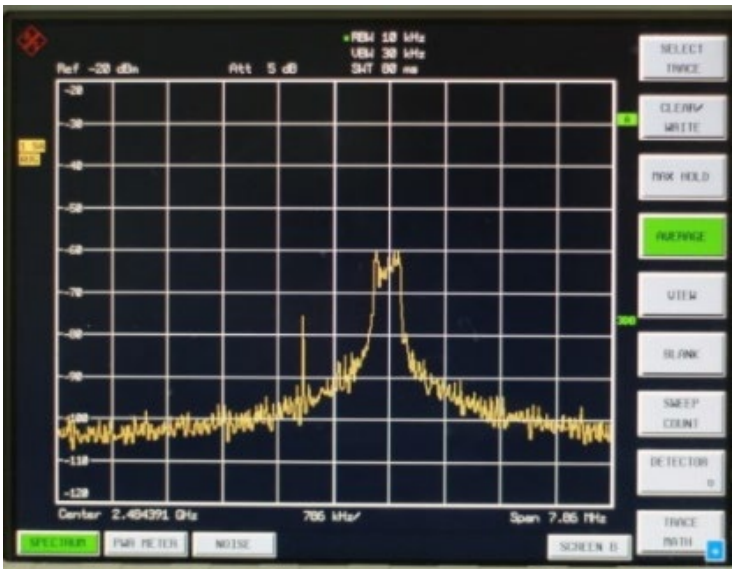

Abbildung 6-1: Exemplarische Messung der Spektralbelegung eines GFDM-Signals

Abbildung 6-1 zeigt eine Beispielmessung der Spektralbelegung eines GFDM-Signals. Wie zu erkennen ist, fällt der Signalpegel außerhalb der Signalbandbreite sehr steil ab und ermöglicht so eine dichte Staffelung von Funksystemen im Frequenzbereich.

Im Folgenden wird die Bitübertragungsschicht mit GFDM im Detail erläutert.

6.1.2 **Vollständige Bitübertragungsschicht**

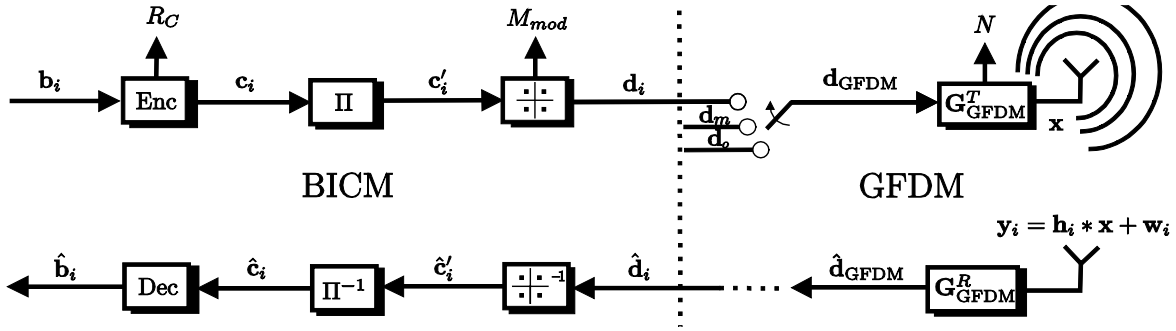

Abbildung 6-2: Modellierung der Bitübertragungsschicht inklusive Kanalcode, Mapping und Spektralformung

Die Bitübertragungsschicht des KoMe-Funksystems besteht aus den in Abbildung 6-2 gezeigten Komponenten:

- **Fehlerkorrigierender Code (Encoder / Decoder)**: Als fehlerkorrigierender Code wird im KoMe-Funksystem eine Polarcode verwendet. Polarcodes weisen sehr einfache Encoder auf und bieten eine Vielfalt an Decodern abgestufter Komplexität. Weiterhin weisen Polarcodes auch für kurze Pakete eine gute Leistungsfähigkeit auf.
- **Interleaver**: Der Interleaver verwürfelt die codierten Bits, um Abhängigkeiten zu reduzieren. Insbesondere werden so Bits, die zu einem Übertragungssymbol gehören getrennt, um Bündelfehler zu reduzieren und die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Decodierung zu erhöhen. Für den Zweck der Evaluation wurde ein Zufallsinterleaver eingesetzt.
- **Modulation**: Der Modulator bildet die codierten und interleavten Bits auf QPSK oder 16-QAM Signale mittels Gray-Mapping ab. Höhere Modulationsstufigkeiten (etwa 64-QAM) sind denkbar, wurden aber aufgrund der geforderten Zuverlässigkeit nicht einbezogen.

- **GFDM-Spektralformungsfilter**: Der GFDM-Block in der Bitübertragungsschicht erfüllt mehrere Zwecke. Zum einen erfolgt hier die Ressourcenzuweisung (vgl. den „Schalter“ in Abbildung 6-2) auf das Zeit-Frequenz-Raster, zum Anderen formt dieser Block für ein gegebenes Raster mittels Gauß-Filter ein Sendesignal mit hoher Frequenz- und Zeitlokalisation.

Das vorliegende GFDM-System wird für die Evaluierung des KoMe-Funksystems mit Scheduler wie folgt parametriert:

- K=200 Unterträger, M=93 Zeitschlitze → insgesamt N=18600 Ressourcen
- N_F=1024 Symbole in einem Übertragungsrahmen
- Maximal 32 Nutzer
- Symboldauer von T_S=930 µs und B=20 MHz Bandbreite
- Trägerfrequenz bei 5.4 GHz

Weitere Details über dieses Setup und die genaue Implementierung der GFDM-Funktionen können [6-1] entnommen werden.

6.2 KoMe-Scheduling

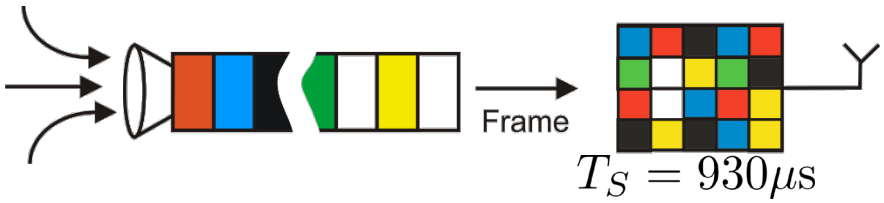

Abbildung 6-3: Illustration der Funktionsweise eines Schedulers bei der Ressourcenzuteilung auf ein Zeit-Frequenzgitter wie es bei GFDM vorliegt. Im vorliegenden GFDM-System wird je ein GFDM Symbole a 930µs als ein Schedulingintervall betrachtet.

In vielen industriellen Funksystemen werden Ressourcen opportunistisch durch verteilte Medienzugriffsverfahren wie Carrier Sense Multiple Access (CSMA) mit Kollisionsvermeidung vergeben. Hierbei besteht keine zentrale Kontrolle über die Vergabe von Ressourcen, was zumeist zu einer Unternutzung des Mediums führt bzw. zur Blockade von Nutzern durch gegenseitige Störungen. Im Gegensatz zu diesen verteilten Medienzugriffsverfahren sind im Mobilfunkt seit jeher dynamische, zentrale Ressourcenzuordnungen durch einen Scheduler üblich. Dabei erfolgt die Zuordnung von Ressourcen (Zeitschlitzen, Frequenzen, etc.) zu verschiedenen Nutzern bzw. Paketen durch einen geeigneten Algorithmus, den Scheduler. Dieser entscheidet anhand von Anforderungen der Nutzer und Seiteninformationen wie die Kanalqualität der Nutzer oder die spektrale Belegung des Mediums, welche Nutzer priorisiert behandelt werden, auf welchen Ressourcen diese zu übertragen haben und mit welchem MCS diese ihre Daten übertragen sollen. Abbildung 6-3 zeigt schematisch die Funktionsweise eines Schedulers. Pakete erreichen den Algorithmus und werden in eine Warteschlange eingereiht. Die Warteschlange wird dann gemäß der ermittelten Ressourcenverteilung geleert und auf das Zeit-Frequenz-Rast von GFDM abgebildet.

Für eine erste Abschätzung, welche Scheduler in einem industriellen Funkszenario mit kleinen Zellen, hohen Echtzeitanforderungen und kleinen Paketen geeignet sein könnten, wurde zunächst eine vereinfachte numerische Evaluation durchgeführt. Hierbei wurde ein einfaches Szenario von 50m Radius, zufällig platzierten Nutzern und einer abstrakten, kapazitätsbasierten Beschreibung der Übertragungsqualität genutzt. Abbildung 6-3 zeigt dabei, dass von den untersuchten Scheduler der Ansatz „Round Robin“ gegenüber den optimierten Mobilfunkansätzen „Max Throughput“ und „Max-Min-Fair“ sehr gut abschneidet. Die dargestellte Latenz wird zu 99,999% eingehalten, wobei nur ein gewisser Anteil der evaluierten Pakete erfolgreich übertragen werden kann. Die Zuverlässigkeit in Summe aufgrund der hohen Paketverlustrate

sehr niedrig. Folglich war eine detaillierte Evaluation notwendig, um auch den Einfluss verschiedener Paketklassen (real-time, non-real time, etc.) besser bewerten zu können.

Tabelle 6-1: Erste Untersuchungsergebnisse von Mobilfunk-Schedulern anhand einer vereinfachten Untersuchungsmethodik

Scheduler	Latenz (99.999%)	Anteil erfolgreicher Paketübertragungen
Round Robin	0.958 ms	79,99 %
Max Throughput	8.310 ms	59,45 %
Max-Min Fair	1.997 ms	79,26 %

Im Folgenden wird daher zunächst eine ausführlichere Darstellung des Evaluationsszenarios dargelegt, gefolgt von einer Beschreibung des allgemeinen Vorgehens zur Abstraktion der Bitübertragungsschicht. Anschließend werden kurz einige bekannte Scheduler vorgestellt und um einen Ansatz ergänzt, welcher explizit das Delay von Paketen berücksichtigt. Schließlich wird die KoMe-Entwicklung „Fair Error“ erläutert und anhand von numerischen Simulationen herausgearbeitet, dass dieser den besten Kompromiss aus Latenzverhalten und Durchsatz bietet.

6.2.1 **Anforderungen und Untersuchungsszenario**

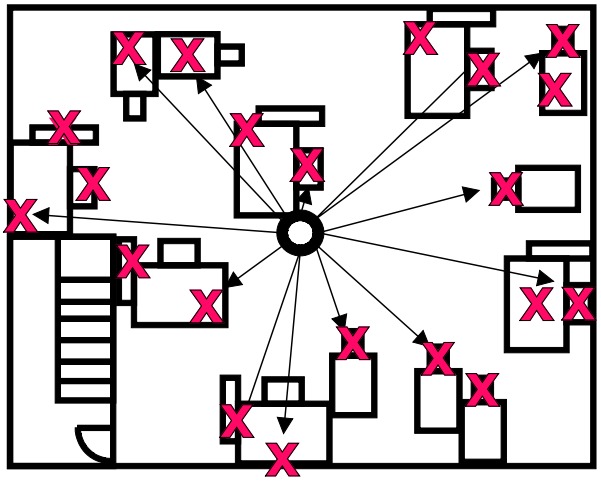

Abbildung 6-4: Abstraktes Modell für ein industrielles Funkszenario mit 50m Zellengrößen und gleichförmig verteilten Nutzern

Die korrekte Evaluation industrieller Szenarien ist grundsätzlich schwierig, da es keine feste Definition von typischen Industrieumgebungen gibt und zudem die Übertragungskanäle für solche Szenarien noch nicht ausreichend beschrieben sind. Als erste Annäherung wurde jedoch in KoMe ein Szenario definiert, welches sich an aktuellen Forschungsergebnissen orientiert und auf Messungen des inIT basiert. Das Szenario ist exemplarisch in Abbildung 6-4 dargestellt und wird wie folgt charakterisiert:

- Zelle mit 50 m Radius
    - Modellierung eines industriellen Funkkanals mit sehr kurzem Echo (~5µs) und Rayleigh-Fading mit exponentiellem Power Delay Profil
    - Kanalkohärenz gemäß der Geschwindigkeit der Nutzer von maximal 10 m/s (zufällig verteilt von -10 m/s bis 10 m/s/)
    - Pfadverluste wie im Freiraum (Verlustfaktor 2)
- Zufällig verteilte Nutzer mit statistischem Bewegungsmodell

Darüber hinaus ist die Modellierung von verschiedenen Nutzern anhand des erzeugten Datenverkehrs essentiell für eine realistische Evaluierung. Hierfür wurde drei unterschiedliche Verkehrsklassen definiert:

- **Zyklische Nutzern (Z)**: Zur Abbildung von zyklischem Verkehr wie er in vielen industriellen Bussystemen üblich ist. Hierbei erzeugen die Z-Nutzer zu jedem Übertragungszeitpunkt ein Paket mit einer Echtzeitanforderung. Im gegebenen System bedeute dies, dass das Paket mit maximal 7 GFDM-Übertragung erfolgreich übertragen werden muss und die zulässige Latenz damit 6,51ms beträgt. Darüber hinaus erhält jedes Paket zur Priorisierung ein Gewicht zwischen 0,8 und 1.
- **Real Time Nutzern (RT)**: Für nicht-zyklische Nutzer gilt die gleiche Deadline von maximal 6,51ms, also 7 GFDM-Symbolen, für die erfolgreiche Übertragung. Diese Nutzer erzeugen zufällig neue Pakete nach einer Poissonverteilung. Darüber hinaus erhält jedes Paket zur Priorisierung ein Gewicht zwischen 0,8 und 1.
- **Non-Real Time Nutzern (NRT)**: Diese Klasse bildet alle nicht-Echtzeit-Anwendungen ab und erlaubt eine maximale Anzahl von vier Wiederholung von Paketen. Danach werden Pakete verworfen und gelten als Paketverlust. Darüber hinaus erhält jedes Paket zur Priorisierung ein Gewicht zwischen 0 und 0,8.

Der Prioritätswert der Verkehrsklassen dient dabei zu einem der Unterscheidung der Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Klassen, zum anderen wird dieser auch in manchen Algorithmen als Entscheidungsgrundlage herangezogen, um zwischen zwei Paketen der gleichen Klasse entscheiden zu können. Für die Evaluation, werden die Verkehrsklassen wie folgt gemischt:

- Z-Pakete werden komplett unabhängig von RT/NRT-Paketen erzeugt mit regelmäßigen Paketintervall 10,23 ms,
- RT- und NRT-Pakete werden mittels einer binären Bernoulliverteilung erzeugt, bei der die RT-Pakete mit der Wahrscheinlichkeit alpha_RT=0,8 gezogen werden und die NRT-Paket mit 1-alpha_RT.

Zur Bewertung der verschiedenen Schedulerverfahren werden folgende Metriken herangezogen:

- **Latenz** bezeichnet die Zeit vom Einreihen eines Pakets in die Scheduler-Warteschlange bis zum erfolgreichen Versand.
- **Datenrate** bezeichnet das Verhältnis der erfolgreich übertragenen Bits zur dafür benötigten zeit
- **Restfehlerrate** bezeichnet das Verhältnis der Paketverluste zu der Gesamtzahl aller Pakete

6.3 Modellierung der Bitübertragungsschicht

Für eine möglichst realistische Simulation der Ressourcenzuweisung durch einen Scheduler benötigt man neben dem zuvor vorgestellten Szenario weiterhin eine möglichst genaue Beschreibung der Bitübertragungsschicht. Diese Beschreibung muss dabei möglichst einfach sein (Look-Up-Table) und somit eine schnelle Evaluation bei der Simulation von vielen Teilnehmern oder großer Szenarien mit vielen Zellen erlauben. Zu diesem Zweck wurde die in Abschnitt 6.1.2 vorgestellte GFDM-basierte KoMe-Bitübertragungsschicht für verschiedene

Parameter numerisch evaluiert. Abbildung 6-2 zeigt diese Bitübertragungsschicht exemplarisch. Hierbei wurden die Modulation (M_mod) und die Coderaten der eingesetzten Polarcodes (R_C) so gewählt, dass verschiedene Arbeitsbereiche abgedeckt werden können. Die Evaluation findet dann numerisch unter Annahme eines einfachen AWGN-Kanal statt, um die Leistungsfähigkeit verschiedener Übertragungsmoden vergleichbar zu ermitteln.

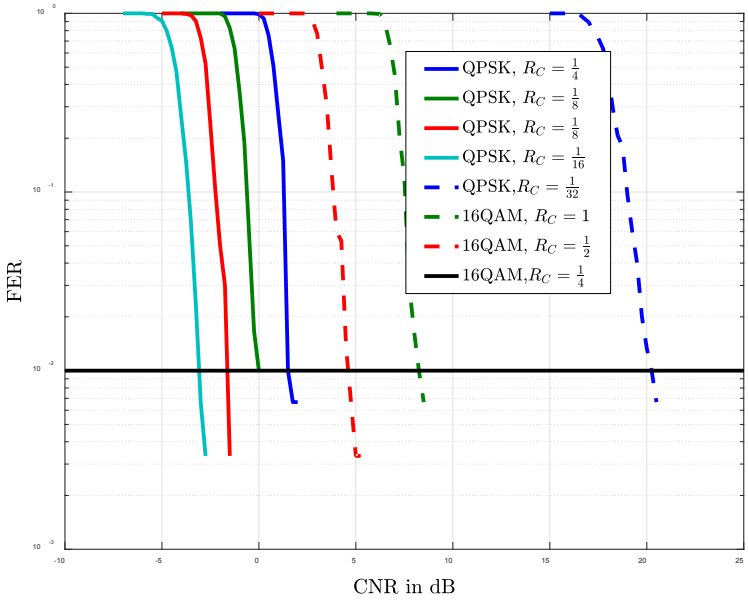

Abbildung 6-5: Rahmenfehlerrate vs. Channel-to-Noise-Ration (CNR) für die QPSK und 16-QAM in Kombination mit Polarcodes verschiedener Coderaten

Abbildung 6-5 zeigt die resultierenden Rahmenfehlerraten für ausgewählte Kombinationen von QPSK und 16-QAM mit Polar Codes der Rate ¼, 1/8, 1/16 und 1/32. Nicht alle Kombinationen führen zu günstigen Fehlerraten, weshalb hier nur die relevanten Kurven gezeigt werden. Aus diesem Ergebnis wurden die sogenannten Modulation und Coding Schemes (MCS) abgeleitet, welche im evaluierten System zum Einsatz kommen. Hierbei wird eine Zielfehlerrate festgelegt, um das benötigte Channel-to-Noise-Ratio (CNR) abzulesen, dass benötigt wird, um diese zu erreichen. Für den Zweck des KoMe-Funksystems müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- Übertragungswiederholungen sind zugelassen
- Übertragungswiederholungen sind nicht zugelassen

Für sehr Latenzkritische Real-Time Pakete können Paketwiederholungen ausgeschlossen werden, so dass für einzelne Übertragungen sehr zuverlässig sein müssen. Daraus resultiert eine Anforderung von einem FER_OW=10^{-8}. Sind Wiederholungen zugelassen, können Pakete auch bei mehrmaligen Fehlern bei der Übertragung durch den Scheduler wiederholt werden. Für diesen Fall liegt die Anforderung bei FER_MW=10^{-2}

6.3.1 **Klassische Scheduling-Algorithmen**

Als Ausgangsbasis für die Untersuchungen wurden die folgenden drei Scheduler ausgewählt:

- **Round Robin** hat eine möglichst gleichförmige Ressourcenverteilung aller Nutzer zum Ziel. Dafür werden Ressourcen zu jedem Sendeframe möglichst gleichförmig auf an die Nutzer zugeordnet [6-2].
- **MaxThroughput** priorisiert die Maximierung des Durchsatzes und bedient immer den Nutzer mit dem besten CNR zuerst. Diese Nutzer erhalten die maximal verfügbaren Ressourcen für ein Paket bei gewählten MCS. Sind weitere Ressourcen verfügbar, erhält diese der Nutzer mit dem zweitbesten CNR und so weiter [6-3].

- **MaxMinFair** benutzt eine komplexere Zielfunktion, welche die Maximierung (max) des Durchsatzes von Nutzern mit minimaler (min) Ressourcenmenge anstrebt und dabei den mittleren Ressourcenbedarf über alle Nutzer (Fairness) als Schwellwert nicht überschreitet [6-4].

6.3.2 **Delay-basiertes Scheduling**

In der jüngeren wissenschaftlichen Literatur sind Latenz- bzw. Delay-sensitive Scheduler im Mobilfunkbereich bereits diskutiert worden. Als vielversprechenden Kandidaten des Delay-basierten Schedulings wurde der sogenannte Delay-sensitive Scheduler (DSS) ausgesucht [6-5]. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Funktionsweise des DSS gegeben, da dieser zum Teil dies Basis für die KoMe-Entwicklung „Fair Error“ darstellt.

Der **Delay-sensitive Scheduler** ist ein drei-schrittiges Verfahren:

1. Zunächst wird die initiale Verteilung von Ressourcen gemäß dem Quotienten der individuellen und der mittleren Rate (relative Forderung) und dem Quotient der individuellen und mittleren Kapazität (relative Kapazität) ermittelt.
2. Sind nach der Initiierung nicht alle Ressourcen vergeben, werden die freien Ressourcen gemäß Latenzforderung von Paketen verteilt, so dass kritische Pakete besser erfüllt werden können.
3. Sind nach der Initiierung mehr Ressourcen vergeben als verfügbar, erfolgt eine Reduktion der allokierten Ressourcen unter Berücksichtigung der Paketalter bis genau alle verfügbaren Ressourcen vergeben sind.

6.3.3 **Der Fair Error Scheduler**

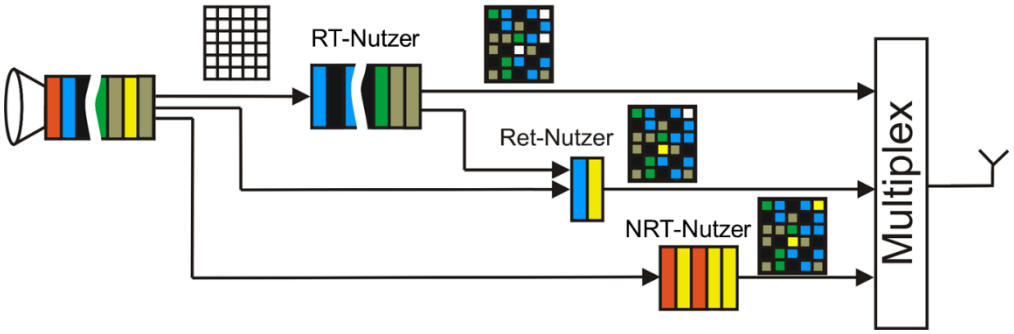

Abbildung 6-6: Schematischer Aufbau des Fair Error Schedulers und seiner drei Schritte.

Aufgrund der eingeschränkten Unterstützung des DSS für verschiedene Verkehrsklassen wurde im Rahmen von KoMe der Fair-Error Scheduler entwickelt, der eine Mischung aus den Grundprinzipien des MaxMinFair und des Delay-sensitive Schedulers mit zusätzlicher Berücksichtigung von Real-Time (RT) / Non-Real Time (NRT) und wiederholten Paketen (Retransmissions) bietet. Grundsätzlich teilt der Fair Error Scheduler die verfügbaren Ressourcen in zwei Teile: einen Echtzeitteil und einen Nicht-Echtzeitteil. In der hier evaluierten Parametrierung werden 90% der Ressourcen für Echtzeitverkehr und 10% der Ressourcen für Paketwiederholungen und Nicht-Echtzeit-Pakete vorgesehen. Die weitere Ressourcenverteilung erfolgt dreistufig wie in Abbildung 6-6 skizziert [6-6]:

1. **Ressourcenvergabe für RT-Nutzer**: Zunächst werden in Anlehnung an den MaxMinFair und den DDS die Ressourcen für die Echtzeitnutzer zugeordnet. Dabei erfolgt die Verteilung dem MaxMinFair, also die Zuteilung von Anteilen der Echtzeitressourcen. Die Ressourcenzuordnung, also die konkrete Vergabe von Ressourcen gemäß der Verteilung erfolgt dann im Sinne des DDS. Sofern aufgrund einer Unternutzung der Echtzeitressourcen
2. **Ressourcenvergabe für Paketwiederholungen**: Im Anschluss an die Echtzeitpakete werden Paketwiederholungen mit Ressourcen versehen, so dass erneut ein maximaler

Durchsatz erzielt werden kann. Auch hierbei werden Echtzeitnutzer ggü. anderen Nutzern priorisiert. Hat ein Echtzeitnutzer Paketwiederholungen in der Queue, dann bekommt dieser immer dann zusätzliche Ressourcen, wenn andernfalls die Wiederholungen nicht gesendet werden könnten.

3. **Verteilen der übrigen Ressourcen**: Sofern nach Schritt 2 und 3 noch Ressourcen verfügbar sind, werden diese möglichst gleichförmig über alle NRT-Pakete aufgeteilt, wobei grundsätzlich Pakete höheren Alters bevorzugt werden, wenn keine vollständige Gleichverteilung erzielbar ist.

6.3.4 **Ergebnisse**

Grundsätzlich ist die Leistungsfähigkeit aller vorgestellten Scheduler abhängig von der Auslastung des evaluierten Systems. In einem unterausgelasteten System sind ausreichend Ressourcen für alle Nutzer und Anforderungen vorhanden, wodurch sich zwar im Detail Unterschiede ergeben, im Prinzip aber alle Verfahren hinreichend funktionieren. Erst im Fall einer Grenzauslastung beginnen die Unterschiede der Scheduler deutlich zu werden. Daher fokussiert dieser Abschnitt auf die Diskussion ausgewählter Ergebnisse für ein grenzausgelastetes System. Das vorliegende GFDM-System ist so dimensioniert, dass im Durchschnitt bis zu 18 Nutzer Pakete übertragen können (vgl. Abschnitt 60). Dies entspricht daher den Fall der Grenzauslastung. Zunächst werden keine Paketwiederholungen erlaubt, um das Verhalten der reinen Bitübertragungsschicht zu betrachten.

Das Evaluationsszenario wurde wie folgt parametriert:

- Szenario wie in Abschnitt 6.2.1
- Z, RT, NRT Pakete wie in Abschnitt 6.2.1
- MSC mit FER_OW=10^{-8}
- Grenzauslastung mit 18 Nutzern
- Pakete der Länge (in Bits): 128, 256, 512, 1024

Datenrate und Restfehlerrate

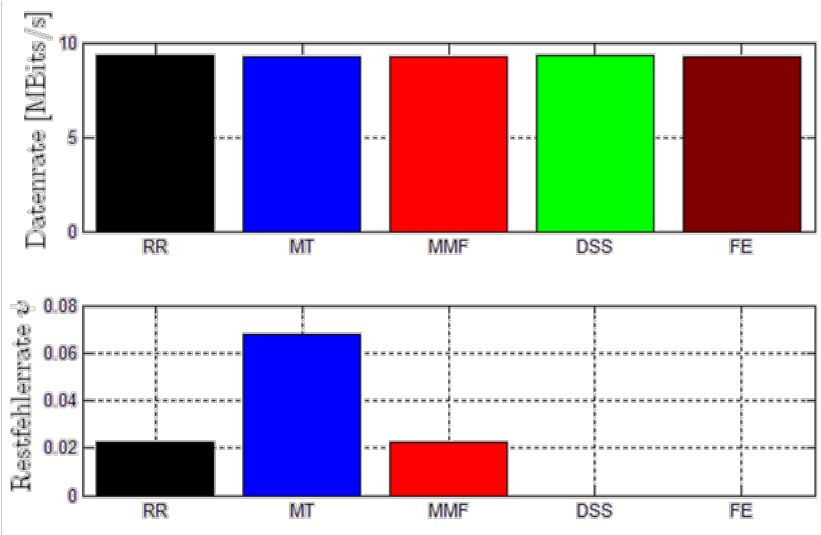

Abbildung 6-7: Datenrate und Restfehlerrate aller betrachteten Scheduler in einem grenzausgelasteten KoMe-System ohne Paketwiederholungen.

Abbildung 6-7 zeigt die erzielte Datenrate und Restfehlerwahrscheinlichkeiten aller betrachteten Scheduler. Wie zu erkennen ist, wird von allen Algorithmen annähernd die gleiche Datenrate erzielt. Im Detail ergeben sich minimal Unterschiede, so erreicht der MaxThrouphut (MT) z.B. eine minimal höhere Datenrate als der Round Robin (RR) und der MaxMinFair (MMF).

Am besten schneiden jedoch DDS und Fair Error (FE) ab, wobei die genannten Unterschiede wie erwähnt nicht signifikant sind. Interessant sind jedoch die erzielten Restfehlerraten der Scheduler. Hier lässt sich gut erkennen, dass alle Scheduler ohne Latenzberücksichtigung (also RR, MT, MMF) eine erhebliche Restfehlerrate von 0.02 (RR/MMF) bis 0.07 (MT) aufweisen. Die Latenzoptimierten Scheduler jedoch zeigen keine Restfehlerrate und erreichen damit das gewünscht Ergebnis.
Als Fazit lässt sich also sagen, dass alle Algorithmen eine Auslastung des Systems erzielen, jedoch nur die Latenzoptimierten Verfahren eine für industrielle Anwendungen akzeptable Restfehlerrate erzielen.

Latenz

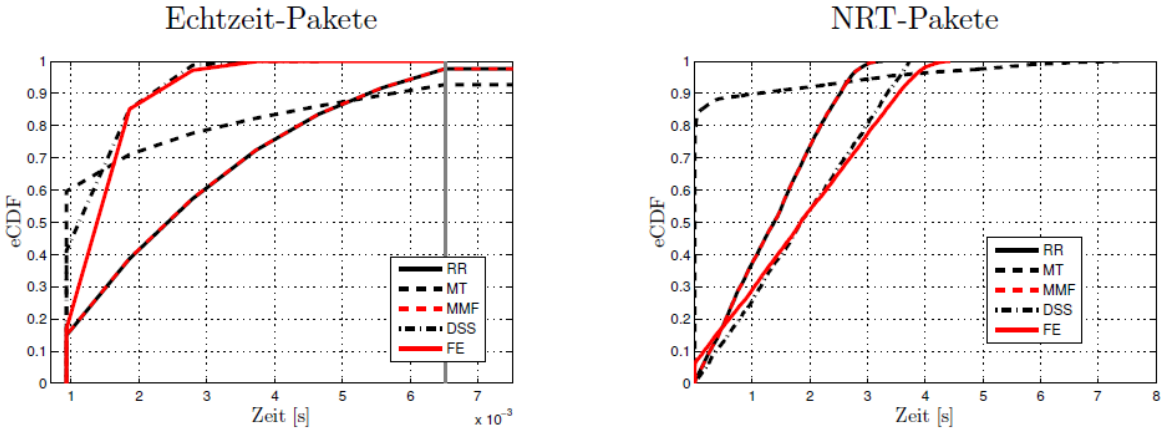

Abbildung 6-8: Empirische Verteilungsfunktion (empirical cumulative distribution function, eCDF) der Latenz für alle betrachteten Scheduler. Links: Echtzeitpakte, Rechts: Nicht-Echtzeit-Pakete.

Abbildung 6-8 zeigt die empirische Verteilungsfunktion der Latenz für Echtzeit- (links) und Nicht-Echtzeit-Pakete (rechts). Wie anhand der Kurven am rechten Rand des Echtzeit-Graphen zu erkennen ist, ergibt sich die Restfehlerrate der Scheduler RR, MT und MMF als Lücke zum 1-Wert. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die eCDF nur sehr langsam steigt. Folglich benötigt im Vergleich zu den Latenz-optimierten Schedulern DSS und FE eine höhere Anzahl an Paketen mehr als 3 GFDM-Übertragungen, um erfolgreich zu sein. Der steile Anstieg von DSS und FE hingegen deutet eine erfolgreiche Übertragung bereits nach 3 bis 4 GFDM-Übertragungen. Auf der rechten Seite zeigt sich, dass alle Scheduler bis auf der MaxThroughput ein ähnliches Verhalten für Nicht-Echtzeit-Pakete aufweisen. Das ist insofern nicht überraschend, da der DSS und FE für diesen Fall annähernd wie der MMF funktionieren. Der MaxThroughput hingegen bedient aufgrund der Favorisierung guter Nutzer zunächst eine hohe Anzahl an Paketen, benötigt dann aber viele Übertragungen, um auch schwächerer Nutzer irgendwann zu bedienen.

Als Zwischenfazit lässt sich erneut feststellen, dass die Latenzoptimierten-Scheduler erwartungsgemäß ein günstigeres Latenzverhalten aufweisen.

Paketwiederholungen

Werden nun Paketwiederholungen zugelassen, ändert sich auch die Auslegung der MCS. Anstatt FER_OW=10^{-8} wie in den vorherigen Ergebnissen wird nun eine Rahmenfehlerrate von FER_MW=10^{-2} für einzelne Übertragungen angesetzt. Daraus ergibt sich eine Veränderung der erzielbaren Datenraten, da nun höhere Raten tendenziell bei niedrigeren CNR (vgl. Abbildung 6-2) gewählt werden. Andererseits bedeutet dies aber auch eine geringere Zuverlässigkeit der geplanten Übertragungen, die durch Wiederholungen ausgeglichen werden müssen.

