

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20193 N

## Thema

Adaptiver Medienzugriff für Echtzeit-Funksysteme in der Automation

## Berichtszeitraum

01.08.2018 bis 31.07.2020

## Forschungsvereinigung

Elektrotechnik beim ZVEI e.V. - FE

## Forschungseinrichtung(en)

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS

---

Duisburg, 11.11.2020

Ort, Datum

Hans-Christian  
Mueller

  
Digital unterschrieben von Hans-  
Christian Mueller  
Datum: 2020.11.11 12:28:45 +01'00'

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und  
Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Kurzfassung.....	4
2. Motivation .....	5
2.1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	5
2.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU .....	7
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz.....	8
3.1. Stand der Forschung und Entwicklung.....	8
3.1.1. Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik.....	8
3.1.2. Adaptiver Medienzugriff.....	9
3.1.3. IO-Link Wireless.....	9
3.2. Arbeitshypothese .....	11
4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....	14
4.1. Arbeitspaket 1 – Anforderungsanalyse.....	14
4.2. Arbeitspaket 2 – Messkampagnen .....	14
4.3. Arbeitspaket 3 – Auswahl und Evaluierung geeigneter Hardware-Komponenten.....	18
4.4. Arbeitspaket 4 – Kognitive Komponente.....	20
4.4.1. Feldebene .....	20
4.4.2. Steuerungsebene .....	21
4.5. Arbeitspaket 5 – Protokoll-Erweiterung .....	22
4.5.1. Untere Protokollsichten .....	23
4.5.2. Existierende Mechanismen .....	24
4.5.3. Erweiterung der existierenden Mechanismen.....	25
4.5.4. Low Energy W-Devices .....	27
4.6. Arbeitspaket 6 – Funktionsmuster .....	27
4.7. Arbeitspaket 7 – Proof of Concept.....	31
4.8. Arbeitspaket 8 – Standardisierung .....	38
5. Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben .....	39
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	39
7. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse.....	39
8. Fortschreibung des mit dem Antrag vorgelegten Plans zum Ergebnistransfer .....	40
9. Schlusswort .....	41
10. Literaturverzeichnis.....	42

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Frequenznutzung.....	6
Abbildung 3-1: Topologie von IO-Link und IO-Link Wireless [8] .....	10
Abbildung 3-2: IO-Link Wireless – W-Sub-Cycle [8].....	10
Abbildung 3-3: »Blacklisting« bezüglich der WLAN-Kanäle 2 und 7 .....	11
Abbildung 3-4: W-Master mit zusätzlicher Komponente für adaptiven Medienzugriff .....	12
Abbildung 3-5. Zell-Konzept für IO-Link Wireless .....	13
Abbildung 4-1: Software Radio Plattform (links); analoges Daughterboard (rechts).....	15
Abbildung 4-2: Messstellen Technologiefabrik Scharnhausen (Quelle: Festo AG & Co. KG)....	15
Abbildung 4-3: Messaufbau an Messstelle 3 .....	16
Abbildung 4-4: Messergebnisse an Messstelle 3 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm) .....	16
Abbildung 4-5: Messergebnisse an Messstelle 6 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm) .....	17
Abbildung 4-6: Kanal-Konfigurationen entsprechend Messstelle 3 (oben) und 6 (unten) .....	17
Abbildung 4-7: Foto der zur Evaluierung verwendeten Hardware-Komponenten.....	18
Abbildung 4-8: Zeitlicher Verlauf der Anzahl detektierter Access Points (AP) .....	19
Abbildung 4-9: Ermittelte WLAN Kanal-Belegung durch Zugangspunkte an den Messstellen ..	19
Abbildung 4-10: Kognitive Komponente – erweitertes Zellkonzept .....	20
Abbildung 4-11: Transmit Spectrum Mask for 20 MHz Transmission [16].....	22
Abbildung 4-12: nRF52 Development Kit (Foto) .....	23
Abbildung 4-13: Downlink-Konfigurations-Rahmen auf der Bitübertragungsschicht.....	24
Abbildung 4-14: Gemessener Signalverlauf (nach Demodulation im Basisband).....	24
Abbildung 4-15: Verwendung der Konfigurationskanäle [8] .....	25
Abbildung 4-16: Pairing Negotiation Type 1 [8].....	26
Abbildung 4-17: Pairing Negotiation Type 2 [8].....	26
Abbildung 4-18: Kodierung eines HOP_N Eintrags [8].....	26
Abbildung 4-19: Skizze des Funktionsmusters .....	28
Abbildung 4-20: Komponenten des Funktionsmusters (Foto) .....	28
Abbildung 4-21: Erste Verifikation mit einem Real-Time Spectrum Analyzer (Screenshot) .....	29
Abbildung 4-22: Kanal-Konfiguration gemäß Versuchsaufbau.....	29
Abbildung 4-23: Ausschnitt des Versuchsaufbaus zur Verifikation (Foto) .....	30
Abbildung 4-24: Ermittelte WLAN-Nutzung (Messstelle 4).....	30
Abbildung 4-25: Abgeleitete Belegung von IO-Link Wireless Kanälen (Messstelle 4) .....	31
Abbildung 4-26: Resultierendes Black-Listing (Messstelle 4).....	31
Abbildung 4-27: Ausschnitt des Versuchsaufbaus für den Proof of Concept (Foto) .....	32
Abbildung 4-28: Messergebnisse bezüglich Messstelle 3 .....	33

Abbildung 4-29: Skizze des Funktionsmusters gemäß Zell-Konzept [8].....	33
Abbildung 4-30: Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün).....	34
Abbildung 4-31: Disjunkte Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün) .....	35
Abbildung 4-32: Disjunkte Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün) .....	35
Abbildung 4-33: Histogramm der Sprungweiten von Hopping-Sequenzen.....	36
Abbildung 4-34: Verifikation des Verfahrens für disjunkte Hopping-Sequenzen.....	36
Abbildung 4-35: Messdaten an Messstelle 6 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm).....	37
Abbildung 4-36: Messergebnisse der Messstelle 6 für zwei Zellen .....	37

### **Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1: Industrielle Anwendungen und ihre Anforderungen [2].....	5
Tabelle 2: Eignung verfügbarer Standards für den Einsatz für industrielle Anwendungen [2] .....	6
Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen .....	40
Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen .....	40

## 1. Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens AMEIDA war die Verbesserung der Koexistenz-Eigenschaften von Echtzeit-Funksystemen in der Automation mittels einer Komponente für den adaptiven Medienzugriff im lizenzenfreien heterogen genutzten 2,4 GHz-ISM-Band. Funksysteme, die dieses Band nutzen, ermöglichen die Verwendung kostengünstiger am Markt verfügbarer Komponenten, implizieren jedoch Fragestellungen zum Koexistenz-Management. Entsprechend wurde ein autonomes Koexistenz-Management angestrebt, das den Echtzeitanforderungen entsprechender Funk-Systeme genügt und aus Sicht potenzieller Anwender die größtmögliche Unterstützung bei der Installation und im Betrieb solcher Systeme gewährleistet. Mit dem konkreten Anwendungsfall IO-Link Wireless wurde zudem dem für die Umsetzung von Industrie 4.0 wichtigen Aspekt der Standardisierung Rechnung getragen.

Zu Beginn des Vorhabens wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, die auch für KMUs relevante Aspekte hinsichtlich der Akzeptanz moderner drahtloser Systeme zum Inhalt hatte. Diese umfassten Fragestellungen hinsichtlich der Plug-and-Play- beziehungsweise Plug-and-Produce-Eigenschaften solcher Systeme in der Produktion sowie einer adäquaten transparenten Zustands-Präsentation. Die Ableitung adäquater Lösungskonzepte stellte mit Blick auf die Umsetzbarkeit von Industrie 4.0 für KMU eine Voraussetzung bezüglich des Einsatzes von Echtzeit-Funksystemen dar. Mit Blick auf die Umsetzbarkeit war ebenso von Bedeutung, dass die Realisierung der erforderlichen Komponenten für einen adaptiven Medienzugriff die Verwendung kostengünstiger am Markt verfügbarer Hardware-Komponenten ermöglichte.

Ausgangspunkt des Lösungswegs waren Messkampagnen in repräsentativen Umgebungen der industriellen, automatisierten Produktion. Der Analyse der entsprechenden Ergebnisse schloss sich die Auswahl geeigneter kostengünstiger Hardware-Komponenten für die Umsetzung der kognitiven Komponente an. Anschließend erfolgte die Entwicklung von Verfahren zur Umsetzung kognitiver Methoden auf Basis dieser Komponenten. Daraus ergab sich unmittelbar die Herausforderung, den Verzicht auf leistungsstarke Hardware-Komponenten durch dedizierte algorithmische Verfahren zu kompensieren.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde ein vollständiges Funktionsmuster realisiert, das alle erforderlichen Komponenten für einen adaptiven Medienzugriff umfasste und zugleich alle wesentlichen Aspekte bezüglich des Anwendungsfalls IO-Link Wireless repräsentierte. Dieses Funktionsmuster wurde umfassenden Untersuchungen unterzogen, die auch ein typisches Anwendungsszenario einer industriellen, automatisierten Produktionsstätte einschlossen.

Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen belegen, dass die Vorhabenziele erreicht wurden.

Ferner leisten die erreichten Ergebnisse für KMUs einen Beitrag zur Erschließung der Potenziale moderner Sensorsysteme mit reduziertem administrativem Aufwand und damit auch eine vereinfachte Umsetzung von Plug-and-Produce-Konzepten in der Produktion basierend auf standardisierten Komponenten zur Vernetzung auf der Feldebene. Die im Kontext des Anwendungsfalls »IO-Link Wireless« umgesetzte Erweiterung des Kommunikationsprotokolls sowie die entsprechend angestrebte Erweiterung der Spezifikationen trägt zur Investitionssicherheit bei.

## 2. Motivation

### 2.1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Internet der Dinge hat in den letzten Jahren einen hohen technologischen Reifegrad erreicht und treibt die Digitalisierung in vielen Anwenderbranchen voran. Im industriellen Kontext bezeichnet der Begriff Industrie 4.0 die Verbindung der digitalen Welt des Internets mit den konventionellen Prozessen und Diensten der produzierenden Wirtschaft [1].

Die Kommunikationsfähigkeit aller Komponenten in der industriellen Fertigung ist Voraussetzung für eine hoch dynamische und flexible Industrie 4.0-Produktion. Die Verknüpfung aller Komponenten lässt sich bei verteilter Informationsverarbeitung mittels drahtloser Datenübertragung sinnvoll realisieren. Ziele bezüglich Zuverlässigkeit und Flexibilität lassen sich kosteneffizienter erreichen. Leitungsgebundene Systeme stoßen angesichts der prognostizierten großen Anzahl von Sensoren und Aktoren schnell an technische und wirtschaftliche Grenzen [2].

Hinsichtlich des Einsatzes von drahtlosen Systemen besteht eine signifikante Herausforderung in der Akzeptanz von Funktechnologien seitens industrieller Anwender. Wichtige Aspekte sind hohe Zuverlässigkeit, einfache Installation, Handhabung und Wartung der Systeme sowie Investitionssicherheit. Hier bieten standardisierte Lösungen mit Unterstützung durch unterschiedliche Hersteller die notwendige Sicherheit [2].

Drahtlose Systeme müssen in der Automation strengen Anforderungen genügen (insbesondere auch als Retrofit-Lösung). So ist in der diskreten Fertigung unter Einsatz moderner Automatisierungstechnik eine Vielzahl von Fertigungsschritten erforderlich, um das finale Produkt zu erhalten. Hier kommen üblicherweise speicherprogrammierbare Steuerungen zum Einsatz, mit deren Hilfe sowie mittels geeigneter Sensoren und Aktoren geschlossene Regelkreise umgesetzt werden. Solche Regelkreise weisen oftmals hohe Anforderungen an die Latenz (typische Zykluszeiten zwischen 1 ms – 12 ms) und die Zuverlässigkeit (Fehlerwahrscheinlichkeit  $10^{-9}$ ) der Kommunikation auf [2]. Diese und weitere Anforderungen an Funktechnologien für den Einsatz der diskreten Fertigung sind in Tabelle 1 auch im Vergleich zu anderen industriellen Anwendungen wiedergegeben.

Tabelle 1: Industrielle Anwendungen und ihre Anforderungen [2]

	Diagnose & Wartung		Diskrete Fertigung		Lager und Logistik			Prozess- automati- sierung	Augmen- ted Reality	Funktio- nale Sicher- heit
	Generell	Condi- tion Monito- ring	Generell	Motion Control	Generell	AGV	Kran- szenario			
Latenz (Sensor zu Controller zu Aktor)	> 20ms	100ms	1 ms – 12 ms	250 µs – 1 ms	> 50 ms	15 ms – 20 ms	15 ms – 20 ms	50 ms – Xs	10 ms	10 ms
Zuverlässigkeit (i.S. „erfolgreich“ innerh. der Latenzanzf. )	$1 - 10^{-4}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-9}$	$1 - 10^{-9}$	$> 1 - 10^{-2}$	$> 1 - 10^{-6}$	$> 1 - 10^{-6}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-9}$
Datenrate	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	Mbit/s – Gbit/s	kbit/s
Paketgrößen	> 200 Byte	1 – 50 Byte	20 – 50 Byte	20 – 50 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte	< 80 Byte	> 200 Byte	< 20 Byte
Reichweiten (zw. komm. Geräten)	< 100 m	100 m – 1 km	< 100 m	< 50 m	< 200 m	~ 2 m	< 100 m	100 m – 1 km	< 100 m	< 30 m
Bewegungs- geschwindigkeit	0 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s	< 40 m/s	< 10 m/s	< 5 m/s	Generell keine, sonst < 10 m/s	< 3 m/s	< 10 m/s
Zeitkritische Mobilitäts- unterstützung	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	ja
Gerätedichte	$0,33 - 3 \text{ m}^{-2}$	$10 - 20 \text{ m}^{-2}$	$0,33 - 3 \text{ m}^{-2}$	$< 5 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	$10.000 / \text{Fabrik}$	$> 0,03 - 0,02 \text{ m}^{-2}$	$> 0,03 - 0,02 \text{ m}^{-2}$
Energieeffizienz	n/a	10 Jahre	n/a	n/a	n/a	< 8h	n/a	10 Jahre	1 Tag	n/a
Lokalisierungs- genauigkeit	< 50 cm	< 50 cm	n/a	n/a	< 1 cm	< 5 cm	< 10 cm	< 50 cm	n/a	< 50 cm

Es existiert eine Vielzahl von Funktechnologien für Anwendungen aus dem Bereich der Kommunikationstechnik, die prinzipiell auch im industriellen Umfeld einsetzbar sind. Allerdings werden insbesondere die Anforderungen an Latenz und Zuverlässigkeit in vielen industriellen Szenarien nicht erfüllt. Verfügbare standardisierte Technologien für das industrielle Umfeld reichen gegenwärtig für (zeit-)kritische Anwendungen nicht aus [2], siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Eignung verfügbarer Standards für den Einsatz für industrielle Anwendungen [2]

	Diagnose & Wartung		Diskrete Fertigung		Lager und Logistik			Prozess- automati- sierung	Augmen- ted Reality	Funktio- nale Sicher- heit
	Generell	Condition Monito- ring	Generell	Motion Control	Generell	AGV	Kran- szenario			
802.11 (WLAN, IWLAN)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
802.15.1 (Bluetooth, WISA)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
802.15.4 (Zigbee, ISA100.11a, Wireless-HART)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2G (GSM)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3G (UMTS)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4G (LTE R.13)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

- Anforderungen können nicht erfüllt werden
- Anforderungen können je nach Anwendungsfall erfüllt werden
- Anforderungen können erfüllt werden

Lediglich die Standards Bluetooth und WISA erfüllen die Anforderungen für den Einsatz in der diskreten Fertigung, wenngleich nur bedingt in Abhängigkeit vom Anwendungsfall (siehe Tabelle 2) und in unterschiedlichem Umfang. Beide erfordern eine individuelle Frequenzkoordination im 2,4 GHz-ISM-Band (Industrial, Scientific und Medical Band).

Anforderungen bezüglich Verfügbarkeit und Robustheit dedizierter Funkanwendungen für industrielle Produktionsumgebungen in einem ISM-Band implizieren unmittelbar Fragestellungen zur Koexistenz bezüglich anderer Funk-Anwendungen. In Abbildung 2-1 ist schematisch die Belegung des 2,4 GHz-Bands, wie sie in der Automation mit einer Reihe von typischen Funksystemen vorgefunden werden kann [3], hinsichtlich Signalstärke bzw. Sendeleistung, Frequenzbelegung und zeitlichem Verlauf dargestellt.