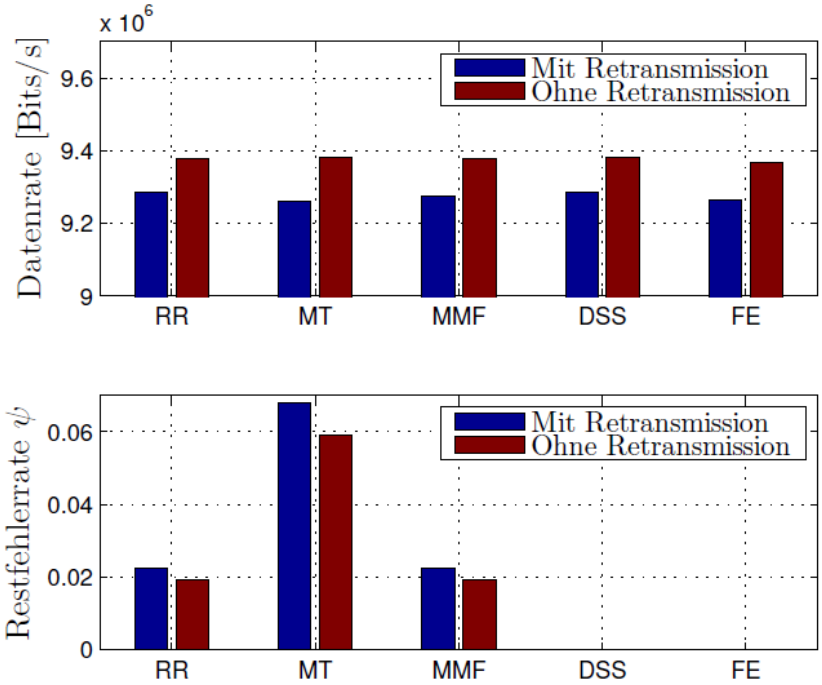

Abbildung 6-9: Datenrate und Restfehlerrate im Vergleich zwischen dem System ohne Paketwiederholungen und mit Paketwiederholungen.

Abbildung 6-9 zeigt einen Vergleich der vorherigen Ergebnisse mit denen, die mit Paketwiederholungen resultieren. Wie man erkennen kann, sinkt für alle Scheduler die erzielte Datenrate. Darüber hinaus steigt die Restfehlerrate für RR, MT und MMF, wobei für DSS und FE keine Änderungen zu verzeichnen sind. Es zeigt sich also, dass die angesetzte Rahmenfehlerschwelle in Summe nicht zu einer höheren, sondern zu einer niedrigen Datenrate führt, da vermehrt Fehler auftreten und das System durch mehr Pakete weiter ausgelastet wird. Die Latenzoptimierten Scheduler können dabei weiterhin ein Überschreiten der Paketdeadlines vermeiden, müssen aber auch insgesamt eine verringerte Datenrate in Kauf nehmen.

Als Zwischenfazit lässt sich also festhalten, dass im gewählten System und mit den hier dargestellten Parametern der Einsatz von Paketwiederholungen von Nachteil ist und vermieden werden sollte. Hieraus lässt sich aber keine generelle Empfehlung ableiten und es ist im Einzelnen zu prüfen, ob Paketwiederholungen sinnvoll sind.

6.3.5 **Fazit**

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass ein KoMe-Funksystem basierend auf aktuellen Technologien aus der Forschung das Potential hat, im industriellen Einsatz verschiedene Anforderungen an die Koexistenz, die Zuverlässigkeit und die Übertragungslatenz zu erfüllen. Zum einen stellt die hier evaluierte Parametrierung von GFDM nur eine Möglichkeit dar, die insbesondere auf die Übertragung von kleinen Paketen innerhalb weniger ms optimiert wurde. Durch die Wahl der Unterträger K und der Zeitschlitze M, die ein GFDM-Symbol ausmachen, lassen sich verschiedene Optimierungen vornehmen. So können auch hohe Datenraten oder deutlich höhere Nutzerzahlen realisiert werden, wobei stets ein Trade-off zwischen der Zahl der Nutzer bzw. der Gesamtdatenrate, der Zuverlässigkeit und der Latenz zu finden sein wird.

Darüber hinaus könnte unter Einsatz der Bitübertragungsschicht gezeigt werden, dass speziell für die industriellen Funkanforderungen angepasste Scheduler die strengen Anforderungen an Latenz und Zuverlässigkeit erfüllen können. Auch hier zeigt sich aber, dass das Gesamtdesign aus den MCS der Bitübertragungsschicht, den Verkehrsklassen und dem Scheduler gut abgestimmt sein muss, um eine optimale Auslastung des Systems zu gewährleisten.

6.4 Spectral Sensing Unit

6.4.1 Einführung und Problemstellung

Einen sehr wichtigen Teil des Koexistenzmanagements stellt die Spektralschätzung zur Erfassung der aktiven drahtlosen Kommunikationssysteme dar, welche im Gesamtsystem als Spectral Sensing Unit (SSU) repräsentiert ist. Die spektrale Belegung muss zuverlässig geschätzt werden, damit Interferenz minimiert wird und dynamisch sowie effizient die begrenzten freien Ressourcen z.B. des 2.4GHz-ISM-Bandes im industriellen Umfeld zugeteilt werden können. Bei der Spektralschätzung spielt es keine Rolle, ob es sich dabei um ein Inter-System- oder Intra-System-Koexistenzmanagement handelt, also ganzen Systemen oder innerhalb eines Systems Spektralbereiche zugeteilt werden. In beiden Fällen muss der gesamte vorgesehene Spektralbereich ohnehin abgedeckt werden.

Um das Ziel der Zuverlässigkeit der Kommunikation zu erreichen, müssen auf der einen Seite Anforderungen an die Genauigkeit der Schätzung und auf der anderen Seite an die Latenz gestellt werden. Dabei ist eine Vermeidung der Interferenz während des Schätzvorgangs bzw. des Updatevorgangs nicht möglich. Um einen Kompromiss zwischen diesen zwei Größen zu erreichen, wurde ein Ansatz zur Schätzung der spektralen Leistungsdichte (engl. Power Spectral Density, PSD) gewählt. Im Vergleich zur Schätzung des Amplitudenspektrums bietet es mit einer höheren Auflösung und Robustheit gegenüber Rauscheinflüssen eine höhere Genauigkeit und kann immer noch an die jeweiligen Latenzanforderungen angepasst bzw. parametrisiert werden.

Ein weiterer Vorteil spricht für die PSD-Schätzung. Es müssen nämlich auch der Energieverbrauch und die Komplexität der Hardware in Betracht gezogen werden. Weil ein breitbandiger Spektralbereich, in dem die einzelnen Systeme funken, abgedeckt werden muss, wird Hardware erforderlich, die die hohen Nyquist-Abtastraten erfüllt. Diese kann sehr komplex werden und einen hohen Energieverbrauch aufweisen. Um die Anzahl der Abtastwerte und damit die Anforderungen an die Hardware zu reduzieren, wird in der Literatur Compressive Sensing als Ansatz vorgeschlagen. Das Spektrum kann nämlich als unternutzt und daher sparse angesehen werden, was derselbe Grund für die Initiierung dieses Projekts darstellt. In diesem Kontext bietet die Betrachtung der PSD einen Vorteil. Bei voller Belegung des Spektrums, die vielleicht gerade durch die Anwendung der hier betrachteten Verfahren in der Zukunft häufiger auftreten kann, sind die meisten Implementierungen in der Signalverarbeitung nicht mehr anwendbar.

6.4.2 Grundlegender Ansatz zur Spektralschätzung

Um dieses Problem zu lösen und dennoch effizient die PSD aus komprimierten Messungen rekonstruieren zu können, wurden innerhalb von KoMe die leistungsstarken Algorithmen 1D Compressed Edge Spectrum Sensing (1D CESS) und 2D Compressed Edge Spectrum Sensing (2D CESS) entwickelt, die sich die Frequenzgrenzen einer Übertragung als sparse Basis zunutze machen [6-7, 6-8, 6-9]. Der Zusammenhang zwischen PSD und Kanten ist schematisch in Abbildung 6-10 dargestellt. Konkret bedeutet dies, dass anstelle der PSD die Kanten des Spektrums direkt aus den Abtastwerten rekonstruiert werden. Denn die meisten Spektralformungsverfahren in der Praxis, wie z.B. OFDM, weisen einen nahezu rechteckförmigen Verlauf, um Interferenz zu benachbarten Bändern zu minimieren und eine hohe Bandbreiteeffizienz zu erreichen. Die Spektralbereiche können daher als stückweise konstant aufgefasst werden. Selbst wenn diese Annahme nur annähernd auf andere Standards übertragbar ist, so

sollte dennoch eine Rechteckapproximation eine ausreichende Genauigkeit aufweisen, um jegliche Spektralformen wiedergeben zu können.

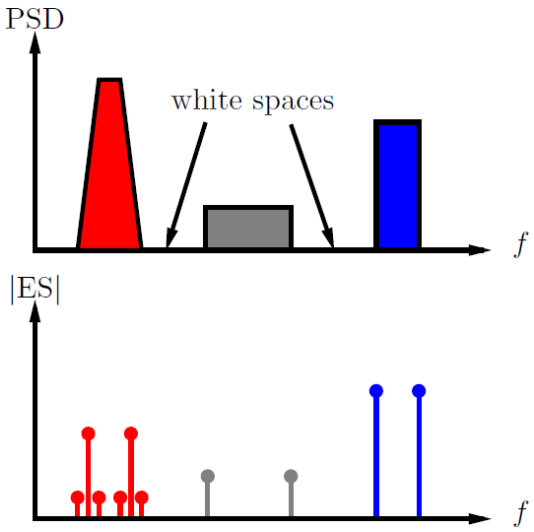

Abbildung 6-10: Dünn besetztes Spektrum (PSD) mit white spaces und darunter Kanten des Spektrums (engl. Edge Spectrum, ES).

In Abbildung 6-11 ist ein WLAN-Belegungsschema exemplarisch zu sehen, das die zugrunde gelegten Annahmen sehr gut widerspiegelt und als Testszenario gewählt wurde. Eine hohe Kompression sollte hier möglich sein, was auch im Forschungsvorhaben gezeigt werden konnte. Zunächst wurden die mathematischen Grundlagen erarbeitet und ein passendes Modell mit geeigneter Parametrisierung ausgewählt. Die Signale werden im Abtastzeitraum Δt als stationär im weiteren Sinne aufgefasst. Diese Annahme konnte im Rahmen des Projekts als gute Näherung der realen Verhältnisse gezeigt werden, was auf die niedrige Auflösung bei großen betrachteten Bandbreitebereichen und der damit zu vernachlässigbaren Zyklostationarität zurückgeführt werden kann.

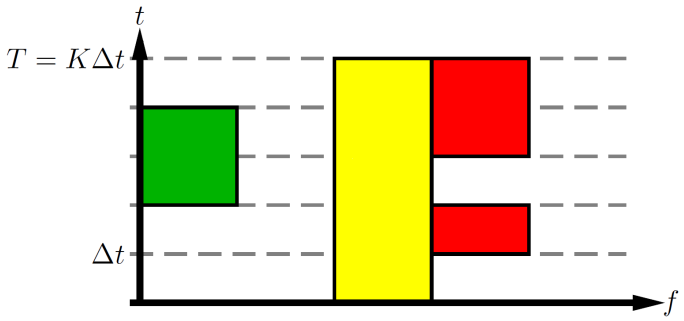

Abbildung 6-11: Belegung eines Spektrums in Zeit t und in Frequenz f. Im Zeitfenster Δt, welches der Zeitauflösung entspricht, wird das Spektrum als stationär im weiteren Sinne angenommen.

Auffallend in Abbildung 6-11 ist, dass nicht nur Kanten in der Frequenz, sondern auch in der Zeit angenommen werden können. Deswegen wurde diese zusätzliche Struktur in den zwei Dimension in einem neuartigen Ansatz zu Nutze gemacht, welcher folglich eine noch höhere Kompression erlaubt.

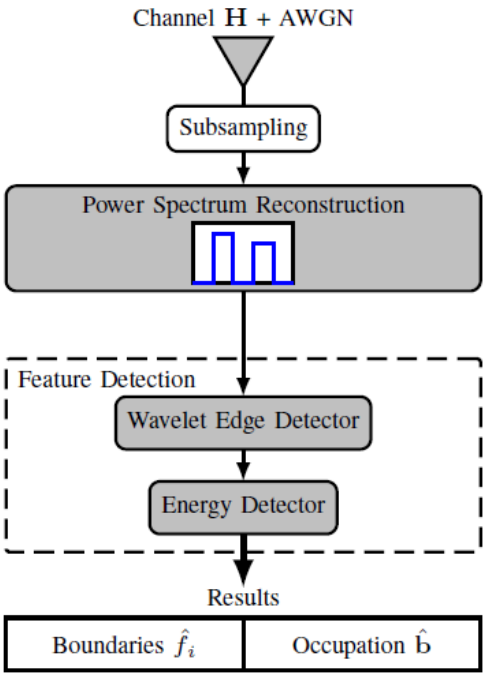

Abbildung 6-12: Aufbau der vorgeschlagenen Spectrum Sensing Unit (SSU).

Die Rekonstruktion der Spektralleistungsdichte aus den unterabgetasteten Messungen liefert nun erst einmal lediglich ein Abbild der spektralen Belegung. Dieses muss noch gedeutet werden und erfordert weitere Verarbeitungsschritte. Im Rahmen dieses Projekts wurde daher ein Spektralschätzer und -klassifizierer, wie in Abbildung 6-12 schematisch dargestellt, umgesetzt.

Nachdem die Übertragungen der teilnehmenden Systeme über einen Kanal (Channel H + AWGN) zur SSU gelangt sind, werden diese breitbandig unterabgetastet (Subsampling). Basierend auf diesen Messungen wird die Spektralleistungsdichte gemäß des gewählten bzw. implementierten Algorithmus rekonstruiert (Power Spectrum Reconstruction). Um eine Aussage bzw. Entscheidung bezüglich der Belegung der Spektralbereiche tätigen zu können, müssen diese lokalisiert und klassifiziert werden. Dafür wurde eine einfache Mustererkennung (Feature Detection) implementiert.

Zunächst werden mithilfe des Wavelet Edge Detector die Bandgrenzen detektiert, indem die lokalen Maxima im Absolutbetrag der Ableitung der PSD, im Kantenspektrum, bestimmt werden. Zusätzlich wird ein Schwellwert angewendet, der an den jeweiligen Signalpegel angepasst wird und den erzielbaren Dynamikbereich begrenzt. Da die Kanten im erarbeiteten Ansatz normalerweise an den Stellen der Nicht-Nulleinträge des Kantenspektrums vorliegen sollten, stellt sich die Frage, wozu ein solcher Schritt überhaupt notwendig ist. Denn im Gegensatz zur Literatur wurden PSD-Rekonstruktion und Wavelet Edge Detector nicht getrennt als aufeinanderfolgende Schritte angesehen, sondern vereinigt. Einerseits können Rauscheinflüsse und andererseits Nichtidealitäten in der Spektralformung und CS-Rekonstruktion die Schätzung der Kanten verfälschen. Außerdem können auf diese Weise klassische Ansätze mit PSD-Rekonstruktion direkt verglichen werden.

Zuletzt entscheidet der Energy Detector gemäß der Signalstärke zwischen zwei Frequenzgrenzen, ob ein Band belegt oder unbelegt ist bzw. Rauschen vorliegt. Die Operation stellt einen Schwellwertvergleich dar, bei dem der Schwellwert durch den Rauschlevel festgelegt wird, welcher z.B. auf Basis des Bandes mit der geringsten Energie geschätzt werden kann, da hier mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Übertragung stattfindet. Als Ergebnisse liefert die SSU die Frequenzgrenzen $\hat{f}_i$ und die Belegung des jeweiligen Bandes, hier repräsentiert in Form eines Vektors $\hat{\mathrm{b}}$.

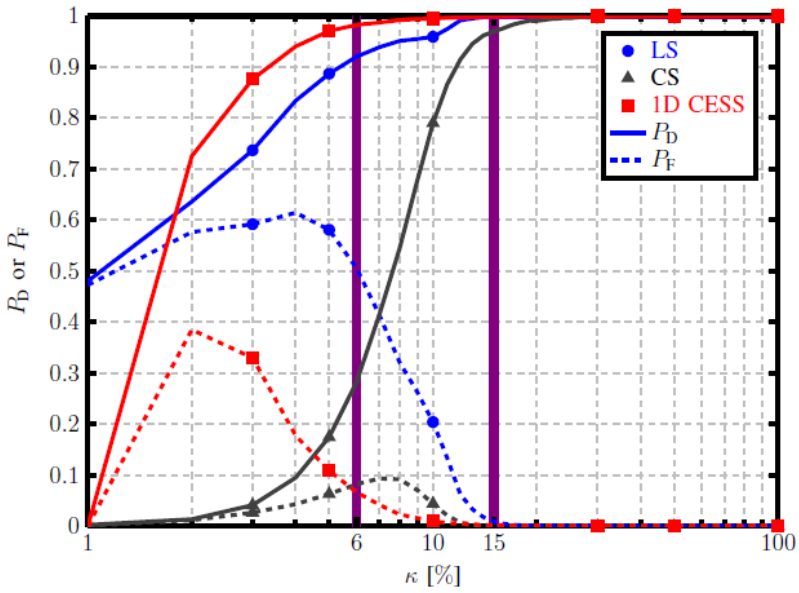

Abbildung 6-13: Detektions- und Falschalarmraten P_D bzw. P_F von 1D CESS im Vergleich zu LS- und CS- Rekonstruktion in Abhängigkeit der Kompression κ.

Erzielte Ergebnisse:

Es wurden die Ansätze 1D Compressed Edge Spectrum Sensing (1D CESS) und 2D Compressed Edge Spectrum Sensing (2D CESS) entwickelt, die simulativ und in der Praxis getestet wurden [6-7].

1D CESS

Die Performance des Ansatzes 1D CESS als Teil der SSU aus Abbildung 6-12 in der Simulation kann Abbildung 6-13 entnommen werden. Eine sporadische mittlere Belegung von 40% der Bandbreite im betrachteten WLAN-Belegungsschema wurde hier angenommen. Die Detektions- und Falschalarmraten P_D und P_F als entscheidende Performancegrößen wurden ausgewertet und über die Kompressionsrate κ aufgetragen. Im Vergleich zu klassischen Verfahren wie Least Squares (LS) und Compressive Sensing (CS), die direkt die PSD rekonstruieren, ermöglicht 1D CESS viel niedrigere Kompressionsverhältnisse. Oberhalb von κ=15% liefern alle Verfahren eine perfekte Rekonstruktion. Während eine signifikante Absenkung der Detektionsrate und Erhöhung der Falschalarmrate bei LS- und CS-Ansatz ab 15% eintritt, kann 1D CESS selbst bis κ=6% zuverlässige Ergebnisse liefern. Dies entspricht der eigentlichen Belegung des Kantenspektrums und damit der minimalen Rate, die eine eindeutige Rekonstruktion ermöglicht. Im Verhältnis zu den klassischen Verfahren lässt sich die Abtastrate nochmals ungefähr um den Faktor 3 reduzieren. Das Hauptergebnis ist damit, dass im betrachteten Modell die mittlere Abtastrate ohne große Einbußen in der Performance auf 6% der Nyquist-Rate gesenkt werden kann.

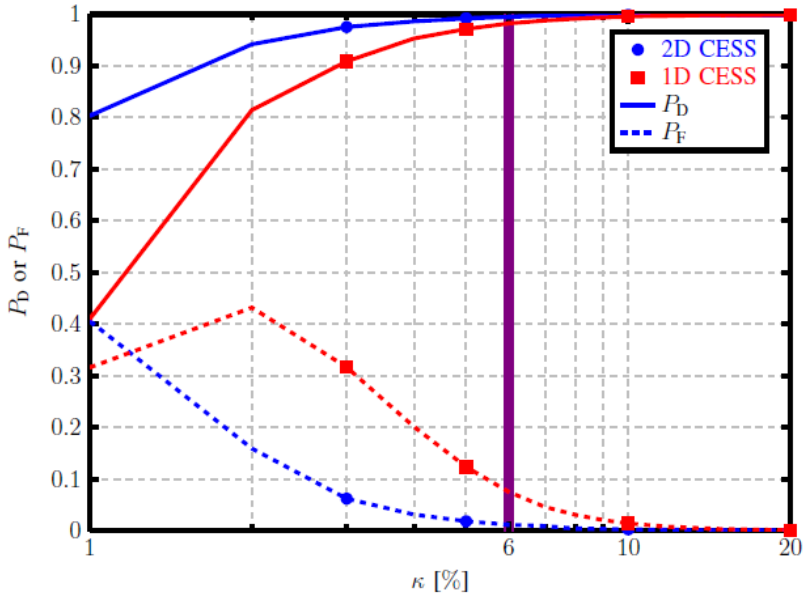

Abbildung 6-14: Detektions- und Falschalarmraten P_D bzw. P_F von 2D und 1D CESS in Abhängigkeit der Kompressionsrate κ.

2D CESS

Die Leistungsfähigkeit des zweiten entwickelten Ansatzes 2D CESS wird aus Abbildung 6-14 ersichtlich. In den Simulationen musste zur Evaluierung auch das Zeitverhalten modelliert werden. Dies wurde über ein Markov-Modell mit den Zuständen belegt und frei realisiert, das auf dieselbe mittlere Belegung wie zuvor parametrisiert wurde. Es stellt sich heraus, dass der 2D-Ansatz den 1D-Ansatz hinsichtlich der Komprimierbarkeit der Messungen nochmals übertrifft. Bis zu einer Kompressionsrate von κ=6% liegen perfekte Detektions- und Falschalarmraten vor. Im Vergleich zu 1D CESS bei κ=6% kann eine vergleichbare Performance sogar bei sehr hoher Kompression κ=3% bzw. 3% der Nyquist-Rate erreicht werden. Was bei diesem sehr guten Ergebnis berücksichtigt werden muss, ist, dass mehrere, genau K, Zeitabschnitte Δt gemäß Abbildung 6-11 für das Abtasten benötigt werden. Dadurch steigt die Latenz gegenüber 1D CESS und klassischen Verfahren.

6.4.3 Einfluss des Übertragungskanals

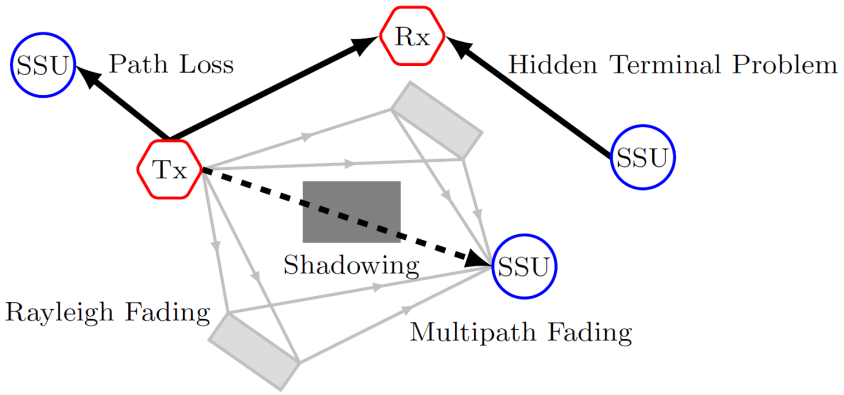

Abbildung 6-15: An der vom Sender (Tx) zum Empfänger (Rx) und zu den SSUs ausgesendeten, elektromagnetischen Strahlung auftretende Effekte, die durch die Geometrie und Beschaffenheit des Raumes bedingt sind.

Im grundlegenden Szenario wurde ein Aspekt vernachlässigt, der bei Übertragungen durch die Luft in der Praxis einen großen Einfluss auf die Form des Spektrums hat und maßgeblich

durch die Umgebung bestimmt wird: der Übertragungskanal. Die Ergebnisse des letzten Abschnitts sind damit nur für einen AWGN-Kanal gültig. Eine Standardannahme in Kommunikationssystemen zur optimalen Auslegung und Überprüfung von entwickelten Ansätzen ist, dass es sich bei einem Kanal um einen Rayleigh-Fading-Kanal mit Mehrwegeausbreitung handelt. Das bedeutet, dass keine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger angenommen wird und das Signal diffus und an mehreren Objekten der Umgebung reflektiert zur SSU gelangt. Das hat die Effekte Rayleigh-Fading und Multipath-Fading zur Folge, die in Abbildung 6-16 schematisch gezeigt sind. Beide bedingen eine Frequenzselektivität des Kanals, wodurch sich die Spektren verformen und nicht mehr als ideal rechteckig angenommen werden können, was in Abbildung 6-16 gezeigt ist.

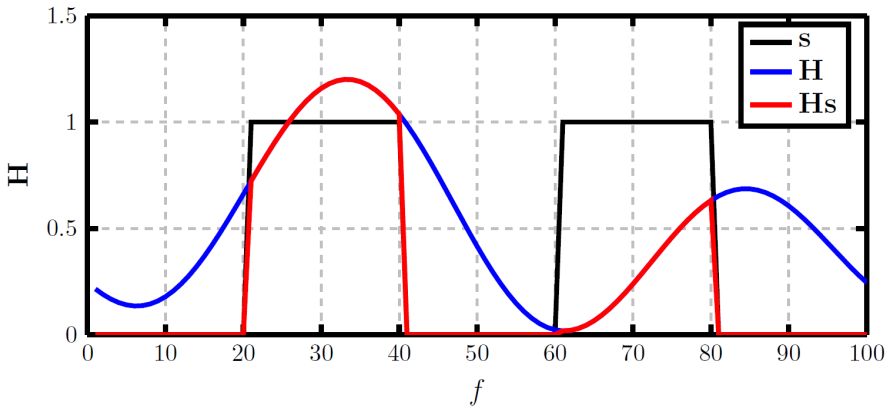

Abbildung 6-16: Die Verformung der Rechteckspektren in s durch den Kanal H schematisch dargestellt.

Um den Effekt der Verformung auf die Kompressibilität und die Detektionsraten zu bestimmen, wurden einerseits Simulationen durchgeführt, die einen Multipath-Rayleigh-Fading-Kanal abbilden, und andererseits wurden Messungen über einen realen Übertragungskanal für eine praktische Verifikation der Annahmen bzw. Ergebnisse vorgenommen [6-9]. Basierend auf Messungen im industriellen Umfeld und im Einklang mit den praktischen Messungen wurde in den Simulationen ein Kanal mit 3 Taps angenommen, deren Varianzen gleich angenommen wurden und auf 1/3 normalisiert wurden. Damit wurde der Worst-Case abgedeckt. Für die praktische Verifikation mit einem echten Kanal wurden zwei Lyrtech/Nutaq Software Defined Radios (SDR) mit vier phasengekoppelten MAX2829-Single-Chip RF Transceivern verwendet, die im 2.45- und 5 GHz- Band arbeiten. Wegen Begrenzungen durch die Bandbreite der Filter von 26 MHz, musste die Abtastung von 104 MHz auf 26 MHz heruntergetaktet werden. Dadurch wurde es zudem notwendig die Spektren auf 5.2 MHz zu skalieren. Als Trägerfrequenz wurde 2484 MHz festgelegt. Das Transmitter-SDR generierte die Testspektren des Standardmodells und übertrug diese jeweils über eine andere Transceiver-Kette, sodass jede Übertragung andere Kanalbedingungen erfuhr. In einer Distanz von 8 m wurde eine Transceiver-Kette des Empfängers als SSU verwendet, um die emittierten Spektren offline mit Matlab gemäß des Flows aus Abbildung 6-12 zu rekonstruieren. Die Unterabtastung wurde wie bereits zuvor simuliert.

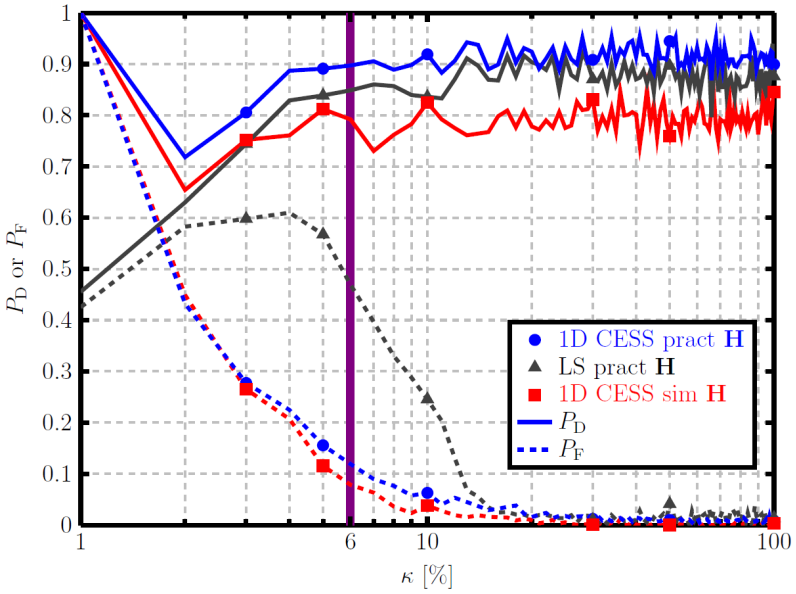

Abbildung 6-17: Detektions- und Falschalarmraten P_D bzw. P_F von 1D CESS bei Übertragung durch realen Kanal (pract H) im Vergleich zu LS-Ansatz (LS) sowie der Kanalsimulation (sim H) über Kompressionsrate κ.

Erzielte Ergebnisse:

Es wurde validiert, ob die entwickelten Ansätze auch in realistischen Szenarien unter Berücksichtigung des Übertragungskanals eingesetzt werden können [6-9].

Die Einflüsse des Kanals auf die Detektionsraten von 1D CESS können in Abbildung 6-17 eingesehen werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen des letzten Abschnitts wird ein Offset in den Detektionsraten in simulierten und praktischen Umgebungen ersichtlich. Während in der Praxis die Detektionsrate mindestens auf 90% abgesenkt wird, beträgt diese in den Simulationen nur noch 80%. Der Unterschied ist geringfügig und kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass in der Praxis eine Sichtverbindung zwischen Sender und SSU bestand. Ein Verlust von 10%-20% in den Detektionen durch Frequenzselektivität des Kanals ist in der Praxis damit unvermeidlich, wenn nur eine SSU verwendet wird.

Die Kompressibilität scheint dagegen nicht durch den Übertragungskanal eingeschränkt zu werden. Immer noch sind wie im Idealfall Kompressionen auf κ=6% der Nyquist-Rate ohne nennenswerte Performanceeinbüßen möglich. Erst dann beginnt die Detektionsrate in Simulation und Praxis zu sinken und die Falschalarmrate überschreitet einen Wert von 10%. Im Gegensatz dazu erlaubt der LS-Ansatz wieder nur eine Kompressionsrate von κ=15%. Damit liegt der Schluss nahe, dass die Spektren trotz Kanal gut durch Rechteckformen approximiert werden können und die vorgeschlagenen entwickelten Algorithmen auch in der Praxis angewendet werden können, um die Anforderungen an die Hardware zu senken.

6.4.4 **Kooperative Spektralschätzung**

Wie sich im Laufe des Projekts herausgestellt hat, ist es aufgrund der Kanaleinflüsse nicht möglich jegliche Übertragungen zu detektieren. Das liegt einerseits an den Effekten des Fast Fading, die im letzten Abschnitt betrachtet wurden. Andererseits liegen noch weitere Einflüsse vor, die in Abbildung 6-15 ebenfalls dargestellt sind. Der Pfadverlust (Path Loss) aufgrund der Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung im Raum kann dazu führen, dass sich die Größenordnung der Leistung der empfangenen Signale stark unterscheidet und diese aufgrund des begrenzten Dynamikbereiches der Spektralschätzung nicht mehr beide aufgelöst werden können. Auch kann die Leistung im Rauschen nicht mehr detektiert werden, wenn die Distanz zu groß wird. Abschattungseffekte (Shadowing), die durch undurchlässige bzw. schlecht durchlässige Materialien bedingt sind, können selbst relativ nahe Sender für die SSU unsichtbar machen, sodass es zu Fehldetektionen kommt. Letztere Effekte sind ein Problem,

wenn sich ein Empfänger innerhalb der Reichweite der SSU befindet, aber der zum Empfänger übertragende Sender nicht mehr von der SSU detektiert werden kann. Dann wird fälschlicherweise angenommen, dass der betreffende Spektralbereich unbelegt ist, sodass es zu Interferenz kommt, wenn hier eine Übertragung zugeordnet wird. Dieses Problem ist in der Fachwelt als Hidden Terminal Problem bekannt.

All diese Effekte können eine zuverlässige Spektralschätzung mit einer SSU unmöglich machen. Deswegen ist es notwendig mehrere SSU im Raum zu verteilen und die Ergebnisse oder Messdaten zusammenzuführen. Auf diese Weise kann nämlich die räumliche Diversität der Übertragungen und Kanäle ausgenutzt werden. Dieser Ansatz ist in der Literatur unter dem Namen kooperative Spektralschätzung bekannt. Hierbei wird zwischen zwei Arten der Verarbeitung unterschieden: zentral und verteilt. Diese sind schematisch in Abbildung 6-18 dargestellt.

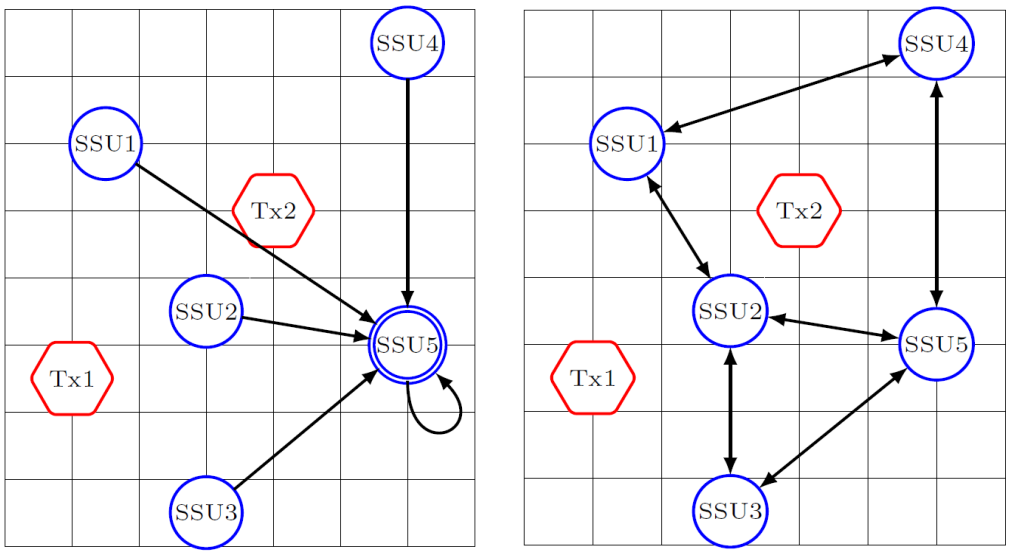

Abbildung 6-18: Darstellung eines kooperativen Netzwerks aus SSUs zur Spektralschätzung bzw. –detektion von Sendern (Tx) im Raum. Die Kommunikation bzw. Verarbeitung im zentralen (links) und verteilten Ansatz (rechts) wird durch die Pfeile repräsentiert.