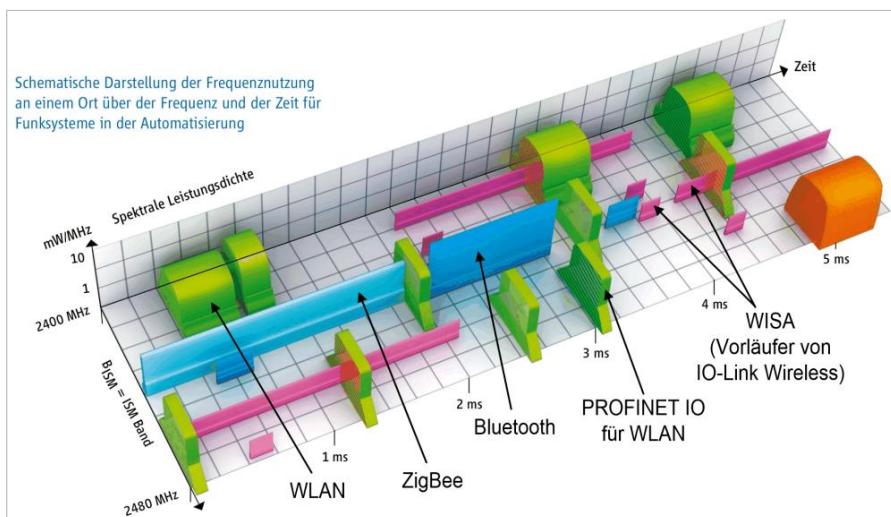


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Frequenznutzung

Es besteht offenkundig ein Bedarf an einer Komponente, die eine autonome und zeitnahe Adaption zeitlicher veränderlicher Belegungen des 2,4 GHz-Bands durch in diesem Band operierende Systeme ermöglicht. Eine solche Komponente ist für Echtzeit-Funksysteme essentiell, da in Zukunft eine steigende Anzahl von drahtlosen Systemen in der industriellen Produktion eingesetzt werden wird und die Nutzung mobiler Devices an Bedeutung gewinnt [4].

Im Besonderen für KMUs sind zudem Aspekte der Akzeptanz und der »Usability« moderner drahtloser Sensorsysteme von Bedeutung. Der Terminus »Usability« umfasst hier die Umsetzbarkeit von Plug-and-Play- beziehungsweise Plug-and-Produce-Konzepten in der Produktion, die transparente Zustands-Präsentation eines drahtlosen Systems (»Quality of Service«, aktuell belegte Bereiche im 2,4 GHz-Band, etc.) sowie die praktikable Umsetzung etwa der VDI/VDE-Richtlinie 2185 [5] zum Koexistenz-Management von Funklösungen.

Die oben beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich der Koexistenz von Funksystemen in industriellen Produktionsumgebungen sowie hinsichtlich der Akzeptanz und der »Usability« solcher Systeme hatten die Beantragung des vorliegenden Forschungsvorhabens für einen adaptiven Medienzugriff für Echtzeit-Funksysteme motiviert.

## **2.2. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU**

Die deutsche Branche für Sensorik und Messtechnik hält knapp 30 Prozent des Weltmarkts. Sie umfasst in Deutschland rund 2500 Unternehmen, 85 Prozent davon sind KMUs. Das Umsatzvolumen der in Deutschland produzierenden Unternehmen wächst jährlich um rund 2,7 Mrd. Euro [1].

Intelligente vernetzte Sensoren stellen für die Umsetzung von Industrie 4.0 eine wesentliche Voraussetzung dar. In der Produktion lässt sich durch die systematische und automatisierte Erfassung, Auswertung und Verarbeitung von Maschinen-, Anlagen- und Produktdaten (z. B. durch den Einsatz vernetzter Sensorsysteme) ein virtuelles Echtzeitbild der Unternehmensabläufe erzeugen. Dies ermöglicht eine echtzeitnahe Planung und Steuerung der Produktion. Die für die Kapazitäts- und Ressourcenplanung dringend notwendigen Prozessdaten lassen sich ohne zusätzlichen manuellen Aufwand vollständig generieren. Gerade in diesem Bereich besteht beim Mittelstand dringender Handlungsbedarf [6].

In vielen Fällen stellen die in der Produktion eingesetzten Maschinen und Komponenten Produktionsdaten, Zustandsdaten, etc. nicht in hinreichendem Umfang zur Verfügung. Entsprechend sind diese Maschinen mit Sensoren und einer adäquaten Vernetzung nachzurüsten, um die Potenziale von Industrie 4.0 auch in KMUs [6] zu erschließen.

Wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt sind gerade für KMUs Aspekte der Akzeptanz wie hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, einfache Installation, Handhabung und Wartung sowie Investitionsicherheit hinsichtlich drahtloser Systeme von essentieller Bedeutung. Das Forschungsvorhaben AMEIDA adressierte dezidiert diese Aspekte und leistet damit einen unmittelbaren Beitrag zur Umsetzbarkeit von Industrie 4.0 für KMU bezüglich Echtzeit-Funksysteme. Im konkreten Anwendungsfall IO-Link Wireless wurde zudem eine Ergänzung der »IO-Link Wireless System Extensions« angestrebt, um den Aspekt Investitionssicherheit im Kontext einer industriellen Umsetzung der Forschungsergebnisse zu befördern.

Von wirtschaftlicher Bedeutung war zudem, dass die Entwicklung einer Komponente für den adaptiven Medienzugriff auf Basis kostengünstiger am Markt verfügbarer Hardware-Komponenten als Technologiebasis erfolgte. Dies stellte sicher, dass eine industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse nach Projektende ebenfalls auf Basis kostengünstiger Komponenten erfolgen kann.

Zu dem potenziellen Nutzerkreis der adressierten Innovation zählen KMUs als Anwender von Echtzeit-Funksystemen in der automatisierten Produktion ebenso wie KMUs als System- und Komponentenanbieter in der Mess-, Sensor- und Automatisierungstechnik. Systeme und Komponenten auf Basis der »IO-Link Wireless System Extensions«, erweitert um eine adaptive Komponente, können einen signifikanten Beitrag zur Festigung der Marktposition in den Bereichen Sensor- und Automatisierungstechnik leisten.

### **3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz**

#### **3.1. Stand der Forschung und Entwicklung**

##### **3.1.1. Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik**

Im Kontext der Umsetzung von Industrie 4.0 kommen zunehmend Technologien der Funkvernetzung im 2,4 GHz-Band zum Einsatz, da sich mit diesen kostengünstig Netzwerke aufbauen lassen und dieses ISM-Band mit nur geringen Einschränkungen weltweit lizenzenfrei verfügbar ist. Hierfür sind Drahtlos-Technologien erforderlich, die strenge Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Latenzzeit und Echtzeitfähigkeit [7] erfüllen.

Standards wie Bluetooth® und WISA® nutzen im 2,4 GHz-Band ein Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) mit 79 Kanälen und einer Kanal-Bandbreite von 1 MHz. Dies ermöglicht nicht nur einen einfachen Medienzugriff, sondern wird auch den Eigenschaften des Übertragungskanals in industriellen Automatisierungsumgebungen gerecht (Fading, Kohärenzbandbreite, etc.).

Der im Jahr 2018 veröffentlichte Standard »IO-Link Wireless System Extensions« [8] basiert wie Bluetooth® und WISA® auf IEEE 802.15.1 und erfüllt als Erweiterung des IO-Link-Standards (IEC 61131-9) die Anforderungen einer drahtlosen Datenübertragung in industriellen Anwendungen hinsichtlich Echtzeitfähigkeit (Determinismus und geringe Latenzzeit, siehe Abschnitt 3.1.3). Dieser Standard nutzt ebenfalls das 2,4 GHz-Band unter Verwendung eines Frequenzsprungverfahrens für den Medienzugriff.

Die Erfüllung der Anforderungen an Funksysteme in der Automatisierungstechnik erfordert bei Nutzung des im 2,4 GHz-Bands, wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt, dedizierte Lösungen zum Koexistenz-Management mit anderen Funkanwendungen.

Gemäß der VDI/VDE-Richtlinie 2185 (»Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik«) ist Koexistenz nicht die Eigenschaft eines Funksystems, sondern ein Zustand, in dem unterschiedliche Funksysteme ihre bestimmungsgemäße Funktion erfüllen, trotz Vorhandenseins der jeweils anderen Funkanwendung. Blatt 2 (»Koexistenz-Management von Funklösungen«) VDI/VDE-Richtlinie 2185 [5] führt unter anderem aus, dass für Funkanwendungen mit hohen Echtzeit-Anforderungen ein Koexistenz-Management sicherstellen muss, dass keine Funktionsbeeinträchtigungen durch den Einfluss anderer Funkanwendungen entstehen.

Die Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0 [9] enthält Empfehlungen hinsichtlich der Koexistenz von Funkanwendungen. So wird ein unternehmensinternes Koexistenz-Management als erforderlich erachtet, um eine hohe Verfügbarkeit der stark wachsenden Anzahl an Funkanwendungen im industriellen Bereich gewährleisten zu können. Dabei sind Konzepte festzulegen, die den Koexistenz-Aspekt sowohl im Lebenszyklus eines industriellen Funkprodukts als auch im Lebenszyklus einer industriellen Funkkommunikationsanlage einbringt, wobei auch Einflüsse der Anwendung von Bedeutung sind.

Die Norm IEC/EN 62657 beschreibt ein frequenzunabhängiges Koexistenz-Management, das manuell oder automatisiert umgesetzt werden kann. Die Entwicklungen bei Software Defined

Radio (SDR) und Cognitive Radio (CR) haben das Potenzial für ein automatisiertes Koexistenz-Management auch über Funktechnologiegrenzen hinweg [9].

### **3.1.2. Adaptiver Medienzugriff**

Das Thema Koexistenz im 2,4 GHz-Band findet im Bereich eingeführter Funkstandards Berücksichtigung. So ermöglichen etwa die Bluetooth-Spezifikationen ein sogenanntes »Adaptive Frequency Hopping« [10], also ein adaptives Frequenzsprungverfahren. Ein Bluetooth-Master und Bluetooth-Slaves in einem Piconet überwachen das Frequenzband bei bestehender Verbindung (»Connection State«), um belegte Kanäle oder Kanäle geringer Dienstgüte zu identifizieren und als »Bad Channels« zu kennzeichnen. Diese Kanäle bleiben dann beim »Frequency-Hopping« ungenutzt.

In den Bluetooth-Spezifikationen ist nicht festgelegt, welche Verfahren zur Bewertung der Kanaleigenschaften zu verwenden sind. Häufig werden Indikatoren wie ein Signalstärke-Indikator (RSSI) oder die Paket- bzw. Bit-Fehlerrate bei der Übertragung für eine solche Bewertung verwendet.

Entsprechende Indikatoren sind auch in den IO-Link Wireless System Extensions spezifiziert [8]. Allerdings werden diese nicht verwendet, um »Bad Channels« automatisch aus der aktuellen »Frequency Hopping«-Tabelle zu entfernen. Vielmehr werden diese Indikatoren genutzt, um bei Erreichen eines Schwellenwerts einen »Event« auszulösen, der den Anwender hinsichtlich aktueller Beeinträchtigungen der Dienstgüte informiert.

Die oben beschriebenen Indikatoren zur Bewertung und Adaption der Verbindungsqualität haben den Vorteil, dass sich diese vergleichsweise einfach umsetzen lassen. Ein Nachteil ist, dass die Indikatoren eine bereits bestehende Verbindung voraussetzen und somit bei der Inbetriebnahme eines Funksystems keinerlei Hinweise auf koexistierende Nutzer im gleichen ISM-Band liefern. Ein weiterer Nachteil ist, dass im laufenden Betrieb eines Funksystems der kausale Zusammenhang zwischen einer Kanalbelegung durch andere Nutzer und einer hohen Paketfehlerrate auf einem oder mehreren Funkkanälen auf Seiten eines Anwenders nicht erkennbar ist.

Kognitive Methoden für einen adaptiven Medienzugriff beziehungsweise für Koexistenz-Optimierung sind in der Literatur umfangreich beschrieben. Jedoch sind Anforderungen industrieller Anwendungen wie minimale Latenz und strikter Determinismus vergleichsweise selten Gegenstand der Betrachtungen. Ausnahmen finden sich unter anderem in [11] und [12]. Ferner werden in der Regel Software Defined Radio Systeme mit einer entsprechend leistungsfähigen Hardware-Plattform verwendet. Deren vergleichsweise hohe Kosten lassen sich rechtfertigen, wenn ein zentrales kooperatives Koexistenz-Management für unterschiedliche industrielle Funksysteme implementiert werden soll und die betrachteten Funksysteme diese Form des Koexistenz-Managements auch technologisch unterstützen. Im hier adressierten Anwendungsfall IO-Link Wireless übersteigen diese Kosten den vertretbaren Rahmen deutlich (siehe Abschnitt 3.2).

### **3.1.3. IO-Link Wireless**

IO-Link ist eine weltweit standardisierte IO-Technologie (IEC 61131-9) zur Kommunikation mit Sensoren und Aktoren, sie basiert dabei auf dem bekannten 3-Leiter Sensor und Aktor Anschluss. Ein IO-Link System besteht grundsätzlich aus den Komponenten:

- IO-Link Master
- IO-Link Device (z. B.: Sensoren, RFID-Reader, Ventile, I/O-Module, etc.)
- Ungeschirmte 3- bzw. 5-Leiter-Standardleitungen

- Engineering-Tool (»Port and Device configuration tool«) zur Projektierung und Parametrierung von IO-Link-Systemen

IO-Link Wireless ist eine Erweiterung des IO-Link Standards, die die drahtlose Kommunikation zwischen einem Master und einem Device ermöglicht.

In den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] ist die drahtlose Kommunikation zwischen der Luftschnittstelle eines sogenannten »W-Master« und der Luftschnittstelle eines oder mehrerer sogenannter »W-Devices« spezifiziert (siehe Abbildung 3-1, rechts).

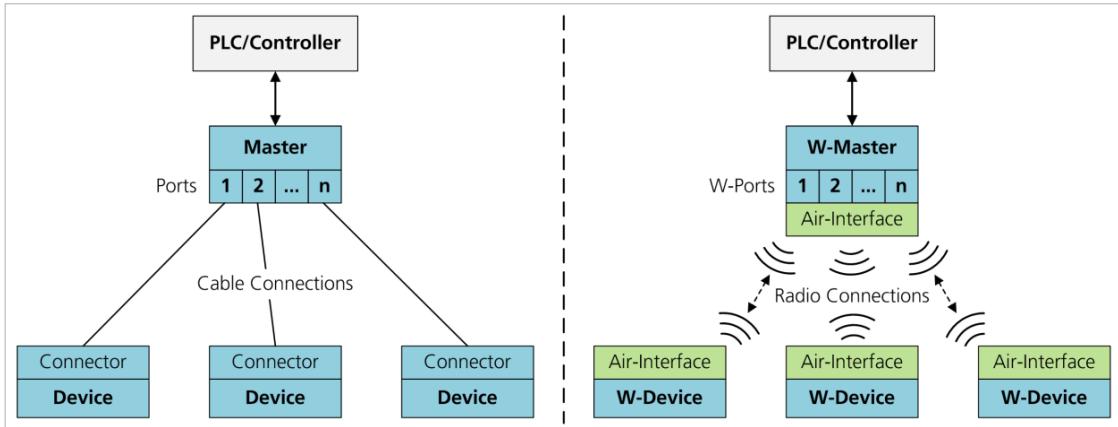


Abbildung 3-1: Topologie von IO-Link und IO-Link Wireless [8]

Die Datenübertragung zwischen einer W-Master (»Downlink«) und einem oder mehreren W-Devices (»Uplink«) erfolgt zeitlich getrennt innerhalb eines sogenannten »W-Frame« (Time Division Duplex, siehe Abbildung 3-2).

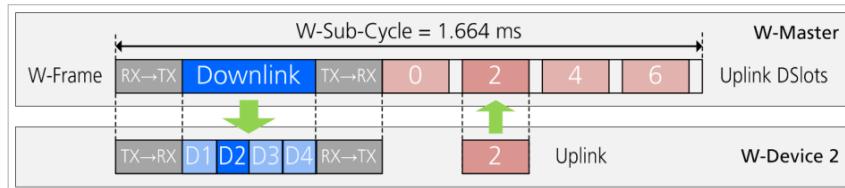


Abbildung 3-2: IO-Link Wireless – W-Sub-Cycle [8]

In IO-Link Wireless wird ein Frequency-Hopping-Verfahren zur Nutzung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im 2,4 GHz-Band bei einer maximalen Sendeleistung von 10 mW verwendet [8]. Es sind 80 Frequenzkanäle mit einer Bandbreite von etwa 1 MHz definiert. Die Kanäle 3 bis 78 ( $f_3 = 2.403$  MHz bis  $f_{78} = 2.478$  MHz) werden für den Datenaustausch zwischen einem W-Master und den assoziierten W-Devices genutzt (siehe Abbildung 3-3, blaue Kennzeichnung). Die Kanäle 1 und 80 ( $f_1 = 2.401$  MHz bzw.  $f_{80} = 2.480$  MHz) sind für den Austausch von Konfigurationsparametern und den initialen Netzaufbau reserviert (siehe Abbildung 3-3, grüne Kennzeichnung).

Die Auswahl eines Datenkanals erfolgt gemäß einer von Parametern (Master-ID, Track-Nummer, etc.) abhängigen »Frequency Hopping«-Tabelle [8]. Zu Beginn jedes Übertragungsrahmens (»W-Frame«, siehe Abbildung 3-2) erfolgt jeweils ein Frequenzwechsel. Seitens des Anwenders besteht die Möglichkeit, die nutzbaren Datenkanäle entsprechend einer »Blacklist« zu beschränken. Diese Maßnahme trägt zu einer Verbesserung der Koexistenz von IO-Link Wireless mit anderen drahtlosen Kommunikationssystemen bei (vergleiche Abschnitt 3.1.1. Ein Beispiel hierfür ist Abbildung 3-3 dargestellt. Das spezifizierte Verfahren für ein Blacklisting ist

jedoch statisch und wird dynamischen Änderungen der Frequenzbelegungen im 2,4 GHz-Band nicht gerecht.

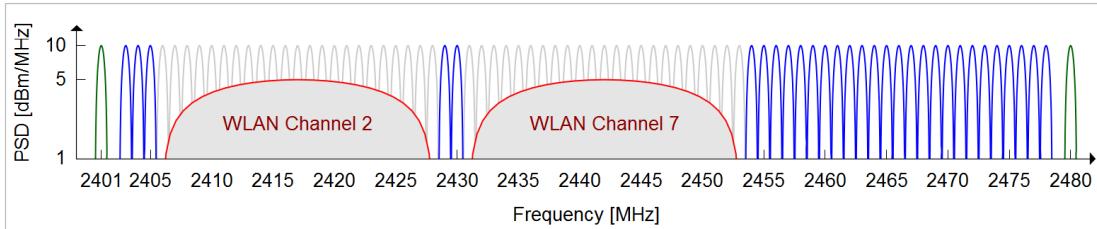


Abbildung 3-3: »Blacklisting« bezüglich der WLAN-Kanäle 2 und 7

Ein W-Master und ein W-Device tauschen Bestätigungen zum korrekten Empfang von Telegrammen aus. Im Fall eines nicht bestätigten Empfangs initiiert der W-Master bis zu zweimal eine »Retransmission«, wobei jeweils ein Kanalwechsel erfolgt. Entsprechend sind sogenannte »W-Cycle« definiert, die sich stets aus drei »W-Sub-cycle« (siehe Abbildung 3-2) zusammensetzen. Die zeitliche Dauer eines W-Cycle von 5 Millisekunden ist zugleich die deterministische Latenzzeit von IO-Link Wireless.

### 3.2. Arbeitshypothese

Das Forschungsziel des Vorhabens war die Verbesserung der Koexistenz-Eigenschaften von Echtzeit-Funksystemen in der Automation mittels einer Komponente für einen adaptiven Medienzugriff im heterogen genutzten 2,4 GHz-Band. Es wurde ein automatisches Koexistenz-Management angestrebt, das den Echtzeitanforderungen entsprechender drahtloser Systeme genügt und aus Sicht des Anwenders die größtmögliche Unterstützung bei der Installation und im Betrieb solcher Systeme gewährleistet.

Das Konzept basierte auf kognitiven Methoden, die in der Telekommunikation etwa für den Zugriff auf sogenannte »White Spaces« Verwendung finden [13]. Hierunter werden Frequenzbereiche verstanden, die lizenzierten Nutzern zugeordnet sind (»Primary User«) von diesen jedoch nicht zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort genutzt werden und entsprechend nicht lizenzierten Nutzern (»Secondary User«) zur Verfügung stehen.

Das Konzept der Nutzerklassifizierung wurde auf das hier adressierte Anwendungsszenario drahtloser Echtzeit-Systemen im 2,4 GHz-Band wie folgt übertragen. WLAN-Nutzer im 2,4 GHz-Band werden als »Primary User« eingestuft, die Nutzer eines Echtzeit-Funksystems in der hier diskutierten Ausprägung als »Secondary User«. Diese Zuordnung erschien gerechtfertigt, da wie in Abschnitt 2.1 dargelegt die Installation drahtloser Echtzeit-Systeme meist in bereits bestehende Produktionsanlagen erfolgt (erfolgen wird) und Eingriffe in vorhandene IT-Infrastrukturen (wie ein übergreifendes kooperatives Koexistenz-Management) mit Blick auf die Gesamtkosten möglichst vermieden werden sollten.

Der adaptive Medienzugriff seitens des »Secondary User« soll sicherstellen, dass Interferenzen zwischen »Primary User« und »Secondary User« durch Orthogonalität hinsichtlich Frequenz, Zeit und Ort bestmöglich vermieden werden.

Mittels einer kognitiven Komponente wird die Basisstation eines drahtlosen Echtzeit-Systems (der W-Master im Kontext von IO-Link Wireless) in die Lage versetzt, zu erkennen, welche Bereiche des 2,4 GHz-Bands verfügbar sind (»Spectrum Sensing«), den am besten geeigneten Frequenzbereich auszuwählen (»Spectrum Management«), übergangslos den Frequenzbereich zu wechseln (»Spectrum Mobility«) und die verfügbaren Frequenzbereiche mit anderen Basisstationen (W-Mastern) zu koordinieren (»Spectrum Sharing«).

Die Detektion verfügbarer Frequenzbereiche (»Spectrum Sensing«) ist die zentrale Funktionalität einer kognitiven Komponente für einen adaptiven Medienzugriff. Sie ermöglicht den dynamischen Zugriff auf verfügbare Frequenzbereiche und macht die Adaption zeitlicher veränderlicher Belegungen des Frequenzbands erst möglich.

Im Allgemeinen werden zum »Spectrum Sensing« in »Cognitive Radio«-Systemen breitbandige Transceiver-Modelle in Verbindung mit einem »Software Defined Radio« eingesetzt. Dies ermöglicht einerseits eine breitbandige Abtastung des Spektrums mit hoher Abtastrate, impliziert jedoch andererseits große Datenmengen, die in »Echtzeit« zu verarbeiten sind.

Die Kosten für entsprechend leistungsfähige Hardware-Plattformen erreichen in der Regel einen Bereich von mehreren Tausend Euro. Im Kontext von IO-Link Wireless beeinträchtigen solche Kosten im Vergleich zu einem herkömmlichen W-Master auf Seiten von KMUs als potenzielle Anbieter oder Anwender von IO-Link Wireless Systemen den Marktzugang oder die Investitionsbereitschaft signifikant.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Ansatz verfolgt, einen adaptiven Medienzugriff mittels »Cognitive Radio«-Methoden mit möglichst geringen Hardwareanforderungen zu realisieren. Anstelle kostenaufwendiger »Software Defined Radio«-Systeme wurden kostengünstige Hardware-Komponenten verwendet, wie sie in vielfältigen Ausprägungen im Kontext des »Internets der Dinge« eingesetzt werden. Daraus ergab sich unmittelbar die Herausforderung, den Verzicht auf leistungsfähige Hardware-Komponenten durch dedizierte algorithmische Verfahren zu kompensieren. Diese sollen gewährleisten, dass andere Nutzer des 2,4 GHz-Bands (»Primary User«) hinreichend zuverlässig detektiert und identifiziert (»Spectrum Sensing«) werden können, der bestgeeignete verbleibende Bandbereich bestimmt (»Spectrum Management«) und übergangslos adaptiert (»Spectrum Mobility«) werden kann.

Im konkreten Anwendungsfall IO-Link Wireless war neben der Entwicklung einer kognitiven Komponente zu betrachten, wie eine Umsetzung kognitiver Methoden erfolgen kann, ohne die Echtzeiteigenschaften von IO-Link Wireless zu beeinträchtigen. Hier sei stellvertretend die Neukonfiguration der Hopping-Tabellen der einzelnen W-Devices im Regelbetrieb genannt (siehe Abbildung 3-4).

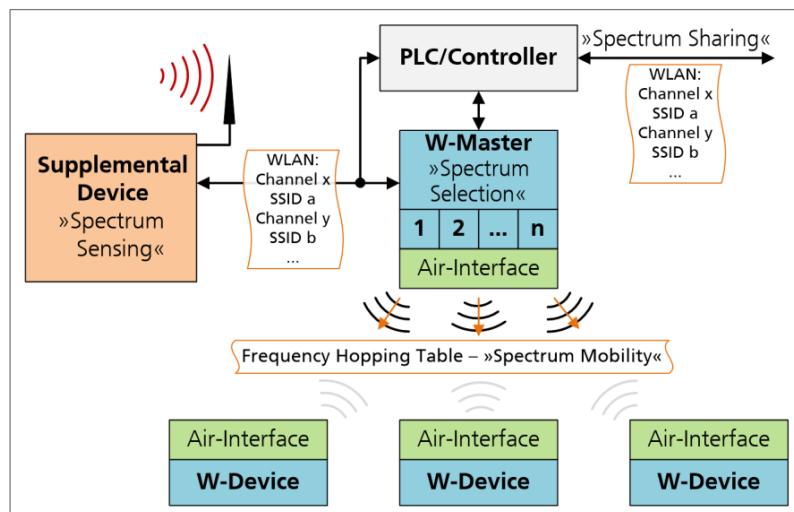


Abbildung 3-4: W-Master mit zusätzlicher Komponente für adaptiven Medienzugriff

Aus dem dynamisch veränderlichen Zugriff auf verfügbare Frequenzbereiche ergab sich die Notwendigkeit, den existierenden und in den »IO-Link Wireless Extensions« [8] spezifizierten

Mechanismen weitere zu definierende Mechanismen hinzuzufügen, um den notwendigen Austausch aktualisierter »Frequency-Hopping«-Tabellen zwischen einem W-Master und den assoziierten W-Devices zeitnah zu gewährleisten (»Spectrum Mobility«).

Weiterhin war eine kooperative Komponente zum Informationsaustausch zwischen W-Mastern zu entwickeln (»Spectrum Sharing«), um die Orthogonalität von Hopping-Sequenzen benachbarter Systeme und optimale Mehrfachnutzung von Funkkanälen gemäß des Zell-Konzepts von IO-Link Wireless (siehe Abbildung 3-5) sicherzustellen.

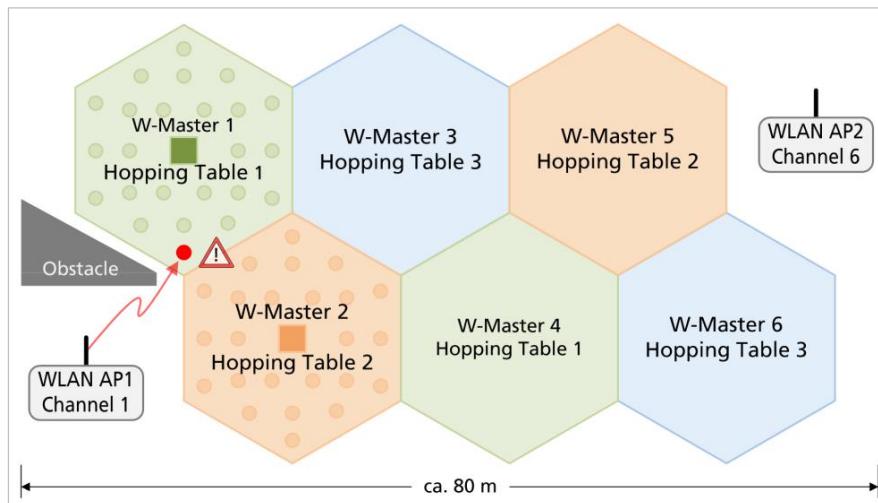


Abbildung 3-5. Zell-Konzept für IO-Link Wireless

Dies ermöglichte zugleich eine Lösung des »Hidden Station«-Problems. Dieses Problem tritt auf, wenn ein W-Master (etwa W-Master 1 in Abbildung 3-5) aufgrund von Ausbreitungsbedingungen (Abschattung, etc.) nicht in der Lage ist, die durch einen WLAN Access Point belegten Frequenzbereiche zu detektieren (WLAN AP1 in Abbildung 3-5). Am Ort eines assoziierten W-Devices, das sich in einer »Line of Sight«-Position zu diesem Access-Point befindet, können jedoch Interferenzen auftreten, die die drahtlose Übertragung beeinträchtigen. Die kooperative Komponente ermöglicht hingegen ein kooperatives »Spectrum Sensing« und »Spectrum Management«.

Der verfolgte Lösungsansatz ist grundsätzlich für jedes Echtzeit-Funksystem mit einem auf Frequenz-Hopping basierten Medienzugriff nutzbar. Im konkreten Anwendungsfall wurde wie ausgeführt IO-Link Wireless adressiert, um eine zeitnahe Umsetzung der FuE-Ergebnisse zu befördern. Die Erarbeitung einer Ergänzung der IO-Link Wireless Extensions hinsichtlich eines adaptiven Medienzugriffs, sowie die Erprobung eines entsprechenden Systems in einer repräsentativen industriellen Umgebung (»Proof of Concept«) waren entsprechend ebenfalls Ziele des Forschungsvorhabens.

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die in den Arbeitsschritten gemäß Forschungsantrag durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt.

### 4.1. Arbeitspaket 1 – Anforderungsanalyse

Gegenstand der Arbeiten war die Analyse sowie die Ermittlung der systemischen Anforderungen. Hierzu wurden unter anderem Literaturrecherchen und die Identifikation aktueller Richtlinien und harmonisierter Normen (z.B.: VDI/VDE, Richtlinie 2185, Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik; EN 300 328 - Wideband Transmission Systems [14]) durchgeführt. Zentraler Gegenstand des Vorhabens war die Entwicklung und Realisierung einer kognitiven Komponente für den adaptiven Medienzugriff von Echtzeit-Funksystemen für die Automatisierungstechnik im heterogen genutzten 2,4-GHz-ISM-Band.

Entsprechend wurden im Rahmen der Anforderungsanalyse funktionale Anforderungen an eine kognitive Komponente hinsichtlich der Umsetzung kognitiver Methoden abgeleitet. Wesentliche Aspekte waren hier die zuverlässige Identifizierung von WLAN-Systemen im 2,4-GHz-ISM-Band. Ziel war es, belegte Frequenz-Bereiche zu ermitteln, zu identifizieren und sofern möglich vorherzusagen.

Es wurden ferner nicht-funktionale Anforderungen ermittelt etwa hinsichtlich der Dienstgüte-Eigenschaften von Echtzeit-Funksystemen (Determinismus, Latenzzeit, Datenrate). Die Grundlage bildete hier der im Vorhaben adressierte Anwendungsfall »IO-Link Wireless« sowie die entsprechenden Spezifikationen [8].

Hinsichtlich der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Aspekte der Akzeptanz und der »Usability« drahtloser Sensorsysteme wurden diejenigen Anforderungen abgeleitet, die für die Umsetzung von Plug-and-Play- beziehungsweise Plug-and-Produce-Konzepten in der Produktion sowie für die transparente Zustands-Präsentation drahtloser Systeme (»Quality of Service«, aktuell belegte Bereiche im 2,4 GHz-Band, etc.) unabdingbar sind.

Die ermittelten Anforderungen und Randbedingungen wurden im weiteren Verlauf des Vorhabens iterativ angepasst und verfeinert. Dabei fanden auch Hinweise und Vorschläge aus dem Projektbegleitenden Ausschuss Berücksichtigung.

### 4.2. Arbeitspaket 2 – Messkampagnen

Ein wesentlicher Gegenstand der Entwicklungsarbeiten war die Durchführung und Auswertung von Messkampagnen in industriellen Produktionsumgebungen. Ziel war es hierbei, aus den Analysen entsprechender Messergebnisse hinreichend belastbare Aussagen zur Nutzung des 2,4 GHz-ISM-Bands in typischen Umgebungen der industriellen Produktion abzuleiten (Signalpegel, belegte Frequenzbereiche, zeitliche Verteilungen, etc.). Dies bildete die Voraussetzung für die Herleitung relevanter Parameter, die für die durchzuführenden FuE-Arbeiten unabdingbar waren, etwa bei der Entwicklung der kognitiven Komponenten (Arbeitspaket 4) oder den umzusetzenden Protokoll-Erweiterungen (Arbeitspaket 5). Die ausgewählten industriellen Produktionsumgebungen selbst sollten ferner der Durchführung des Proof of Concept (Arbeitspaket 7) unter realen Produktionsbedingungen dienen.

Als Messequipment für diese Messkampagnen wurde eine breitbandige Software-Defined-Radio (SDR) Plattform verwendet (siehe Abbildung 4-1: Software Radio Plattform (links); analoges Daughterboard (rechts)). Die Beschaffung einer solchen Plattform war Gegenstand des Einzelfinanzierungsplans im Antragsverfahren und wurde entsprechend bewilligt. Die Aufzeichnung und Wiedergabe ermöglichte mit gewissen Einschränkungen die Nachbildung einer repräsentativen Umgebung der industriellen Automation unter Laborbedingungen.

Für die Messkampagnen wurde folgende Parameter gewählt:

- Frequenzbereich: 2,4 GHz – 2,5 GHz
- Samplerate: 100 MS/s
- Quantisierung: 12 bit



Abbildung 4-1: Software Radio Plattform (links); analoges Daughterboard (rechts)

Die Festo AG & Co. KG, Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses, stellte der Forschungseinrichtung Fraunhofer IMS für die Durchführung der Messkampagnen eine Produktionsumgebung in der Technologiefabrik Scharnhausen zur Verfügung und ließ der Forschungseinrichtung umfassende Unterstützung zuteilwerden. In Absprache mit der Festo AG & Co. KG wurden an diesem Standort sechs Messstellen zur Durchführung der Messkampagne ausgewählt. In Abbildung 4-2 sind der Gebäudeplan sowie die Messstellen dargestellt.