Beim zentralen Ansatz werden alle Daten der verschiedenen SSUs zu einer zentralen Instanz (engl. Fusion Center) geleitet und dort verarbeitet. Das Ergebnis dieser kooperativen Spektralschätzung wird dann wiederum zurück zu den einzelnen SSUs übertragen. Da alle Daten zu einem Ort im Raum geleitet werden, ist die Übertragung dieser hohen Menge an Daten stark von den jeweiligen Kanalbedingungen abhängig. Ist die zentrale Instanz nicht erreichbar oder fällt aus, können die übertragenen Daten nicht mehr verarbeitet werden.

Deswegen stellt die dezentrale und verteilte Verarbeitung der anfallenden Daten eine Alternative dar. Damit wird die Verarbeitung robuster gegenüber einzelnen Störungen im Netzwerk von SSUs. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Berechnungen nun iterativ durchgeführt werden müssen bis Konvergenz gewährleistet ist. Folglich müssen zwischen den Iterationen Teilergebnisse ausgetauscht werden und die Latenz vergrößert sich.

Damit hängt die Realisierbarkeit des verteilten Ansatzes maßgeblich von der Komplexität des zu implementierenden Algorithmus ab. Sind die Operationen relativ simpel, sollte eine verteilte Berechnung keine größeren Einbußen in Latenz und Kommunikationsaufwand zur Folge haben.

Die durchzuführenden Operationen wiederum werden durch die zu verarbeitenden Daten bestimmt. Ein erster Ansatz besteht darin, dass die SSUs mit den rohen Messdaten gemeinsam das Spektrum schätzen. Das bedeutet z.B., dass CESS verteilt ausgeführt wird. In diesem Projekt wurde ein solcher verteilter Algorithmus erarbeitet. Da dann jeweils mit einem zusätzlichen Consensus Constraint dieselben CS-Optimierungsprobleme gelöst werden, liegt eine hohe Komplexität bei jeder einzelnen Berechnungsiteration vor. Eine äquivalente, erarbeitete

zentrale Lösung besitzt dieses Problem nicht. Zudem liegen in der Kanalmatrix, die berücksichtigt werden muss, verschiedene Größenordnungen vor. Die Leistung nimmt nämlich anisotrop und stark nichtlinear ab. Dies macht das Problem numerisch instabil und daher eine Schätzung anfällig gegenüber Rauschen. Alleine die Tatsache, dass es notwendig wird, die Kanäle zwischen unbekannten Sendern und Empfängern zu schätzen, lässt eine Implementierung als mehr als problematisch erscheinen.

Ein wesentlich einfacherer Ansatz realisiert die Kooperation über einen Austausch der Belegung bzw. der Klassifikationen. Dadurch wird das Problem der verschiedenen Größenordnungen umgangen. Die Berechnung des Endergebnisses vereinfacht sich zu einer Mittelwertbildung mit anschließendem Schwellwertvergleich. Ein niedriger Schwellwert ist im Anwendungsfall zu bevorzugen, da Cooperative Sensing gerade zur Ergänzung dessen eingesetzt werden soll, was eine einzelne SSU nicht sehen kann. Verteilt ist die Mittelwertbildung im Gegensatz zur gemeinsamen Lösung des CS-Problems sehr einfach zu implementieren mit der sogenannten Average Consensus Technique.

Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, welche der genannten und untersuchten Implementierungen für den Einsatz im industriellen Kontext am geeignetsten ist. Da im KoMe-System ein Central Coordination Point (CCP) vorliegt, bietet sich die zentrale Lösung an. Alle Messungen bzw. Belegungen werde hier gesammelt und ein Bild von der spektralen Gesamtbelegung ermittelt, um weitere Schritte folgen zu lassen. Für diese muss jedoch sichergestellt werden, dass eine zuverlässige Funkkommunikation zwischen den im Raum verteilten SSUs gewährleistet ist. Sollte dies aufgrund eines sich stetig ändernden Umfelds nicht der Fall sein, so sollte der verteilte Ansatz eingesetzt werden. Dieser führt zu einem erhöhten iterativen Kommunikationsaufwand und damit höherer Latenz, ist aber robust gegenüber Kanalstörungen.

Erzielte Ergebnisse:

Es wurden verschiedene Strategien zur Kooperation von SSUs in einem Netzwerk erarbeitet, um gemäß den Anforderungen im industriellen Umfeld geeignete vorzuschlagen und auszuwählen [6-9]. Getestet wurden die kooperative Spektralschätzung und Spektraldetektion. Wegen des höheren Implementierungsaufwandes und der genannten Beschränkungen wird auf eine Darstellung der Ergebnisse der Spektralschätzung verzichtet und auf die gemeinsame Spektraldetektion fokussiert.

Angenommen wurde eine Verteilung von 10 SSUs in einem Bereich von -10 m bis 10 m. Wieder wurde ein 3-Tap-Kanal des vergangenen Abschnitts ohne Abschwächung modelliert. Neu in der Simulation sind der Pfadverlust zu den wie zuvor zu zwei gewählten Sendern und Lognormal Shadowing mit Standardabweichung von 5 dB. Damit wurden alle relevanten Effekte bei einer Übertragung berücksichtigt. 3 SSUs mussten einen Spektralpunkt als belegt klassifizieren, damit dieser insgesamt als belegt eingestuft wird. Die Performance von zentralen und verteilten Algorithmen ist im Idealfall dieselbe. Deswegen wurden Ergebnisse für den zentralen Fall berechnet.

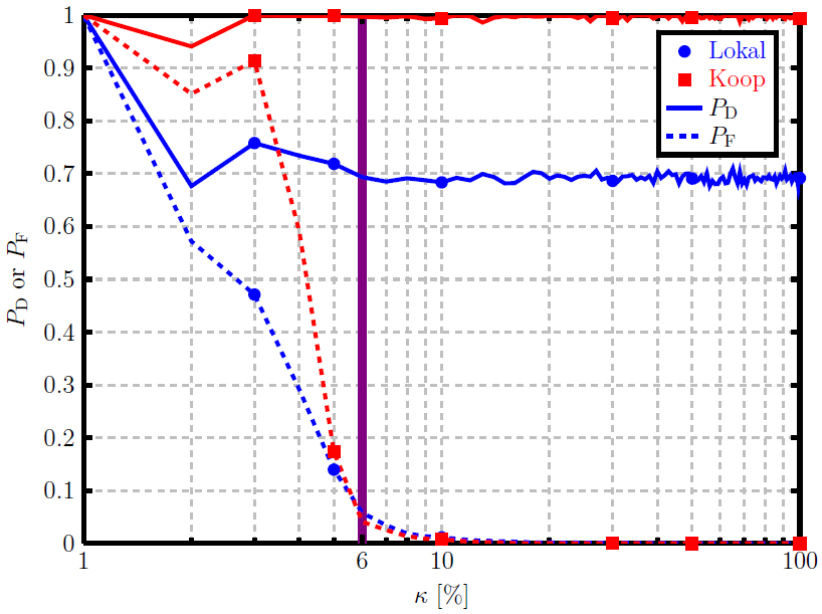

Abbildung 6-19: Detektions- und Falschalarmraten P_D bzw. P_F von 1D CESS lokal über alle 10 SSUs gemittelt und in Kooperation (Koop), aufgetragen über der Kompressionsrate κ.

In Abbildung 6-19 kann die Performance von 1D CESS lokal und kooperativ in Abhängigkeit der Kompressionsrate κ eingesehen werden. Die mittlere lokale Detektionsrate der 10 SSUs reduziert sich im Simulationssetup auf ca. 70% und scheint relativ unabhängig von der Kompressionsrate κ zu sein. Damit zeigt sich wieder ein unvermeidlicher Offset. Gleichzeitig können die verformten Spektren relativ gut durch Rechtecke approximiert werden. Die Falschalarmrate erhöht sich trotz der Verformung wieder erst bei κ=6% signifikant, was auch für den Fall der kooperativen Spektraldetektion gilt. Sehr gut deutlich wird, dass der Offset in der Detektionsrate durch die Kooperation kompensiert werden kann und eine optimale Detektion erreicht wird.

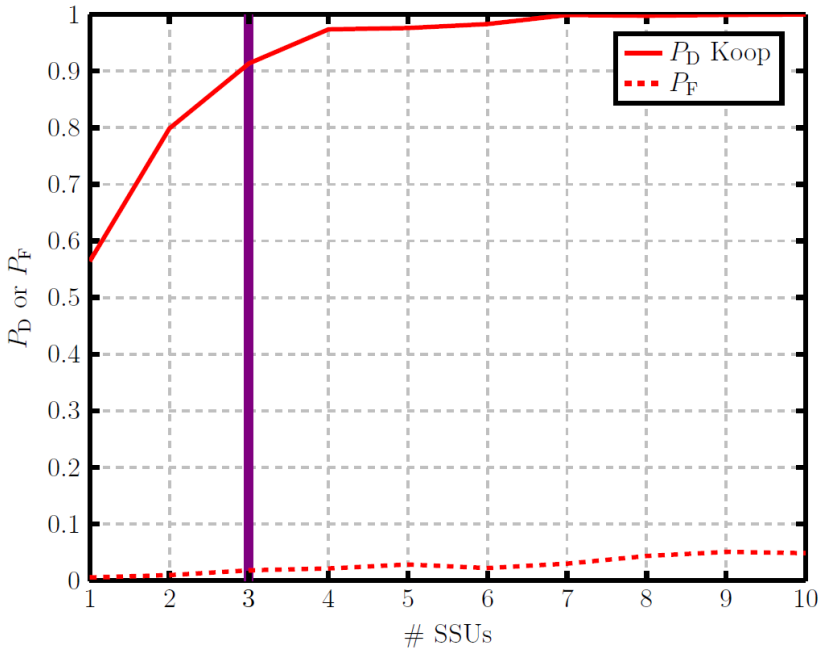

Abbildung 6-20: Detektions- und Falschalarmraten P_D bzw. P_F von 1D CESS in Abhängigkeit der Anzahl der kooperierenden SSUs für Kompressionrate κ =15%.

Um eine minimale Anzahl an SSUs für eine zuverlässige Spektrumsdetektion abschätzen zu können, wurde auch der Einfluss dieser Größe auf die Performance von 1D CESS in Kooperation untersucht. In Abbildung 6-20 sind die Ergebnisse für eine Kompressionsrate κ =15%

dargestellt. Der finale Entscheidungsschwellwert für die Klassifikation wurde auf den Minimalwert festgelegt, um die OR-Regel zu realisieren und so optimale Schwellwerte für geringe Anzahlen auf einfache Weise mit höheren vergleichbar zu machen. Es wird deutlich, dass 3 SSUs ausreichend sind um eine hohe Detektionsrate von 92% bei sehr geringer Falschalarmrate von 1% zu erreichen. Ab einer Anzahl von 7 SSUs werden im Simulationssetup nahezu alle Übertragungen erkannt. Es stellt sich heraus, dass schon eine geringe Anzahl an SSRs von z.B. 3 ausreichend ist, um die Detektionsrate signifikant von ungenügenden 56% im Einzelfall anzuheben. Abschließend sei angemerkt, dass die optimale Verteilung der SSRs im Raum von den praktischen Gegebenheiten im industriellen Umfeld abhängig ist. Deswegen sollte mithilfe von Messungen eine Platzierung zur bestmöglichen Ausnutzung der räumlichen Diversität ausgewählt werden.

6.4.5 **Implementierung und Test**

In den bisherigen Betrachtungen wurde immer von idealen Spektren ausgegangen und es wurden Hardwareeinflüsse ignoriert. Aus diesem Grund wurde auch eine praktische Verifikation der erarbeiteten Algorithmen durchgeführt, um deren Anwendbarkeit zu demonstrieren. Die Performance von CESS wurde daher in der Praxis unter realen Bedingungen getestet. Hierfür wurde eine Breitbandabtastung mithilfe eines Lyrtech-SDRs realisiert, wobei die 4 Transceiver-Ketten jeweils zu Filterbänken parallelgeschaltet wurden, um einen anderen Bandbreitebereich von effektiv 22 MHz abzudecken. Durch die geschickte Wahl der einzelnen Trägerfrequenzen konnte der gesamte erlaubte Bereich des 2.4GHz-ISM-Bandes von 0-84 MHz abgedeckt werden. Um Aliasing zu vermeiden, wurde ein Tschebyscheff-FIR-Filter digital auf dem FPGA des SDRs implementiert und wurden überlappende Spektralbereiche aussortiert. Durch den Filter werden die Spektren sogar noch weiter verformt und weichen von der Idealform ab. In der Offline-Prozessierung mit Matlab wurde wieder die Unterabtastung simuliert und es wurden die Datensätze zusammengeführt, sodass eine Breitbandabtastung emuliert wird.

Erzielte Ergebnisse:

Es wurde ein Wideband-Sensing-Demonstrator erstellt, der die erarbeiteten Verfahren unter realen Bedingungen auf reale Messsignale anwendet [6-9].

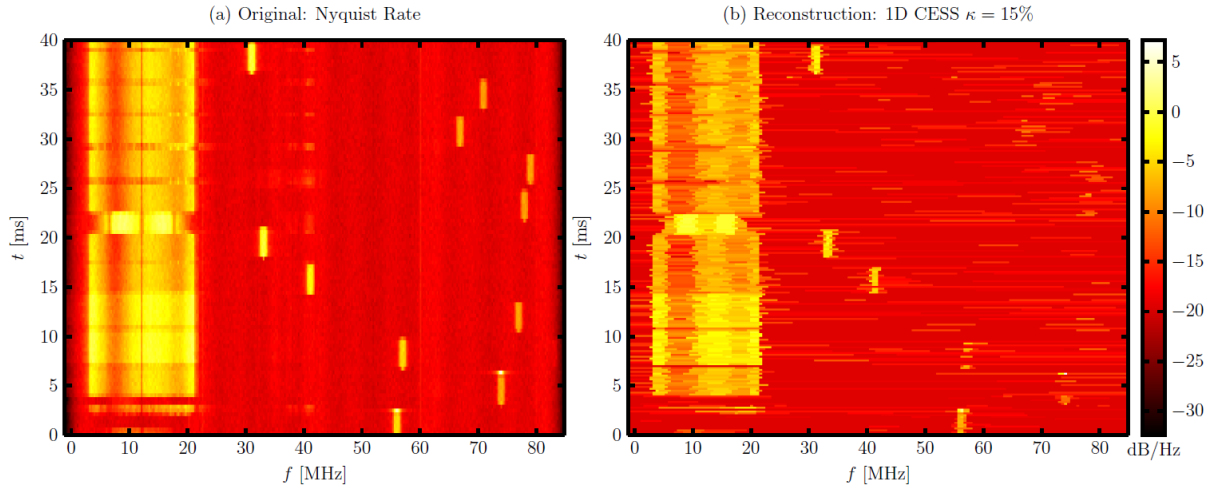

Abbildung 6-21: Spektrogramme von WLAN- und Bluetooth-Signalen des 2.4GHz-ISM-Bandes, die mit der Wideband-Sensing-Demonstration erstellt wurden. Rekonstruktion der Spektren bei (a) Nyquist-Rate und (b) Kompressionsrate κ =15% mit 1D CESS basierend auf SDR-Messungen.

In Abbildung 6-21 sind die Ergebnisse einer Demonstration in Form von zwei Wasserfalldiagrammen abgebildet. Das linke Diagramm (a) stellt das Spektrum dar, wenn alle Abtastwerte verfügbar sind, während das rechte (b) die Rekonstruktion von 1D CESS bei einer Kompressionsrate von κ =15% zeigt. Die Farbskala deutet auf die logarithmische Skalierung hin, wobei sich ein Pegel von -20 dB/Hz als Grundrauschen herausstellt. Bei der Trägerfrequenz von 12

MHz, welche dem Nullträger und ISM-Kanal 1 entspricht, kann eine 802.11n-WLAN-Übertragung mit einer Bandbreite von 17.5 MHz ausgemacht werden. Ein Deep Fade des Übertragungskanals wird deutlich sichtbar bei 8 MHz. Von ca. 20 ms bis 22 ms kann außerdem ein fremdes 802.11b-WLAN-Signal ohne Deep Fade beobachtet werden. Bei höheren Frequenzen von 30 bis 80 MHz finden die Bluetooth-Übertragungen statt, welche den belegten Kanal 1 vermeiden und einem zufälligen Frequenzsprungmuster folgen. Die Dauer eines Signals von 3,125 ms führt auf die maximale Bluetooth-Paketlänge von 5.

Es wird deutlich, dass 1D CESS in der Lage ist das Spektrum von WLAN- und Bluetooth-Übertragungen trotz der Nichtidealitäten zu rekonstruieren. Lediglich die Bluetooth-Signale bei höheren Frequenzen können nicht detektiert werden, weil diese einer starken Verzerrung durch den Kanal ausgesetzt sind. Die Unterschiede in der Größenordnung zwischen WLAN- und Bluetooth-Signalen betragen hier ca. 15 dB, sodass der Dynamikbereich nicht ausreicht, um beide gemeinsam zu rekonstruieren. Jedoch kann dieses Problem gelöst werden, wenn eine kooperative Spektralschätzung umgesetzt wird. Daher kann abschließend festgehalten werden, dass die Schätzung von praktischen Spektren bei sehr niedrigen Kompressionsraten tatsächlich möglich ist.

6.4.6 **Fazit**

In diesem Projekt wurden die leistungsstarken Algorithmen 1D CESS und 2D CESS entwickelt, die die eine starke Kompression und damit Reduktion der mittleren Abtastrate ermöglichen [6-7]. Eine Absenkung auf 5%-10% der Nyquist-Rate ist ohne größere Einbußen in der Performance möglich. CESS übertrifft die klassischen LS- und CS-Verfahren deutlich.

Zudem wurden die Algorithmen unter realen Übertragungsbedingungen getestet [6-9]. Dabei hat sich gezeigt, dass ein Verlust in der Detektionsrate unvermeidlich ist und eine kooperative Spektralschätzung realisiert werden muss. Die Verformung der Spektren scheint keinen allzu großen Einfluss auf die Kompressibilität zu haben. Als effizienteste Kooperationsstrategie hat sich herausgestellt, dass mehrere SSUs im Raum verteilt werden, die miteinander die Ergebnisse der Spektralklassifikation teilen. Die Verarbeitung kann je nach industriellen Umgebungsbedingungen zentral oder verteilt erfolgen. Mit schon relativ wenigen SSUs kann dabei die Anzahl der Fehldetektionen signifikant reduziert werden.

In einem Proof of Concept wurde eine selbst erstellte Wideband Sensing - Demo auf reale Übertragungen angewendet. Wieder zeigte sich die Leistungsfähigkeit der Algorithmen bei der Rekonstruktion von realen WLAN- und Bluetooth-Signalen.

Abschließend hat sich gezeigt, dass mit den erarbeiteten Konzepten jegliche Kanaleinflüsse kompensiert werden können und daher eine zuverlässige Schätzung der Spektren bei hoher Unterabtastung ermöglichen wird. Damit kann Hardware gebaut werden, die breitbandige Spektralschätzung effizient umsetzt. Dabei muss noch nicht einmal eine höhere Komplexität der nachgelagerten Messauswertung vorliegen. Wird nämlich ein Greedy-Algorithmus wie der Orthogonal Matching auf das unterbestimmte Gleichungssystem mit weniger Messungen angewendet, so reduziert sich diese sogar.

7 Validierungsplattform

7.1 Definition der Validierungsziele

7.1.1 Allgemeines

Mithilfe der Validierung soll gezeigt werden inwieweit die erarbeiteten Konzepte die gestellten Anforderungen erfüllen. Im Gegensatz zum Demonstrator geht es bei der Validierung um eine quantifizierte Bewertung und nicht um eine anschauliche Präsentation der Forschungsergebnisse. Insofern kann die Validierung auch im Projektverlauf zur Orientierung und Planung der Forschungsarbeiten genutzt werden. Es werden zwei Teilziele formuliert.

Beim Nachweis von Funktion und Grenzen der Messung der Mediumnutzung (Sensing) geht es darum, die Qualität der Analyse der Mediumnutzung zu bewerten. Die beiden in KoMe verfolgten Ansätze, zentrales und dezentrales Sensing, sollen bewertbar sein.

Beim Nachweis der Funktion des Managements von KoMe-System bzw. KoMe-FKS geht es darum zu bewerten, wie gut bestimmte Koexistenzszenarien beherrscht werden und durch welches Zeitverhalten die Verfahren gekennzeichnet sind.

7.1.2 Validierungsziele - Messung der Mediumnutzung

Die Validierung soll geeignet sein, folgende Funktionen der Messung der Mediumnutzung zu bewerten:

- Erkennen verschiedener Funkkommunikationssysteme bei unterschiedlichen Anwendungskommunikationsanforderungen
- Erkennen von Funkkommunikationssystemen bei unterschiedlicher örtlicher Mediumsbelegung (z. B. Szenarien in einer Fertigungshalle)
- Erkennen von anderen Funkanwendungen (z. B. ISM-Anwendungen)

7.1.3 Validierungsziele - Funksystemmanagement

Die Validierung soll geeignet sein, folgende Management-Funktionen zu bewerten:

- Herstellen der Koexistenz bei Vorhandensein verschiedener Funkkommunikationssysteme
- Herstellen der Koexistenz bei Vorhandensein verschiedener Funkkommunikationssysteme und einer anderen Funkanwendung (z. B. ISM-Anwendungen)
- Verhalten bei Vorhandensein verschiedener Funkkommunikationssysteme und einer temporären anderen Funkanwendung (z. B. ISM-Anwendung)
- Management von Funkkommunikationssystemen

Außerdem soll das Zeitverhalten des Managements bewertet werden können. Die Validierung der KoMe-Konzepte soll durch Simulation und durch messtechnische Untersuchungen mit realen Implementierungen möglich sein.

7.2 Validierung KoMe-System

7.2.1 Validierungskonzept

Für die Validierung des KoMe-Systems wird das Konzept wie in Abbildung 7-1 gezeigt in zwei wesentliche Elemente unterteilt. Objekte der Validierung sind

1. die Funktionen zur zentralen Messung der Mediumnutzung und zur Ermittlung der aktiven Funkkommunikationssysteme sowie
2. die kognitiven Algorithmen zur Bestimmung und Zuweisung der Parameterwerte für die Funkkommunikationssysteme, die eine koexistente Mediumnutzung ermöglichen.

Die heterogene Menge unabhängiger, aktiver Funkkommunikationssysteme sowie Funktionen zur Dokumentation und Analyse der Validierung ist von einer Validierungsplattform zu realisieren.

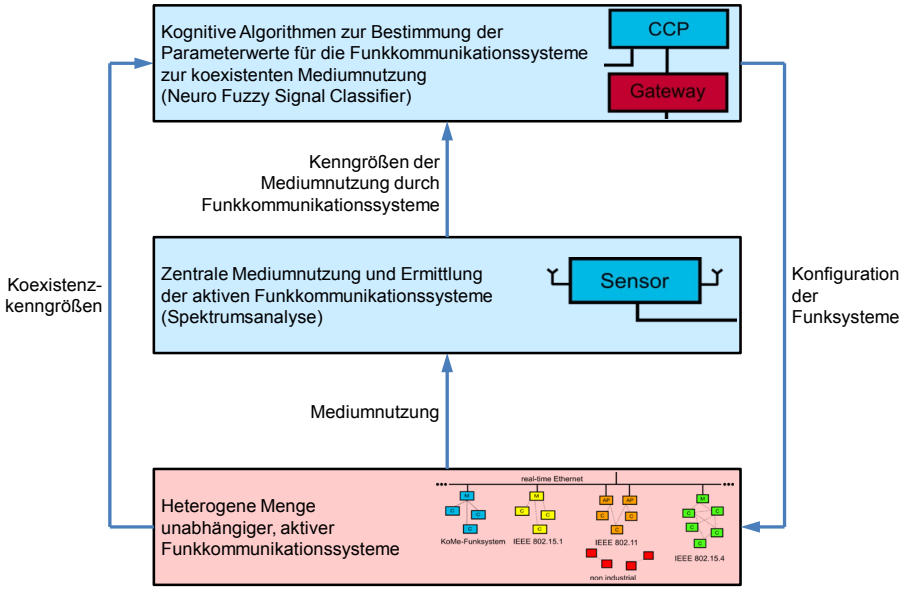

Abbildung 7-1: Objekte und Subjekt der Validierung des KoMe-Systems

7.2.2 **Validierung der Messung der Mediumnutzung**

7.2.2.1 Validierungssystem

Die Validierungsplattform zum Test der Ermittlung der Mediumnutzung zeigt Abbildung 7-2. Die Validierungsplattform erzeugt entsprechend definierter Interferenzprofile (siehe Abschnitt 7.4) eine Mediumnutzung. Diese ist vom Sensor (Sensing) des KoMe-Systems zur ermitteln. Die ermittelten Kenngrößenwerte werden über eine Schnittstelle ausgegeben, von der Validierungsplattform dokumentiert und einer Analyse zugeführt.

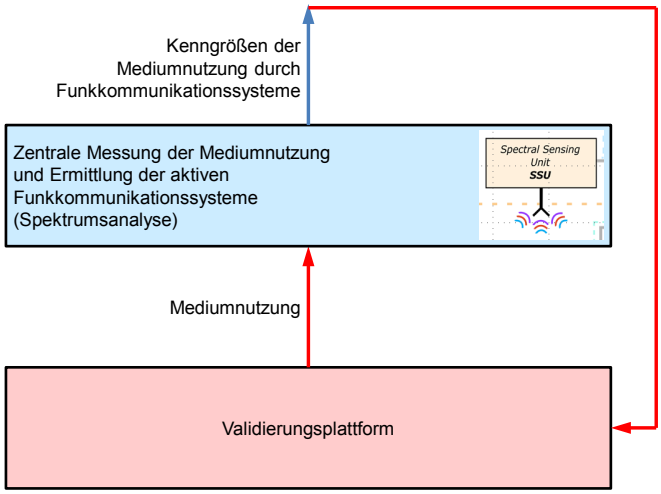

Abbildung 7-2: Validierung der Ermittlung der Mediumnutzung

7.2.2.2 Ausgangsschnittstelle Mediumnutzung

Die Mediumnutzung kann durch handelsübliche Funkgeräte oder durch den Einsatz eines Vektor Signal Generators (VSG) vorgegeben werden. Die Verbindung zwischen Validierungsplattform und KoMe-System kann über die Luft oder mithilfe von Koaxialkabeln erfolgen.

7.2.2.3 Eingangsschnittstelle Kenngrößen der Mediumnutzung

Die Spektrumsanalyse liefert eine Zeitreihe von IQ-Datensätzen für die Belegung des Frequenzspektrums. Die Datensätze werden über eine Ethernet-Schnittstelle ausgegeben. Die IQ-Datensätze werden von der Validierungsplattform mit dem eingespeisten Interferenzprofil verglichen.

7.2.3 **Validierung des Funksystemmanagements**

7.2.3.1 Validierungssystem

Das System zur Validierung der kognitiven Algorithmen zeigt Abbildung 7-3. Die Validierungsplattform erzeugt die Kenngrößen zur Mediumnutzung sowie Informationsparameter von Funkkommunikationssystemen. Zusätzlich werden Kenngrößenwerte zur Beurteilung des Koexistenzzustandes bereitgestellt. Die ermittelten Konfigurationswerte werden über eine Ethernet-Schnittstelle ausgegeben, von der Validierungsplattform dokumentiert und einer Analyse zugeführt.

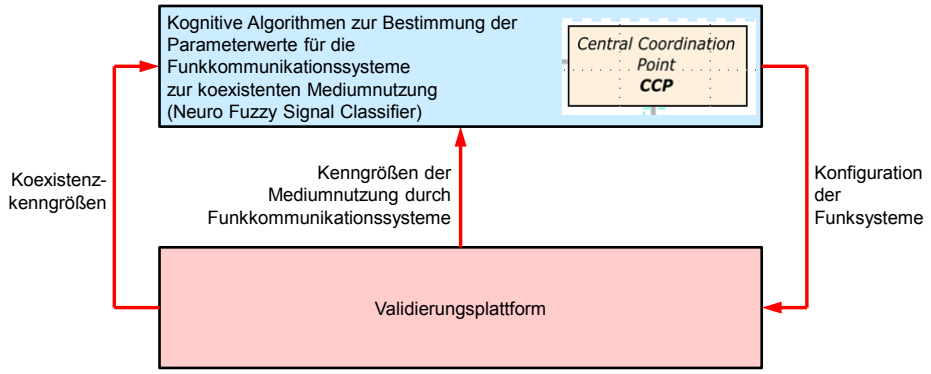

Abbildung 7-3: Validierungssystem für das Funksystemmanagement

7.2.3.2 Ausgangsschnittstelle Mediumnutzung

Die Validierungsplattform erzeugt ein Zeitreihe von IQ-Datensätzen, die die Belegung des Frequenzspektrums charakterisieren. Die Daten werden über eine Ethernet-Schnittstelle bereitgestellt. Das Übergabeprotokoll entspricht der Implementierung der GNU-Radio-Plattform bzw. des im PC implementierten Treibers.

7.2.3.3 Ausgangsschnittstelle Funkkommunikationssystemparameter

Die Validierungsplattform emuliert die Konfiguration von Funkgeräten. Die in Tabelle 7-1 aufgeführten Parameter werden von der Validierungsplattform bereitgestellt und können über eine Ethernet-Schnittstelle mittels SNMP ausgelesen werden. Die Spezifikation der Parameter zeigt Tabelle 7-2.

Tabelle 7-1: Von der Validierungsplattform bereitzustellende Parameter von Funkkommunikationssystemen

Name	Bezeichner	MIB	OID
Typ des Funkkommunikationssystems	WCST	SNMPv2	1.3.6.1.2.1.1.1.0
	WCST	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.1.1
Bandbreite des Funksystems	WCBW	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.2.1.4
Übertragungsstartfrequenz	TSF	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.2.1.2
Übertragungsstoppfrequenz	TEF	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.2.1.3

Name	Bezeichner	MIB	OID
Maximale Sendeleistung	EIRP	Ieee802dot11	1.2.840.10036.4.3.1.10
	EIRP	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.3.1.1
Mittleres Tastverhältnis	DTC	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.5.2
Mediumnutzung	MU	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.5.1

Tabelle 7-2: Spezifikation der Parameter von Funkkommunikationssystemen

Name	Bezeichner	Datentyp	Wertebereich	Maßeinheit
Typ des Funkkommunikationssystems	WCST	UInt16	[802_15_1, 802_15_4, 802_11g, 62591, 62601…]	-
Bandbreite des Funksystems	WCBW	UInt16	[0… 65535]	kHz
Übertragungsstartfrequenz	TSF	UInt16	[0… 65535]	kHz
Übertragungsstoppfrequenz	TEF	UInt16	[0… 65535]	kHz
Maximale Sendeleistung	EIRP	UInt8	[0..255]	dBm
Mittleres Tastverhältnis	DTC	UInt8	[0..100]	%
Mediumnutzung	MU	UInt16	[0..65535]	dBm*%/MHz

7.2.3.4 Ausgangsschnittstelle Koexistenzkenngrößen

Die Validierungsplattform stellt gemäß [5-21] Koexistenzkenngrößenwerte die in Tabelle 7-3 gezeigten Koexistenzkenngrößen zur Verfügung. Tabelle 7-4 listet die Spezifikation der Kenngrößen auf. Diese Kenngrößen werden über eine Ethernet-Schnittstelle bereitgestellt und können mittels SNMP ausgelesen werden.

Tabelle 7-3: Von der Validierungsplattform bereitzustellende Koexistenzkenngrößen

Name	Bezeichner	MIB	OID
Kennung der Funkanwendung	WA_ID	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.1
Kennung der logischen Funkverbindung	LL_ID	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.2
Modalwert der Übertragungszeit	TT_{Mode}	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.3
P95-Wert der Übertragungszeit	TT_{P95}	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.4
Mittelwert der Aktualisierungszeit	UT_{mean}	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.5
Standardabweichung der Aktualisierungszeit	UT_{SD}	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.6
Paketverlustrate	PLR	KoMe-MIB	1.3.6.1.4.1.46983.1.8.7

Tabelle 7-4: Spezifikation der Koexistenzkenngrößen

Name	Bezeichner	Datentyp	Wertebereich	Maßeinheit
Kennung der Funkanwendung	WA_ID	UUID		-

Name	Bezeichner	Datentyp	Wertebereich	Maßeinheit
Kennung der logischen Funkverbindung	LL_ID	UUID		-
Modalwert der Übertragungszeit	TT_{Mode}	UInt16	[0..65535]	s
P95-Wert der Übertragungszeit	TT_{P95}	UInt16	[0..65535]	s
Mittelwert der Aktualisierungszeit	UT_{mean}	UInt16	[0..65535]	s
Standardabweichung der Aktualisierungszeit	UT_{SD}	UInt16	[0..65535]	s
Paketverlustrate	PLR	UInt16	[0..65535]	-

7.2.3.5 Eingangsschnittstelle Konfiguration der Funkkommunikationssysteme

Die kognitiven Algorithmen liefern die in Tabelle 7-5 aufgelisteten Konfigurationsdaten für die zu managenden Funkkommunikationssysteme. Die Konfigurationsdaten werden über eine Ethernet-Schnittstelle mittels SNMP bereitgestellt. Die Werte der Konfigurationsdaten werden ereignisorientiert übertragen.

Tabelle 7-5: Konfigurationsdaten vom KoMe-System

Name	Bezeichner	Datentyp	Wertebereich	Maßeinheit
Kennung der Funkanwendung	WA_ID	UUID		-
Kennung des Funkgerätes	WD_ID	UUID		-
Funkkanal	RadioCh	UInt8	[0..255]	-
Maximal Sendeleistung	EIRP	UInt8	[0..255]	dBm

7.2.4 **Validierung des KoMe-System**

Das System zur Validierung des kompletten KoMe-Systems zeigt Abbildung 7-4. Die Validierungsplattform erzeugt wiederum eine Mediumnutzung und stellt zusätzlich Kenngrößenwerte zur Beurteilung des Koexistenzzustandes bereit. Die ermittelten Konfigurationswerte werden über eine Ethernet-Schnittstelle ausgegeben, von der Validierungsplattform dokumentiert und einer Analyse zugeführt.