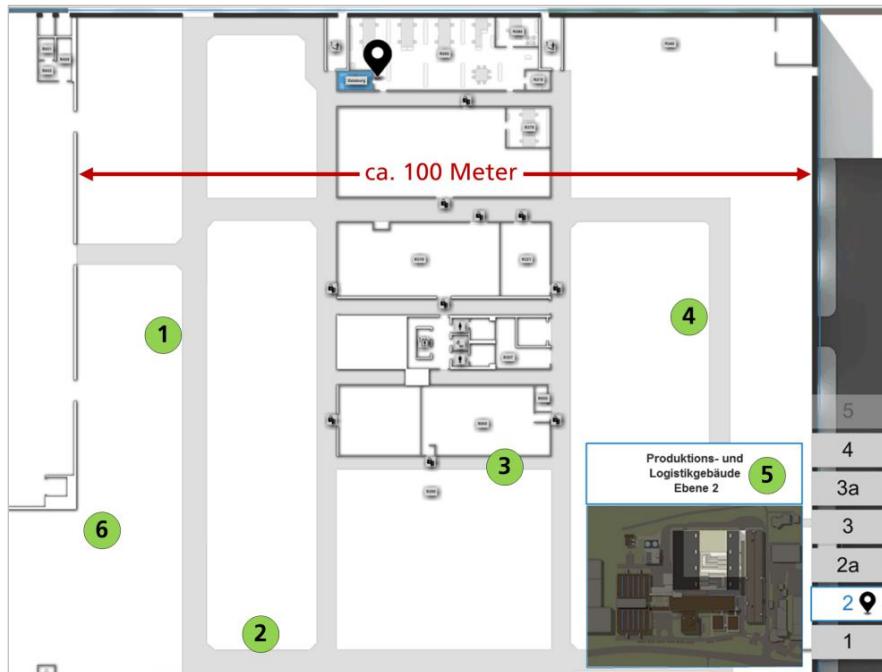


Abbildung 4-2: Messstellen Technologiefabrik Scharnhausen (Quelle: Festo AG & Co. KG)

An all diesen Messpunkten wurde das 2,4-GHz-ISM-Band (Industrial, Scientific und Medical Band) im Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz wie beschrieben mit einer Abtastrate von 100 MS/s (einhundert Millionen Abtastvorgänge pro Sekunde) und einer Auflösung von 12 Bit abgetastet. Abbildung 4-3 zeigt den Messaufbau, einen Personal Computer (PC) sowie eine Software-Defined-Radio (SDR) Plattform, an Messstelle 3.



Abbildung 4-3: Messaufbau an Messstelle 3

In Abbildung 4-4 ist ein Ausschnitt der an Messstelle 3 aufgezeichneten Messwerte als Wasserfalldiagramm dargestellt. Im oberen Teil ist das Kurzzeitleistungsspektrum der aufgezeichneten Signale wiedergegeben, im unteren Teil deren zeitlicher Verlauf. Es ist zu erkennen, dass an dieser Messstelle drei WLAN-Kanäle aktiv genutzt wurden (Kanäle 1, 6 und 11). Auch Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) Geräte waren dort aktiv (im »Advertising-Modus«).

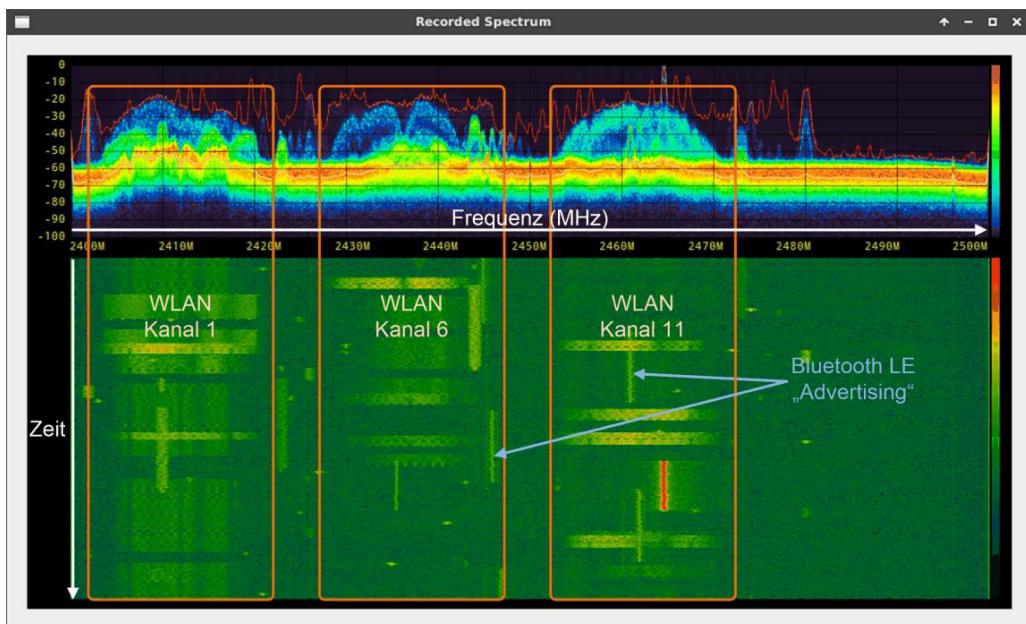


Abbildung 4-4: Messergebnisse an Messstelle 3 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm)

In Abbildung 4-5 ist ähnlicher Weise ein Ausschnitt der an Messstelle 6 aufgezeichneten Messwerte als Wasserfalldiagramm dargestellt. Es ist offenkundig, dass an dieser Messstelle zwei

WLAN-Kanäle aktiv genutzt wurden (Kanäle 1 und 11) und auch dort Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) Geräte im »Advertising-Modus« aktiv waren.

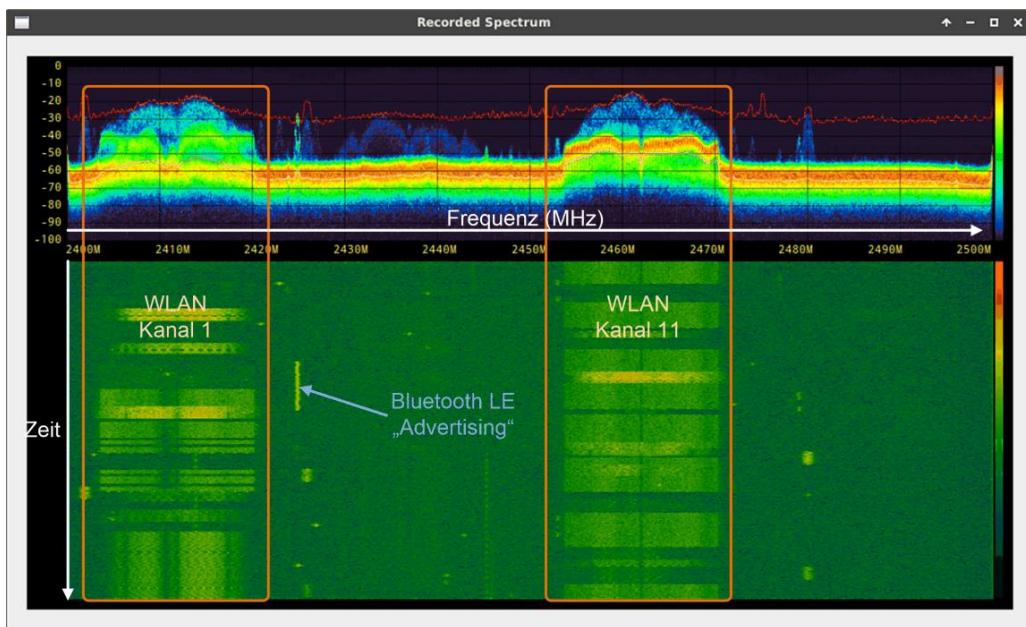


Abbildung 4-5: Messergebnisse an Messstelle 6 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm)

Insgesamt wurden im Rahmen der durchgeführten Messkampagne Messdaten mit einem Gesamtvolumen von 920 Gigabyte aufgezeichnet. Die verwendete Software-Defined-Radio (SDR) Plattform lässt sich nicht nur als »Empfänger« sondern auch als »Sender« nutzen. Entsprechend wurden die aufgezeichneten Messdaten im weiteren Verlauf des Vorhabens auch dazu verwendet, die Nutzung des 2,4-GHz-ISM-Bands in der Technologiefabrik Scharnhausen im Hochfrequenzlabor des Fraunhofer IMS »nachzustellen«, um die im Vorhaben entwickelten Komponenten hinsichtlich der intendierten Funktionalitäten zu validieren.

Wird die WLAN-Kanalnutzung der Messstellen 3 und 6 auf die in den »IO-Link Wireless System Extensions Version« [8] spezifizierte Verfahrung zum Blacklisting (vergleiche Abschnitt 3.1.3) übertragen, so ergeben sich die in Abbildung 4-6 dargestellten Kanal-Konfigurationen.

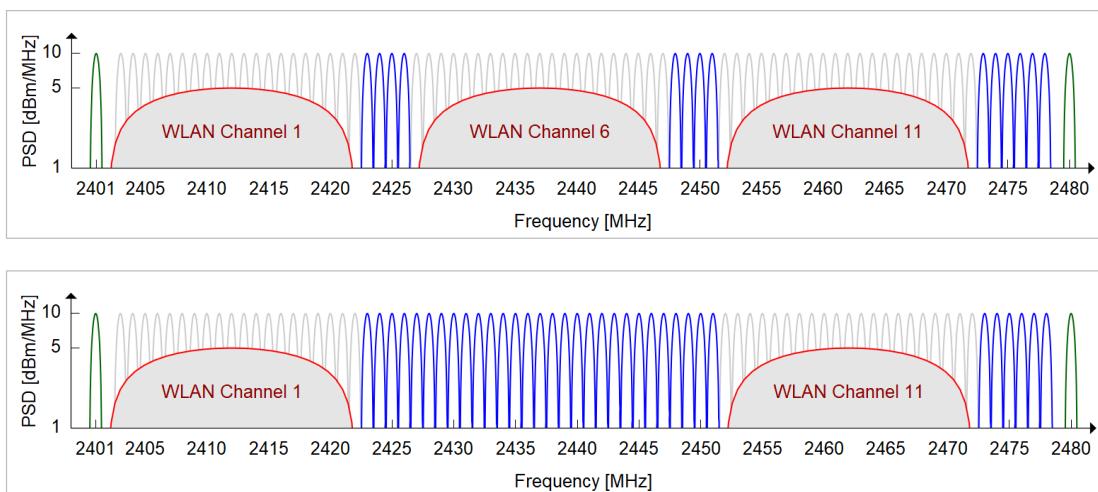


Abbildung 4-6: Kanal-Konfigurationen entsprechend Messstelle 3 (oben) und 6 (unten)

Abbildung 4-6 ist zu entnehmen, dass eine WLAN-Kanalnutzung entsprechend Messstelle 3 eine Kanal-Konfiguration impliziert, die lediglich 14 von 76 nutzbaren IO-Link Wireless Datenkanälen zulässt. In einem solchen Fall stößt ein IO-Link Wireless System an Grenzen etwa hinsichtlich der zugesicherten Latenzzeit insbesondere dann, wenn weitere Teilnehmer des 2,4 GHz-Bands die verbleibenden Frequenzbereiche nutzen. Auch ein adaptiver Medienzugriff kann in einem solchen Szenario keinen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Situation leisten.

#### 4.3. Arbeitspaket 3 – Auswahl und Evaluierung geeigneter Hardware-Komponenten

Ziel des Vorhabens war es, die zu entwickelnde kognitive Komponente mit möglichst geringen Hardwareanforderungen umzusetzen. Entsprechend wurden am Markt verfügbare kostengünstige Hardware-Komponenten zur Implementierung von Bestandteilen der kognitiven Methoden wie das »Spectrum Sensing« genutzt (siehe Abschnitt 3.2). Ziel war es hierbei, andere Nutzer des 2,4 GHz-Bands, insbesondere WLAN-Systeme, hinreichend zuverlässig zu detektieren und zu identifizieren.

Hinsichtlich der Detektion von WLAN-Systemen wurde eine Reihe von Anforderungen spezifiziert, die für die Auswahl geeigneter Hardware-Komponenten von Bedeutung sind. So muss es ein entsprechendes Hardware-System ermöglichen, erkannte WLAN-Systeme hinreichend umfassend zu beschreiben. Dazu zählen der verwendete WLAN-Standard (IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g oder IEEE 802.11n), die Eigenschaften gesendeter Datenpakete (Anzahl, Länge), die Sendeleistung oder etwa die Nutzungsdauer.

Zur Evaluierung potenziell geeigneter Komponenten wurden Untersuchungen sowohl im Laborumfeld als auch im Büroumfeld der Forschungseinrichtung durchgeführt. Als Hardware-Komponenten wurde ein Einplatinen-Computer der *Raspberry Pi Foundation* sowie ein separater WLAN-Adapter für das 2,4 GHz-Band verwendet (siehe Abbildung 4-7). Das Betriebssystem dieser Plattform basiert auf Linux. Entsprechend waren Kernel-Erweiterungen und Open-Source-Software-Komponenten verfügbar, die als Grundlage für eine hinreichende Erfassung von Informationen einer WLAN-Kommunikation verwendet werden konnten.

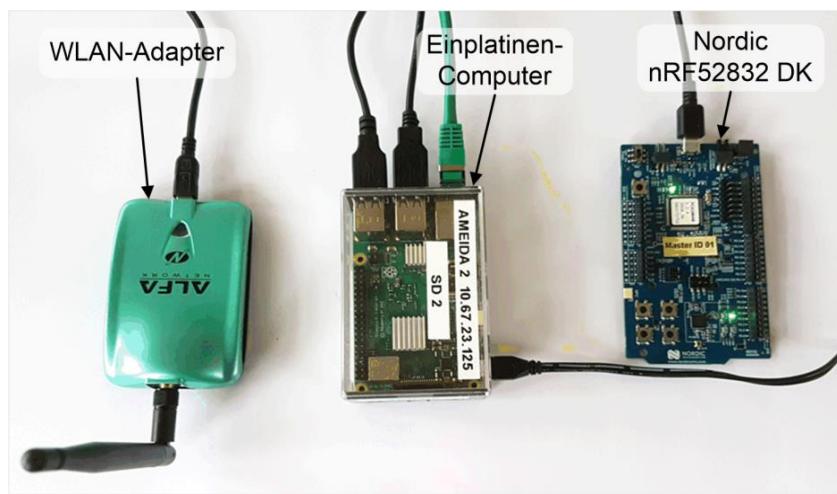


Abbildung 4-7: Foto der zur Evaluierung verwendeten Hardware-Komponenten

Mit der oben beschriebenen Kombination der Hardware-Komponenten und entsprechend erweiterter beziehungsweise angepasster Software-Komponenten zur Analyse von WLAN-Systemen wurden, wie oben beschrieben, Untersuchungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass das

beschriebene System in der Lage ist, die notwendigen Informationen bereitzustellen, wie etwa den zeitlichen Verlauf detekтирter Basisstationen (Access Points), siehe Abbildung 4-8.

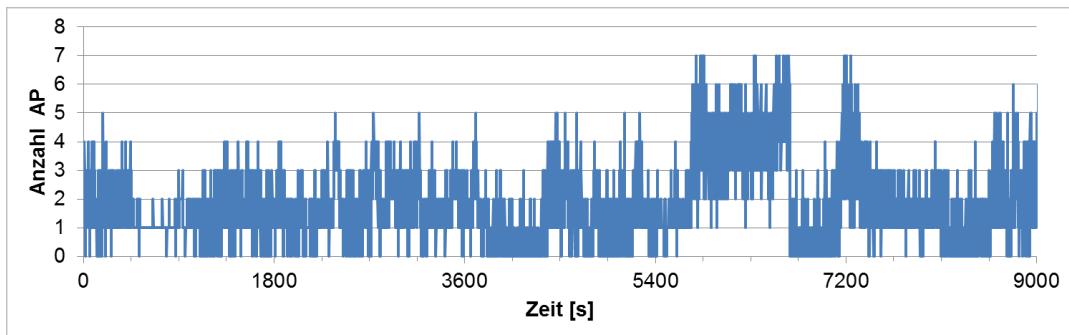


Abbildung 4-8: Zeitlicher Verlauf der Anzahl detekтирter Access Points (AP)

Die durchgeföhrten Evaluierungsarbeiten wurden durch Untersuchungen in der Technologiefabrik Scharnhausen ergänzt. Das heißt, die oben beschriebenen und dargestellten Hardware-Komponenten wurden als Vorstufe eines »Supplemental Device« ebenfalls an den beschriebenen Messpunkten (siehe Abbildung 4-2) in Betrieb genommen und die damit gewonnenen Datensätze aufgezeichnet und ausgewertet.

In Abbildung 4-9 ist die aus den aufgezeichneten Datensätzen abgeleitete Kanal-Nutzung der an den unterschiedlichen Messstellen erfassten Zugangspunkte bezüglich der genutzten WLAN-Kanäle 1 bis 13 dargestellt. Unter dem Begriff Zugangspunkt sind Geräte wie Access-Points, Router und Repeater für WLAN-Systeme zusammengefasst.