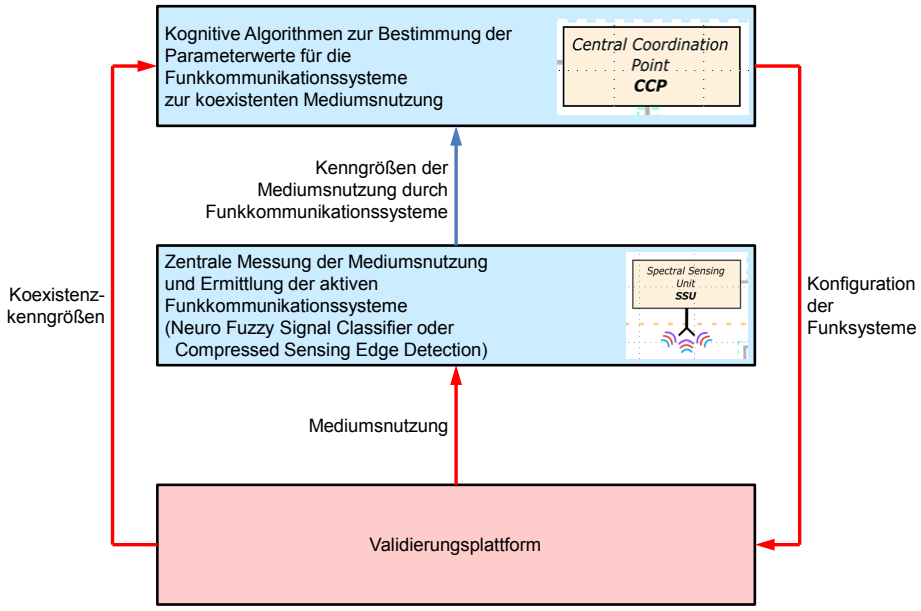

Abbildung 7-4: Validierungssystem für die kognitiven Algorithmen

Die Ausgangsschnittstelleschnittstelle Mediumnutzung entspricht der in Abschnitt 7.2.2.2 beschriebenen. Die Ausgangsschnittstelleschnittstelle Koexistenzkenngrößen ist mit den Festlegungen in Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4 identisch. Die Eingangsschnittstelle Konfiguration der Funkkommunikationssysteme ist im Abschnitt 7.2.3.4 beschrieben.

7.3 Validierung KoMe-Funkkommunikationssystem

7.3.1 Validierungskonzept

Für die Validierung des KoMe-FKS wird das Konzept wie in Abbildung 7-5 gezeigt in drei wesentliche Elemente unterteilt. Objekte der Validierung sind

1. die Funktionen zur dezentralen Messung der Mediumnutzung und zur Ermittlung der aktiven Funkkommunikationssysteme sowie
2. die Algorithmen zur Bestimmung der Parameterwerte des KoMe-Funkkommunikationssystems, die eine koexistente Mediumnutzung ermöglichen.

Die heterogene Menge unabhängiger, aktiver Funkkommunikationssysteme sowie Funktionen zur Dokumentation und Analyse der Validierung wird von einer Validierungsplattform realisiert.

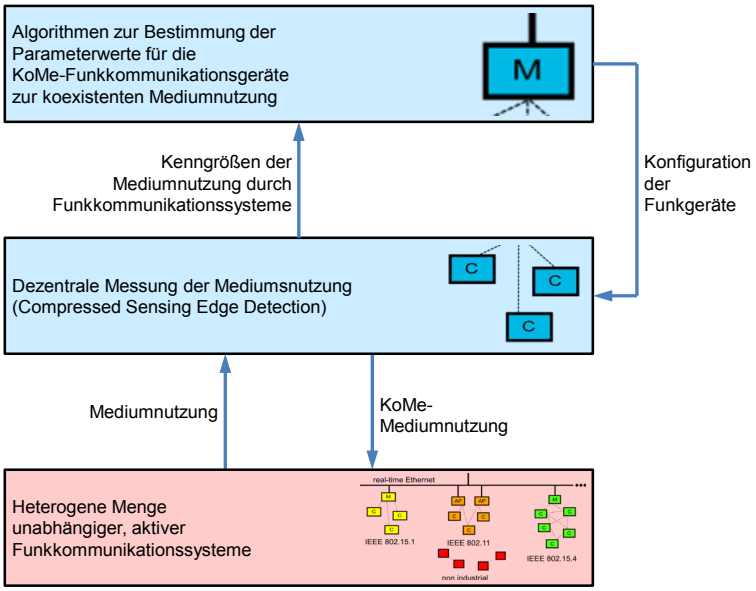

Abbildung 7-5: Objekte und Subjekt der Validierung der KoMe-Funkkommunikationssystem

7.3.2 **Validierung der Messung der Mediumnutzung**

7.3.2.1 Validierungssystem

Das System zur Validierung der Ermittlung der Kenngrößenwerte zeigt Abbildung 7-6. Die Validierungsplattform erzeugt entsprechend definierter Interferenzprofile (siehe Kapitel 7.4) eine Mediumnutzung. Diese ist von den Geräten des KoMe-Funkkommunikationssystems zu analysieren. Die ermittelten Kenngrößenwerte werden als Datei ausgegeben, von der Validierungsplattform dokumentiert und einer Analyse zugeführt.

Die Ausgangsschnittstellen Mediumnutzung entspricht der in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen.

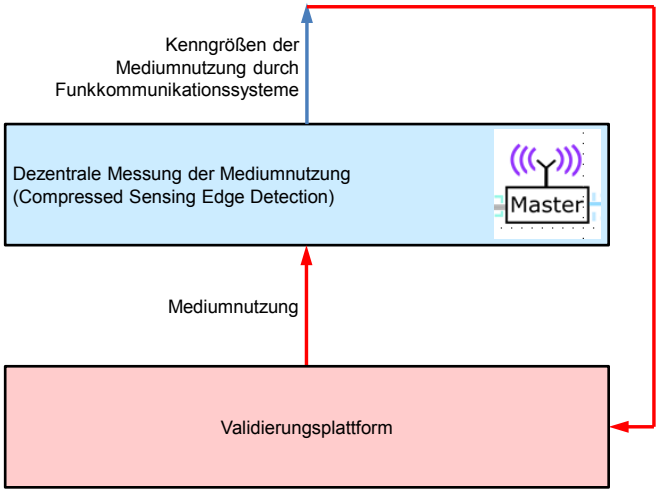

Abbildung 7-6: Validierungssystem für die Ermittlung der Kenngrößen der Mediumnutzung beim KoMe-Funkkommunikationssystem

7.3.2.2 Eingangsschnittstelle Mediumnutzung

Bei der Bestimmung der Mediumnutzung durch das KoMe-Funkkommunikationssystem mithilfe des Compressed Sensing Edge Detection (CSED) wird als Kenngröße die mittlere spektrale Leistungsdichte innerhalb detektierter Zeit- und Frequenzgrenzen ermittelt. Die Parameter werden gemäß Tabelle 7-6 bereitgestellt. Sie beschreiben die Mediumnutzung wie in Abbildung 7-7 grafisch dargestellt.

Tabelle 7-6: Spezifikation der Kenngrößen der Mediumsnutzung

Name	Bezeichner	Datentyp	Wertebereich	Maßeinheit
Übertragungsstartzeit	TST	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	µs
Übertragungsstartfrequenz	TSF	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	kHz
Übertragungsstoppzeit	TET	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	µs
Übertragungsstoppfrequenz	TEF	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	kHz
Mittlere spektrale Leistungsdichte	APSD	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	dBm/MHz

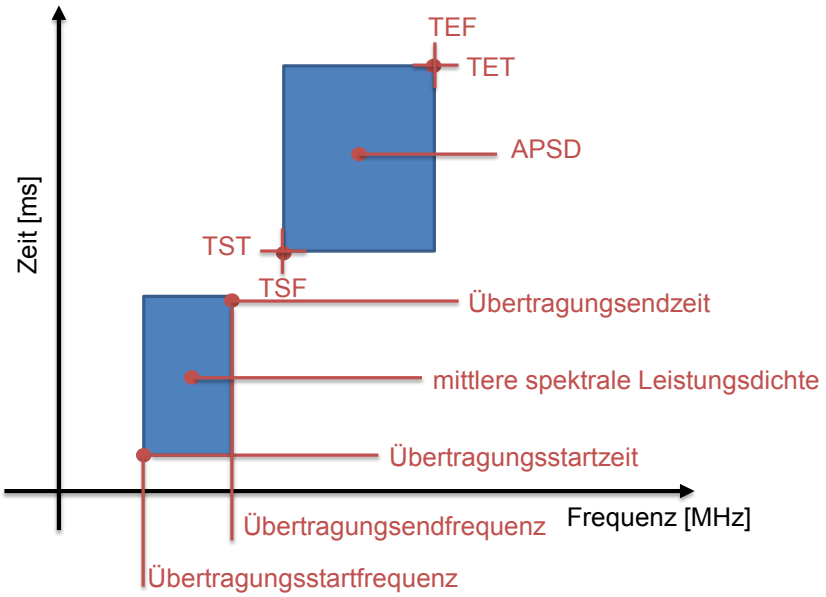

Abbildung 7-7: Kenngrößen der Mediumnutzung des KoMe-Funkkommunikationssystems

7.3.3 **Validierung des Funksystemmanagements**

Das System zur Validierung der Algorithmen des Funksystemmanagements zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. Die Validierungsplattform erzeugt wiederum eine Mediumnutzung und stellt zusätzlich Kenngrößenwerte zur Beurteilung des Koexistenzzustandes bereit. Die ermittelten Konfigurationswerte werden über eine Schnittstelle ausgegeben, von der Validierungsplattform dokumentiert und einer Analyse zugeführt.

Die Ausgangsschnittstelle Mediumnutzung entspricht der in Abschnitt 7.2.2.2 beschriebenen. Die Verbindung zwischen Validierungsplattform und KoMe-FKS kann über die Luft oder mithilfe von Koaxialkabeln erfolgen. Die Eingangsschnittstelle Konfiguration der Funkkommunikationssysteme entspricht der im Abschnitt 5.3.4 beschriebenen. Die KoMe-Mediumnutzung wird durch einen Spektrumanalysator bestimmt, der Teil der Validierungsplattform ist.

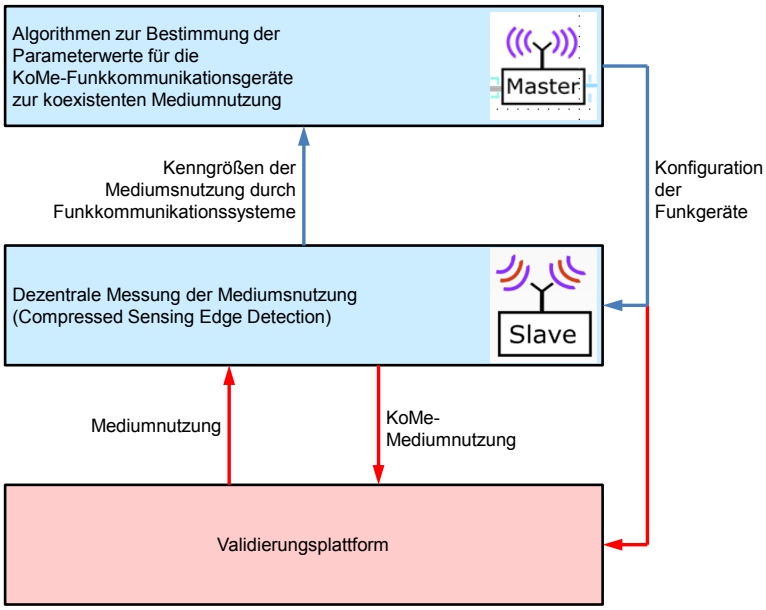

Abbildung 7-8: Validierungssystem für die Algorithmen

7.4 Spezifikation von Interferenzprofilen

7.4.1 Allgemeines

Die in diesem Kapitel spezifizierten Interferenzprofile sollen einheitliche, anwendungsorientierte und reproduzierbare Untersuchungen der Koexistenz ermöglichen. Ausgehend von industriellen Koexistenzszenarien sollen folgende Interferenzprofile betrachtet werden:

- Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth
- PROFINET IO Kommunikation mit WLAN
- Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA
- Video-Übertragung mit WLAN
- Bluetooth Inquire
- WLAN Probe Request
- ISM-Anwendung Mikrowelle

Für die Interferenzprofile der Funkkommunikationssysteme werden die beteiligten Funkgeräte, die logischen Verbindungen, die Nutzdatenlänge und der Sendezeitabstand spezifiziert. Für die eingesetzte Funktechnologie wird die Nutzung des Mediums beschrieben. Andere Funkanwendungen (z. B. ISM-Anwendungen) werden allgemein beschrieben.

Die Spezifikationen der Interferenzprofile können einheitlich und reproduzierbar durch reale Geräte, durch Emulation oder mit Simulationsmodellen implementiert werden.

Die Interferenzprofile, also die anwendungsspezifische Mediumbelegung, kann durch die Parameter Startzeit, Startfrequenz, Endzeit, Endfrequenz und die mittlere Sendeleistung der Nachrichtenübertragung spezifiziert werden. Diese Art der Spezifikation entspricht der Beschreibung in Abbildung 7-7. Alternativ kann die Medienbelegung durch die Parameter Startzeit, Endzeit, die mittlere Sendeleistung der Nachrichtenübertragung sowie durch den Frequenzkanal oder durch Mittenfrequenz und Bandbreite des Frequenzkanals spezifiziert werden. Die Möglichkeiten der Interferenzprofilspezifikation sind in Tabelle 7-7 und Tabelle 7-8 dargestellt.

Tabelle 7-7: Möglichkeit 1 der Interferenzprofilspezifikation

Startzeit	Endzeit	Startfrequenz	Endfrequenz	Mittlere Sendeleistung

Tabelle 7-8: Möglichkeit 2 der Interferenzprofilspezifikation

Startzeit	Endzeit	Übertragungskanal bzw. Mittenfrequenz	Bandbreite	Mittlere Sendeleistung

7.4.2 **Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth**

In diesem Abschnitt wird das Interferenzprofil für den periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth beschrieben. Dabei wird die Medienbelegung von drei parallelen Bluetooth Funkkommunikationssystemen entsprechend Abbildung 7-9 angenommen. Das Bluetooth Funkkommunikationssystem verfügt nicht über ein Adaptives Frequenzsprungverfahren (AFH). Die Mediumnutzung beträgt im Mittel 10%, zufällig verteilt je Frequenzkanal und zwischen den Frequenzkanälen untereinander.

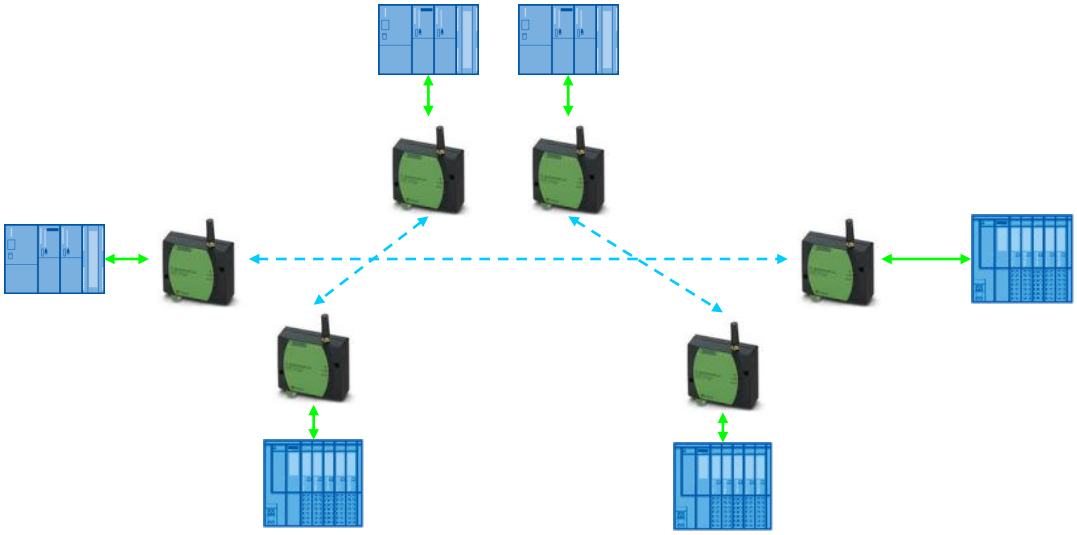

Abbildung 7-9: Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth

Das Bluetooth Funkkommunikationssystem verwendet die physikalische Schicht gemäß IEEE 802.15.1 [7-1]. Die Spektralmaske mit den Grenzwerten gemäß [7-1] ist in Abbildung 7-10 dargestellt, wobei sich die Angaben auf eine Auflösebandbreite von 100 kHz beziehen.

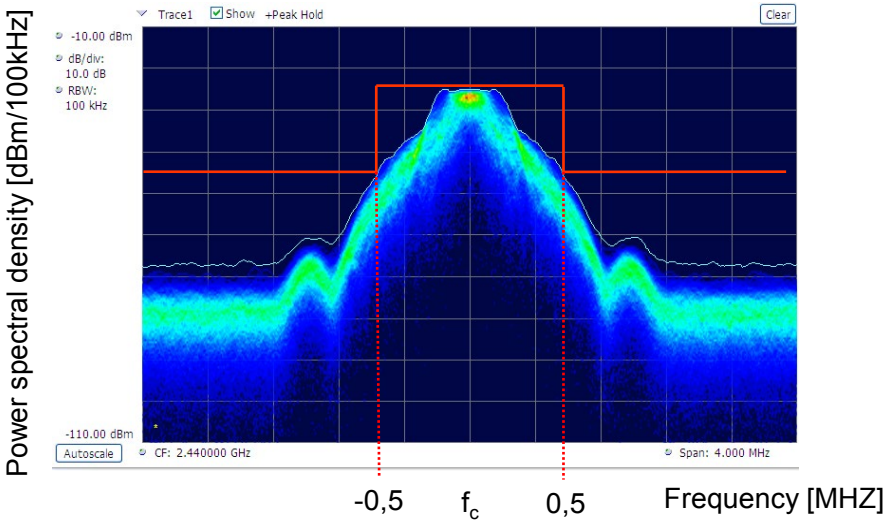

Abbildung 7-10: Spektralmaske IEEE 802.15.1

Die Parameter der Bitübertragungsschicht von Bluetooth sind in Tabelle 7-9 aufgeführt.

Tabelle 7-9: Parameter der Bitübertragungsschicht von Bluetooth

Bezeichnung	Symbol
Modulation	Gaussian frequency shift keying (GFSK)
Filter Funktion	Gauss Filter
Bandbreiten-Bit Produkt (BT)	0,5
Modulationsindex	0,28 (0,32)
Minimale Frequenzabweichung	140 kHz (160 kHz)
Zuordnung	Logisch „1“ → positive Frequenzabweichung Logisch „0”→ negative Frequenzabweichung
Symbolrate	1 MSymbol/s
Mittenfrequenz	fc siehe Gleichung (7-1)
Frequenzsprungfolge	zufällig verteilt

Das Funkkommunikationssystem Bluetooth verwendet 79 Frequenzkanäle im 2,4 GHz ISM-Band. Die Berechnung der Mittenfrequenzen f_C für die 79 Frequenzkanäle erfolgt mithilfe von Gleichung 7-1. Abbildung 7-11 zeigt das Spektrum von Bluetooth mit allen 79 Frequenzkanälen, zudem ist das untere und obere Schutzband rot markiert.

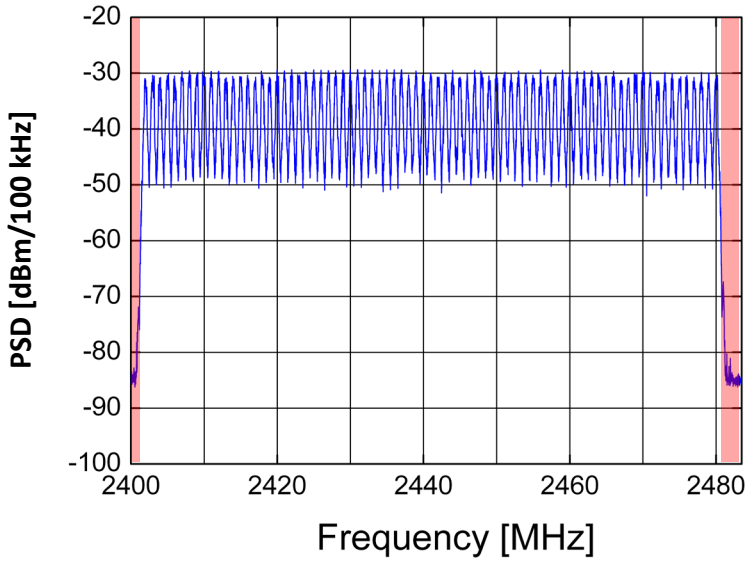

Abbildung 7-11: Spektrum des Bluetooth Funkkommunikationssystems

$$f_C = (2402 + k)\ MHz; \quad k = 0, \ldots\ldots, 78 \tag{7-1}$$

Der Paketaufbau einer Bluetooth-Nachricht mit Nutzdaten besteht aus dem Access Field, dem Payload Header, dem Dateninhalt (Payload) und einer CRC-Prüfsumme. Dafür wird in der Automatisierungstechnik der Bluetooth Nachrichtentyp DM1, DM3 oder DM5 mit Forward Error Correction und CRC-Prüfsumme verwendet. Der Nutzdateninhalt kann in Abhängigkeit vom Nachrichtentyp 240 Bit für DM1, 1490 Bit für DM3 und 2740 Bit für DM5 Pakete betragen.

Beispielhaft ist der Paketaufbau der Bluetooth-Nachricht mit einem Nutzdateninhalt von 64 Byte in Abbildung 7-12 dargestellt. Als Nutzdateninhalt wird eine UDP-Nachricht mit einem Nutzdateninhalt von 46 Byte übertragen. Das entspricht der PROFINET IO Realtime Kommunikation. Für den periodischen Prozessdatenaustausch mit Bluetooth wird ein Sendezeitabstand von 16 ms verwendet. Neben den Bluetooth-Nachrichten zur Datenübertragung werden außerdem Management Nachrichten (z. B. POLL, NULL) mit fester Länge in festen Zeitabständen übertragen, damit die Synchronisation zwischen Master und Slave erhalten bleibt.

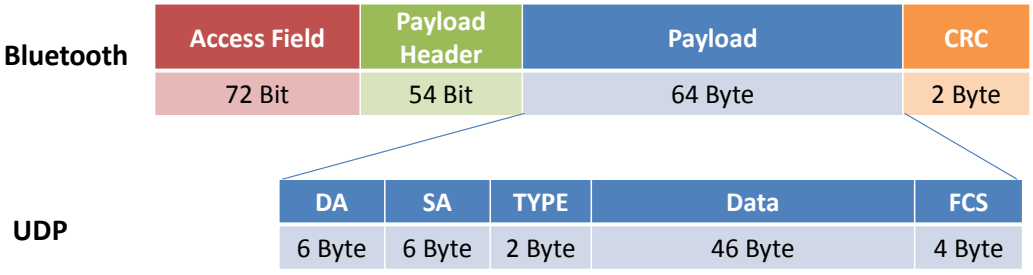

Abbildung 7-12: Paketaufbau einer Bluetooth Nutzdaten-Nachricht

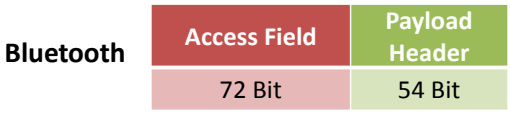

Abbildung 7-13: Paketaufbau für Bluetooth Management Nachrichten

Bei Bluetooth beträgt der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn zweier Nachrichtenübertragungen einen ganzzahligen vielfachen von 625 µs. Da Bluetooth das Time Division Multiple Access (TDMA) Verfahren verwendet, ist die Zeit in sogenannte Slots mit einer Länge von

625 µs eingeteilt. Die Datenübertragung für einen Anwendungszyklus von 16 ms ist in Tabelle 7-10 dargestellt.

Tabelle 7-10: Daten eines Abschnittes für das Bluetooth Interferenzprofil

Zeit [ms]	Kanal	Frequenz [MHz]	Übertragungsrichtung	Paketlänge		Pakettyp
				[Bit]	[µs]	
0,000	65	2.467	Master → Slave	1000	1000	Nutzdaten
1,875	65	2.467	Slave → Master	166	166	ACK
2,500	47	2.449	Master → Slave	166	166	Management
5,000	78	2.480	Master → Slave	166	166	Management
7,500	26	2.428	Master → Slave	166	166	Management
10,000	69	2.471	Master → Slave	166	166	Management
12,500	0	2.402	Master → Slave	166	166	Management
15,000	10	2.412	Master → Slave	166	166	Management
17,500	40	2.442	Master → Slave	1000	1000	Nutzdaten
18,125	40	2.442	Slave → Master	166	166	ACK
20,000	65	2.467	Master → Slave	166	166	Management
22,500	05	2407	Master → Slave	166	166	Management
25,000	73	2475	Master → Slave	166	166	Management
27,500	58	2460	Master → Slave	166	166	Management
30,000	36	2.438	Master → Slave	1000	1000	Nutzdaten
31,875	36	2.438	Slave → Master	166	166	ACK

7.4.3 **PROFINET IO Kommunikation mit WLAN**

In diesem Abschnitt wird das Interferenzprofil für die PROFINET IO Kommunikation mit WLAN beschrieben. Dabei wird die Medienbelegung von einem WLAN Funkkommunikationssystem bestehend aus einem Access Point und 10 Clients entsprechend Abbildung 7-14 betrachtet. Als Anwendungsdaten werden PROFINET IO Daten zwischen einer Steuerung (SPS) und verteilten Automatisierungskomponenten (ET200) übertragen.

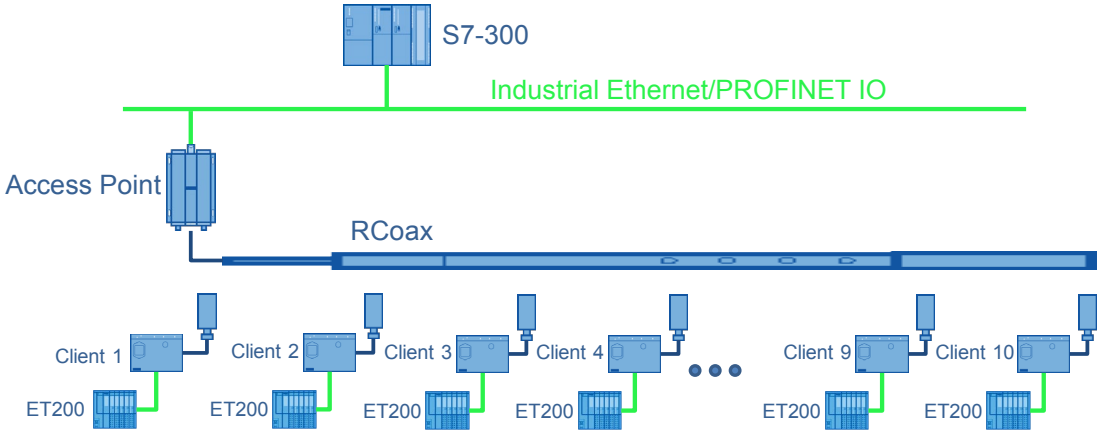

Abbildung 7-14: PROFINET IO Kommunikation mit WLAN

Die Parameter der Bitübertragungsschicht sind in Tabelle 7-11 aufgeführt.

Tabelle 7-11: Parameter der Bitübertragungsschicht von WLAN

Bezeichnung	Symbol
Modulation	Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)
Filter Funktion	Cosine
Roll off	0,1
Fenster Funktion	Hanning

Das Funkkommunikationssystem WLAN gemäß IEEE 802.11g [5-23] arbeitet im 2,4 GHz Frequenzband auf 13 Frequenzkanälen. Die Kanalnummern der 13 möglichen Frequenzkanäle mit entsprechenden Mittenfrequenzen (f_C) sind in Tabelle 7-12 auflistet. Eine typische Kanalbelegung im industriellen Umfeld ist die Verwendung der WLAN Kanäle 1, 6 und 11 oder 1, 7 und 13.

Tabelle 7-12: Frequenzkanäle und Kanalnummern für WLAN im 2,4 GHz ISM Band

Kanalnummer	Mittenfrequenz [MHz]	Kanalnummer	Mittenfrequenz [MHz]
1	2412	8	2447
2	2427	9	2452
3	2437	10	2457
4	2427	11	2462
5	2432	12	2467
6	2437	13	2472
7	2442	-	

In [5-23] sind nur die Werte der Spektralmasken mit den Grenzwerten der spektralen Leistungsdichte über einem Frequenzbereich definiert. Die in [5-23] aufgeführten Spektralmasken eigenen sich nur bedingt zur Emulation der Funksignale des Funkkommunikationssystems WLAN, da die Werte der Spektralmaske des Senders nur den maximalen Werten der spektralen Leistungsdichte entsprechen. Deutlich wird dieses Verhalten anhand der Messergebnisse der spektralen Leistungsdichte für das Funkkommunikationssystem WLAN nach IEEE 802.11b in Abbildung 7-15 und für das Funkkommunikationssystem WLAN nach IEEE 802.11g in Abbildung 7-16.

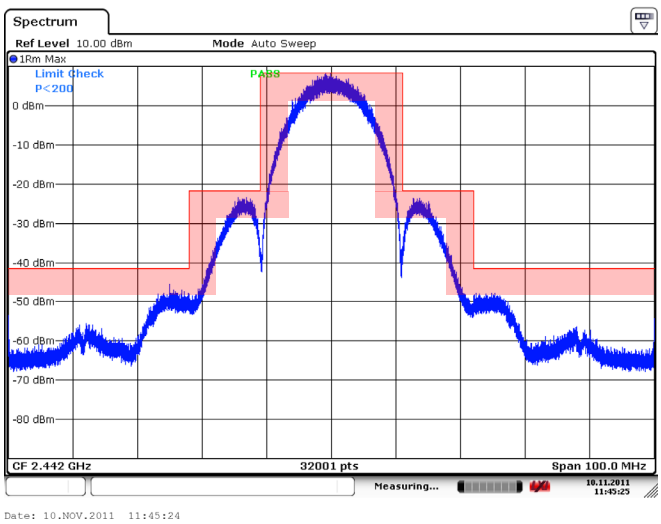

Abbildung 7-15: Spektrum und Spektralmaske für WLAN nach IEEE 802.11b

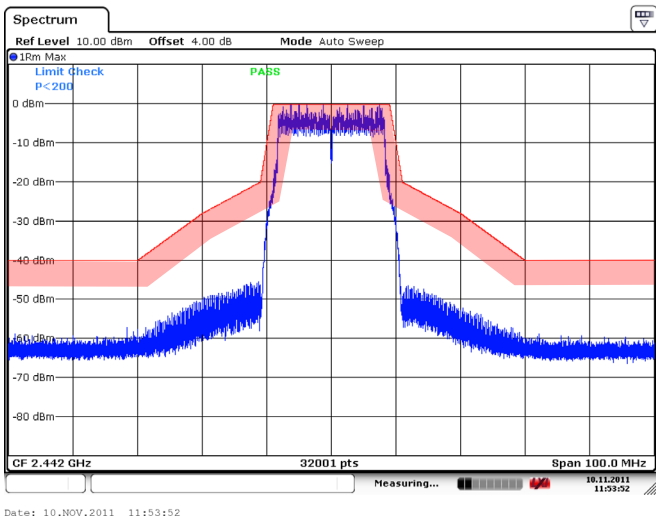

Abbildung 7-16: Spektrum und Spektralmaske für WLAN nach IEEE 802.11g

Der Paketaufbau für die verwendeten WLAN-Nachrichten ist in Abbildung 7-17 dargestellt. Die WLAN Nachrichten mit Nutzdateninhalt haben eine feste Länge von 185 Byte.

	Preamble	PLCP Header	Frame Control	Duration ID	Destination Adresse	BSSID	Source Address	SEQ	Nutzdaten	FCS
Data AP→STA	12	3	2	2	6	6	6	2	142	4

	Preamble	PLCP Header	Frame Control	Duration ID	BSSID	Source Address	Destination Address	SEQ	Nutzdaten	FCS
Data STA→AP	12	3	2	2	6	6	6	2	142	4

	Preamble	PLCP Header	Frame Control	Duration ID	Destination Adresse	FCS
ACK	12	3	2	2	6	4

Abbildung 7-17: Paketaufbau der WLAN-Nachrichten

Jede WLAN Nachricht mit Nutzdateninhalt wird vom Empfänger durch eine Acknowledgement-Nachricht bestätigt. Das Spektrogramm einer bidirektionale Übertragung von UDP Nachrichten mit einer Länge von 64 Byte in einer WLAN Nachricht ist in Abbildung 7-18 dargestellt. Zwischen der WLAN Nachricht mit Dateninhalt und der Empfangsbestätigung (ACK) findet für eine Dauer von 10 µs (SIFS: Short Interframe Space) keine Funkübertragung statt. Nach der Empfangsbestätigung (ACK) darf für eine Dauer von mindestens 50 µs (DIFS: Distributed Interframe Space) keine Funkübertragung erfolgen. Die Datenübertragung für einen Anwendungszyklus von 16 ms ist in Tabelle 7-13 dargestellt.