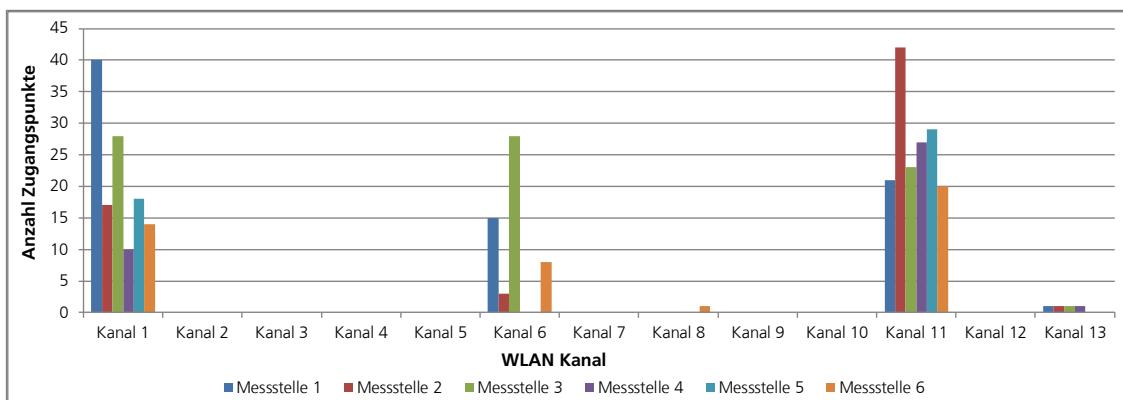


Abbildung 4-9: Ermittelte WLAN Kanal-Belegung durch Zugangspunkte an den Messstellen

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass vor Ort überwiegend die WLAN-Kanäle 1, 6 und 11 genutzt wurden. Dabei ist anzumerken, dass die Anzahl der Zugangspunkte in einem WLAN-Kanal nicht notwendigerweise mit der Intensität der Frequenzbandnutzung in diesem WLAN-Kanal korreliert. Neben der Anzahl der Zugangspunkte wurden auch deren Metadaten erfasst, wie MAC-Adresse, SSID, unterstützte Datenraten, Kanal-Bandbreite oder verwendeter Sicherheitsstandard.

#### 4.4. Arbeitspaket 4 – Kognitive Komponente

Das unter anderem bei kognitiven Methoden in der Telekommunikation verwendete Konzept zur Nutzerklassifizierung wurde auf das hier adressierte Anwendungsszenario drahtloser Echtzeit-Systeme im 2,4-GHz-ISM-Band wie folgt übertragen. WLAN-Nutzer in diesem Band werden als »Primary User« eingestuft, die Nutzer eines Echtzeit-Funksystems, im konkreten Anwendungsfall ein IO-Link Wireless System, als »Secondary User«. Der adaptive Medienzugriff seitens des »Secondary User« sollte sicherstellen, dass Interferenzen zwischen »Primary User« und »Secondary User« durch Orthogonalität hinsichtlich Frequenz, Zeit und Ort bestmöglich vermieden werden.

Zur Umsetzung der kognitiven Komponente und der notwendigen Teilkomponenten wurde für den Anwendungsfall IO-Link Wireless das in den »IO-Link Wireless System Extensions« spezifizierte Zellkonzept erweitert, wie in Abbildung 4-10 dargestellt. Die zugrunde gelegte System-Hierarchie orientiert sich an der Automatisierungspyramide, wie sie etwa in [15] dargestellt ist.

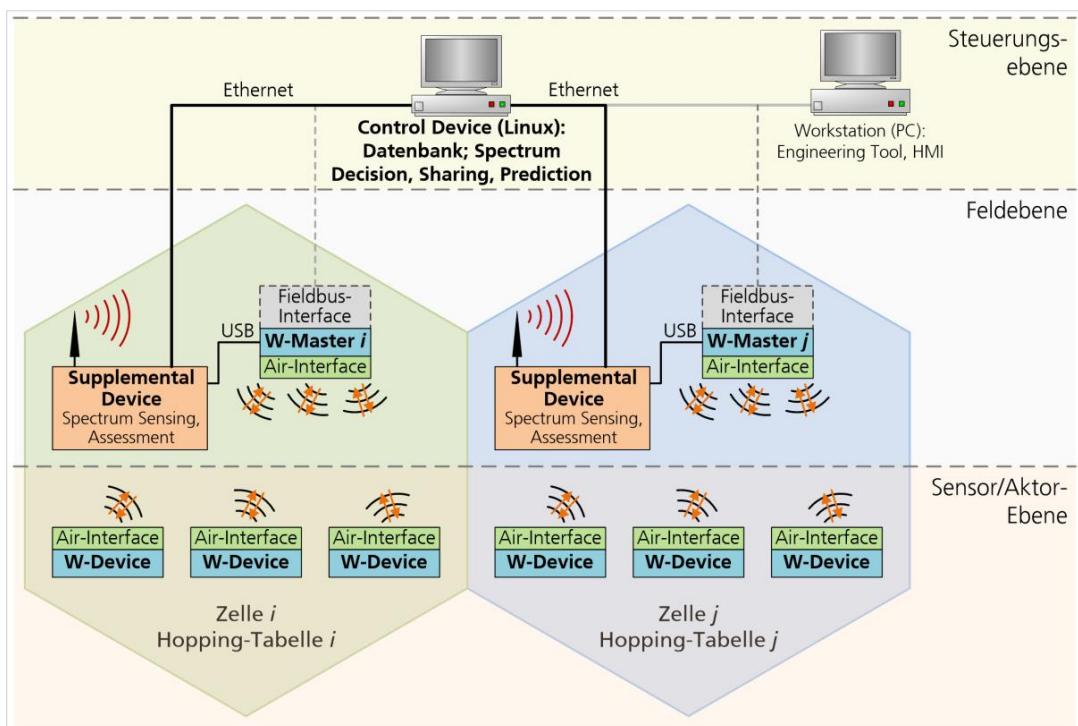


Abbildung 4-10: Kognitive Komponente – erweitertes Zellkonzept

##### 4.4.1. Feldebene

W-Master sowie Supplemental Device sind auf der Feldebene angesiedelt. Gemäß dem Zellkonzept von IO-Link Wireless spannt eine Basisstation, der sogenannte W-Master, mit den assoziierten Einheiten, den W-Devices, eine Zelle auf. In Abbildung 4-10 sind dies die Zelle  $i$  und die Zelle  $j$ . In IO-Link Wireless wird ein Frequency-Hopping-Verfahren zur Nutzung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im 2,4 GHz-Band verwendet. Das spezifizierte Verfahren zur Bestimmung der Frequency-Hopping-Tabellen stellt sicher, dass die Hopping-Sequenzen benachbarter Zellen orthogonal zueinander sind. Dieses Konzept war bei der Umsetzung der kognitiven Komponente beizubehalten.

Ein wesentliches Element ist das »Supplemental Device«, das jedem W-Master zugeordnet ist. Eine der Aufgaben eines Supplemental Device ist die Detektion von WLAN-Systemen, die in einer Zelle die für IO-Link Wireless verfügbaren Spektralbereiche im 2,4-GHz-ISM-Band belegen.

Dazu stellt ein Supplemental Device folgende Funktionen bereit:

- Spectrum Sensing (siehe auch Abschnitt 3.2):  
Dies umfasst die Ermittlung von:
  - SSID: Service Set Identifikator;
  - MAC(-Adresse): Hardware-Adresse eines Netzwerkadapters;
  - 802.11 Standard-Version;
  - verwendete Bandbreite (in der Regel 20 MHz, 22 MHz oder 40 MHz);
  - verwendeter Sicherheitsstandard (WPA2, etc.);
  - aktuell verwendeter Kanal,
  - Anzahl und Länge der empfangenen bzw. gesendeten Datenpakete
  - durchschnittliche Empfangsleistung (RSSI-basiert).

Die auf diese Weise ermittelten Informationen werden dem Control Device auf der Steuerungsebene zugeführt. Dort erfolgt die Bestimmung verfügbarer IO-Link Wireless Kanäle beziehungsweise die Bestimmung der nicht zu verwendenden IO-Link Wireless Kanäle für jeden W-Master und damit für jede Zelle (»Blacklisting»).

- Kommunikation mit der Steuerungsebene:

Diese umfasst sowohl die Übertragung der mittels »Spectrum Sensing« ermittelten Informationen, als auch den Abruf der aktuellen auf Seiten des angeschlossenen W-Master nicht zu verwendender IO-Link Wireless Kanäle (»Blacklisting»).

- Kommunikation mit dem W-Master:

Die Kommunikation mit dem W-Master ist in zwei Schritte gegliedert. Zunächst erfolgt die Abbildung der nicht zu verwendenden IO-Link Wireless Kanäle auf eine binär codierte Zeichenfolge (entsprechend [8]) und anschließend die Übertragung dieser Zeichenfolge an den angeschlossenen W-Master.

#### 4.4.2. Steuerungsebene

Das Control Device ist die zentrale, zell-übergreifende Koordinierungsinstanz des AMEIDA Systems (siehe Abbildung 4-10). Dem Control Device sind folgende Aufgaben zugeordnet:

- Zentrale Datenhaltung:

Auf Seiten des Control Device erfolgt die Speicherung sowohl aller von den angeschlossenen Supplemental Devices übertragenen Informationen bezüglich des Spectrum Sensing sowie die Bereitstellung des ermittelten Blacklistings für die jeweiligen IO-Link Wireless-Zellen. Die Datenhaltung erfolgt in Form einer relationalen Datenbank.

- Zentrale Erstellung des Blacklistings:

Auf Grundlage der »Spectrum Assessment«-Daten wird für jede Zelle das jeweilige Blacklisting bestimmt. Dazu erfolgt zunächst auf Basis der seitens der Supplemental Device übermittelten WLAN-Nutzung die Abbildung auf eine entsprechende Nutzung von IO-Link Wireless Kanälen. Hierbei wird die »Transmit Spectrum Mask« den Standards 802.11 zugrunde gelegt [16], siehe Abbildung 4-11. Vereinfachend wird hier angenommen, dass im Bereich von  $\pm 9$  MHz um die Mittenfrequenz (Center Frequency,  $fc$  in Abbildung 4-11) mit maximal zulässiger Leistung abgestrahlt wird, in einem Bereich von  $\pm 10$  MHz von der Mittenfrequenz mit der halben Leistung abgestrahlt wird und im Bereich von  $\pm 11$  MHz von der Mittenfrequenz die abgestrahlte Leistung vernachlässigt werden kann. Die Abbildung auf der WLAN-Nutzung auf IO-Link Wireless Kanäle erfolgt mittels auf dem Control-Device implementierter Software-Komponenten.

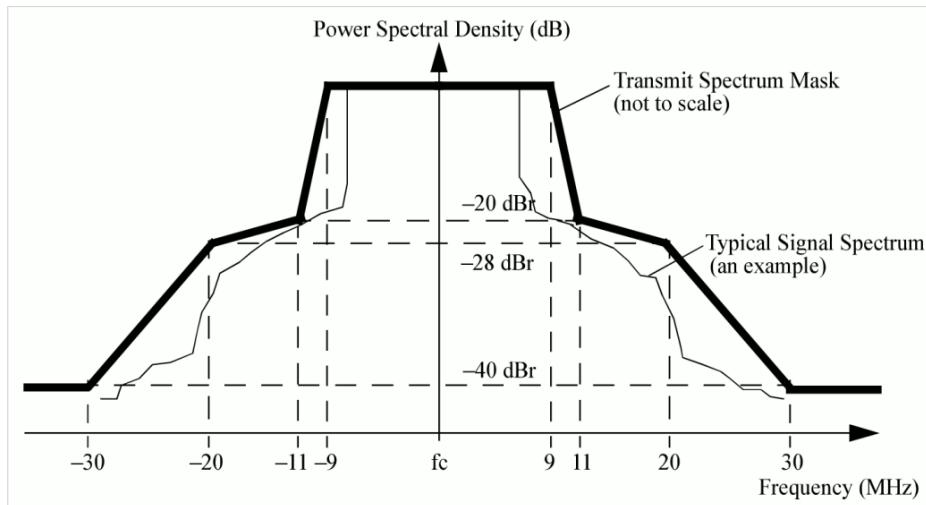


Abbildung 4-11: Transmit Spectrum Mask for 20 MHz Transmission [16]

Die Berechnung der Blacklistings erfolgt dynamisch unter Verwendung aller aktuell verfügbaren Detektionsergebnisse (Spectrum Sensing). Eine Aktualisierung des in einem System verwendeten Blacklistings wird durch das Control Device initiiert.

- Visualisierung von Diagnose-Informationen

Das Control Device bereitet folgende Klassen von Informationen zur Visualisierung auf:

- Aktueller Systemzustand:  
Detektionsergebnis aus dem Spectrum Assessment sowie die auf dieser Grundlage getroffenen Entscheidungen des AMEIDA Systems.
- Hinweise zur Verbesserung der System-Performance  
Ein Beispiel für einen solchen Hinweis kann eine Empfehlung, ein WLAN-Netz auf einem anderen Kanal anzusiedeln, sein.

Die Visualisierung erfolgt in Form eines Webinterfaces. Die in Abbildung 4-10 als »Workstation« bezeichnete System-Komponente dient der Visualisierung und Auswertung der seitens des Control Device ermittelten Daten und Informationen.

Ein erstes Funktionsmuster bestehend aus zwei Supplemental Devices sowie einem Control Device mit implementierter MySQL-Datenbank wurde am Standort des Fraunhofer IMS (in unmittelbarer Nähe des Campus Duisburg der Universität Duisburg-Essen) von Mai 2019 bis August 2019 betrieben. Dabei wurden erfasst:

- 4.417 unterschiedliche Access Points (inklusive ÖPNV-Busse, Pkw, etc.)
- 3.901.334 Access Point Metadatensätze
- 381.239 unterschiedliche Clients (»MAC Address Randomization«)
- 1.541.892 Clients Metadatensätze

Die hierbei erzielten Ergebnisse bildeten eine Grundlage für die in Abschnitt 4.6 beschriebene Entwicklung des Funktionsmusters.

#### 4.5. Arbeitspaket 5 – Protokoll-Erweiterung

Ziel Umsetzung der Protokoll-Erweiterung für den Anwendungsfall IO-Link Wireless war die Ermöglichung des Austausches der »Frequency Hopping«-Tabellen im laufenden Betrieb von IO-Link Wireless Systemen mit hoher Agilität und unter Beibehaltung der garantierten

Zuverlässigkeit und Latenz. Die notwendigen Modifikationen der »IO-Link Wireless System Extensions« sollten dabei mit möglichst geringem Umfang umsetzbar sein.

#### 4.5.1. Untere Protokollsichten

Eine Voraussetzung zur Umsetzung der Protokoll-Erweiterung war zunächst die Implementierung der unteren Protokoll-Schichten von IO-Link Wireless. Ursprünglich war geplant, die seitens der Forschungseinrichtung bereits im Vorfeld des Vorhabens AMEIDA umgesetzte Implementierung der unteren Protokoll-Schichten von IO-Link Wireless zu nutzen. Es zeigte sich jedoch, dass ein Wechsel der wesentlichen elektronischen Komponente, des Transceivers, sinnvoll und notwendig geworden war. Die entsprechenden Mehraufwände waren aus Sicht der Forschungseinrichtung wegen des vergleichsweisen geringen Umfangs vertretbar.

Entsprechend wurde eine erneute Implementierung auf Basis eines Produkts der Firma *Nordic Semiconductor* (nRF52832, »2.4 GHz Wireless System on Chip«) durchgeführt. Die Implementierung der unteren Protokoll-Schichten sowie einiger Bestandteile der höheren Protokoll-Schichten waren notwendig, um die im Rahmen des Vorhabens zu entwickelnde Protokoll-Erweiterung zu realisieren und zu verifizieren.

Grundlage für die durchgeführten Arbeiten bildete das von der Firma Nordic Semiconductor angebotene Entwicklungs-Kit (Development Kit) für den nRF52832 (siehe Abbildung 4-12). Dieses Entwicklungs-Kit bietet neben einem dedizierten Mikrocontroller als Programmier- und Debug-Schnittstelle vielfältige weitere Schnittstellen für den Anschluss von Messequipment. Ferner verfügt das Entwicklungs-Kit über Leuchtdioden, die mittels entsprechend implementierter Software-Komponenten eine einfache unmittelbare Zustandskontrolle ermöglichen. Als Beispiel seien hier genannt: die Anzeige eines erfolgreichen Verbindungsbaus zwischen einem W-Master und einem W-Device einschließlich der Übertragung relevanter Konfigurationsdaten oder die Anzeige eines zyklischen Datenaustauschs zwischen einem W-Device und dem zugeordneten W-Master mit hoher Dienstgüte (Quality of Service).

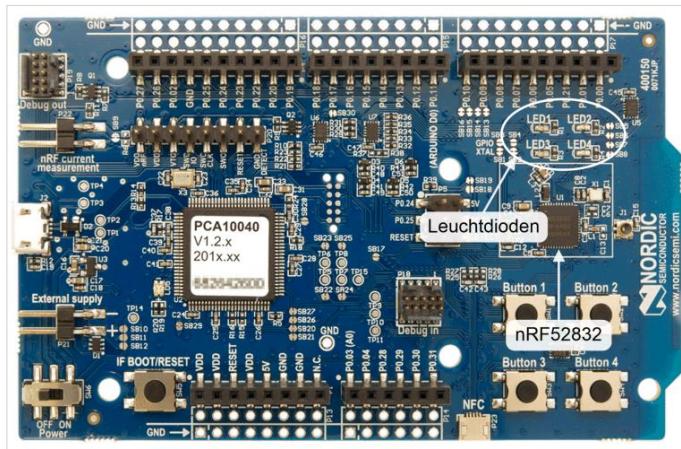


Abbildung 4-12: nRF52 Development Kit (Foto)

Der genannte Wechsel der Hardware-Komponente implizierte eine Anpassung der in den »IO-Link Wireless System Extensions« für die unteren Protokollsichten spezifizierten Zeitspannen. In Abbildung 4-13 ist der sogenannte Downlink-Konfigurations-Rahmen auf der Bitübertragungsschicht dargestellt, der Bestandteil eines »W-Frame« ist. Die zeitliche Dauer eines W-Frame (»W-Sub-cycle«) beträgt bei der umgesetzten Implementierung technisch bedingt 1816  $\mu$ s, spezifiziert sind 1664  $\mu$ s. Diese Abweichung beeinträchtigte nicht die Erreichung der Vorhabenziele, da etwa die Echtzeiteigenschaften nicht tangiert wurden.

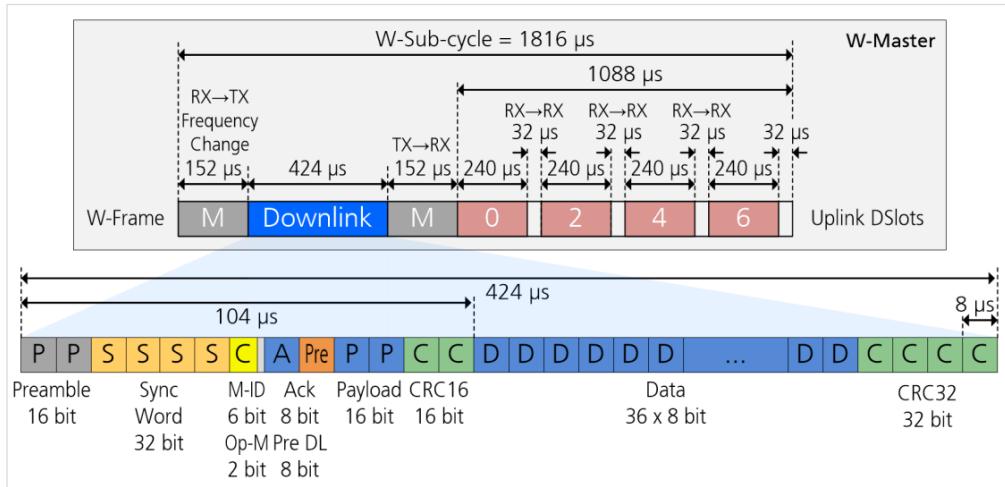


Abbildung 4-13: Downlink-Konfigurations-Rahmen auf der Bitübertragungsschicht

In Abbildung 4-14 ist der gemessene zeitliche Verlauf der Beginn eines »Downlink-Rahmens« nach Demodulation im Basisband darstellt. Dazu waren die relevanten Komponenten der unteren Protokoll-Schichten auf einem nRF52832-System implementiert worden. Das entsprechend modulierte 2,4-GHz-Signal wurde über eine Antenne abgestrahlt, mit dem zu Verfügung stehenden Messequipment aufgezeichnet, demoduliert und ins Basisband übertragen.

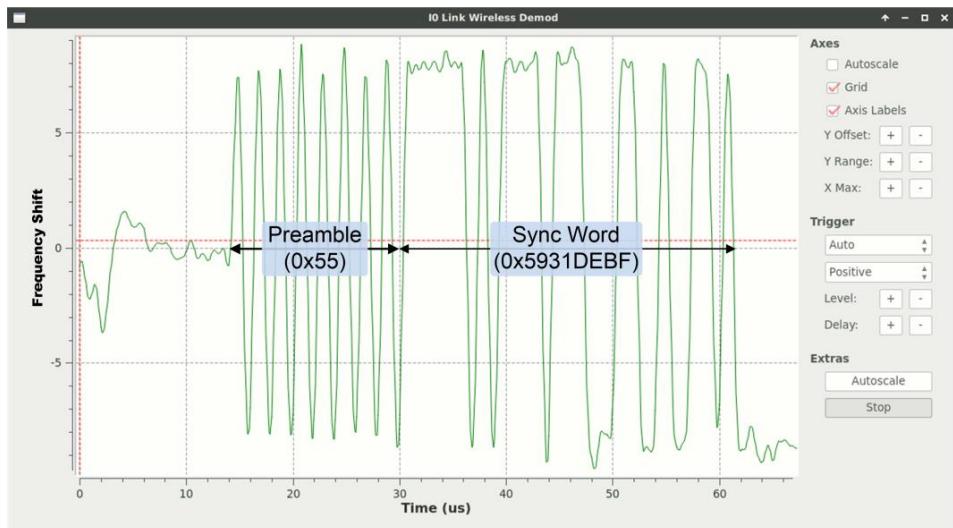


Abbildung 4-14: Gemessener Signalverlauf (nach Demodulation im Basisband)

Der dargestellte, mittels eines Software-Radio-Systems aufgezeichnete, zeitliche Verlauf des von einem nRF52832-System gesendeten und demodulierten Signals, repräsentiert den Beginn des oben beschriebenen Downlink-Rahmens. Besonders deutlich ist die Präambel zu erkennen. Der Hexadezimalwert 0x55 entspricht dem Binärwert 01010101, der bei dem von IO-Link Wireless verwendeten Modulationsverfahren (»Frequency Shift Keying«) einer entsprechenden alternierenden Frequenzverschiebung entspricht.

#### 4.5.2. Existierende Mechanismen

Mittels des Downlink-Konfigurations-Rahmens übermittelt ein W-Master gemäß der »IO-Link Wireless System Extensions« [8] die aktuellen »Frequency Hopping«-Tabellen an die assoziierten W-Devices. Dazu werden die »Data«-Felder im Downlink genutzt, siehe Abbildung 4-13.

In den »IO-Link Wireless System Extensions Version« sind zwei Konfigurationskanäle definiert (2,401 GHz bzw. 2,480 GHz, vergleiche Abschnitt 3.1.3), die an Stelle des aktuellen Eintrags in einer »Frequency Hopping«-Tabelle verwendet werden, siehe Abbildung 4-15.



Abbildung 4-15: Verwendung der Konfigurationskanäle [8]

Grundsätzlich sind die Konfigurationskanäle für die Übertragung von Konfigurationsparametern und den Netzaufbau reserviert. Letzteres meint beispielsweise die Anmeldung eines »neuen« W-Device an einen W-Master (»Pairing«). In einem solchen Fall wechselt ein W-Master auf die Konfigurationskanäle, um etwa die Übertragung der aktuellen »Frequency Hopping«-Tabelle zu initiieren.

Die Konfigurationskanäle werden ebenfalls genutzt, wenn sich ein IO-Link Wireless System im sogenannten Roaming-Modus befindet. Dies ist dann der Fall, wenn in mobilen Anwendungen (wie mobile Werkzeugträger, etc.) W-Devices von einem W-Master zu einem anderen W-Master wechseln. Bei diesem Modus erfolgt ein Wechsel auf die Konfigurationskanäle bei jedem fünften W-Sub-cycle (siehe Abbildung 4-15).

#### 4.5.3. Erweiterung der existierenden Mechanismen

Die existierenden Mechanismen wurden wie folgt erweitert. In einem laufenden IO-Link Wireless System, in dem aktuell eine »Frequency Hopping«-Tabelle  $n$  verwendet wird, übermittelt ein W-Master den assoziierten W-Device eine neue Frequency Hopping«-Tabelle  $n+1$ , sowie den Aktivierungszeitpunkt  $T_A$ , zu dem diese Tabelle zu aktivieren ist. Letzteres setzt voraus, dass alle Teilnehmer in einem IO-Link Wireless System zeitlich synchronisiert sind, dies gilt zellübergreifend (siehe Abbildung 4-10).

Mit dem Konzept zur Protokoll-Erweiterung wurden zwei zusätzliche Parameter eingeführt: zum einen ist dies der genannte Aktivierungszeitpunkt  $T_A$ , zum anderen die aktuelle »Systemzeit«  $T_S$ . Diese zusätzlichen Parameter erforderten zusätzliche Datenfelder innerhalb der im Downlink-Konfigurations-Rahmen übertragenen Nachrichten. Dazu boten sich reservierte Felder innerhalb der Nachrichten des Typs »Pairing Negotiation Type 1« bzw. »Pairing Negotiation Type 2« an (Abbildung 4-16 bzw. Abbildung 4-17).

Octet	1							2							3							4										
Bit	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7								
0	Preamble							ConfigSyncword																								
4	ConfigSyncword							MasterID							UL type							ACK										
8	Table length							HOP-1							HOP-2							HOP-3										
12	HOP-4							HOP-5							HOP-6							HOP-7										
16	HOP-8							HOP-9							HOP-10							HOP-11										
20	HOP-12							HOP-13							HOP-14							HOP-15										
24	HOP-16							HOP-17							HOP-18							HOP-19										
28	HOP-20							HOP-21							HOP-22							HOP-23										
32	HOP-24							HOP-25							HOP-26							HOP-27										
36	HOP-28							HOP-29							HOP-30							HOP-31										
40	HOP-32							HOP-33							HOP-34							HOP-35										
44	HOP-36							HOP-37							HOP-38							HOP-39										
48	CRC 32																															

Abbildung 4-16: Pairing Negotiation Type 1 [8]

Octet	1							2							3							4										
Bit	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7								
0	Preamble							ConfigSyncword																								
4	ConfigSyncword							MasterID							UL type							ACK										
8	Col_N							HOP-40							HOP-41							HOP-42										
12	HOP-43							HOP-44							HOP-45							HOP-46										
16	HOP-47							HOP-48							HOP-49							HOP-50										
20	HOP-51							HOP-52							HOP-53							HOP-54										
24	HOP-55							HOP-56							HOP-57							HOP-58										
28	HOP-59							HOP-60							HOP-61							HOP-62										
32	HOP-63							HOP-64							HOP-65							HOP-66										
36	HOP-67							HOP-68							HOP-69							HOP-70										
40	HOP-71							HOP-72							HOP-73							HOP-74										
44	HOP-75							HOP-76							HOP-77							HOP-78										
48	CRC 32																															

Abbildung 4-17: Pairing Negotiation Type 2 [8]

Gemäß den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] dient dieser Nachrichtentyp der Übertragung einer »Frequency Hopping«-Tabelle von einem W-Master an die assoziierten W-Devices, »Type 1« für die Tabelleneinträge 1 bis 39 und analog »Type 2« für Tabelleneinträge 40 bis 78.

Zur Kodierung der zusätzlich benötigten Datenfelder ließ sich ausnutzen, dass das höchstwertige Bit (Bit 7) in den »HOP\_N«-Tabelleneinträgen ungenutzt ist, siehe Abbildung 4-18.

Table 155 HOP_N Bit coding								
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Meaning	0	HOP_N (6)	HOP_N (5)	HOP_N (4)	HOP_N (3)	HOP_N (2)	HOP_N (1)	HOP_N (0)

Abbildung 4-18: Kodierung eines HOP\_N Eintrags [8]

Damit standen  $2 \times 39$  freie Bit in »Pairing Negotiation« Nachrichten des »Type 1« und »Type 2« zur Verfügung. Davon wurden 32 Bit für die Kodierung der aktuellen Systemzeit  $T_S$  und 32 Bit für die Kodierung des Aktivierungszeitpunkts  $T_A$  genutzt.

Hinsichtlich der in den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] spezifizierten Einträge in den »Pairing Negotiation« Nachrichten wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Pairing Negotiation Type 1:
  - MSG\_DLink\_type: 0xA1 (statt 0xA0)
  - UL type: stets 0
  - ACK: stets 0
  - Device\_N: Stets 0 (Broadcast)
  - Höchstwertige Bits in HOP-1 bis HOP-32: Aktuelle Systemzeit  $T_S$
- Pairing Negotiation Type 2:
  - MSG\_Dlink\_type: 0xB1 (statt 0xB0)
  - UL type: stets 0
  - ACK: stets 0
  - Device\_N: Stets 0 (Broadcast)
  - Höchstwertige Bits in HOP-40 bis HOP-71: Aktivierungszeitpunkt  $T_A$

Die Übertragung der aktuellen »Pairing Negotiation« Nachrichten erfolgt mittels der für die Konfiguration vorgesehenen Kanäle 1 und 80 (vergleiche Abschnitt 3.1.3 und Abbildung 3-3) und entsprechend dem in den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] definierten »Roaming«-Modus.

Das gewählte Konzept zur Protokoll-Erweiterung wurde erfolgreich umgesetzt und implementiert, siehe dazu auch Abschnitt 4.6.

#### 4.5.4. Low Energy W-Devices

In den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] sind auch Methoden und Verfahren zur Unterstützung sogenannter »Low Energy W-Devices« definiert und spezifiziert. Wenngleich diese Ausprägung von W-Devices nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens war, soll an dieser Stelle die oben dargestellte Protokoll-Erweiterung hinsichtlich der Nutzbarkeit für Low Energy W-Devices diskutiert werden.

In einer typischen Applikation solcher Devices befinden sich diese überwiegend in einem Ruhezustand, dies betrifft die Funkschnittstelle (der Transceiver) gleichermaßen. Ein Low Energy W-Device nimmt aktiv die Kommunikation mit dem zugeordneten W-Master auf, wenn entweder eine konfigurierbare Zeitspanne abgelaufen ist oder wenn »neue« Daten zu übermitteln sind. In einem solchen Fall ist auf Seiten des Low Energy W-Devices zunächst auf dem Konfigurationskanal zu prüfen, ob die vorhandene Hopping-Tabelle noch aktuell ist. Dazu lässt sich der in einer Pairing Negotiation Type 2 Nachricht codierte Aktivierungszeitpunkt  $T_A$  nutzen. Gegebenenfalls ist dann auch der Empfang einer Pairing Negotiation Type 1 für die erste Hälfte der neuen Hopping-Tabelle notwendig.

### 4.6. Arbeitspaket 6 – Funktionsmuster

Auf Basis der Ergebnisse der Arbeitspakete 3, 4 und 5 wurde die Entwicklung, Realisierung und Verifikation eines Funktionsmusters durchgeführt. Dieses umfasste zwei IO-Link Wireless Zellen mit jeweils einem W-Master, drei W-Devices und einem Supplemental Devices sowie ein übergeordnetes Control-Device (Linux-PC), siehe Abbildung 4-19.

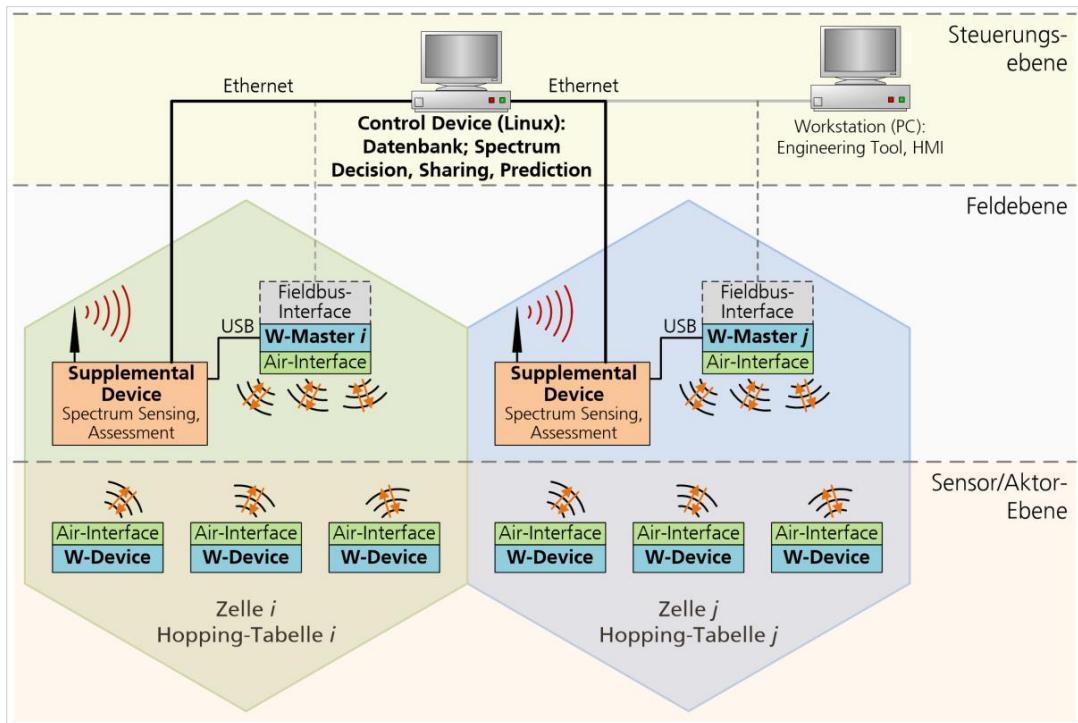


Abbildung 4-19: Skizze des Funktionsmusters

Eine Basis für die physikalische Realisierung der W-Master und der W-Devices bildeten die seitens des Transceiver-Herstellers angebotenen Entwicklungs-Boards. In Abbildung 4-20 sind die Komponenten des Funktionsmusters dargestellt (ohne Control-Device).