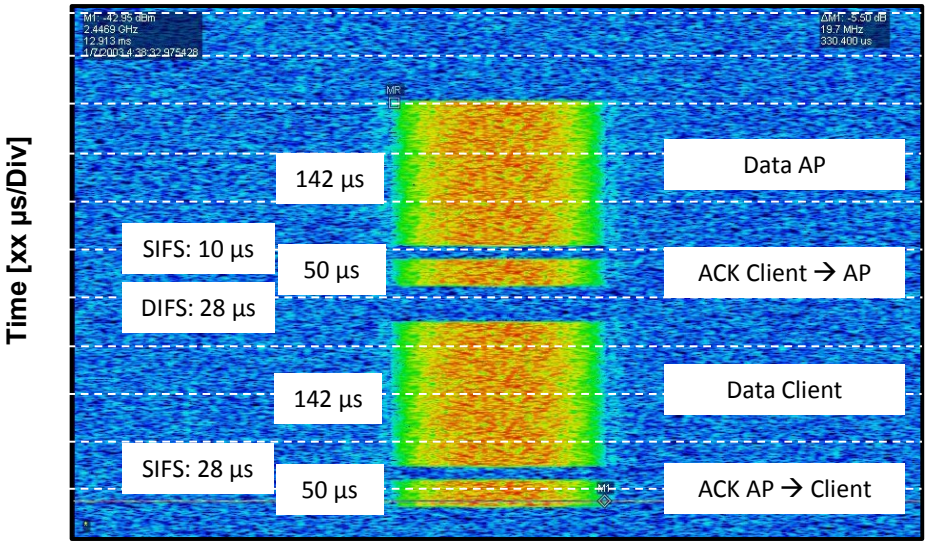

Abbildung 7-18: Spektrogramm für die Übertragung von WLAN-Nachrichten

Tabelle 7-13: PROFINET IO Kommunikation mit WLAN

Zeit [ms]	Kanal	Frequenz [MHz]	Übertragungsrichtung	Paketlänge		Pakettyp
				[Byte]	[µs]	
0,000	7	2442	Access Point → Client 1	185	142	Nutzdaten
0,152	7	2442	Client 1 → Access Point	29	50	ACK
0,230	7	2442	Client 1 → Access Point	185	142	Nutzdaten
0,382	7	2442	Access Point → Client 1	29	50	ACK
5,000	7	2442	Access Point → Client 2	185	142	Nutzdaten
5,152	7	2442	Client 2 → Access Point	29	50	ACK
5,230	7	2442	Client 2 → Access Point	185	142	Nutzdaten
5,382	7	2442	Access Point → Client 2	29	50	ACK
10,000	7	2442	Access Point → Client 3	185	142	Nutzdaten
10,152	7	2442	Client 3 → Access Point	29	50	ACK
10,230	7	2442	Client 3 → Access Point	185	142	Nutzdaten
10,382	7	2442	Access Point → Client 3	29	50	ACK
15,000	7	2442	Access Point → Client 4	185	142	Nutzdaten
15,152	7	2442	Client 4 → Access Point	29	50	ACK
15,230	7	2442	Client 4 → Access Point	185	142	Nutzdaten
15,382	7	2442	Access Point → Client 4	29	50	ACK

Zeit [ms]	Kanal	Frequenz [MHz]	Übertragungsrichtung	Paketlänge		Pakettyp
				[Byte]	[µs]	
…	…	…	…	…	…	…
45,000	7	2442	Access Point → Client 10	185	142	Nutzdaten
45,152	7	2442	Client 10 → Access Point	29	50	ACK
45,230	7	2442	Client 10 → Access Point	185	142	Nutzdaten
45,382	7	2442	Access Point → Client 10	29	50	ACK
…	…	…	…	…	…	…
128,000	7	2442	Access Point → Client 1	185	142	Nutzdaten
128,152	7	2442	Client 1 → Access Point	29	50	ACK
128,230	7	2442	Client 1 → Access Point	185	142	Nutzdaten
128,382	7	2442	Access Point → Client 1	29	50	ACK
…	…	…	…	…	…	…
173,000	7	2442	Access Point → Client 10	185	142	Nutzdaten
173,152	7	2442	Client 10 → Access Point	29	50	ACK
173,230	7	2442	Client 10 → Access Point	185	142	Nutzdaten
173,382	7	2442	Access Point → Client 10	29	50	ACK

7.4.4 **Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA**

Das WISA System besteht aus einer Basisstation und mehreren Funkknoten. Dabei können sich die Zellen von benachbarten WISA Systemen überlagern (siehe Abbildung 7-19).

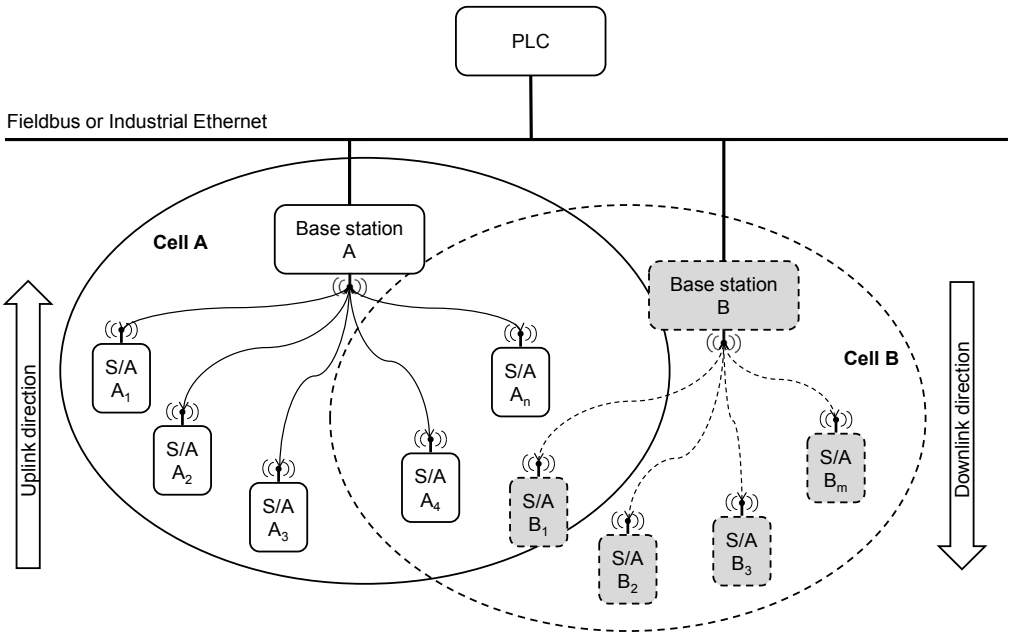

Abbildung 7-19: Systemaufbau von WISA

Das WISA System verwendet wie Bluetooth die physikalische Schicht des Standards IEEE 802.15.1 [7-1]. Die Spektralmaske mit den Grenzwerten gemäß [7-1] ist Abbildung 7-10 dargestellt. Die Angaben in Abbildung 7-10 beziehen sich auf eine Auflösungsbandbreite von 100 kHz. Die Parameter der Bitübertragungsschicht sind in Tabelle 7-14 aufgeführt.

Tabelle 7-14: Parameter der Bitübertragungsschicht von WISA

Bezeichnung	**Symbol**
Modulation	Gaussian frequency shift keying (GFSK)
Filter Funktion	Gauss Filter
Bandbreiten-Bit Produkt (BT)	0,5
Modulationsindex	0,28 (0,32)
Minimale Frequenzabweichung	140 kHz (160 kHz)
Zuordnung	Logisch „1“ → positive Frequenzabweichung Logisch „0” → negative Frequenzabweichung
Symbolrate	1 MSymbol/s
Mittenfrequenz	fc siehe Gleichung (7-6), (7-7), (7-8), (7-9) und (7-10)1
Frequenzsprungfolge	siehe Gleichung (7-6), (7-7), (7-8), (7-9) und (7-10)1

WISA verwendet zur Medienzugriffssteuerung eine Kombination aus Time Division Multiple Access mit Frequency Division Duplex und Frequency Hopping (TDMA/FDD/FH), wie in Abbildung 7-20 dargestellt. Die Downlink-Übertragung von der WISA Basisstation zu den Sensoren und Aktoren (S/A) ist zum Zweck der Paket- und Slotsynchronisation der Sensoren und Aktoren (S/A) immer aktiv. Somit wird den S/A ermöglicht die Zeitschlitze zu finden, in welchen eine Uplink-Nachricht übertragen werden kann. Die Uplink-Übertragung von den S/A zur Basisstation ist nur für die Dauer der Prozessdaten- und Synchronisierungsdatenübertragung aktiv.

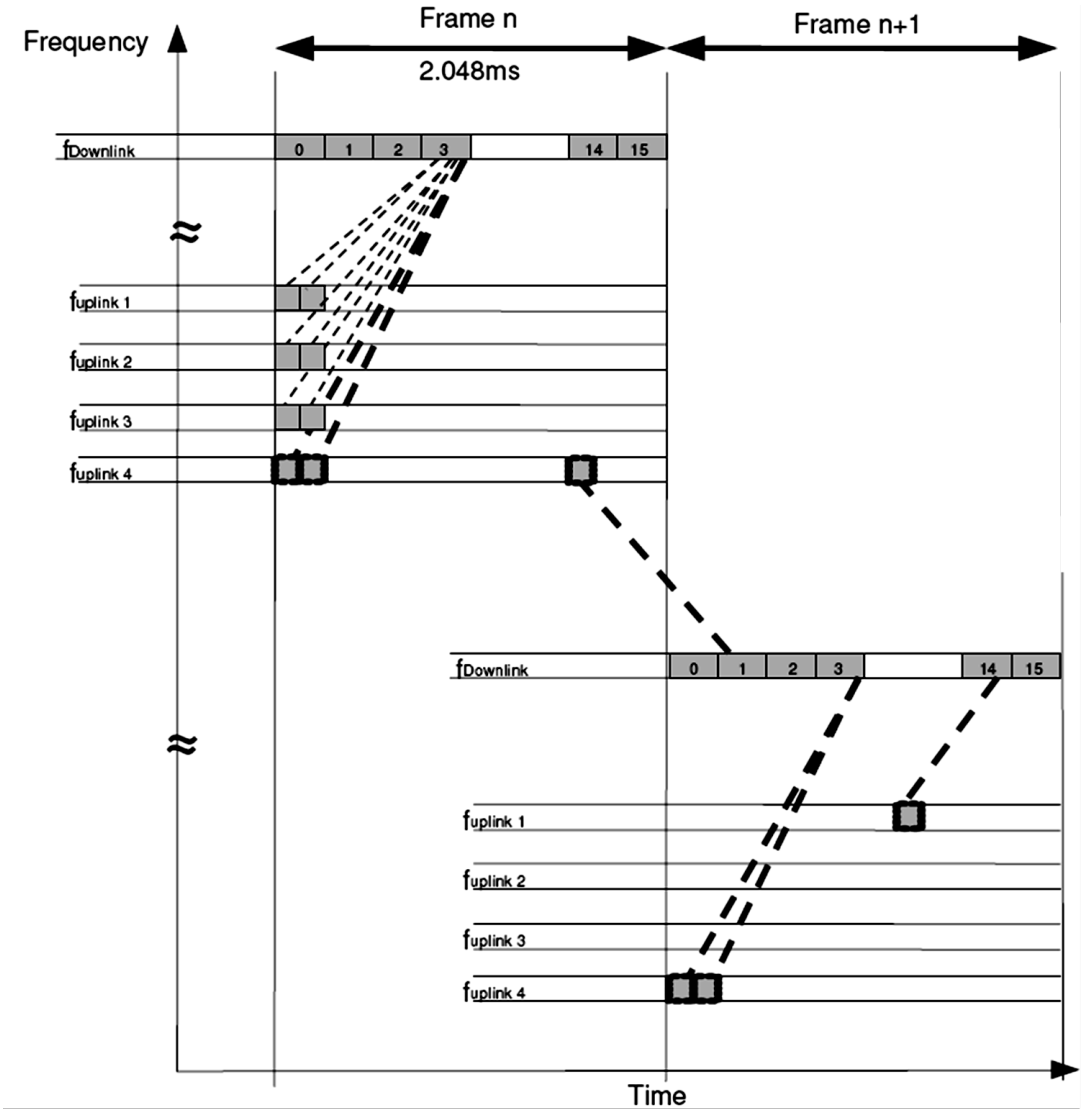

Abbildung 7-20: WISA TDMA/FDD/FH Muster

Für die Datenübertragung verwendet WISA einen Downlink-Kanal von der Basisstation zu den S/A und vier Uplink-Kanäle von den S/A zur Basisstation. Der Downlink-Kanal und die vier Uplink-Kanäle wechseln synchron die Übertragungsfrequenz. Für das TDMA-Verfahren erfolgt die Datenübertragung in Zeitrahmen (T_{frame}) mit einer Länge von 2048 µs. Für die Downlink-Übertragung ist dieser Zeitrahmen in 16 Downlink-Slots mit je 128 µs Länge unterteilt. Die Uplink-Frames sind am Downlink-Frame ausgerichtet. Es können maximal 32 Uplink-Slots mit 32 µs Länge pro Zeitrahmen und Uplink-Kanal übertragen werden. Zu Beginn und am Ende des Zeitrahmens sind Guard Slots eingefügt, welche als Umschaltzeit für den Frequenzwechsel reserviert sind.

WISA verwendet, im Gegensatz zu Bluetooth, ein deterministisches Frequenzsprungverfahren. Das verfügbare Frequenzband ist in sieben Unterbänder ($n_B = 7$) mit einer Bandbreite von $B_s = 11$ MHz aufgeteilt. Jedes Unterband verfügt über elf Frequenzkanälen ($n_I = 11$) mit einer Bandbreite von $B_H = 1$ MHz. Somit lassen sich für die Startfrequenz $f_0 = 2403$ MHz die Frequenzkanäle für ein WISA System nach Gleichung (7-2) errechnen.

$$f = f_0 + W \cdot B_S + X \cdot B_H \qquad (7\text{-}2)$$

$$f = 2403\ \text{MHz} + W \cdot 11\ \text{MHz} + X \cdot 1\ \text{MHz}$$

Die Änderung der Variablen W und K bei jedem Frequenzsprung wird entsprechend Gleichung (7-3) berechnet.

$$
\begin{aligned}
&W_0(j) = j,\ j = 0 \,..\, 6\\
&W_K(j) = (W_0(j)\cdot(K+1)) \bmod 7,\ \text{for } K = 0 \text{ to } 5\\
&X_0(i) = i,\ i = 0 \,..\, 10\\
&X_I(i) = (X_0(i)\cdot(I+1)) \bmod 11,\ \text{for } I = 0 \text{ to } 9.
\end{aligned}
\tag{7-3}
$$

Aus den Variablen K und I können $6 \cdot 10 = 60$ unterschiedliche Frequenzsprungfolgen erzeugt werden. Die Identifikation der WISA Zelle erfolgt durch die Cell-ID, welche sich durch folgenden Ausdruck beschreiben lässt:

$$Cell_{ID} = 10 \cdot K + I \tag{7-4}$$

Die Indexpaare (K, I), welche über die gewählte Cell-ID festgelegt werden, bestimmen die Sequenzen $W_K(j)$ und $X_I(i)$. Die Auswahl der Nummer für i und j für $W_K(i)$ und $X_I(j)$ erfolgt über folgende Gleichung:

$$
\begin{aligned}
j &= FN \bmod 7\\
i &= FN \bmod 11.
\end{aligned}
\tag{7-5}
$$

Als Ergebnis ergeben sich 60 unterschiedliche Frequenzsprungfolgen mit einer Periode von 77 Übertragungen. Jede einzelne Frequenz wird einmal pro Periode belegt. Schlussendlich kann die Frequenz für jede Downlink- und Uplink-Übertragung deterministisch berechnet werden. Für die Downlink-Richtung erfolgt die Berechnung des Frequenzsprunges nach folgender Gleichung:

$$f_{DL}(FN) = f_0 + W_K(j)\cdot B_S + X_I(i)\cdot B_H \tag{7-6}$$

Für die Uplink-Richtung erfolgt die Berechnung des Frequenzkanäle für die vier getrennten Uplink-Frequenzen nach den folgenden Gleichungen (7-7) bis (7-10).

$$f_{UL1}(FN) = f_0 + ((W_K(j)+3) \bmod 7)\cdot B_S + X_I(i)\cdot B_H \tag{7-7}$$

$$f_{UL2}(FN) = f_0 + ((W_K(j)+3) \bmod 7)\cdot B_S + (X_I(i)+3)) \bmod 11)\cdot B_H \tag{7-8}$$

$$f_{UL3}(FN) = f_0 + ((W_K(j)+3) \bmod 7)\cdot B_S + (X_I(i)+6)) \bmod 11)\cdot B_H \tag{7-9}$$

$$f_{UL4}(FN) = f_0 + ((W_K(j)+3) \bmod 7)\cdot B_S + (X_I(i)+9)) \bmod 11)\cdot B_H \tag{7-10}1$$

7.4.5 **Video-Übertragung mit WLAN**

Das Interferenzprofil Video-Übertragung mit WLAN nutzt, wie das Interferenzprofil PROFINET IO-Kommunikation mit WLAN, den IEEE802.11g Standard. Im Gegensatz zum Interferenzprofil PROFINET IO-Kommunikation mit festen Paketlängen variiert die Paketlänge beim Interferenzprofil Video-Übertragung mit WLAN. Es wird eine variable Belegung des Mediums mit jeweils 10 %, 20 % und 30 % zeitlicher Mediumbelegung vorgegeben. Dafür wird eine Folge von Datenpaketen mit zufälligen Paketlängen erzeugt. Nach jedem Datenpaket erfolgt ein Acknowledgement. Anschließend werden zufällig Wartezeiten aufeinandergereiht, so dass verschiedene Konstellationen entstehen.

7.4.6 **Bluetooth Inquire**

Das Bluetooth Inquire beschreibt einen Teil des Verbindungsaufbaues bei Bluetooth durch den Bluetooth Master. Der Bluetooth Inquire Vorgang wird für den Verbindungsaufbau, nach Verbindungsabbrüchen oder durch fehlerhafte Bluetooth Kommunikationsverbindungen durchgeführt. Beim Bluetooth Inquire werden 16 Frequenzen belegt, die in vier Unterbänder unterteilt

sind. Die Inquire Nachrichten werden mit einem Zyklus von 10 ms, dem sogenannten Train, auf den gleichen Frequenzen erneut ausgesendet. Die zeitliche Mediumbelegung pro Inquire Nachricht beträgt T_{on} = 166 µs. Die Inquire Nachricht wird in einem Slot von 625 µs ausgesendet. Die Übertragungskanäle liegen innerhalb eines Unterbandes in einem Abstand von 2 MHz. Die Unterbänder 1 bis 4 belegen folgende Frequenzbereiche:

- Unterband 1: belegter Frequenzbereich von 2403 MHz bis 2410 MHz,
- Unterband 2: belegter Frequenzbereich von 2432 MHz bis 2438 MHz,
- Unterband 3: belegter Frequenzbereich von 2448 MHz bis 2454 MHz,
- Unterband 4: belegter Frequenzbereich von 2464 MHz bis 2470 MHz.

Tabelle 7-15: Mediumbelegung für einen Train der Bluetooth Inquire Prozedur

Zeit [µs]	Kanal	Mitten-frequenz [MHz]	Übertragungsrichtung	Paketlänge		Pakettyp
				[Bit]	[µs]	
0		2448	Master Broadcast	166	166	
625		2464	Master Broadcast	166	166	
1250		2432	Master Broadcast	166	166	
1875		2403	Master Broadcast	166	166	
2500		2450	Master Broadcast	166	166	
3125		2466	Master Broadcast	166	166	
3750		2434	Master Broadcast	166	166	
4375		2405	Master Broadcast	166	166	
5000		2452	Master Broadcast	166	166	
5625		2468	Master Broadcast	166	166	
6250		2436	Master Broadcast	166	166	
6875		2407	Master Broadcast	166	166	
7500		2454	Master Broadcast	166	166	
8125		2470	Master Broadcast	166	166	
8750		2438	Master Broadcast	166	166	
9375		2409	Master Broadcast	166	166	

Jeder Train wird mindesten 256-mal wiederholt. Diese Wiederholung erfolgt viermal. Falls keine Verbindung zu Stande kommt wird die Inquire Prozedur einmal pro Minute wiederholt.

7.4.7 **WLAN Probe Request**

Ein WLAN Client ohne Verbindung zu einem WLAN Access Point versucht sich mit einem WLAN Access Point zu verbinden. Bei der aktiven Suche nach einem WLAN Access Point sendet er Probe-Request-Nachrichten. Das erfolgt für jeden bekannten Service Set Identifier (SSID) auf jedem möglichen WLAN Kanal. Die Bitrate für die WLAN Probe Request Nachrichten beträgt 6 Mbit/s mit der Modulationsart BPSK und einer Bandbreite von 20 MHz.

Für das Interferenzprofil WLAN Probe Request sollen dem WLAN Client 10 SSID bekannt sein und er soll die WLAN Kanäle 1 bis 13 verwenden. Dabei belegt die Probe Request Nachricht für eine Dauer von 274 µs das Medium, gefolgt von einer DIFS mit einer Länge von 28 µs.

Tabelle 7-16: Medienbelegung von WLAN Probe Request

Bezeichnung	Symbol	Medienbelegung in [µs]
Probe Request Nachricht	Ton	274
DIFS	Toff	28
Anzahl an Probe Request Nachrichten	N	10

7.4.8 **ISM-Anwendung Mikrowelle**

Informationen zur Spezifikation der Mediumbelegung durch eine relevante industrielle ISM-Anwendung konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht ermittelt werden.

7.5 Spezifikation von Testreihen

7.5.1 **Allgemeines**

Aufbauend auf den spezifizierten Interferenzprofilen bzw. mithilfe der spezifizierten Modelle können Testreihen durch Kombination der Interferenzprofile erstellt werden. Prinzipiell sollen Testreihen mit folgenden Bedingungen zur Verfügung stehen:

- unterschiedliche Anwendungskommunikationsanforderungen der Funkkommunikationssysteme (zeitliche Mediumsbelegung);
- Szenarien mit unterschiedlicher örtlicher Mediumsbelegung durch verschiedene Funkkommunikationssysteme (z. B. Szenarien in einer Fertigungshalle); Dämpfung variieren;
- unterschiedliche Funkkommunikationssysteme;
- Kombination unterschiedlicher Funkkommunikationssysteme mit anderen Funkanwendungen (ISM-Anwendungen);
- Dynamik der Funkkommunikationssysteme (Änderung der Medienbelegung);
- verschiedene temporäre Funkanwendung (ISM-Anwendungen);

7.5.2 **Testfallspezifikation**

7.5.2.1 Validierung der Ermittlung der Mediumsnutzung

Die Testreihe Mediumsnutzung beinhaltet die Vorgabe der Mediumnutzung entsprechend der Interferenzprofile nach Abschnitt 7.4.

7.5.2.2 Validierung des Funksystemmanagements

Für die Testreihe Funksystemmanagement konnten im Rahmen dieses Vorhabens lediglich die Schnittstellen implementiert werden. Die Spezifikation und Implementierung der Algorithmen für Funkkommunikationssysteme und deren Kenngrößenverläufe übersteigen die für diese Arbeitspaket vorgesehenen Aufwendungen.

7.5.2.3 Validierung des KoMe-System

Die Testreihen werden durch Überlagerung von Interferenzprofilen bzw. durch Änderung von Einflussgrößenwerte gebildet. Im Einzelnen sollen im KoMe-Projekt nachfolgend beschriebene Testreihen berücksichtigt werden.

Tabelle 7-17: Testgruppe Referenztest

Einflussgrößen	Wert
Anzahl der Funkgeräte	3
Abstand der Funkgeräte	100 m

Bewegung der Funkgeräte	1 m/s
Nutzdatenlänge	64 Oktett
Sendezeitabstand	250 ms, 16 ms

Tabelle 7-18: Testgruppe Bluetooth

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth (Abschnitt 7.4.2)
Abstand zu den Funkgeräten	1 m, 3 m, 10 m

Tabelle 7-19: Testgruppe WLAN

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	PROFINET IO Kommunikation mit WLAN (Abschnitt 7.4.3), Videoübertragung mit WLAN (Abschnitt 7.4.5), WLAN AP mit 64 Clients
Abstand zu den Funkgeräten	1 m, 3 m, 10 m

Tabelle 7-20: Testgruppe WISA

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA (Abschnitt 7.4.4)
Abstand zu den Funkgeräten	1 m, 3 m, 10 m

Tabelle 7-21: Testgruppe Kombinierte Interferenzen

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	WLAN AP mit 64 Clients und WISA (Abschnitt 7.4.4), WLAN AP mit 64 Clients und ISM Anwendung (Abschnitt 7.4.8)
Abstand zu den Funkgeräten	1 m, 3 m, 10 m

Tabelle 7-22: Testgruppe Temporäre Interferenzen

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	Bluetooth Paging (Kap. 7.4.6), WLAN Probe Request
Abstand zu den Funkgeräten	1 m

Tabelle 7-23: Testgruppe Übergangsverhalten des SUT

Einflussgrößen	Wert
Interferenzprofil	Anlauf, Wiederanlauf nach Störung
Abstand zu den Funkgeräten	1 m, 3 m, 10 m

7.6 Methoden zur Bewertung des Spektrum Sensings

7.6.1 **Detektionstheorie**

Grundlage dieses Kapitels sind die Ausführungen in [7-2]. Ein Hauptbestandteil der Detektionstheorie ist die Entscheidungstheorie. Alle Entscheidungsprobleme haben Basisparameter die in Tabelle 7-24 aufgeführt sind.

Tabelle 7-24: Basisparameter von Entscheidungsproblemen

Parameter	Erklärung
e_k	Informationen oder Indiz
h_i	Mögliche Zustände
H_i	Gewählter Zustand vom Entscheidungstreffenden

Wendet man diese Parameter auf ein Ja-Nein Vorgehen an, so sind die Informationen oder Indizien e_k das Signal s und das Rauschen n. Die möglichen Zustände h_i sind, das Signal S liegt an oder es herrscht ein Rauschen N vor. Zur Bewertung der Entscheidungen kann man zum Beispiel die Signal-Antwort Matrix heranziehen. Es liegt eine Information vor, zum Beispiel s. Es muss eine Entscheidung über den Zustand getroffen werden. Der Entscheidungstreffende wählt S oder N. Abbildung 7-21 stellt die vier möglichen Fälle dar, wobei die Einträge bedingte Wahrscheinlichkeiten sind. Zum Beispiel P(S|s) ist die Wahrscheinlichkeit, dass wenn das Signal s wahrgenommen wird, der Zustand S gewählt wird.

		Mögliche Zustände S	Mögliche Zustände N	
Mögliche Signale	s	P(S|s) Treffer *Richtig Positiv **TP***	P(N|s) Verfehlung *Falsch Negativ **FN***	P(S|s) + P(N|s) = 1
	n	P(S|n) Falscher Alarm *Falsch Positiv **FP***	P(N|n) Richtige Reaktion *Richtig Negativ **TN***	P(S|n) + P(N|n) = 1

Abbildung 7-21: Signal-Antwort Matrix eines Ja-Nein Vorgehens [7-2] mit Zuordnung der Entscheidungsszenarien

7.6.2 **Beispiel WISA**

Beim WISA ist das Band in 7 Unterbände je 11 Sprungfrequenzen aufgeteilt, daraus ergeben sich 77 Kanäle. Bei einer Sendedauer von 2048 µs und einem Betrachtungszeitraum von 220 ms ergibt sich eine Stichprobengröße von 8239. Wird ein Signal s 110 mal gesendet und der Entscheidungstreffende wählt S 89 mal (True Positive – TP = 89) und N 21 (Falsch Negativ - FN = 21), so ist die Wahrscheinlichkeit P(S|s) = 0,81 und P(N|s) = 0,19. Ein Rauschen n liegt 8129 mal vor. Der Entscheidungstreffende wählt S 8 (Falsch Positiv – FP = 8) mal und N 8121 mal (Richtig Negativ – TN = 8121), so ist die Wahrscheinlichkeit P(N|s) = 0,001 und P(N|n) = 0,999.

Daran ist auch zu sehen, dass je Spalte nur ein Wert frei wählbar ist, da die Zeilen als Summe immer 1 ergeben müssen. Der Freiheitsgrad der Matrix beträgt 2.

Außer den Wahrscheinlichkeiten können zur Bewertung noch Quoten festgelegt werden. Diese sind in der Arbeit [7-3] auf Grundlage von [7-2] zusammengefasst worden und in Tabelle 7-25 dargestellt.

Tabelle 7-25: Bewertungsmaße für Detektoren [7-3]

Größe der Teststichprobe	Nsample	=	TP + FP + FN + TN
Erkennungsquote	EQ	=	$\frac{TP + TN}{N_{sample}} = 1 - FQ$
Fehlerquote	FQ	=	$\frac{FP + FN}{N_{sample}} = 1 - EQ$

Sensitivität	SEN	=	$\frac{TP}{TP+FN} = 1 - FRQ$	P(S|s)
Spezifität	SEZ	=	$\frac{TN}{FP+TN} = 1 - FAQ$	P(N|n)
Relevanz	REL	=	$\frac{TP}{TP+FP}$	
Fehleralarmquote	FAQ	=	$\frac{FP}{FP+TN} = 1 - SEZ$	P(S|n)
Fehldetektionquote	FDQ	=	$\frac{FP}{FP+TP}$	
Segreganz	SEG	=	$\frac{TN}{TN+FN}$	
Fehlrückweisungsquote	FRQ	=	$\frac{FN}{TP+FN} = 1 - SEN$	P(N|s)

Um die Leistung des Detektors bezüglich der richtigen Erkennung zu bewerten, eignet sich die Erkennungsquote:

$$EQ = \frac{TP + TN}{N_{sample}} \tag{7-10}$$

Diese Quote lässt eine Einstufung je nach Anforderung zu. Wird die Quote zum Beispiel auf das Beispiel WISA angewendet so ergibt sich ein Wert von $EQ = \frac{89+8121}{8239} = 0{,}9965$. Des Weiteren kann eine Auswertung mithilfe der Fehlrückweisungsquote bzw. der Sensitivität vorgenommen werden. Die Fehlrückweisungsquote am Beispiel WISA ist:

$$FRQ = \frac{21}{89 + 21} = 0{,}19 \tag{7-11}$$

Je nach Anforderungen sind weitere Quoten in die Bewertung einzubeziehen.

8 CCP Kommunikation

8.1 Allgemeines

Das KoMe- System ist eine Implementierungsvariante des Koexistenzmanagements von Funkkommunikationslösungen mit zentraler Koordination. Diese Koexistenzmanagementkonzept wird nach der Schlüsselkomponente, dem Central Coordination Point (CCP), auch als CCP- Konzept bezeichnet. In Abbildung 8-1 ist ein exemplarischer Anwendungsfall für ein CCP- Konzept dargestellt. Die Abbildung zeigt verschiedene Funkkommunikationssysteme, die durch einen CCP verwaltet werden. Der CCP greift auf eine Datenbasis zu und nutzt zusätzlich Messwerte von Spectrum Sensing Nodes sowie Informationen der Funkkommunikationssysteme. Deshalb ist neben den in den Abschnitten 5 und 6 beschriebenen Verfahren zur Analyse der Spektrumbelegung und zum automatischen Koexistenzmanagement auch der Datenaustausch zwischen allen involvierten Geräten von entscheidender Bedeutung.

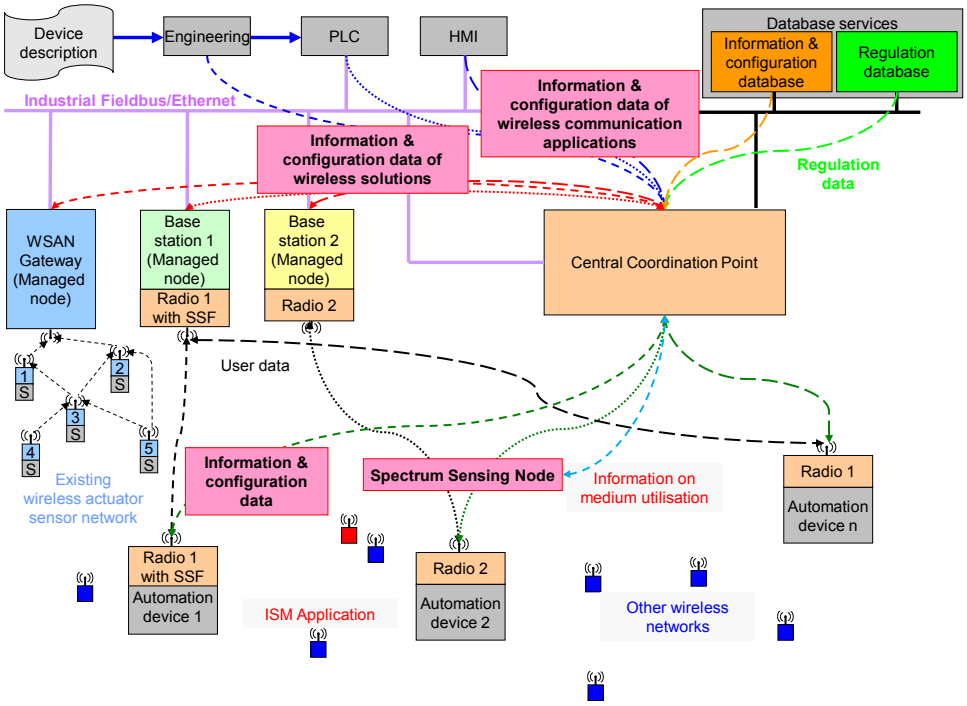

Abbildung 8-1: Beispiel für die Anwendung des CCP- Konzeptes

Im Forschungsvorhaben KoMe wurde der grundsätzliche Kommunikationsbedarf des CCP-Konzeptes ermittelt und Implementierungsvarianten untersucht. Die Standardisierung dieser Dienste und deren Parameter ist entscheidend für den Erfolg des CCP- Konzeptes. Schließlich sollen die Dienste von verschiedensten Herstellern von Funkautomatisierungsgeräten, Infrastrukturkomponenten, Spectrum Sensing Nodes, Funkinfrastrukturgeräten usw. implementiert werden. Deshalb wurde der grundsätzliche Kommunikationsbedarf (CCP- Dienste) als deutscher Beitrag für die Normung in der IEC 62657-4 [8-1] eingebracht und dort berücksichtigt. Die Normung ist noch nicht abgeschlossen.

8.2 CCP- Architektur

In Abbildung 8-1 lassen sich folgende Elemente erkennen, die ein CCP- Managementsystem bilden:

- Central Coordination Point;
- Data base;
- Spectrum sensing node;
- Wireless communication system and device;

- Application engineering.

Jedes dieser Elemente bietet Dienste an, die für das Koexistenzmanagement erforderlichen sind. Bei den Funkkommunikationssystemen und -geräten wird unterschieden ob sie vom CCP gesteuert (CCP managed) werden können oder nicht. In Abbildung 8-2 wird auf der linken Seite lediglich die Basisstation eines Funkkommunikationssystems gesteuert. In dieser Basisstation kann auch eine Spectrum Sensing Function (SSF) implementiert sein. Selbst wenn die Basisstation keine CCP- Dienste anbietet, können ggf. Parameter aus ihr gelesen und beim Koexistenzmanagement berücksichtigt werden. Funkkommunikationsgeräte die direkt vom CCP gesteuert werden können bieten entsprechende Dienste an, die vom CCP direkt erreichbar sind oder über andere Funkkommunikationsgeräte weitergeleitet werden. Auch Funkkommunikationsgeräte können über Spectrum Sensing Function (SSF) wie in Abschnitt 6 beschrieben verfügen.

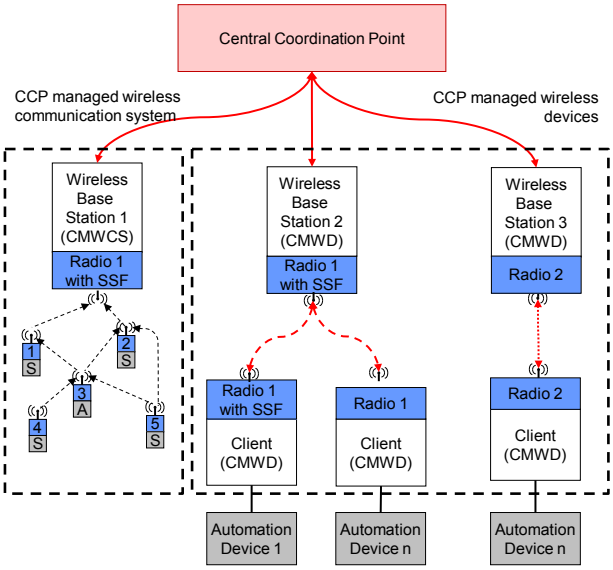

Abbildung 8-2: CCP gesteuerte Funkkommunikationssysteme und -geräte

CCP-gesteuerte Funkkommunikationsgeräte implementieren Funktionen und Schnittstellen entsprechend Abbildung 8-3. Hier sind auch die Schnittstellen zu den einzelnen Kommunikationsschichten dargestellt. Das CCP- Interface eines CCP-gesteuerte Funkkommunikationsgerätes bietet Dienste über einen Management Service Access Point (M-SAP) und einen Control Service Access Point (C-SAP) an.

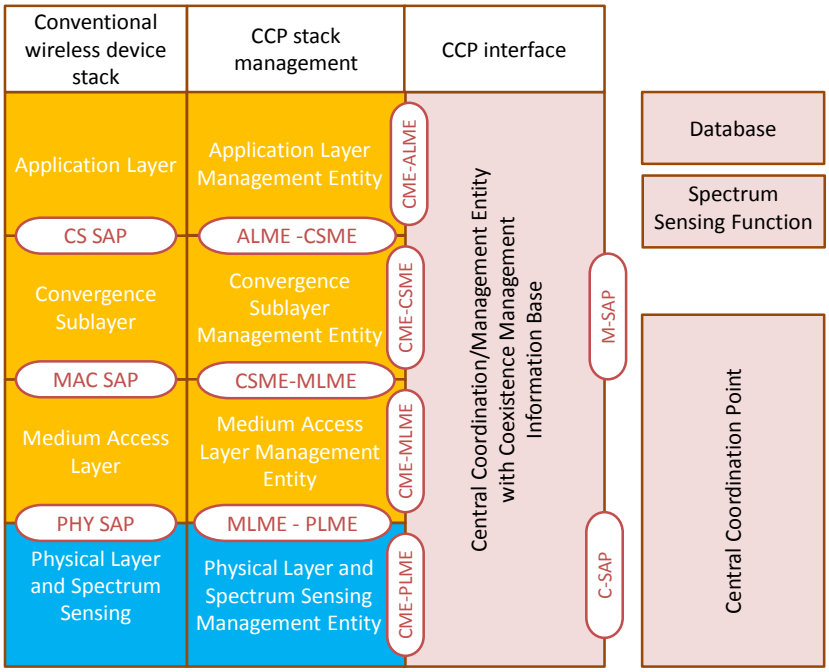

Abbildung 8-3: Protokollreferenzmodell für CCP-gesteuerte Funkkommunikationsgeräte

Central Coordination Point

Der CCP verwaltet Funksysteme und -geräte. Demzufolge muss er Dienste anbieten, mit denen Funksysteme und Funkgeräte angemeldet und abgemeldet werden können. Der gewählte Dienst richtet sich danach ob er von einem einzelnen Funkgerät (SubscribeDevice, UnsubscribeDevice) oder von einem Funksystem (SubscribeSystem, UnsubscribeSystem) genutzt wird. Sollte keine Datenbank mit Informationen über die Anwendungsbedingungen zur Verfügung stehen, bietet der CCP den Dienst SetGeneralPlantCharacteristic an, um entsprechende Informationen übergeben zu können.

Data base

Die Datenbank beinhaltet in erster Linie Informationen über lokale, regionale oder globale Regulierungen des Frequenzspektrums, die beim Koexistenzmanagement zu beachten sind. Dafür wird der Dienst GetRadioRegulation angeboten. Künftig könnten auch weitere Informationen über die Funkanwendungen und deren Merkmale in der Datenbank abgelegt sein.

Spectrum sensing node

Jedes Gerät, das Spectrum Sensing Functions implementiert hat, bietet dem CCP Dienste zur Konfiguration des Spectrum Sensing (SetMediumSensingReport) und zum Lesen der ermittelten Spektruminformation (GetMediumSensingResults) an.

Wireless communication system and device

Funkgeräte bieten CCP- Dienste an. Bei Infrastrukturgeräten wie Basisstationen sind die Dienste der Zugang für das gesamte Funkkommunikationssystem. Um die Mediumbelegung eines Funksystems oder eines Funkgerätes zu ermitteln kann der CCP den Dienste GetMediumResourceReport nutzen. Es können aber auch Bedingungen konfiguriert werden (SetMediumResourceReport) unter denen die Mediumnutzung an den CCP automatisch übertragen werden (GetMediumResource).

Der CCP kann mit den Diensten GetDeviceAttribute und SetDeviceAttribute relevante Parameter aus Funkgeräten lesen und in diesen konfigurieren. Für die direkte Steuerung der Mediumnutzung werden folgende Dienste vorgesehen:

- SetTransmitPower
- SetFrequencyChannel

- SetBandwidth
- SetFrequencyHoppingSequence
- SetBlackListedFrequencyRange
- SetDwellTime
- SetMediumAccessControlMechanism

Mit dem Dienst SetDeviceStatus kann die Kommunikation des Funkgerätes eingeschaltet und ausgeschaltet werden.

Application Engineering

Entsprechend der Definition der Koexistenz von Funkkommunikationssystemen der industriellen Automation kommt der Anwendung eine entscheidende Bedeutung zu (siehe [8-2]). Demzufolge sollte das Engineering der Automatisierungsanwendung Informationen und Dienste zu Anwendungsbedingungen (GetGeneralPlantCharacteristic) und Anwendungsanforderungen (GetApplicationCommunicationRequirements) bereitstellen.

8.3 Analyse von IT Kommunikationskonzepten

Für die Implementierung der definierten CCP- Dienste gibt es verschiedene Möglichkeiten, die hier diskutiert werden sollen. Wertet man das Koexistenzmanagement als Netzwerkmanagement so kommen Konzepte wie Simple Network Management Protokoll oder NETCONF und YANG infrage. Stellt man allerdings den Bezug zur Anwendung in den Vordergrund, bietet sich, insbesondere in Anbetracht der mit Industrie 4.0 ansteigenden Flexibilität der Kommunikation, OPC UA an. Folgende Betrachtungen sind Ergebnisse aus [8-3].

Message Queue Telemetry Transport

Das Message Queue Telemetry Transport (MQTT) Protokoll wurde 1999 von Dr. Andy Stanford-Clark und Arlen Nipper entwickelt. Es wird mittlerweile von der Organization for the Advancement of Structured Information (OASIS) standardisiert.

MQTT ist ein Kommunikationsprotokoll, dass für die Anwendungsbereiche *Machine to Machine* (M2M) und *Internet of Things* (IoT) entwickelt wurde. Das Design dieses Protokolls soll den Nachrichtentransport zwischen örtlich verteilten Geräten mit geringer Speicherkapazität (z. B. 8-bit, 256KB ram controller), geringen Energiebedarf, geringer Kommunikationsbandbreite, teuren Verbindungen, geringen Zeitanforderungen, variabler Verfügbarkeit und ausgehandelten Empfangsgarantien unterstützen. Zum Beispiel wird MQTT benutzt für Sensoren, die zu einem Broker per Satellit kommunizieren, SCADA, für gelegentlich auftauchende dialup Verbindungen mit Gesundheitsanbietern (medizinische Geräte) und für verschiedene Szenarien in den Bereichen Gebäudeautomatisierung. Es eignet sich auch für mobile Anwendungen [8-4].

Ein Vorteil von MQTT ist, dass es aus dem IoT Bereich kommt und entsprechen verbreitet ist. Es kann auch auf Geräten laufen, auf denen keine Netzwerkmanagement Software wie z. B. SNMP läuft. In [8-5] wurde untersucht, wie solche Geräte in das Netzwerkmanagement mit SNMP integriert werden können. Wenn allerdings alle Geräte des CCP- Systems eine Lösung aus dem Netzwerkmanagement unterstützen, wie z. B. SNMP oder NETCONF/YANG, gibt es keinen Grund Lösungen ohne Bezug zu Netzwerkmanagement wie MQTT zu nutzen.

NETCONF und YANG

Mit der Definition des Network Configuration Protocol (NETCONF) sollten Erfahrungen mit älter Lösungen genutzt und deren Nachteile überwunden werden. Ziel war einen einfachen Mechanismus mit einen Client- (Netzwerkmanagement-Anwendung) Server- (Operationen auf Geräten) Konzept zu realisieren. Die NETCONF Spezifikation [RFC6241] definiert einen kleinen Satz von Operationen, vermeidet aber in diesen Operationen Anforderungen an die zu übertragenden Daten zu stellen. Dieser Datenmodell agnostische Ansatz erlaubt es, dass Datenmodelle unabhängig definiert werden können [8-6].

Um Datenmodelle für NETCONF definieren zu können eine Spezifikation für YANG [RFC6020] erstellt. Diese erlaubt es proprietäre und Standard- Datenmodelle, in einer für den Menschen leicht lesbaren Form, zu veröffentlichen. YANG erlaubt dem Modellierer ein Datenmodell zu erstellen, die Organisation der Daten in diesem Modell zu definieren und Beschränkungen für dieser Daten zu definieren [8-6].

[RFC 6244] gibt einen Überblick über die Verwendung von NETCONF und YANG zum Netzwerkmanagement.

NETCONF/YANG scheint für die CCP- Kommunikation geeignet zu sein. Entsprechend der bereitzustellenden Dienste wird auf den Geräten des CCP- Systems ein NETCONF-Server bzw. ein NETCONF-Client implementiert. Es muss ein YANG-Modul erstellt werden, welches die für das Koexistenzmanagement relevanten Daten beschreibt. Dabei sind die Festlegungen der IEC 62657-2 zu berücksichtigen. Das YANG-Modul wird von jedem Server geladen, wodurch die Daten zur Verfügung gestellt werden.

OPC Unified Architecture

OPC Unified Architecture (UA) ist ein Standard (IEC 62541) für offenen und nahtlosen Austausch von Daten mit definierter Semantik [8-7]. Es ist eine Sprache für die horizontale und vertikale Integration von Systemen unterschiedlicher Hersteller, welche dadurch in die Lage versetzt werden durchgängig und ohne Datenverluste zu interagieren, Daten effizient auszutauschen und gleichzeitig allen Kommunikationspartnern ein einheitliches Verständnis der ausgetauschten Informationen ermöglicht (Interoperabilität) [8-7].

OPC UA ist dabei mehr als ein Kommunikationsstandard, wie schon der Begriff *architecture* im Namen ausdrückt. Insbesondere bietet es eine mächtige Beschreibungssprache für beliebige Informationsmodelle – die Basis für die semantische Interoperabilität. Dadurch ist es möglich, eine Variable in einen spezifischen semantischen Kontext einzubetten, der neben einem Bezeichner und einem Datentyp vor allem aus der Objektorientierung gewonnen wird. Weitere Eigenschaften von OPC UA sind die eingebauten Sicherheitsmerkmale, die vom Anwender skalierbar gewählt werden können, und schließlich die Verfügbarkeit kostengünstiger Entwickler-Kits zur Realisierung eigener OPC UA-fähiger Geräte. Die geringen Anforderungen an Speicher und Prozessor erlauben es, OPC UA auch auf kleinen Endgeräten wie Sensoren zu implementieren [8-7].

OPC UA hat viele Merkmale und Funktionalitäten wie z. B. Security, Objekte im Adressraum mit Variablen, Events oder Beziehungen zwischen den Objekten. Es ist dadurch allerdings auch relativ kompliziert und umfangreich. Außerdem kommt es nicht aus der Domäne des Netzwerkmanagements wie z. B. NETCONF/YANG und SNMP. Dennoch sind weitere Untersuchungen in dieser Richtung lohnenswert.

REST

REST ist ein Konzept und nicht standardisiert. Die REST Architektur ist in [8-8] beschrieben. REST wird als Architektur Stil beschrieben, der Latenzzeit und Netzwerkkommunikation minimieren und zur gleichen Zeit die Unabhängigkeit und Skalierbarkeit von Komponenten-Implementierungen maximieren [8-9] kann.

Die REST Architektur wird mit HTTP kombiniert, obwohl sie nicht an HTTP gebunden ist. Die Kombination wird oft als RESTful HTTP bezeichnet [8-9]. Es sollen Fähigkeiten des Web genutzt werden ohne das REST neue Technologien, Komponenten oder Dienste einführt. Allerdings definiert RESTful HTTP Prinzipien und Beschränkungen um existierende WEB-Standards besser zu benutzen [8-9].

HTTP ist weit verbreitet, ein HTTP-Server auf den meisten Netzwerkgeräten bereits installiert. Die CCP-Dienste können im Server implementiert werden und stehen dann für Anfragen zur Verfügung. Nachteilig ist, dass für HTTP mehr Bandbreite benötigt wird als für SNMP oder NETCONF. Auch gibt es noch nicht so viele Werkzeuge zur Implementierung. Ein Vorteil ist, dass HTTP für den Menschen einfacher zu benutzen ist als SNMP.

Simple Network Management Protocol

Das Simple Network Management Protocol (SNMP) ist in der Version 3 (SNMPv3) in [RFC 3410] bis [RFC 3418] und in [RFC 2576] definiert [20]. SNMP ist ein Netzwerkprotokoll mit dem Management- Informationen eines Netzwerkelementes von logisch entfernten Nutzern inspiziert und modifiziert werden können. SNMP-fähige Hardware können Router, Switches und Server sein. Auch Drucker, Umgebungssensoren (Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc.) und viele andere Geräte können mittels SNMP abgefragt und gesteuert werden [8-10].

Voraussetzung für die Verwendung von SNMP ist, dass das Gerät über eine Netzwerkverbindung (Ethernet, TCP/IP) erreichbar ist und über einen SNMP-Server verfügt. Mit SNMP können von einem Client Daten in einen Server geschrieben und aus diesem gelesen werden.

Eine Schwachstelle des SNMP ist die IT-Sicherheit, die allerdings mit der Version 3 verbessert wurde. Version 3 ist dafür aber schwieriger zu benutzten. Der Implementierungsaufwand für die Konfiguration von Geräte ist hoch. Deshalb wird SNMP in der Praxis meist für Überwachungsaufgaben aber nicht zur Konfiguration eingesetzt. Dieser Nachteil wurde bei der Spezifikation von Netconf/Yang beseitigt.

SNMP ist prinzipiell für die Implementierung von CCP- Diensten geeignet. Vorteilhaft ist, dass viele Netzwerkgeräte SNMP unterstützen und damit die Installation eines SNMP-Servers nicht nötig ist.

8.4 Implementierung der CCP- Kommunikation

Für die Konzepte NETCONF/YANG, SNMP und REST wurden Spezifikationen für die Implementierung von CCP- Diensten erarbeitet und exemplarisch umgesetzt.

Es wurde festgestellt, dass NETCONF/YANG konzeptionell am besten geeignet ist, aber die frei verfügbaren Implementierungen noch nicht den Entwicklungsstand für eine schnelle Realisierung haben. SNMP ist konzeptionell schlechter geeignet als NETCONF/YANG bietet aber mit Net-SNMP eine schon lange stabil funktionierende Implementierung. Mit REST kann schnell eine Realisierung für die CCP- Kommunikation realisiert werden, da es auf HTTP basiert und Implementierungen verfügbar sind. Es stehen Framework zur Verfügung mit denen man für REST-Implementierung Benutzerschnittstellen einfach in einem Webbrowser darstellen kann.

9 Systemvalidierung

9.1 Architektur der Validierungsplattform

Das Blockdiagramm in Abbildung 9-1 zeigt die Architektur der Validierungsplattform. Deren Herzstück bildet eine zentrale Verarbeitungseinheit (test control) von der alle Konfigurations- und Steuerinformationen sowie die erfassten Messgrößen verarbeitet und entsprechende Kenngrößenwerte generiert werden. Die Verarbeitungseinheit wird über eine Nutzerschnittstelle (User interface) konfiguriert und gesteuert. Über diese Nutzerschnittstelle kann zudem der Status des Tests erfasst werden. Die zentrale Verarbeitungseinheit realisiert die Testprojektverwaltung, die Dokumentation der Testvorbereitung, die Erstellung und Dokumentation von Testfällen sowie die Verwaltung der Messergebnisse. Die Erstellung von Dokumenten zur Analyse der Testergebnisse und Testdokumentation werden unterstützt. Die Verarbeitungseinheit konfiguriert und steuert die Test- und Messausrüstung (Test and measurement equipment), den Funkkanalemulator (Radio channel emulator), die Funktestausrüstung (Wireless test equipment) und soweit möglich das zu untersuchende System (System under test).

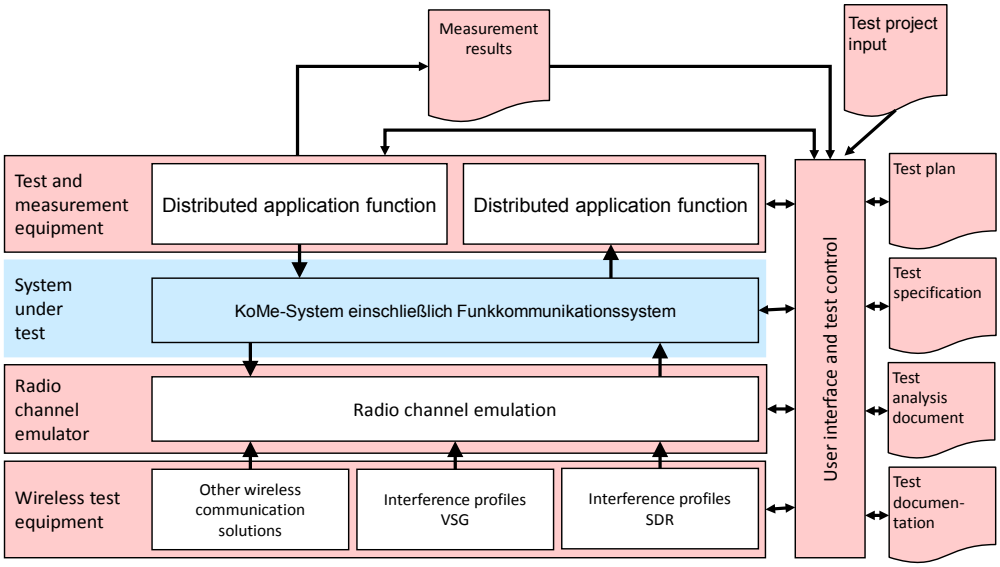

Abbildung 9-1: Konzeptmodell der Validierungsplattform

Auf Grundlage der Eingaben (Testfälle) werden die anwendungsbezogene Mediumnutzung und passive Umgebungseinflüsse durch die Validierungsplattform emuliert. Während der Testphase werden Kenngrößenwerte zur KoMe-Mediumnutzung, des KoMe-Systems bzw. des KoMe-Funkkommunikationssystems kontinuierlich erfasst und so gespeichert, dass eine zeitliche Zuordnung zwischen diesen Daten möglich ist. Zusätzlich werden die Konfigurationen der Funkkommunikationssysteme und der KoMe-Funkgeräte eingelesen. Aus den erfassten Kenngrößenwerten und Konfigurationsdaten können Koexistenzkenngrößenwerte ermittelt, gespeichert und ausgegeben werden. Im Nachgang der Tests erfolgt die Analyse und Dokumentation der Validierungsergebnisse.

Die einzelnen Implementierungen werden nachfolgend vorgestellt.

9.2 Implementierungen für die KoMe-Validierungsplattform

9.2.1 Verarbeitungseinheit und Nutzerschnittstelle

Verarbeitungseinheit und Nutzerschnittstelle basieren auf einer vom ifak entwickelten Rahmensoftware zur Netzwerkanalyse. Mit speziell für den Test von Funkkommunikationssystemen entwickelte Modulen sowie KoMe-spezifische Erweiterungen wurde die Software zum zentralen Element der KoMe-Validierungsplattform ausgebaut.

Zu den Modulen für den Test von Funkkommunikationssystemen gehören:

- die Steuerung der Geräte zur Emulation des Datenverkehrs;
- die Übernahme der Kenngrößenwerte;
- die Konfiguration des Funkkanalemulators und
- die funkspezifische Testdokumentation.

Zu den KoMe-spezifische Erweiterungen gehören:

- die Konfiguration des Vectorsignalgenerators;
- die Konfiguration des Spektrumanalysators;
- der Datenaustausch mit einer Software Defined Radio Plattform
- das Lesen der MIB der Funkkommunikationsgeräte und
- die Konfiguration der Funkkommunikationsgeräte.

Abbildung 9-2 zeigt die Nutzerschnittstelle zum Erstellen der Testspezifikation. Im Project Explorer (Dokumentbaum links) werden die erforderlichen Dokumente zusammengetragen. Auf der rechten Seite erscheinen kontextsensitiv Karteikarten für die Konfiguration. So können Testparameter festgelegt und alle im Test verwendeten Geräte entsprechend einem Testfall konfiguriert werden. Die Nutzersschnittstelle bietet die Möglichkeit Testfälle automatisch durchzuführen. D.h. es können mehrere Konfigurationen (Testfälle) in Testgruppen gespeichert werden. Damit können zu einem Zeitpunkt mehrere Testfälle gestartet werden, deren Abarbeitung dann automatisch nacheinander erfolgt.

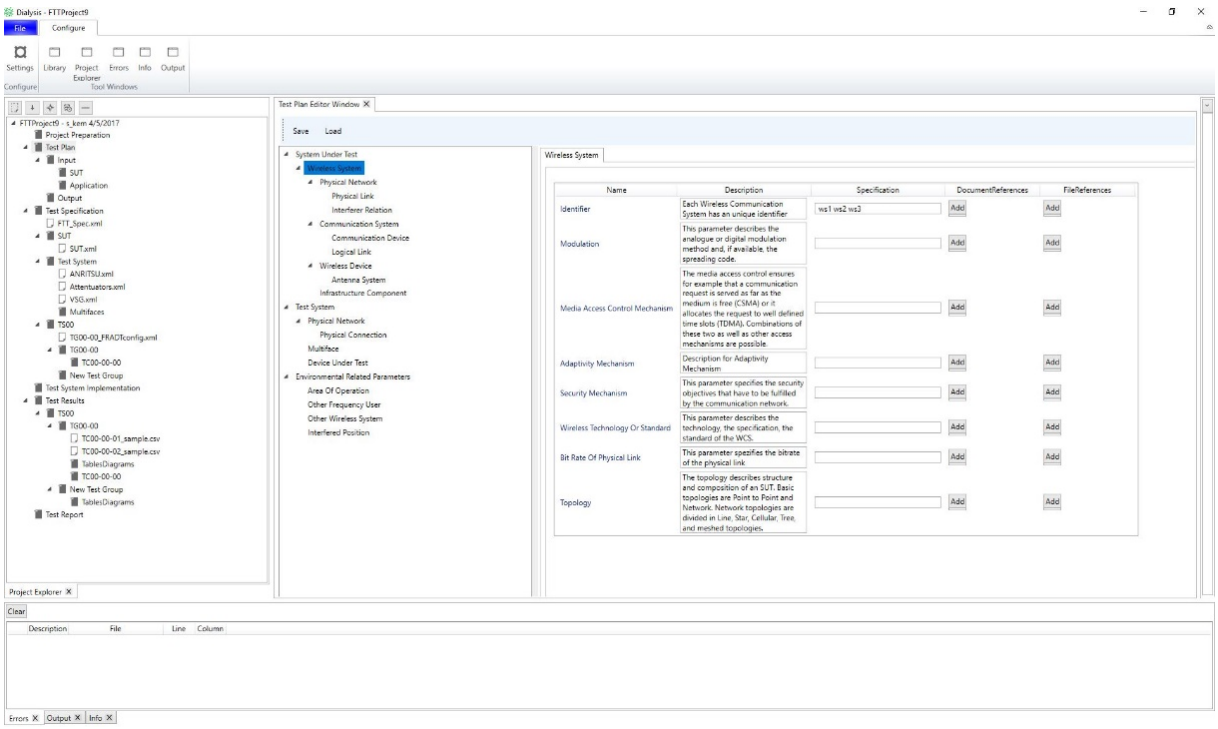

Abbildung 9-2: Nutzerschnittstelle - Testvorbereitung

Abbildung 9-3 zeigt die Nutzerschnittstelle während eines Tests. Die Liste auf der rechten Seite enthält die zur Ausführung vorbereiteten Testfälle. Die Grafiken in der Mitte veranschaulichen den Ablauf des laufenden Testfalls. Den Verlauf einer Kenngrößen eines ausgewählten logischen Links zeigt das obere Bild. In diesem Fall ist es der zeitliche Verlauf der Übertragungszeit. Unten links ist ein Spektrogramm dargestellt, das die Belegung des Frequenzspektrums entsprechend dem konfigurierten Interferenzprofils zeigt. Unten rechts sieht man das Echtzeitspektrum, das mithilfe der Software Defined Radio Plattform ermittelt oder aus dem Spektrumanalysator gelesen wird.

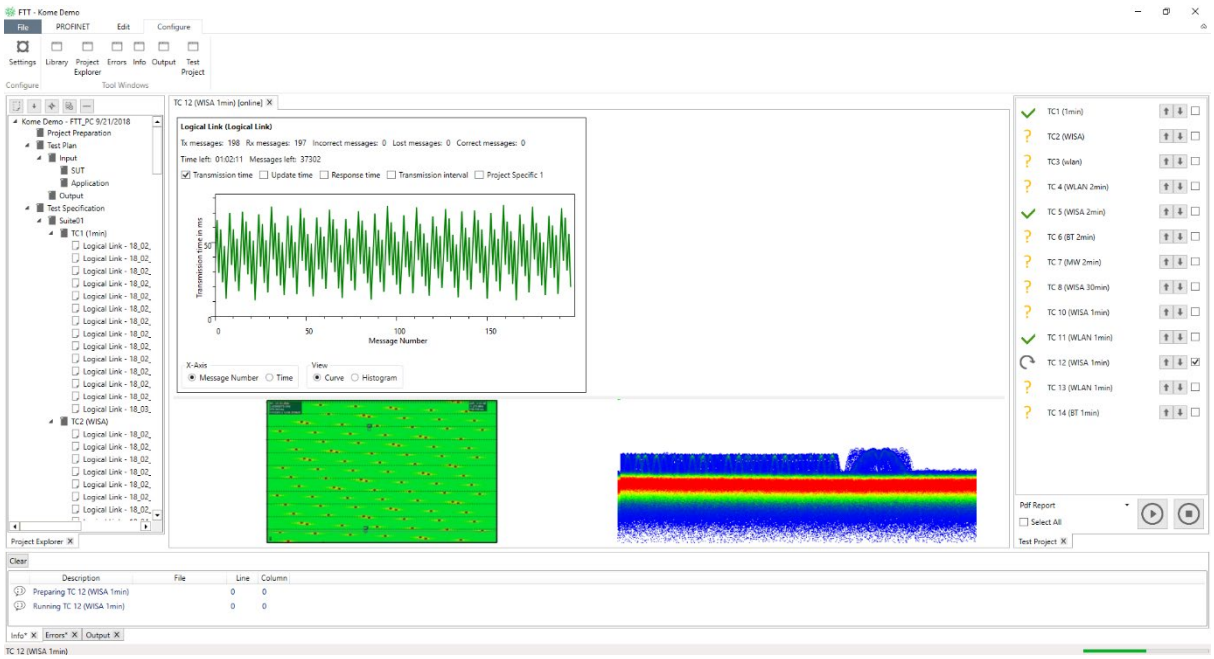

Abbildung 9-3: Nutzerschnittstelle - Testdurchführung

9.2.2 **Multiface**

Das Multiface (siehe Abbildung 9-4) ist eine Hardware zur Generierung von definiertem Testdatenverkehr und zur Ermittlung von Kenngrößen des zu testenden Funkkommunikationssystems gemäß VDI/VDE-Richtlinie 2185. Das Multiface bietet verschiedene Referenzschnittstellen an so dass Funkgeräte mit unterschiedlichen Schnittstellen angeschlossen werden können. Multifaces können über Ethernet mit einem PC verbunden werden. So können die Konfigurationen vom PC auf Multifaces und die Messergebnisse umgekehrt übertragen werden. Das Multiface ist in verschiedenen Versionen verfügbar.

Abbildung 9-4: Multiface 2

9.2.3 **Abschirmboxen**

Zur Abschirmung der zu testenden Funkgeräte (DUT) stehen Abschirmboxen mit unterschiedlichen Abmessungen zur Verfügung. Die Abschirmboxen haben eine Dämpfung von großer 90 dB im Frequenzbereich von 400 MHz bis 6000 MHz. Die Abschirmbox RPE-402 (Abbildung 9-5) verfügt über zwei Ethernet-Durchführungen, eine Durchführung für serielle Daten, eine Durchführung für die Spannungsversorgung und vier SMA-Durchführungen. Die Abschirmbox RPE-401L (Abbildung 9-6) verfügt über zwei Ethernet-Durchführungen, eine Durchführung für serielle Daten, eine Durchführung für die Spannungsversorgung, eine Spannungsversorgung von 230 V und acht SMA-Durchführungen. Die RF Shield Box (Abbildung 9-7) verfügt über vier SMA-Durchführung, eine USB-Durchführung, ein M12 X-kodierter 8-poliger Steckverbinder und ein 4-poliger Steckverbinder für die Spannungsversorgung des DUT.

Abbildung 9-5: RPE-402 Two standard chamber

Abbildung 9-6: RPE-401L Single large chamber

Abbildung 9-7: RF Shield Box

9.2.4 **Kanalemulator**

Mithilfe des in Abbildung 9-8 dargestellten Kanalemulators QPER wird das Funkkanalverhalten durch variable Dämpfungs- und Phasenwerte emuliert. Der Frequenzbereich des QPER geht von 400 MHz bis 6000 MHz. Die maximal eingekoppelte Sendeleistung pro Port beträgt 23 dBm.

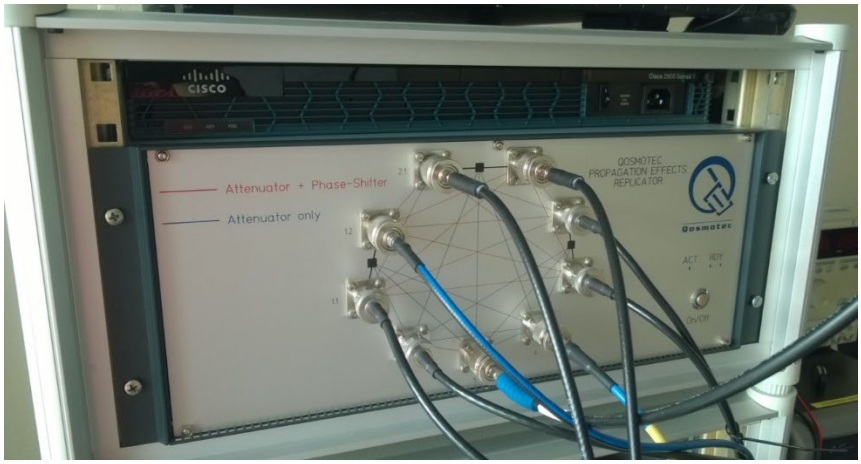

Abbildung 9-8: Qosmotec Propagation Effect Replicator (QPER)

Der QPER verfügt über insgesamt 9 Ports. Die Port 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 und 3.2 sind für 2x2 MIMO Funksysteme und die Ports 4, 5 und 6 sind für Funksysteme mit einer Antenne vorgesehen. Somit können mithilfe des QPER drei Funkgeräte mit zwei Antennenanschlüssen und drei Funkgeräte mit einem Antennenanschluss verbunden werden. Innerhalb des QPER sind die einzelnen Ports über Leistungsteiler, Phasenschieber und Dämpfungsglieder miteinander verbunden. Die Verbindung der einzelnen Ports ist in Abbildung 9-9 schematisch dargestellt.