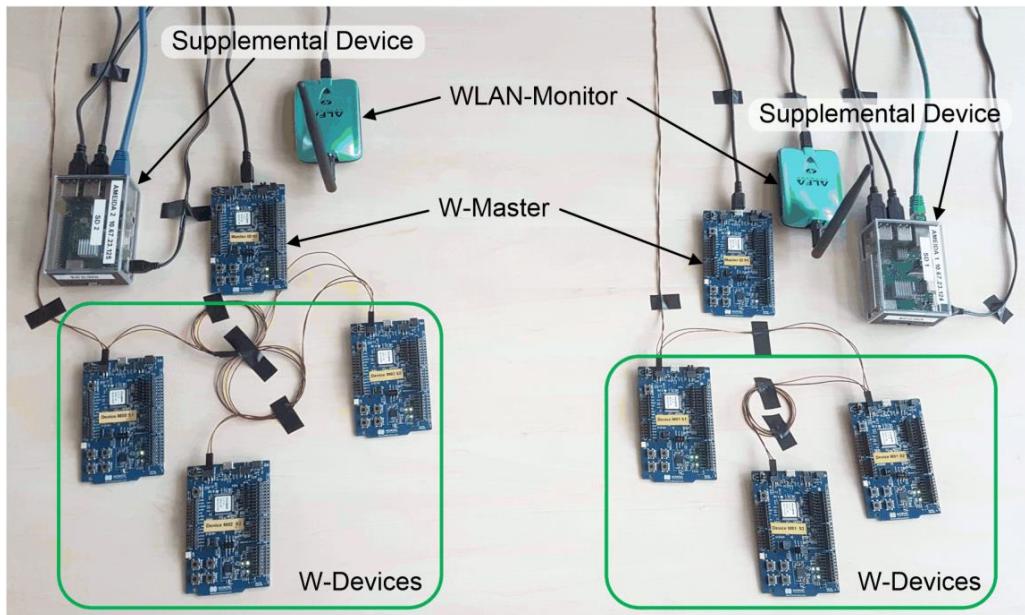


Abbildung 4-20: Komponenten des Funktionsmusters (Foto)

Die Supplemental Devices basierten auf einem Raspberry Pi mit angeschlossenem externem WLAN-Monitor. Aufgabe eines Supplemental Device ist die Erfassung der aktuellen WLAN-Nutzung sowie die Weiterleitung der Ergebnisse an das Control Device. Dort wird auf Basis der WLAN-Nutzung eine »Blacklist« erstellt und diese wiederum über das Supplemental Device

dem angeschlossenen W-Master übermittelt. Auf Seiten eines W-Master erfolgt die Bestimmung der aktuellen »Frequency Hopping«-Tabelle.

Als Control-Device wurde ein Linux-PC mit einer MySQL Datenbank verwendet, die die Daten der Supplemental Devices aufnimmt. Dort erfolgt die Abbildung belegter WLAN-Kanäle auf belegte IO-Link Wireless Kanäle, die die Basis für die Ermittlung von »Blacklists« darstellt. Das Control-Device wurde zudem mit einem Web-Interface ausgestattet, das die Darstellung ermittelter WLAN Access Points und WLAN-Clients ebenso ermöglicht wie die Darstellung der Kanalauslastung (WLAN Kanäle und IO-Link Wireless Kanäle) sowie der aktuellen Blacklists der jeweiligen Zellen.

Das Funktionsmuster wurde in den Laboren des Fraunhofer IMS einer Reihe von Untersuchungen zur Verifikation der Systemeigenschaften unterzogen. In Abbildung 4-21 ist stellvertretend ein, mittels eines Real-Time Spectrum Analyzer (Echtzeit-Spektrum-Analysator) aufgezeichnete, zeitlicher Ausschnitt der Frequenzbandnutzung im 2,4 GHz-Band während einer solcher Untersuchung dargestellt.

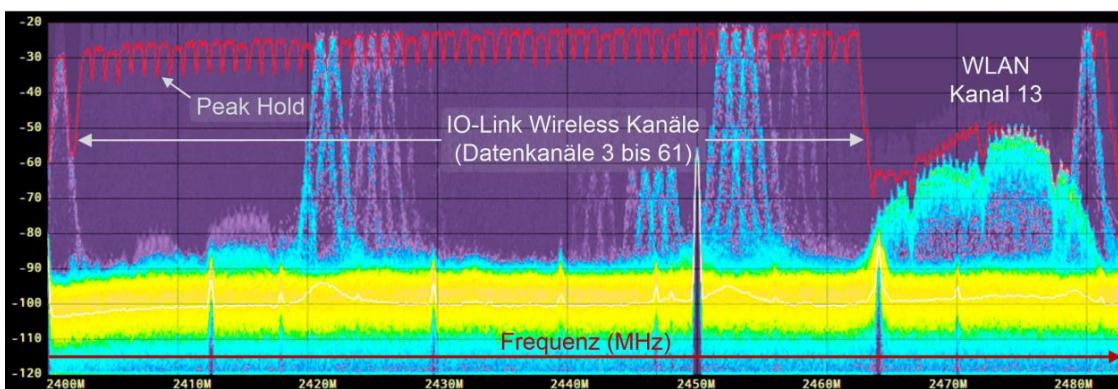


Abbildung 4-21: Erste Verifikation mit einem Real-Time Spectrum Analyzer (Screenshot)

Dem Screenshot ist zu entnehmen, dass in diesem Beispiel der obere Bereich des 2,4-GHz-ISM-Bands durch ein WLAN-System genutzt wurde (WLAN-Kanal 13). Das Funktionsmuster hat in diesem Fall adaptiv eine »Frequency Hopping«-Tabelle so bestimmt, dass die IO-Link Wireless Datenkanäle 3 (2,403 GHz) bis 62 (2,461 GHz) genutzt werden (erkennbar am Verlauf der roten »Peak Hold« Linie), um Interferenzen mit dem WLAN-System auszuschließen. Ein Vergleich mit einem entsprechend der IO-Link Wireless System Extensions Version hergeleiteten Kanal-Konfiguration mit einem statischen Blacklisting zeigt eine vollständige Übereinstimmung (Abbildung 4-22).

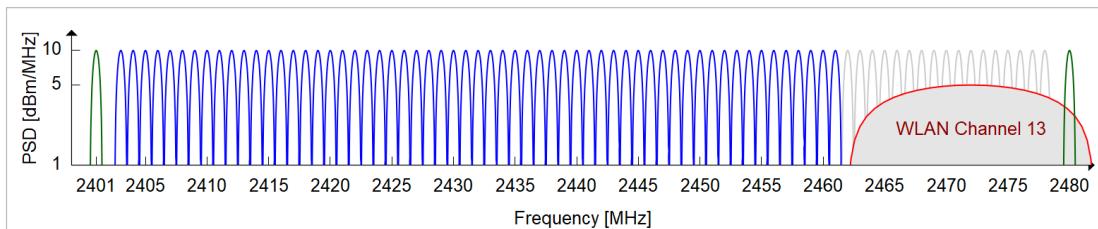


Abbildung 4-22: Kanal-Konfiguration gemäß Versuchsaufbau

Das Funktionsmuster wurde ferner im Hochfrequenzlabor des Fraunhofer IMS weiteren Verifikationsuntersuchungen unterzogen. Abbildung 4-23 zeigt einen Ausschnitt des Versuchsaufbaus.

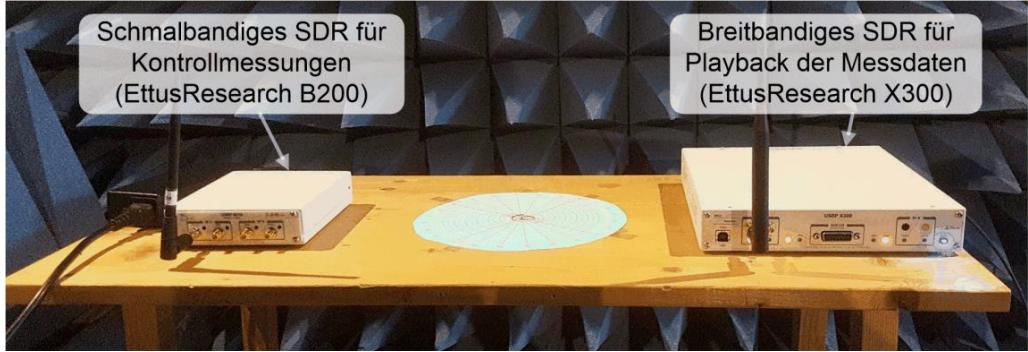


Abbildung 4-23: Ausschnitt des Versuchsaufbaus zur Verifikation (Foto)

Die breitbandige SDR-Plattform, die im Rahmen der Messkampagnen zur Aufzeichnung einer typischen Nutzung des 2,4-GHz-ISM-Bands in einer Produktionsumgebung gedient hatte (siehe Abschnitt 4.2), wurde nun verwendet, um mittels der seinerzeit aufgezeichneten Messdaten das Funktionsmusters mit eben dieser Nutzung des 2,4-GHz-ISM-Bands zu beaufschlagen. Für die Verifikation wurden unter anderem die an Messstelle 4 (siehe Abbildung 4-2) aufgezeichneten Daten verwendet.

In Abbildung 4-24 ist ein Ausschnitt des seitens des Funktionsmusters ermittelte WLAN-Nutzung dargestellt. Die Zahlen in den WLAN-Kanälen geben die Anzahl der detektierten WLAN-Pakete innerhalb eines Zeitraums von 20 Sekunden an.

Timestamp	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8	Channel 9	Channel 10	Channel 11	Channel 12	Channel 13
2020-02-26 13:43:19	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:42:19	19	0	0	0	0	2	0	0	0	0	15	0	0
2020-02-26 13:41:19	16	0	0	0	0	2	0	0	0	0	7	0	0
2020-02-26 13:40:19	37	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0
2020-02-26 13:39:19	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:38:19	8	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:37:19	9	0	0	0	0	0	15	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:36:19	17	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:35:19	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:34:19	18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:33:18	28	0	0	0	0	26	0	0	0	0	2	0	0
2020-02-26 13:32:18	9	0	0	0	0	4	0	0	0	0	13	0	0
2020-02-26 13:31:18	24	0	0	0	0	0	13	0	0	0	4	0	0
2020-02-26 13:30:17	41	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:29:17	26	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:28:17	18	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:27:17	9	0	0	0	0	0	10	0	0	0	6	0	0
2020-02-26 13:26:17	18	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:25:16	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2020-02-26 13:24:16	16	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
2020-02-26 13:23:16	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4-24: Ermittelte WLAN-Nutzung (Messstelle 4)

Auf Basis dieser WLAN-Nutzung erfolgt eine Abbildung auf eine entsprechende Nutzung von IO-Link Wireless Kanälen. Hierbei wird die »Transmit Spectrum Mask« den Standards 802.11 zugrunde gelegt [16], siehe Abschnitt 4.4.2. Die Abbildung der WLAN-Nutzung auf IO-Link Wireless Kanäle erfolgt mittels auf dem Control-Device implementierter Software-Komponenten.

Das Web-Interface des Control-Device ermöglicht die Visualisierung des Ergebnisses der Abbildung auf IO-Link Wireless Kanäle, siehe Abbildung 4-25. Die Zahlen in den IO-Link Wireless Kanälen geben die Anzahl der ursprünglichen WLAN-Pakete innerhalb eines Zeitraums von 20 Sekunden an.

Abbildung 4-25: Abgeleitete Belegung von IO-Link Wireless Kanälen (Messstelle 4)

Auf Basis dieser Belegung von IO-Link Wireless Kanälen erfolgt schließlich die Bestimmung des Blacklistings, siehe Abbildung 4-26. Dazu wird ein parametrierbarer Schwellenwert für die Kanalnutzung (Anzahl der Pakete) genutzt, bei dessen Überschreitung innerhalb einer ebenfalls parametrierbaren Zeitspanne ein Datenkanal der Blacklist hinzugefügt wird.

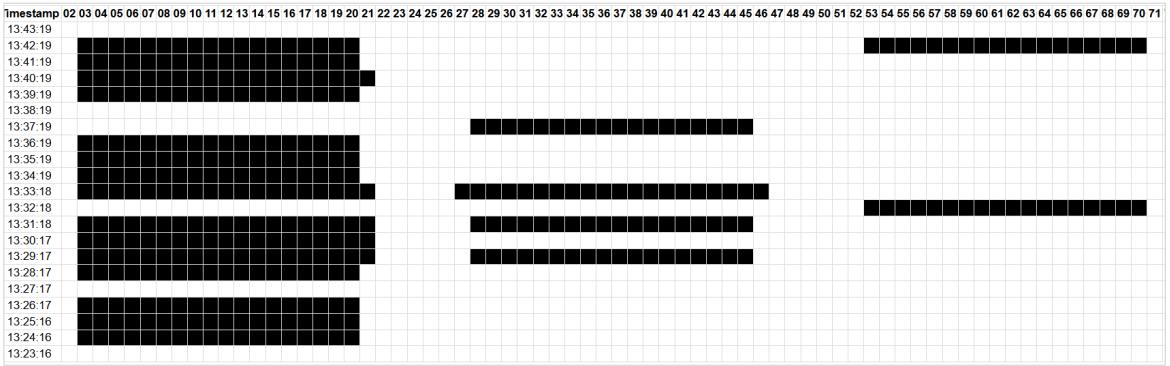


Abbildung 4-26: Resultierendes Black-Listing (Messstelle 4)

Anschließend erfolgt die Abbildung des Blacklistings auf eine binäre codierte Zeichenfolge gemäß [8] mittels auf dem Supplemental Device implementierter Software-Komponenten. Diese Zeichenfolge wird anschließend via eines ASCII-basierten Protokolls dem zugeordneten W-Master zugeleitet. Dort erfolgt entsprechend des in den »IO-Link Wireless System Extensions« [8] definierten Verfahrens die Bestimmung der Hopping-Sequenz.

Die obigen Abbildungen (Abbildung 4-24 bis Abbildung 4-26) zeigen, dass das durch das Funktionsmuster repräsentierte AMEIDA-System in der Lage ist, wechselnde Belegungen des 2,4-GHz-ISM-Bands durch WLAN-Nutzer hoch agil zu adaptieren und stetig aktualisierte Black-Listings zu übertragen. Dazu bedarf es keinerlei Interaktion seitens des Anwenders, sondern dies erfolgt vollständig autonom.

## 4.7. Arbeitspaket 7 – Proof of Concept

Der Proof of Concept sollte gemäß ursprünglicher Planung am Standort der Technologiefabrik Scharnhausen der Festo AG & Co. KG durchgeführt werden. Die Corona-bedingten Einschränkungen, die auch das produzierende Gewerbe betrafen, machten dies jedoch unmöglich. In Absprache mit der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. wurde daher entschieden, den Proof of Concept im Hochfrequenzlabor des Fraunhofer IMS durchzuführen.

Ermöglicht wurde dies durch Nutzung der im Verlauf der Messkampagnen am Standort der Technologiefabrik Scharnhausen aufgezeichneten Messdaten (vergleiche Abschnitt 4.2).

Abbildung 4-27 zeigt einen Ausschnitt des Versuchsaufbaus für den Proof of Concept in der Hochfrequenzmesskammer des Fraunhofer IMS.

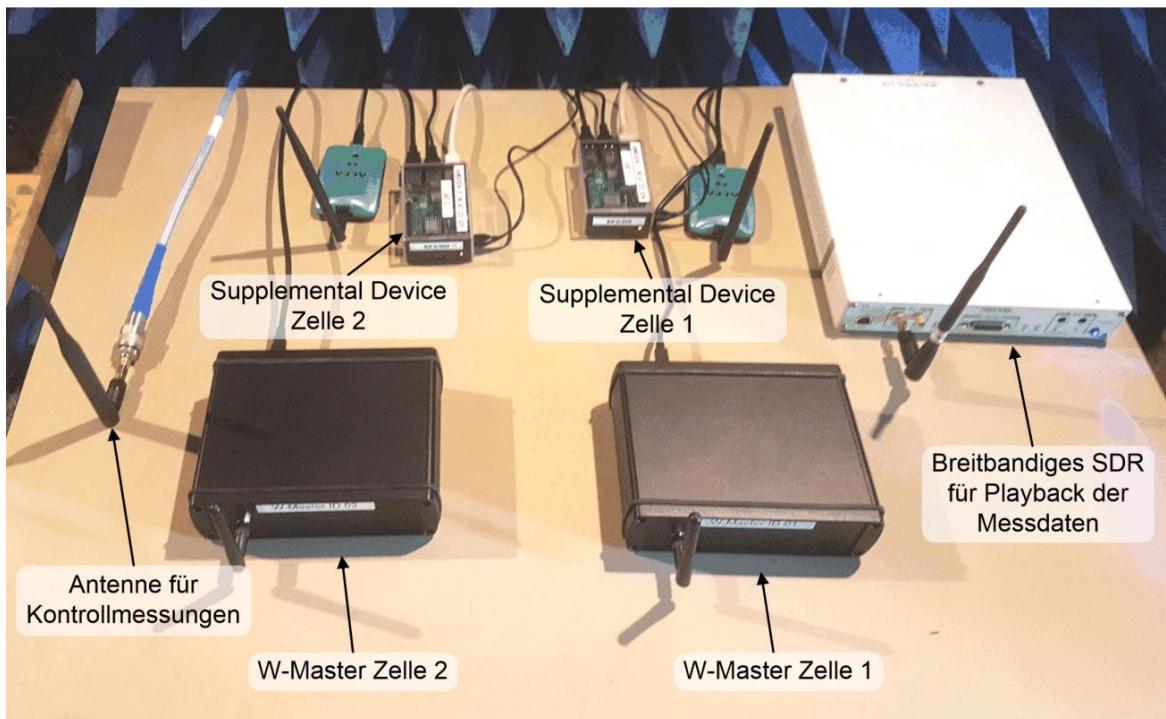


Abbildung 4-27: Ausschnitt des Versuchsaufbaus für den Proof of Concept (Foto)

Der Versuchsaufbau basierte auf dem in Arbeitspaket 6 realisierten Funktionsmuster (siehe Abschnitt 4.6) und repräsentierte zwei Zellen mit jeweils einem W-Master, drei W-Devices sowie einem Supplemental Device. Die W-Master und W-Devices waren in HF-dichte Gehäuse eingebaut worden, um Störeinstrahlungen weitestmöglich zu verhindern. Die seinerzeit verwendete breitbandige Software-Defined-Radio-Plattform (SDR) diente der Wiedergabe (Playback) der am Standort der Technologiefabrik Scharnhausen aufgezeichneten Messdaten.