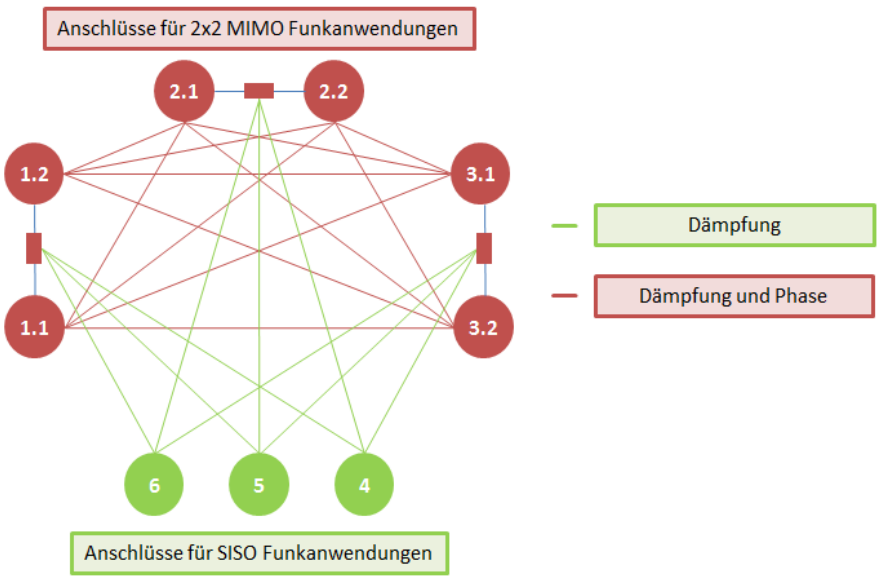

Abbildung 9-9: Anschlüsse und Verbindungen des QPER

Die Steuerung und Konfiguration der Dämpfungs- und Phasenwerte zwischen den einzelnen Ports erfolgt durch die Software "Air Interface Simulator (AiS)". Dafür stehen bei AiS zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann ein sogenanntes "Table File" (Datei im Format .csv) mit den Dämpfungs- und Phasenwerten erstellt werden. Mit Hilfe des "Table File" werden Dämpfungs- und Phasenwerte zu definierten Zeitpunkten mit einer Auflösung von 1 ms festgelegt. Wird das "Table File" im Softwareinterface geladen und gestartet, so stellt der QPER zwischen den jeweiligen Ports die in der Tabelle eingetragenen Dämpfungs- und Phasenwerte zu den festgelegten Zeitpunkten ein. Zum anderen stellt die AiS Software eine grafische Bedienoberfläche (GUI) zur Verfügung ("Scenery View"). Mithilfe der GUI können die Funkgeräte per Drag-and-Drop auf der Weltkarte oder einem Hallengrundriss platzieren und an Bewegungsprofile angebunden werden.

Den verwendeten Funkgeräten können zudem Antennen zugeordnet werden, deren Richtcharakteristik in Form von Tabellen beschrieben werden. Dazu wird in horizontaler und vertikaler Ausrichtung der Antennengewinn in Schrittweiten von 1° angegeben. Zudem können die Antennen horizontal und vertikal geneigt und in der Höhe verändert werden.

Für das KoMe-Projekt wurde die Ansteuerung des Kanalemulators von der Nutzerschnittstelle über die Verarbeitungseinheit implementiert und der Kanalemulator damit in die KoMe- Validierungsplattform integriert.

9.2.5 **Echtzeitspektrumanalysator**

Die KoMe-Mediumnutzung wird mithilfe des Echtzeitspektrumanalysators RS6114A (RSA) von Tektronix erfasst. Der RSA bietet mehrere Möglichkeiten zur Darstellung von Hochfrequenzsignalen. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere Spektrogramme verwendet. Bei den Spektrogrammen sind die Signale im Frequenz- und Zeitbereich dargestellt. Die Signalstärke erkennt man anhand unterschiedlicher Farben. Die Echtzeitbandbreite des RSA beträgt 110 MHz.

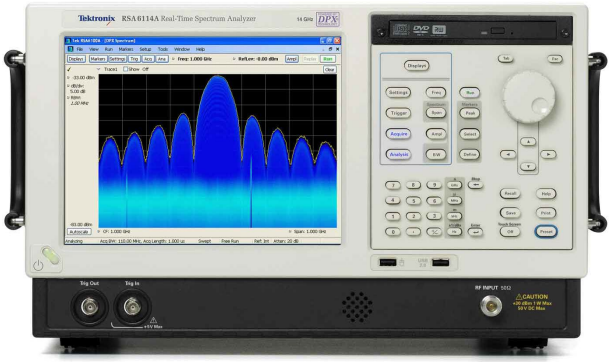

Abbildung 9-10: Echtzeitspektrumanalysator RSA6114A

Des Weiteren können die Signale als DPX Spektren dargestellt werden (wie in Abbildung 9-10). Hierbei wird die Häufigkeit der aufgetretenen Messpunkte innerhalb eines definierten Zeitintervalls farblich dargestellt.

Der RSA verfügt über eine Ethernet-Schnittstelle. Darüber lässt sich der RSA in das IP-basierte Netzwerk integrieren und Fernsteuern. Das Übertragungsprotokoll zur Fernsteuerung des RSA basiert auf dem VXI-11 Standard. Als Fernsteuerungskommandos verwendet der RSA SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) Befehle.

Für das KoMe-Projekt wurde die Ansteuerung des Echtzeitspektrumanalysators von der Nutzerschnittstelle über die Verarbeitungseinheit implementiert und der Kanalemulator damit in die KoMe- Validierungsplattform integriert.

9.2.6 **Vektorsignalgenerator**

Der in Abbildung 9-11 dargestellte Vektor Signalgenerator SMJ100A wird zur Generierung von Interferenzprofilen verwendet. Dazu können im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz digital modulierte Signale mit einem Signalpegel von bis zu 20 dBm und einer Signalbandbreite bis 80 MHz erzeugt werden.

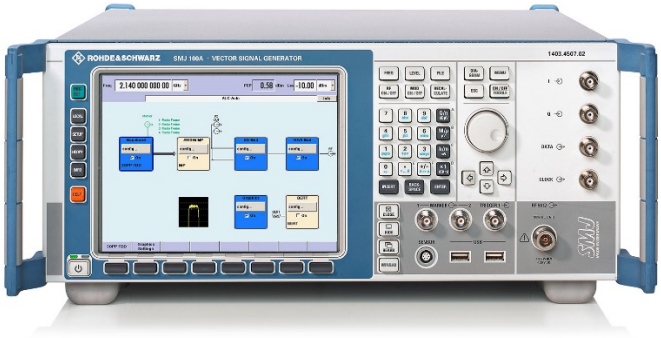

Abbildung 9-11: Vektorsignalgenerator SMJ100A

Für das KoMe-Projekt wurde die Ansteuerung des Vektorsignalgenerators von der Nutzerschnittstelle über die Verarbeitungseinheit implementiert und der Kanalemulator damit in die KoMe- Validierungsplattform integriert.

9.2.7 **Software Defined Radio Plattform**

Für die Generierung von Spektrumnutzungen entsprechend spezifizierter Testfälle bzw. für die Spektrumanalyse steht die Software Defined Radio (SDR) Plattform Universal Software Radio Peripheral (USRP) X310 mit zwei UBX-160 Erweiterungskarten zur Verfügung (siehe Abbildung 9-12). Auf dem USRP X310 befinden sich Analog-Digital- bzw. Digital-Analog-Wandler, zusammen mit einem FPGA. Es stehen Schnittstellen für Erweiterungskarten und zu einem Host (z.B. PC) zur Verfügung, auf denen die Signalverarbeitung vorgenommen wird.

Abbildung 9-12: SDR Plattform Universal Software Radio Peripheral (USRP) X310

Im KoMe-Projekt wurde die Nutzung der SDR Plattform für die Implementierung von Interferenzprofilen untersucht. Außerdem wurde die Ansteuerung von der Nutzerschnittstelle über die Verarbeitungseinheit implementiert und damit die Integration in die KoMe- Validierungsplattform realisiert.

9.2.8 **Implementierung der Interferenzprofile**

9.2.8.1 Vektorsignalgenerator

Ausgehend von den Spezifikationen der Interferenzprofile im Abschnitt 7.4 werden in diesem Abschnitt die Implementierungen der entsprechenden Modelle für die Emulation mit einem Vektorsignalgenerator (VSG) vorgestellt. Auf der Basis der Festlegungen in Abschnitt 7.4 wurden Waveform-Dateien für den VSG erzeugt. Zur Visualisierung der Mediumbelegung durch die implementierten Interferenzprofile wurden die mit dem VSG erzeugten Signale mit einem Spektrumanalysator aufgezeichnet. Die Spektrogramme sind nachfolgend dargestellt.

Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil für den periodischen Prozessdatenaustausch mit Bluetooth ist in Abbildung 9-13 dargestellt.

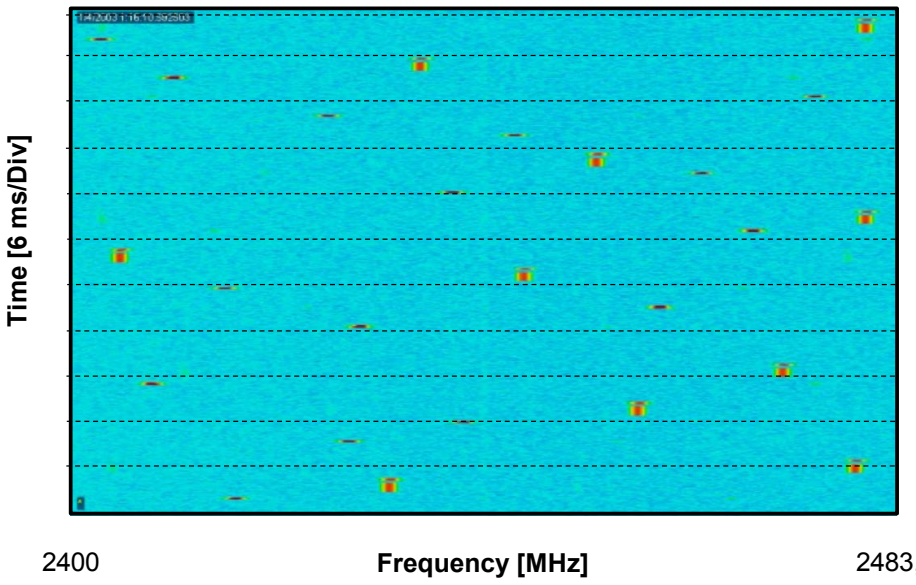

Abbildung 9-13: Interferenzprofil "Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth"

PROFINET IO Kommunikation mit WLAN

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil für die PROFINET IO Kommunikation mit WLAN ist in Abbildung 9-14 dargestellt. Aus Ressourcenbeschränkungen des VSG kann die geforderte

Zykluszeit von 128 ms nicht realisiert werden. Somit weist das emulierte Interferenzprofil eine maximale Zykluszeit von 125 ms auf.

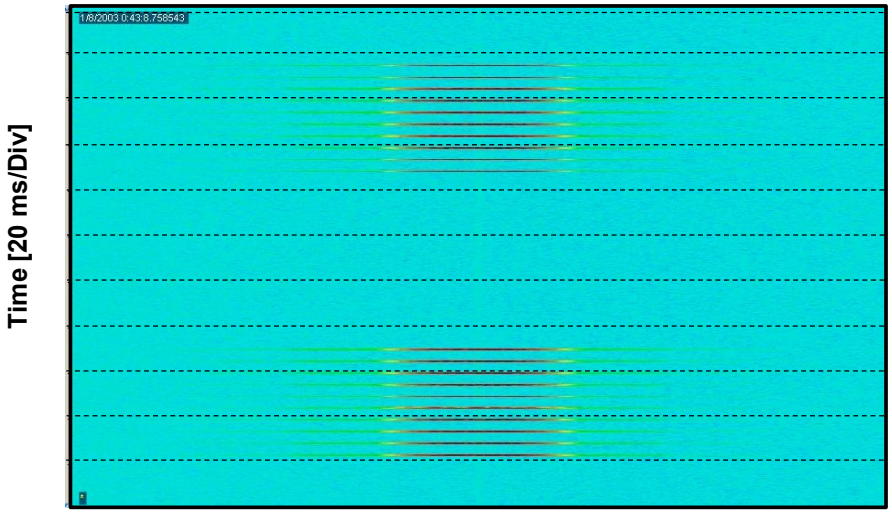

Abbildung 9-14: Interferenzprofil "PROFINET IO Kommunikation mit WLAN"

Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil Periodischer Prozessdatenaustauch mit WISA sind in Abbildung 9-15 für die WISA Cell ID 01 und in Abbildung 9-16 für die WISA Cell ID 31 dargestellt.

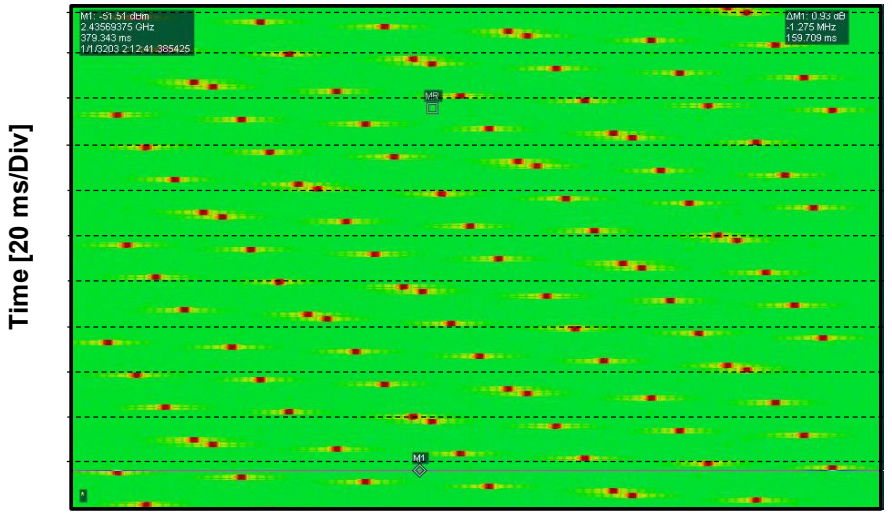

Abbildung 9-15: Interferenzprofil "Periodischer Prozessdatenaustauch mit WISA (Cell-ID 01)"

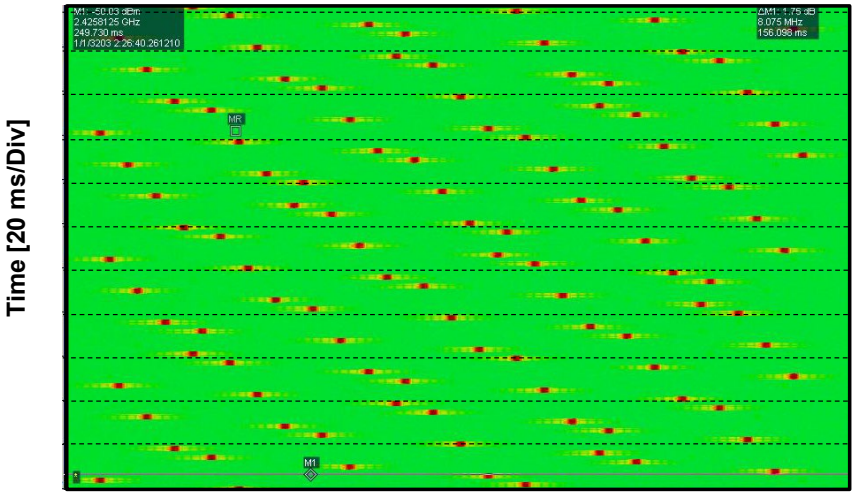

Abbildung 9-16: Interferenzprofil "Periodischer Prozessdatenaustauch mit WISA (Cell-ID 31)"

Video-Übertragung mit WLAN

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil für die Videoübertragung mit WLAN ist in Abbildung 9-17 für die zeitliche Mediumsbelegung von 30 %, 20 % und 10 % dargestellt.

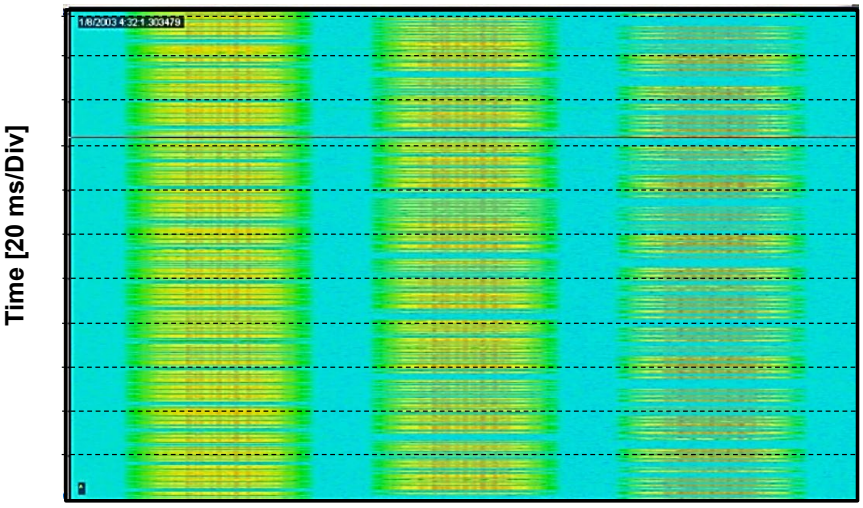

Abbildung 9-17: Interferenzprofil "Videoübertragung mit WLAN"

Bluetooth Inquire

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil für Bluetooth Inquire ist in Abbildung 9-18 dargestellt.

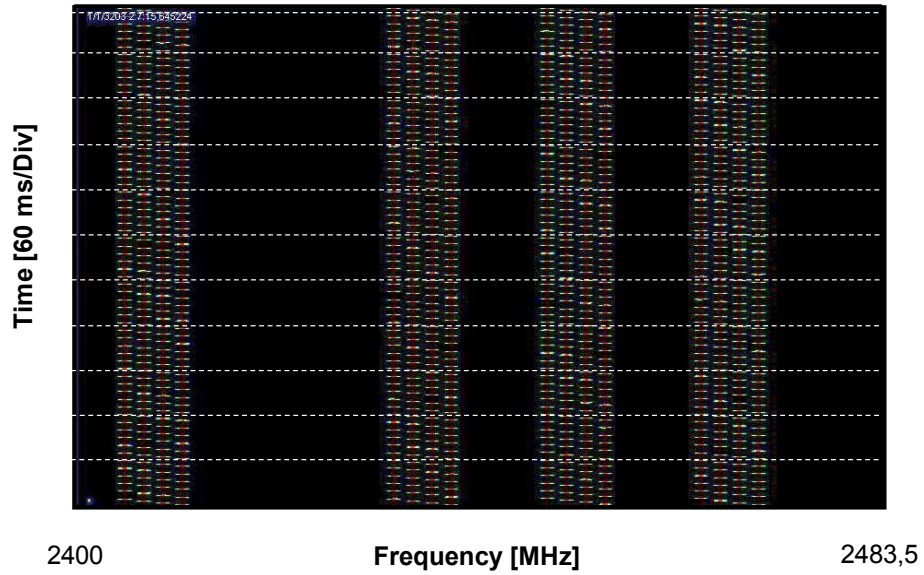

Abbildung 9-18: Interferenzprofil "Bluetooth Inquire"

WLAN Probe Request

Das vom VSG erzeugte Interferenzprofil für WLAN Probe Request ist in Abbildung 9-19 dargestellt.

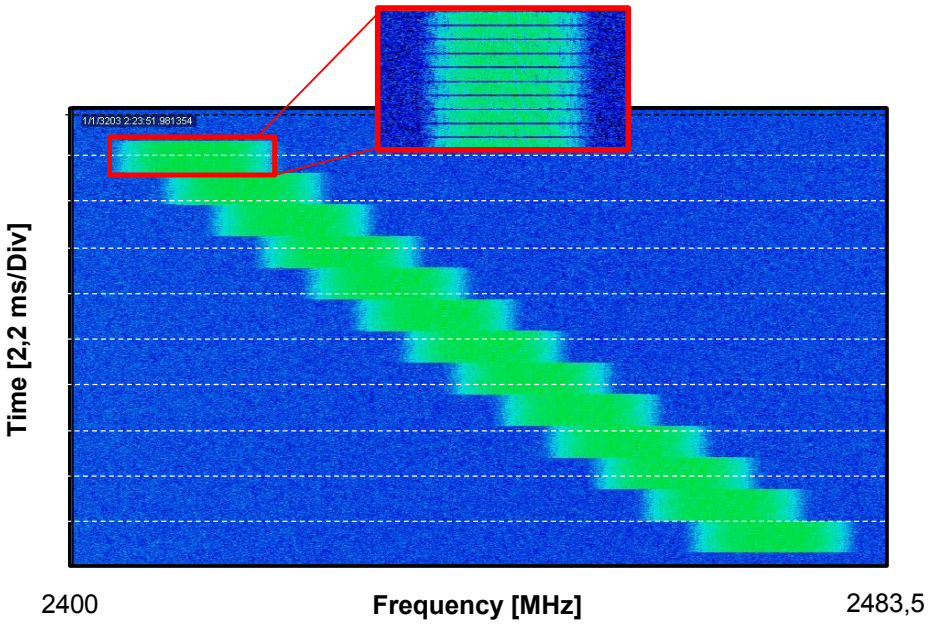

Abbildung 9-19: Interferenzprofil "WLAN Probe Request"

9.2.8.2 Software Defined Radio Plattform

Das Erzeugen der Interferenzprofile mit einem Vektorsignalgenerator hat den Nachteil, dass vor dem Senden das Medium nicht auf aktive Übertragungen geprüft werden kann. Damit stellt diese Art der Implementierung der Interferenzprofile den jeweils ungünstigsten Fall dar. Ein WLAN Gerät beispielsweise sendet nicht bei belegtem Medium. Bei der Emulation mit einem Vektorsignalgenerator wird eine aktive Übertragungen durch ein WLAN Gerät beeinflusst. Deshalb wurden folgende Implementierungsmöglichkeiten auf einer SDR Plattform untersucht [9-1]:

Erstellung der Interferenzprofile mit GNU Radio

Nachrichten mit zufälligem Nutzdateninhalt werden entsprechend einer ausgewählten Funktechnologie mithilfe der Software GNU Radio erzeugt und in IQ-Werte gewandelt. Diese werden auf die SDR Plattform geladen und von dieser gesendet (siehe Abbildung 9-20). Interferenzprofile aus mehreren Funkanwendungen können durch Addition einzelner Interferenzprofile generiert werden.

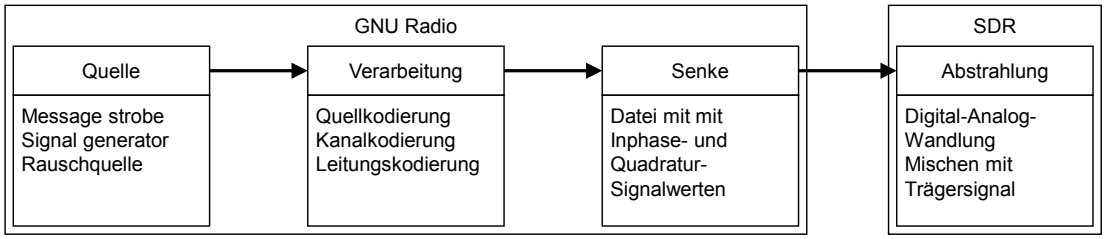

Abbildung 9-20: Erstellung der Interferenzprofile mit GNU Radio

Erstellung der Interferenzprofile als Wave- Dateien

Mithilfe des VSG oder dem Programm WinIQSIM werden die Interferenzprofile als Wave- Dateien erzeugt. Die Dateien werden mit GNU Radio weiterverarbeitet und von der SDR Plattform gesendet (Abbildung 9-21).

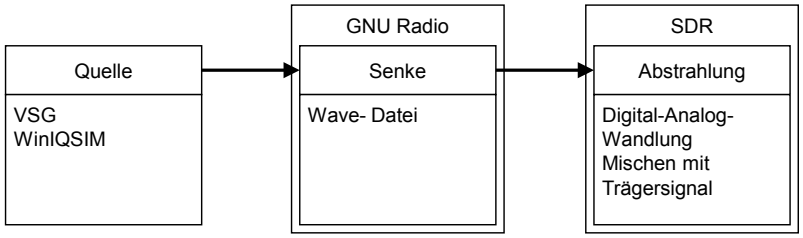

Abbildung 9-21: Erstellung der Interferenzprofile als Wave- Dateien

Erstellung der Interferenzprofile durch Aufzeichnung mit SDR Plattform

Mit einem VSG wird ein Interferenzprofil erzeugt und an die SDR Plattform übertragen. Die Signale werden von der SDR Plattform im Rahmen der möglichen Bandbreite erfasst und als IQ-Datenstrom, ohne Signalverarbeitung durch den FPGA auf einem PC gespeichert. Da sich in dieser Verarbeitungskette keine zeitkritischen Prozesse befinden, kann die gesamte Signalverarbeitung durch Programme wie GNU Radio auf dem PC durchgeführt werden. Der IQ-Datenstrom kann dann von der SDR Plattform gesendet werden (Abbildung 9-22).

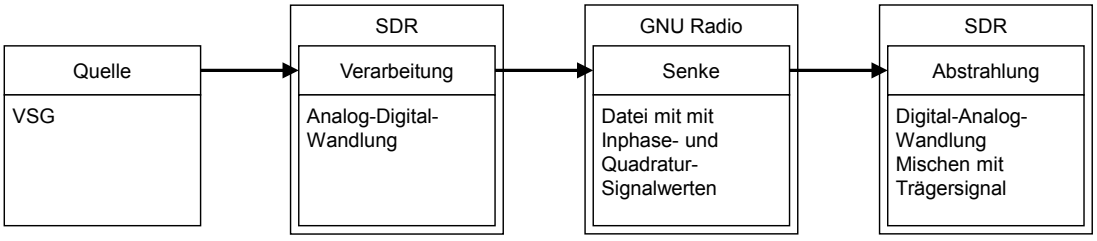

Abbildung 9-22: Erstellung der Interferenzprofile durch Aufzeichnung mit SDR Plattform

Die Erzeugung von Interferenzprofilen ist mit einer SDR Plattform beschränkt möglich. Zum Teil ergeben sich Einschränkungen durch die Performance der Signalverarbeitung (Intel i7-6700). Die Erzeugung von Funksignalen mehrerer Funksysteme ist problematisch. Die Plattform USRP X310 sendete bei breitbandiger Nutzung ein nicht erwünschtes dominantes

Trägersignal [9-1]. Sollen Mediumzugriffsmechanismen berücksichtigt werden sind diese aus Performance-Gründen auf dem FPGA der SDR Plattform zu implementieren.

9.3 Validierung

9.3.1 Validierung KoMe-System

9.3.1.1 Verwendete Implementierungen der Validierungsplattform

Für die Validierung des KoMe-Systems wurden folgende der in Abschnitt 9.2 beschrieben Geräte genutzt:

- Verarbeitungseinheit und Nutzerschnittstelle
- Vektorsignalgenerator
- Kanalemulator
- SDR Plattform
- SUT WLAN bestehend aus Access Point und Client

Folgende der in Abschnitt 9.2 beschriebene Interferenzprofile wurden genutzt:

- WLAN PNIO
- WISA
- Bluetooth

9.3.1.2 Validierungsergebnisse

Die Validierung der Messung der Mediumnutzung und der Umschaltung auf einen nicht gesteuerten Kanal wurde mithilfe der in Kapitel 7.4.3, 7.4.2, 7.4.4 beschriebenen Interferenzprofile WLAN PNIO, Bluetooth und WISA durchgeführt. Es wurde zunächst untersucht, *ob der Störer erkannt* wurde und *ob eine Umschaltung stattgefunden* hat. In den folgenden drei Abbildungen sind erfolgreiche Detektierungen von Interferenzen dargestellt, bei denen ein Kanalwechsel eingeleitet wurde (Treffer - True Positive TP). Folgende Zustände sind in den Abbildungen beschriftet:

3. WLAN System sendet
4. WLAN System beeinflusst durch Interferenzprofil
    - PROFINET IO Kommunikation mit WLAN (Abbildung 9-23)
    - Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth (Abbildung 9-24)
    - Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA (Abbildung 9-25)
3. Rekonfiguration des WLAN Systems
4. Geräte haben den Kanal gewechselt

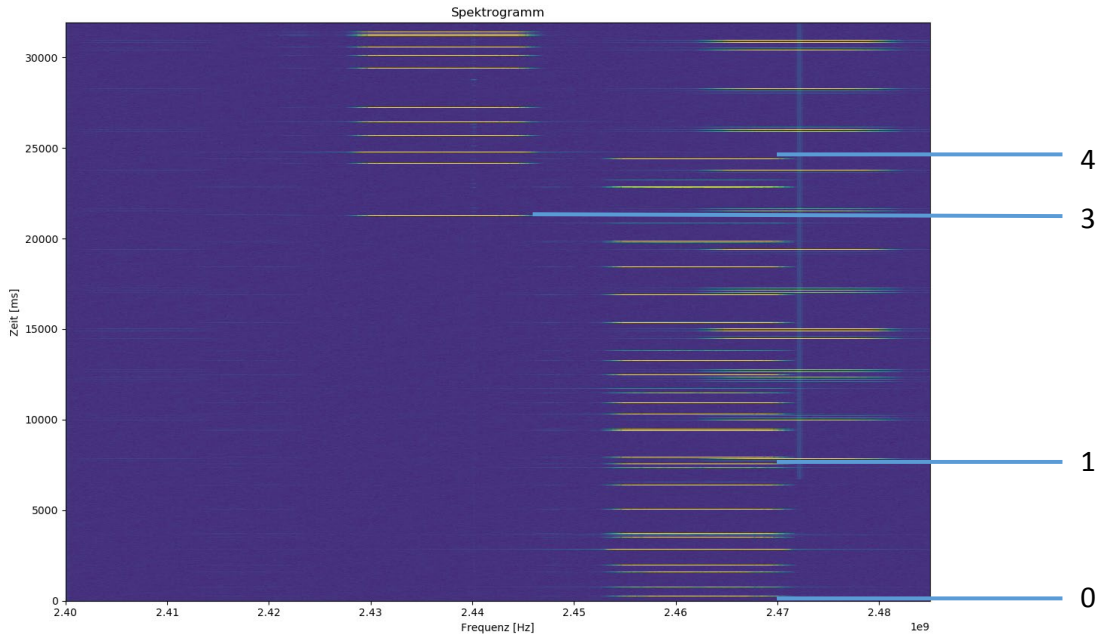

Abbildung 9-23: Kanalwechsel; WLAN Störer auf Kanal 13

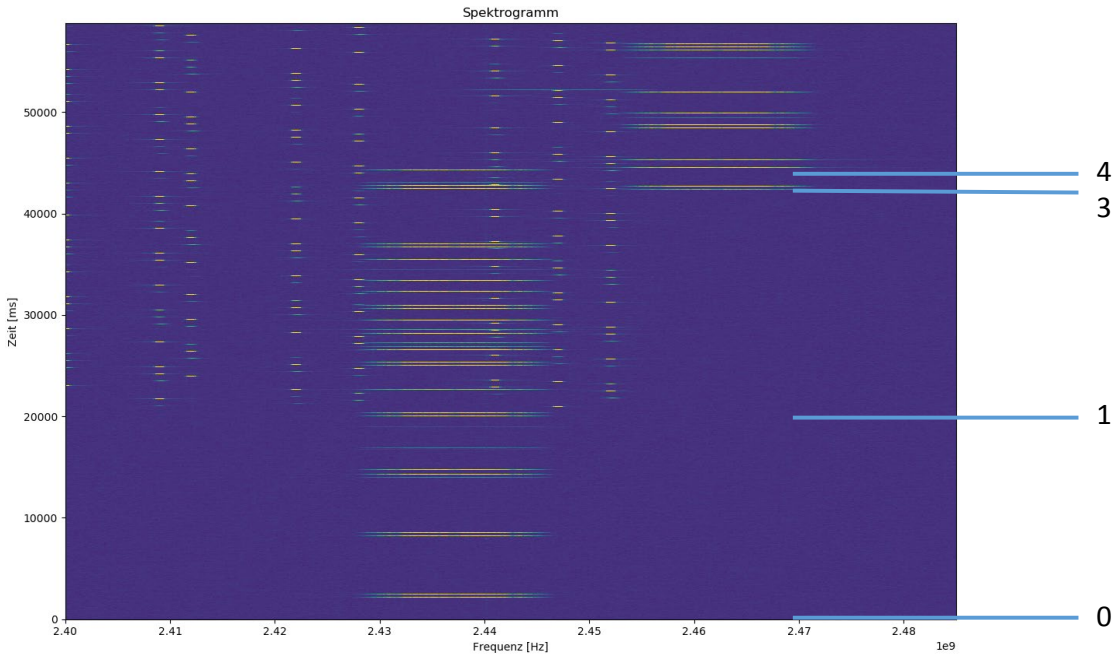

Abbildung 9-24: Kanalwechsel; Bluetooth Störer auf Kanal 1 bis 8

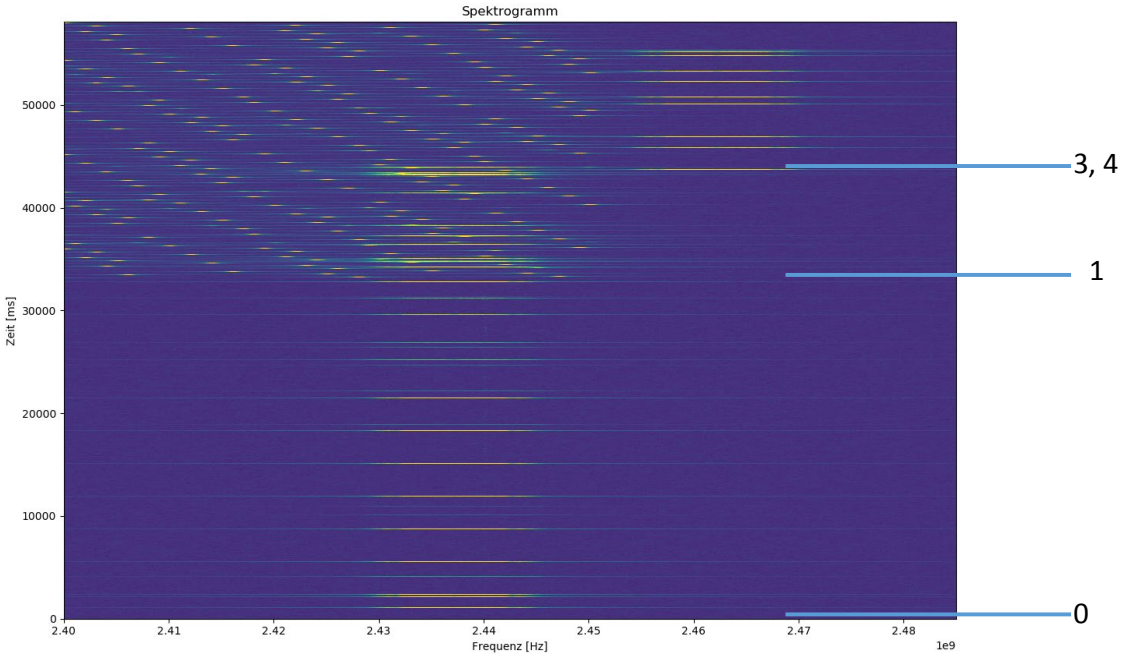

Abbildung 9-25: Kanalwechsel; WISA Störer auf Kanal 1 bis 8

Abbildung 9-26 zeigt den Fall eines nicht erforderlichen Kanalwechsels (Falscher Alarm - False Positive FP). Es gab keinen Störer auf dem Kanal auf dem sich das SUT WLAN befindet, es wird aber zu den Zeitpunkten 5 und 6 der Kanal gewechselt. Dieses Verhalten konnte in mehreren Stichproben nachgewiesen werden. Vermutlich wird das Signal des SUT WLAN als Störsignal interpretiert.

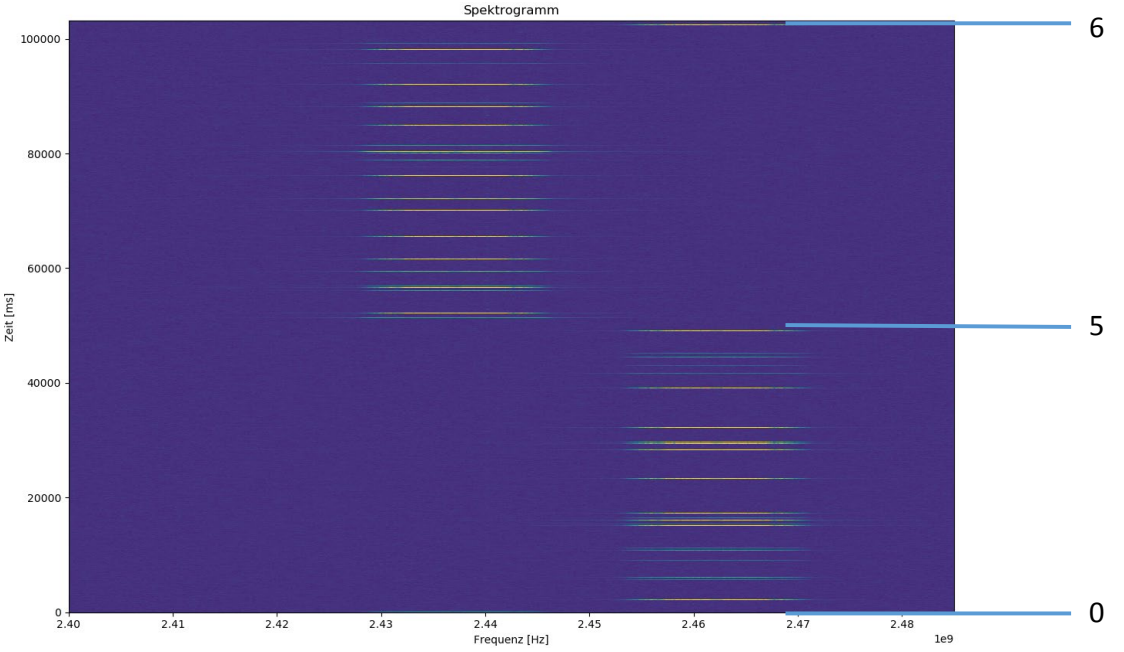

Abbildung 9-26: Kanalwechsel; kein Störer

Abbildung 9-27 zeigt einen Bluetooth System auf WLAN Kanal 1-8. Der Kanal wird nach der Erkennung des Bluetooth Systems richtigerweise (TP) von 6 auf 11 gewechselt. Nach ca. 20 s wird allerdings wieder umkonfiguriert, dorthin wo das Bluetooth System sendet. Hier tritt eine Verfehlung auf (Verfehlung - False Negative FN). Dieses Verhalten tritt bei allen drei getesteten Interferenzprofilen in mehreren Stichproben auf.

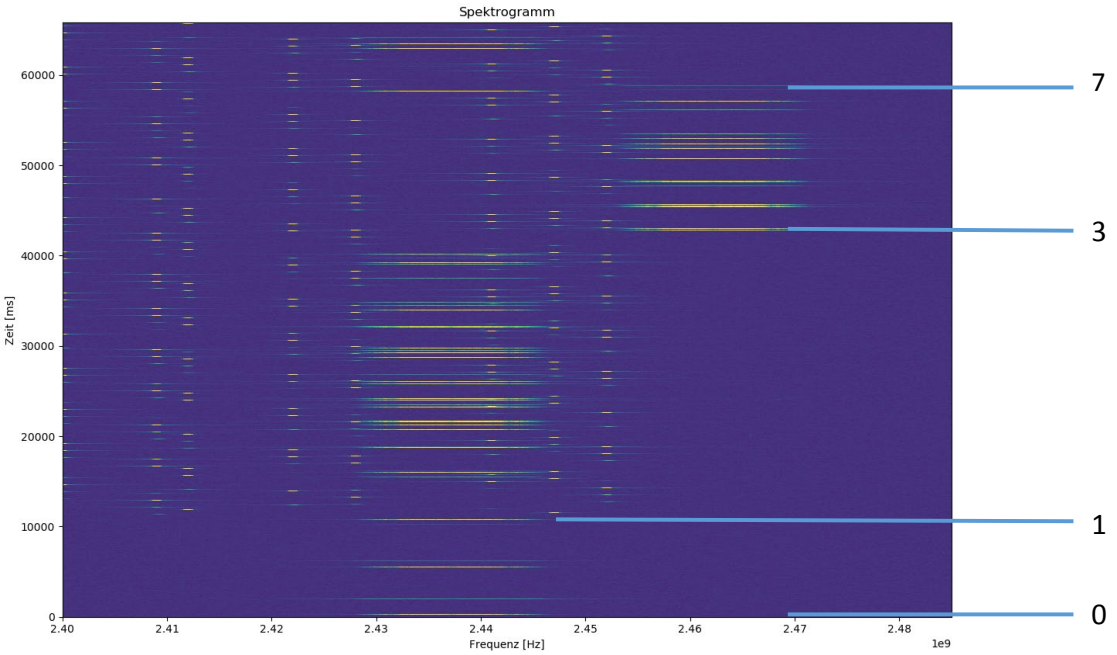

Abbildung 9-27: Kanalwechsel; Bluetooth Störer auf Kanal 1 bis 8; Wechsel zurück

Für den Fall, dass keine Interferenz vorliegt und demzufolge auch keine Rekonfiguration erfolgt (Richtige Reaktion - True Negative TN) wurde keine extra Abbildung erzeugt. Die Ursachen für die Fälle Falscher Alarm (FP) und Verfehlung (FN) konnten aus Zeitgründen nicht mehr ermittelt werden. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

9.3.2 **Validierung KoMe-Funkkommunikationssystem**

9.3.2.1 Allgemeines

Im Unterschied zum im Abschnitt 7.3.2 beschriebenen Konzept wird die Kenngröße der Mediumnutzung nach Tabelle 7-6 nicht vom Compressed Sensing Edge Detection (CSED) zur Verfügung gestellt. Die CSED-Implementierung legt Werte der mittleren spektralen Leistungsdichte in Form einer Zeit-Frequenz-Matrix gemäß Tabelle 9-1 in einer MATLAB-Datei ab. In Tabelle 9-2 sind die Parameter der Zeit-Frequenz-Matrix spezifiziert.

Tabelle 9-1: Zeit-Frequenz-Matrix der Leistungsdichtewerte ermittelt vom CSED

Messzeitpunkt	**Frequenzgrenze f_1**	**Frequenzgrenze f_2**	**Frequenzgrenze $f_{...}$**	**Frequenzgrenze f_J**
t_1	$APSD_{11}$	$APSD_{12}$	…	$APSD_{1J}$
t_2	$APSD_{21}$	$APSD_{21}$	…	$APSD_{2J}$
…	$APSD_{..}$	$APSD_{..}$	…	$APSD_{..}$
t_K	$APSD_{K1}$	$APSD_{K2}$	…	$APSD_{KJ}$

Tabelle 9-2: Spezifikation der Parameter der Zeit-Frequenz-Matrix vom CSED

Name	**Bezeichner**	**Datentyp**	**Wertebereich**	**Maßeinheit**
Messzeitpunkt	t_i	yy/mm/dd hh:mm:ss,xxxxxx	-	-
Frequenzgrenze	f_j	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	MHz
Mittlere spektrale Leistungsdichte	APSD	double	Bereich einer 32 bit Fließkommazahl	dBm/MHz

Für die Bewertung der Messergebnisse zur Bestimmung der Mediumnutzung wurde ein Matlab Script implementiert. Dieses beschreibt die Erstellung eines Zeitvektors mit der entsprechenden Abtastzeit von 384,6 µs und der Erstellung eines Frequenzvektors von 2.399 MHz - 2.484 MHz. Diese Vektoren dienen zur Erstellung der Zeit-Frequenz-Matrix, wie in Tabelle 9-2 beschrieben. Mit einem Suchalgorithmus wurden pro Zeiteinheit, die Werte aus dem erstellten Frequenzvektor mit den gemessenen Frequenzwerten aus dem CSED –Verfahren verglichen um die entsprechenden Werte der Leistungsdichte in der Matrix zuzuordnen.

9.3.2.2 Verwendete Implementierungen der Validierungsplattform

Für die Validierung des Funkkommunikationssystems bzgl. des CSED– Verfahrens wurden Spektrogramme aufgenommen. Ziel ist der Vergleich des Signalerfassung mit dem CSED–Verfahren mit den erzeugten Interferenzprofilen. Dazu wurde folgende Ausrüstung genutzt:

- Vektorsignalgenerator (VSG)
- PC mit Verarbeitungseinheit und Nutzerschnittstelle
- SUT Sensing Unit

Der VSG wurde mit Wave- Dateien für folgende Interferenzprofile konfiguriert:

- Periodischer Prozessdatenaustausch mit Bluetooth
- PROFINET IO Kommunikation mit WLAN
- Periodischer Prozessdatenaustausch mit WISA
- Video-Übertragung mit WLAN

Im Test wurden die entsprechenden Signale vom VSG gesendet und von der Sensing Unit erfasst. Das CSED- Verfahren wurde auf die erfassten Signale angewendet, um die Signalkanten (Edges) der Funkübertragungen zu finden. Die ermittelten Frequenz- und Leistungsdaten wurde mithilfe eines Matlab- Skripts aufbereitet und mit dem in Tabelle 9-1 beschriebenen Format in einer Matlab- Datei abgelegt. Durch ein weiteres Matlab- Script wurden Grafiken im Format von Spektrogrammen generiert, um sie mit den Spektrogrammen der Interferenzprofile zu vergleichen.

9.3.2.3 Validierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse ausgewertet. Abbildung 9-28 zeigt das Spektrogramm des Interferenzprofiles Bluetooth. Abbildung 9-29 zeigt das Spektrogramm, das dafür, auf Basis der mit dem CSED- Verfahren erfassten Signale, mit dem Matlab- Script erzeugt wurde. In den Abbildungen sind der Sendezeitabstand von 27 ms und die Medienbelegung durch ein Bluetooth- Paket von 1,9 ms markiert. Diese Werte werden für die Validierung bzw. Bewertung herangezogen. Beide Werte stimmen in den Grafiken überein.

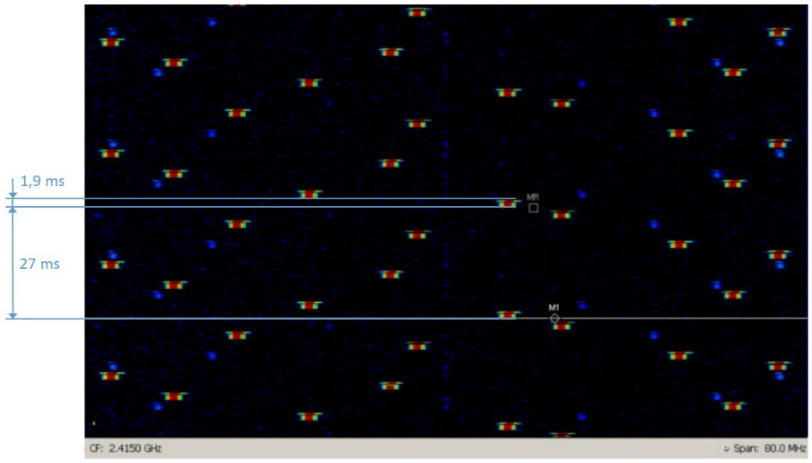

Abbildung 9-28: Spektrogramm Interferenzprofil Bluetooth

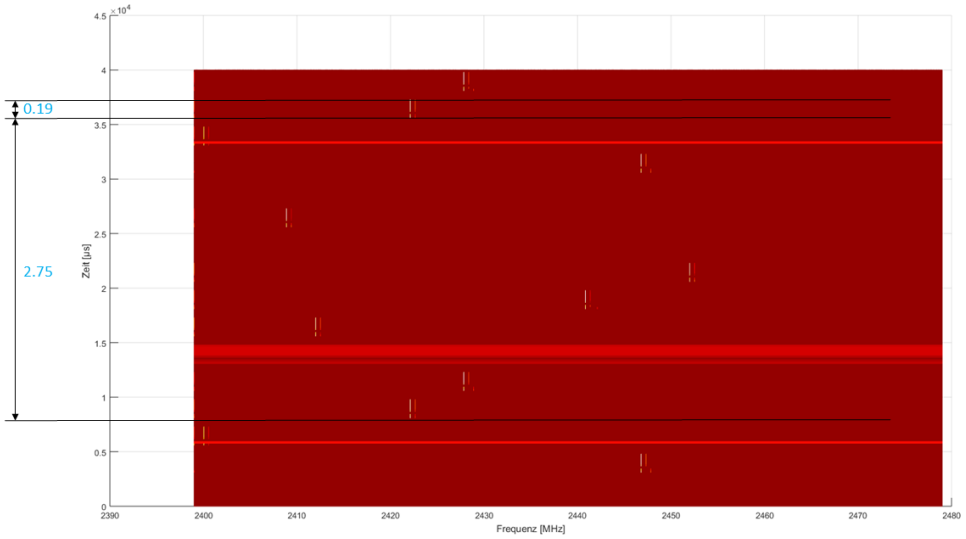

Abbildung 9-29: Spektrogramm CSED- Erfassung Bluetooth

Abbildung 9-30 zeigt das Spektrogramm des Interferenzprofiles PROFINET IO Kommunikation mit WLAN. Abbildung 9-31 zeigt das Spektrogramm, das dafür, auf Basis der mit dem CSED- Verfahren erfassten Signale, mit dem Matlab- Script erzeugt wurde. In den Abbildungen sind die Werte des Sendezeitabstandes (original 125 ms) und der Dauer des Bursts für die 10 logischen Verbindungen (original 46 ms) eingezeichnet. Die Mediumbelegung für eine logische Verbindung beträgt 1.6 ms. Der Abstand zwischen Übertragungen zweier logischer Verbindungen beträgt 4.4 ms. In Abbildung 9-31 sind nicht alle WLAN Übertragungen zu erkennen. Demzufolge weichen auch die Werte der eingezeichneten Zeitabstände von den Originalwerten ab. Ursache kann die für industrielle Übertragungen typische sehr kurze Belegung des Mediums sein.

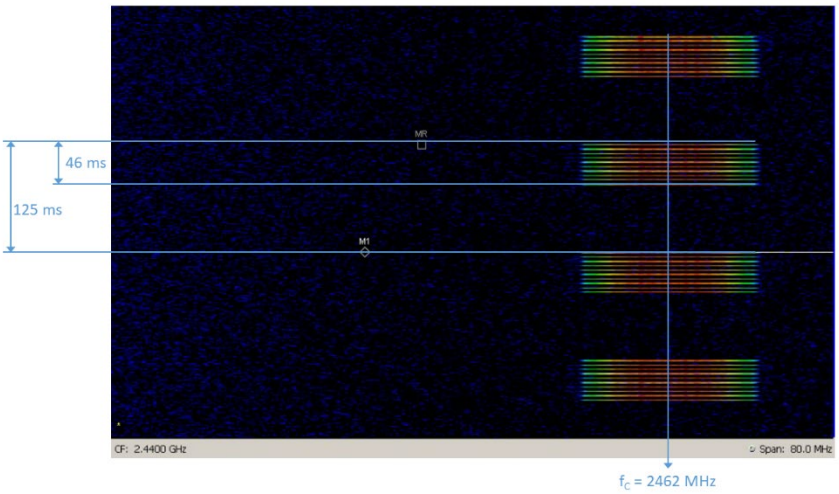

Abbildung 9-30: Spektrogramm Interferenzprofil WLAN PNIO

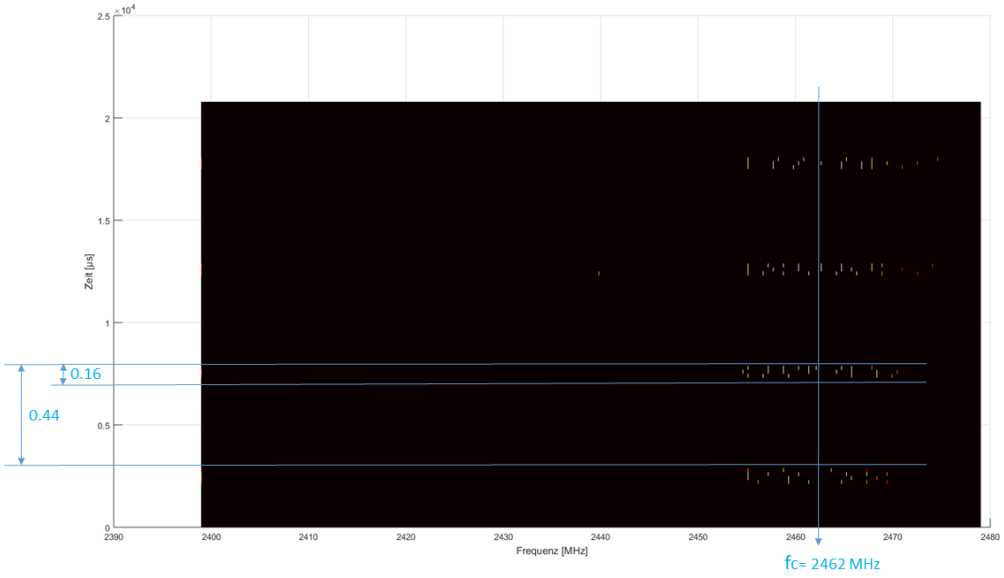

Abbildung 9-31: Spektrogramm CSED- Erfassung WLAN PNIO

10 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsvorhaben wurde eine gesamtheitliche Betrachtung des Koexistenzmanagements durchgeführt. Hierbei wurden berücksichtigt: Anforderungen der Automatisierungsanwendungen, Spektrumsensing, Eigenschaften der Funkkanäle, Mediumzugriff und die Kommunikation zwischen den beteiligten Geräten. Das erforschte KoMe-System basiert auf einer zweistufigen Migrationsstrategie.

In einer ersten Phase wurden Lösungsansätze für ein zentrales Koexistenzmanagement mit einem Central-Coordination-Point (CCP) entwickelt, welche die heute eingesetzten Funkkommunikationslösungen berücksichtigen. Für das Koexistenzmanagement wurden zunächst neuartige Quality-of-Coexistence-Kenngrößen (QoC) definiert. Die elementaren CCP-Dienste können mit den bekannten Protokollen NETCONF / YANG, REST und SNMP abgebildet werden. Gleichwohl ist die Gesamtperformance noch nicht zufriedenstellend. Ein stabiler Standard ist für die Spezifikation der benötigten KoMe-Algorithmen erforderlich. Bei der Ressourcenzuweisung wurden der Frequenzkanal und die Sendeleistung berücksichtigt. Eine Variation der Sendeleistung beeinflusst die Versorgungs- und Störreichweite und adressiert damit die räumliche Dimension. Der entwickelte Algorithmus 'Kassandra' optimiert die Ressourcenverteilung innerhalb eines Netzwerkgraphen zugunsten eines optimalen Koexistenzzustands.

In der zweiten Phase wurden neuartige Lösungsvorschläge für einen systemspezifischen Mediumzugriff eines neuen KoMe-Funksystems und dessen Integration in das Konzept des zentralen Koexistenzmanagements erarbeitet. Die durchgeführten Arbeiten haben zu neuen und vielversprechenden Konzepten geführt: Die Spektralformung wurde mit dem Konzept 'Generalized Frequency Division Multiplex' (GFDM) adressiert, die Spektralerfassung wurde durch die Entwicklung von Compressive-Edge-Spectrum-Sensing (CESS) wesentlich verbessert und die umfassende Bewertung existierender Verfahren zum Mediumzugriff ermöglichte die Entwicklung des neues Schedulingkonzepts „Fair Error“.

Die Lösungen wurden exemplarisch auf einer Validierungsplattform implementiert und unter realen Einsatzbedingungen bezüglich ihrer Effizienz für Anwendungen in Maschinen und Anlagen getestet. Das Validierungskonzept ermöglicht einen schrittweisen Test von Koexistenzmanagementlösungen. Es beruht auf:

- Spezifikation und exemplarische Implementierung von Kommunikationsdiensten, die für das Koexistenzmanagement erforderlich sind;
- Realisierung aus Standardausrüstung und zusätzlich umgesetzten Implementierungen;
- Erfassung und Emulation von Interferenzen verschiedener Funkkommunikationssysteme;
- Validierung der Entscheidungsfindung und der Managementfunktion des KoMe-Systems.

Die erzielten Forschungsergebnisse sind wesentliche Bestandteile eines neuen Verfahrens zur Realisierung eines automatisierten Koexistenzmanagements nach IEC 62657-2.

Weiterführende Arbeiten sollten folgende Punkte behandeln:

- Erweiterung des Grades der Automatisierung der Validierungsplattform.
- Erweiterung der Funktion der Validierungsplattform für andere, insbesondere dezentrale Lösungsansätze des Koexistenzmanagements.
- Spezifikation der Abbildung der CPP-Dienste auf ein generisches Kommunikationskonzept wie OPC UA oder NETCONF/YANG und damit Etablierung eines stabilen Standards.

11 Anhang

11.1 Literaturverzeichnis

[2-1] U. Meier, L. Rauchhaupt: Bewertung industrieller Funklösungen - Standardtests und Performance-Klassen; atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, 9/2013, 44 - 56

[2-2] L. Rauchhaupt, U. Meier: Performance Classes for Industrial Wireless Application Profiles and its Determination; 18th IEEE Conference on Emerging Technology and Factory Automation - ETFA 2013, Sept. 10 - 13, Cagliari, Italy

[2-3] IEC/EN 62657-1:2015 "Industrial communication networks – Wireless communication networks – Part 1: Wireless communication requirements and spectrum considerations"

[3-1] VDI/VDE Richtlinie 2185, "Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik.", Blatt 4 "Messtechnische Performancebewertung von Funklösungen für industrielle Automatisierungs-anwendungen", 2018

[3-2] VDI/VDE Richtlinie 2185, "Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik", VDI/VDE Richtlinie 2185, Blatt 1, 2. Auflage, Juni 2006

[3-3] DKE: DKE Wörterbuch, Internetseite, https://www.dke.de/de/online-service/dke-iev/Seiten/IEV-Woerterbuch.aspx, 2016

[3-4] Block, Dimitri und Meier, Uwe: A Novel Approach to Assess Wireless Coexistence, KommA 2014 - Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Lemgo, November 2014

[5-1] Cisco, „CleanAir-Technologie," 2010.

[5-2] Zebra Technologies Corporation, „AirDefense Services Platform 9.1.3 User Guide," Lincolnshire, USA, 2015.

[5-3] Motorola Solutions, Inc., "Motorola Wireless Intrusion Prevention Solutions Overview," 2011.

[5-4] Aruba Networks, "AirWave Data Sheet," Sunnyvale, USA.

[5-5] Meru Networks, „Meru Spectrum Manager Product Overview," USA, 2010.

[5-6] Hewlett Packard, „Enterprise Network Automation," USA, 2016.

[5-7] Hewlett Packard, "Enterprise Network Management Brochure," USA, 2016.

[5-8] Hewlett Packard, „Enterprise Network Node Manager i," USA, 2016.

[5-9] MicroNova, „ManageEngine OpManager," Vierkirchen, Deutschland, 2015.

[5-10] Ericsson AB, „ServiceOn Element Manager," Stockholm, Sweden, 2009.

[5-11] Ericsson AB, „ServiceOn Microwave," Stockholm, Sweden, 2009.

[5-12] Ericsson AB, „ServiceOn Microwave Product Catalog," Ericsson, Stockholm, Sweden, 2007.

[5-13] The OpenNMS Group, "www.opennms.org," 2016. [Online].

[5-14] Nagios Enterprises, LLC, „www.nagios.org," 2016. [Online].

[5-15] Phinex Informatik AG, „www.bigsister.ch," [Online].

[5-16] Edgewall Software, „http://munin-monitoring.org/," 2016. [Online].

[5-17] The Cacti Group, Inc., „http://www.cacti.net/," 2016. [Online].

[5-18] ETSI, „TR 102864 V1.1.1 - Reconfigurable Radio Systems (RRS); Feasibility Study on Control Channels for Cognitive Radio Systems," 2012.

[5-19] ETSI, „TR 102682 V1.1.1 - Reconfigurable Radio Systems (RRS); Functional Architecture (FA) for the Management and Control of Reconfigurable Radio Systems," 2009-07.

[5-20] IEEE, „1900.4 - IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks," 2009.

[5-21] KoMe, „AP 1 - Anforderungsanalyse," Bremen, Lemgo, Magdeburg, 2016.

[5-22] ETSI, „TS 103 329 - V1.1.1 - Wireless Industrial Applications (WIA); Radio equipment to be used in the 5,725 GHz to 5,875 GHz frequency range with power level up to 400 mW; Methods and concepts for a WIA system approach to sharing in the 5,725 GHz to 5,875 GHz b," ETSI, 2016.

[5-23] IEEE, „802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Spec," 2012.

[5-24] I. C. Society, „IEEE Std 802.15.2™-2003, Local and metropolitan area networks—Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands," IEEE Computer Society, 2003.

[5-25] K. Ahmad, P.-B. Ostfeld, U. Meier und H. Kwasnicka, „Exploitation of Multiple Hyperspace Dimensions to Realize Coexistence Optimized Wireless Automation Systems," *IEEE Trans. Ind. Inf. (IEEE Transactions on Industrial Informatics),* 2010.

[5-26] N. Wiebusch, D. Block und U. Meier, „A Centralized Cooperative SNMP-based Coexistence Management Approach for Industrial Wireless Systems," in *13th IEEE International Workshop 2017*, Trondheim, Norway, 2017.

[5-27] N. Wiebusch, P. Söffker, D. Block und U. Meier, „A Multidimensional Resource Allocation Concept for Wireless Coexistence Management," in *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation*, Limassol, Cyprus, 2017.

[6-1] J. Demel, C. Bockelmann, A. Dekorsy, „Evaluation of a Software Defined GFDM Implementation for Industry 4.0 Applications", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2017), Toronto, Canada, 22. - 25. March 2017

[6-2] R.D. Trivedi und M.C. Pavel, "Comparison of dierent Scheduling Algorithms for LTE", In International Journey of Emerging Technology and Advanced Engeneering, 2014.

[6-3] J. Rasool, M. Carpin und A. Zanella et al., „Scheduling Policies for the LTE Downlink", Channel. In CoRR, 2014.

[6-4] I. Wong und B. Evans, "Ressource Allocation in Multiuser Multicarrier Wireless",Systems. Springer Vieweg Verlag, 1. Auflage, 2008.

[6-5] A.K.F. Khattab und K.M.F. Elsayed, „Opportunistic Scheduling of Delay Sensitive Trafic in OFDMA-based Wireless Networks", In World of Wireless, Mobile an Multimedia Networks, Juli 2006.

[6-6] Sven-Ole Schmidt, „Analyse von Latenz-empfindlichem Scheduling auf Systemebene fürAnwendungen der Industrie 4.0", Master Thesis, Universität Bremen, 2018.

[6-7] E. Beck, C. Bockelmann, and A. Dekorsy, "Compressed Edge Spectrum Sensing for Wideband Cognitive Radios," in 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2018), Sep. 2018.

[6-8] C. Bockelmann, E. Beck, and A. Dekorsy, "One- and Two-dimenisonal Compressive Edge Spectrum Sensing," in Jahreskolloquium Kommunikationin der Automation (KommA) 2017, Nov. 2017.

[6-9] E. Beck, „Compressed Spectrum Sensing for Cognitive Radio in Time and Space", Master Thesis, University of Bremen, May 2017.

[7-1] IEEE 802.15.1

[7-2] Green, D.M., Swets,J.A.: Signal Detection Theory an Psychophysics, Los Altos, 1988

[7-3] Geßler, Peter: Stimmenauthentifizierung, btu Cottbus Senftenberg Bachelorarbeit 2014

[8-1] IEC 62657-4 CD2 " Industrial communication networks – Wireless communication networks – Part 4: Coexistence management with central coordination of wireless applications"

[8-2] IEC/EN 62657-1:2015 "Industrial communication networks – Wireless communication networks – Part 1: Wireless communication requirements and spectrum considerations"

[8-3] S. Kempiak, "Kommunikation zum Management der Koexistenz von Funksystemen in der Industrie.", Masterarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Juni 2018

[8-4] MQTT OASIS Website [Online], Available: https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=mqtt [23.11.2017]

[8-5] M. Savić, “BRIDGING THE SNMP GAP: SIMPLE NETWORK MONITORING THE INTERNET OF THINGS,” Electronics and Energetics, Vol. 29 no. 3, pp.475-487, September 2016

[8-6] P. Shafer, “An Architecture for Network Management Using NETCONF and YANG”, RFC6244, June 2011. Available: https://tools.ietf.org/html/rfc6244 [22.09.2017]

[8-7] M. Weinländer, „Industrie 4.0 – Industrielle Kommunikation Basistechnologie für die Digitalisierung der Industrie“, Beuth 2017

[8-8] R. Fielding, “Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures”, Dissertation, 2000, Available: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/fielding_dissertation.pdf

[8-9] R. Enns, “NETCONF Configuration Protocol”, December 2006. Available: https://tools.ietf.org/pdf/rfc4741.pdf [22.09.2017]

[8-10] Quo Vadis, SNMP? Whitepaper Teil 1: Einführung in SNMP, Stand: März 2014 [Online]. Available: https://assets.paessler.com/common/files/pdf/whitepaper/introducing_snmp_1_de.pdf [27.09.2017]

[9-1] M. Rabsilber, "Erstellung von Interferenzprofilen mithilfe einer Software Defined Radio Plattform.", Masterarbeit, Hochschule Magdeburg-Stendal, November 2017

11.2 Begriffsdefinitionen

Funkanwendung

Jede Verwendung von elektromagnetischen Wellen mit Geräten oder Anlagen zur Erzeugung und Verwendung von Hochfrequenzenergie

Funkkommunikationsanwendung

Teil einer industriellen Automatisierungsanwendung, der Funkkommunikation nutzt

ISM Anwendung

Betrieb von Geräten und Anlagen, die zur lokalen Erzeugung und Nutzung von Hochfrequenzenergie für industrielle, wissenschaftliche, medizinische, häusliche oder ähnliche Zwecke bestimmt sind, ausgenommen Anwendungen im Bereich der Telekommunikation

Koexistenz (coexistence)

Zustand, in dem alle Funkkommunikationslösungen einer Anlage, die ein gemeinsames Medium nutzen, alle Kommunikationsanforderungen ihrer Anwendung erfüllen

[QUELLE: IEC 62657-2]

Koexistenzmanagement (coexistence management)

Prozess der Herstellung und Erhaltung von Koexistenz mit Hilfe von technischen und organisatorischen Maßnahmen

[QUELLE: IEC 62657-2]

KoMe-System

System aus einer oder mehrerer Komponenten zum Erfassen der Mediumsnutzung, einem Central Coordination Point (CCP) und Kommunikationsverbindungen zu Funkkommunikationssystemen

Herkömmliche Funkkommunikationssysteme sollen durch eine KoMe-Managementfunktionalität ergänzt werden, um mit einem CCP Daten austauschen zu können. Das KoMe-System soll Referenz für ein automatisiertes Koexistenzmanagementsystem sein.

KoMe-Funkkommunikationssystem

Funkkommunikationssystem, das Funktionen zum Erfassen der Mediumsnutzung und eine KoMe-Managementfunktionalität beinhaltet

Gegenüber herkömmlichen Funkkommunikationssystemen ist das KoMe-Funkkommunikationssystem durch leistungsfähige Algorithmen zum automatischen Koexistenzmanagement gekennzeichnet. Das KoMe-Funkkommunikationssystem soll Referenz für ein kognitives Funkkommunikationssystem sein.

11.3 Abkürzungsverzeichnis

CCP	Central Coordination Point
CESS	Compressed Edge Spectrum Sensing
CNR	Channel-to-Noise-Ratio
CS	Compressive Sensing
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
ES	Edge Spectrum
FE	Fair Error
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplex
LS	Least Squares
MCS	Modulation und Coding Schemes
MMF	MaxMinFair
MT	MaxThrougput
NRT	Non-Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PSD	Power Spectral Density
RR	Round Robin
RT	Real Time
SDR	Software Defined Radio
SSU	Spectral Sensing Unit
Z	Zyklische Nutzer