Zunächst seien hier die Ergebnisse bezüglich der an Messstelle 3 aufgezeichneten Messdaten diskutiert. An dieser Messstelle lag eine kontinuierliche Nutzung der WLAN-Kanäle 1, 6 und 11 vor. Wie in Abschnitt 4.2 ausgeführt muss ein IO-Link Wireless System aufgrund der geringen Anzahl verfügbarer Datenkanäle in einem solchen Fall zwangsläufig an Grenzen stoßen. Die gilt umso mehr, wenn mehrere IO-Link Wireless Zellen gleichzeitig betrieben werden. Im Rahmen des Proof of Concept für die Messstelle 3 wurde daher der Versuchsaufbau mit lediglich einer Zelle betrieben.

In der folgenden Abbildung 4-28 ist ein Ausschnitt der Messergebnisse dargestellt, die bei der Beaufschlagung des Versuchsaufbaus mit WLAN-Signalen von Messstelle 3 erzielt wurden. Die linke Seite repräsentiert die Ergebnisse ohne adaptives Blacklisting (»ohne AMEIDA«), die rechte Seite die Ergebnisse mit adaptivem Blacklisting (»mit AMEIDA«). Mit Z1D1, Z1D2 sowie Z1D3 sind die W-Devices 1 bis 3 in Zelle 1 bezeichnet, mit PER die Paketfehlerrate (Packet Error Rate). Erwartungsgemäß konnten in einem solchen Fall keine signifikanten Verbesserungen mit Hilfe des AMEIDA Systems erzielt werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das AMEIDA System dem Anwender diesbezüglich umfassende Informationen zu Verfügung stellt, die es gegebenenfalls ermöglichen, die Umgebungsbedingungen zielgerichtet anzupassen.

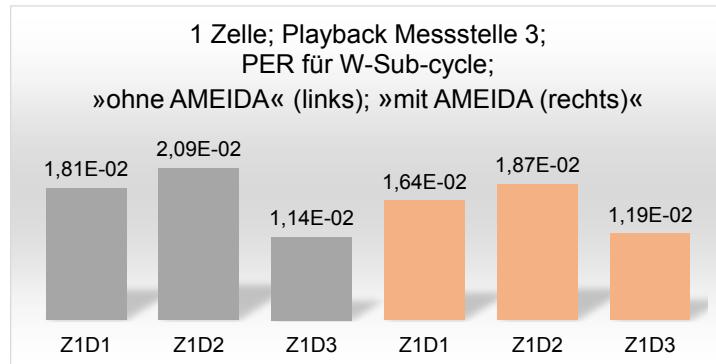


Abbildung 4-28: Messergebnisse bezüglich Messstelle 3

Unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Messdaten resultieren aus der gewählten Art des Versuchsaufbaus einige Implikationen, die im Folgenden betrachtet werden. Diese betreffen im Besonderen die Hopping-Sequenzen, die für die jeweiligen Zellen zu bestimmen sind. Zur Verdeutlichung ist untenstehend noch einmal die Skizze des Funktionsmusters aus Abschnitt 4.6 in einer Darstellung wiederholt, die sich näher an der Definition des Zell-Konzepts in Abschnitt 4.3 der »IO-Link Wireless System Extension« [8] orientiert, siehe Abbildung 4-29. Das IO-Link Wireless Zell-Konzept sieht Zellen mit einem Durchmesser von bis zu 40 Metern vor, die sich teilweise überlappen. Dies ließ sich in der Hochfrequenzmesskammer des Fraunhofer IMS mit einer Grundfläche von  $3 \text{ m} \times 8 \text{ m} = 24 \text{ m}^2$  nicht umsetzen. Die Folge war eine vollständige Überlappung der betrachteten beiden Zellen.

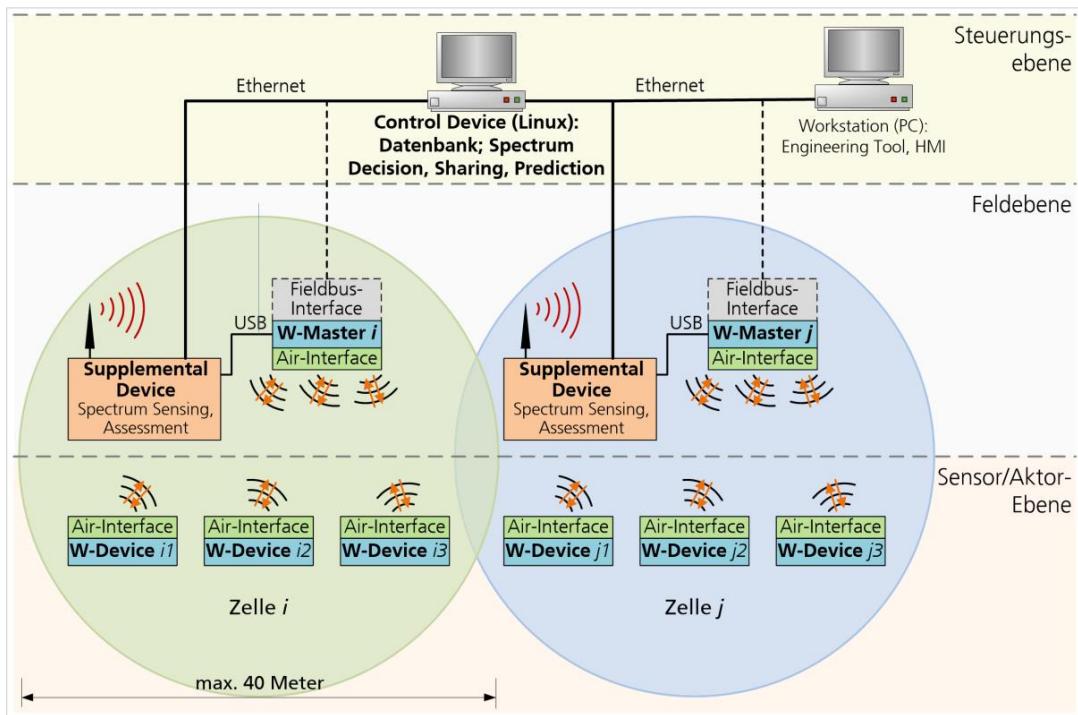


Abbildung 4-29: Skizze des Funktionsmusters gemäß Zell-Konzept [8]

Eine vollständige Überlappung führt zu einigen Konsequenzen, die sich unter anderem daraus ergeben, dass die beteiligten W-Master zeitlich nicht synchronisiert sind und die Oszillatoren, aus denen der jeweilige Systemtakt abgeleitet wird, nicht zwangsläufig ein identisches Driftverhalten aufweisen.

Mittels Abbildung 4-30 seien die genannten Konsequenzen verdeutlicht. Hier sind die Hopping-Sequenzen für die Zelle 1 (blau gekennzeichnet) und Zelle 2 (grün gekennzeichnet) wiedergegeben, wie sie sich aus der Anwendung des in den »IO-Link Wireless System Extension« [8] beschriebenen Verfahrens zu Berechnung der Hopping-Sequenzen ergeben.

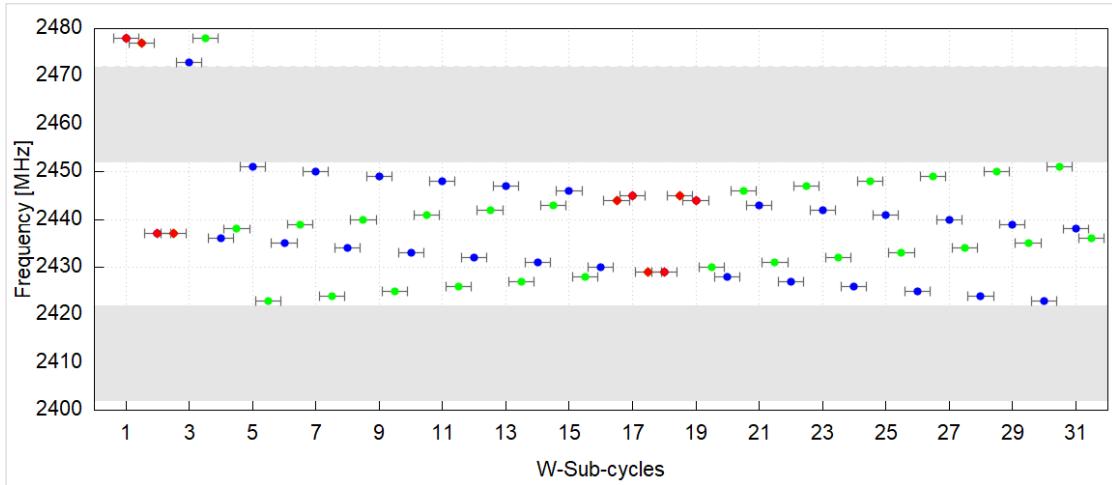


Abbildung 4-30: Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün)

Für die beiden Zellen wurden als MasterID die Werte 1 respektive 2 gewählt. Die MasterID ist ein Parameter, der gemäß der »IO-Link Wireless System Extension« in die Berechnung der Hopping-Sequenzen eingeht. Bei der numerischen Ermittlung der Hopping-Sequenzen gemäß Abbildung 4-30 wurde ein statischer zeitlicher Versatz von einem halbem W-Sub-cycle (siehe Abschnitt 4.5) zwischen den beiden Zellen gewählt. Zusätzlich wurde ein Black-Listing der WLAN-Kanäle 1 und 11 durchgeführt, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten.

In Abbildung 4-30 ist zu erkennen, dass es zwischen beiden Zellen zu Interferenzen kommt (rot gekennzeichnet), entweder durch eine unmittelbare Überlappung oder weil der Kanalabstand bei lediglich einem MHz liegt. Bei Letzterem kommt der Güte der Eingangsfilter der verwendeten Transceiver eine hohe Bedeutung zu. Wird die beschriebene numerische Ermittlung der Hopping-Sequenzen sowie der Interferenzen zugrunde gelegt, so kommt es gemäß Abbildung 4-30 in jeder der beiden Zellen bei 5 von 31 W-Sub-cycles zu Interferenzen, woraus sich auf W-Sub-cycle Ebene eine Paketfehlerwahrscheinlichkeit von 0,16 oder 16 Prozent ableiten lässt.

Um aus den Untersuchungen des entwickelten AMEIDA-Systems im Rahmen des Proof of Concept Ergebnisse ableiten zu können, die unabhängig von der beschriebenen Interferenz-Problematik sind, wurde entschieden, das Verfahren zur Bestimmung der Hopping-Sequenzen zu modifizieren. Durch die vorgenommene Modifikation sind die Hopping-Sequenzen der beteiligten Zellen nicht nur, wie »IO-Link Wireless System Extension« spezifiziert, orthogonal zueinander sondern auch noch disjunkt. Dazu wird der Zentralwert  $\tilde{f}$  der Menge verfügbarer Datenkanäle  $f_{av}$  ermittelt und den Zellen 1 und 2 jeweils die Teilmenge  $M_1 = \{f_x | f_x > \tilde{f}\}$  beziehungsweise die Teilmenge  $M_2 = \{f_x | f_x < \tilde{f}\}$  der verfügbaren Datenkanäle  $f_{av}$  zugewiesen.

Dies sei in folgender Abbildung 4-31 veranschaulicht. Auch hier wurde ein Black-Listing der WLAN-Kanäle 1 und 11 durchgeführt, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten. Es ist offensichtlich, dass Interferenzen zwischen den beiden Zellen auch dann nicht auftreten können, wenn die beteiligten W-Master nicht synchronisiert sind.

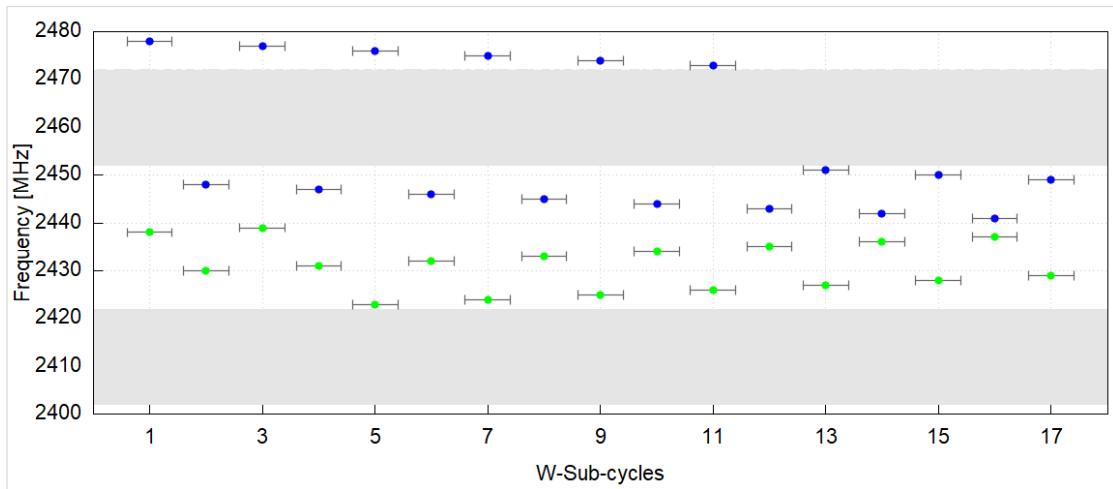


Abbildung 4-31: Disjunkte Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün)

Das beschriebene vergleichsweise einfache Verfahren zu Bestimmung disjunkter Hopping-Sequenzen lässt mit einer Modifikation auch für Anwendungsfälle erweitern, bei denen die beteiligten Zellen unterschiedlichen WLAN-Nutzungen unterliegen. Ein entsprechendes Szenario konnte mit Blick auf die oben beschriebenen Versuchsbedingungen (vollständige Überlappung der Zellen) nicht Bestandteil des Proof of Concept sein. Dennoch sei hier beispielhaft das Ergebnis einer numerischen Ermittlung der Hopping-Sequenzen wiedergegeben (Abbildung 4-32). Hier wurde angenommen das in Zelle 1 ein Blacklisting bezüglich der WLAN-Kanäle 1 und 6 und in Zelle 2 ein Blacklisting bezüglich der WLAN-Kanäle 1 und 11 erfolgt. Entsprechend sind in Zelle 1 die Datenkanäle im Bereich des WLAN-Kanals 11 und in Zelle 2 die Datenkanäle im Bereich des WLAN-Kanals 6 verfügbar.

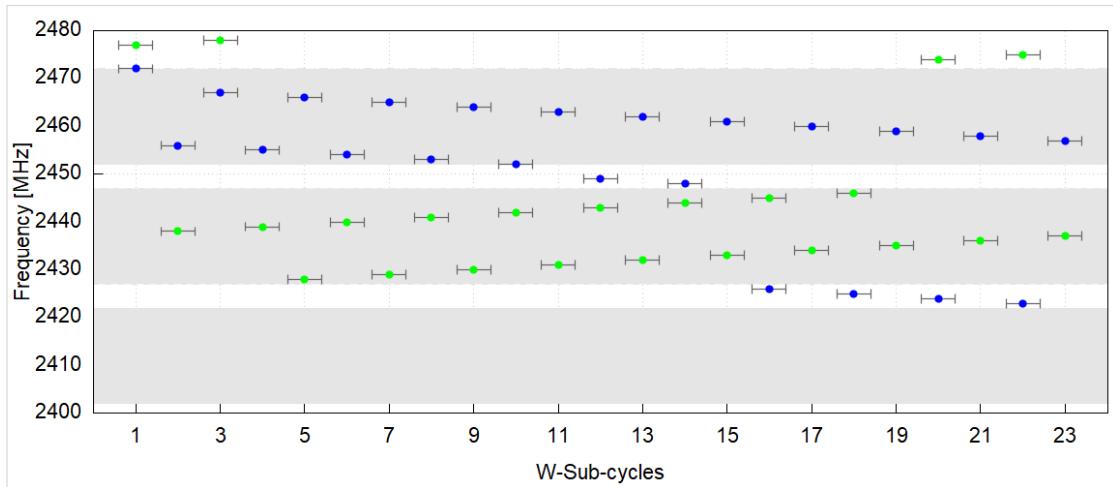


Abbildung 4-32: Disjunkte Hopping-Sequenzen in Zelle 1 (blau) und Zelle 2 (grün)

Ein Nachteil des gewählten Verfahrens sei jedoch nicht verschwiegen. Im Vergleich zum ursprünglichen in den »IO-Link Wireless System Extension« definierten Verfahren, ist die mittlere Sprungweite um die Hälfte reduziert. In Abbildung 4-33 sind die Histogramme der Sprungweiten für eine nicht disjunkte Hopping-Sequenz (oben) und eine disjunkte Hopping-Sequenz (unten) dargestellt. Durch die Halbierung der Sprungweite erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem hinreichend breitbandigen Störsignal, nicht nur der aktuelle Datenkanal

Beeinträchtigungen durch dieses Störsignal unterliegt, sondern auch der in einer Hopping-Sequenz unmittelbar folgende Datenkanal.

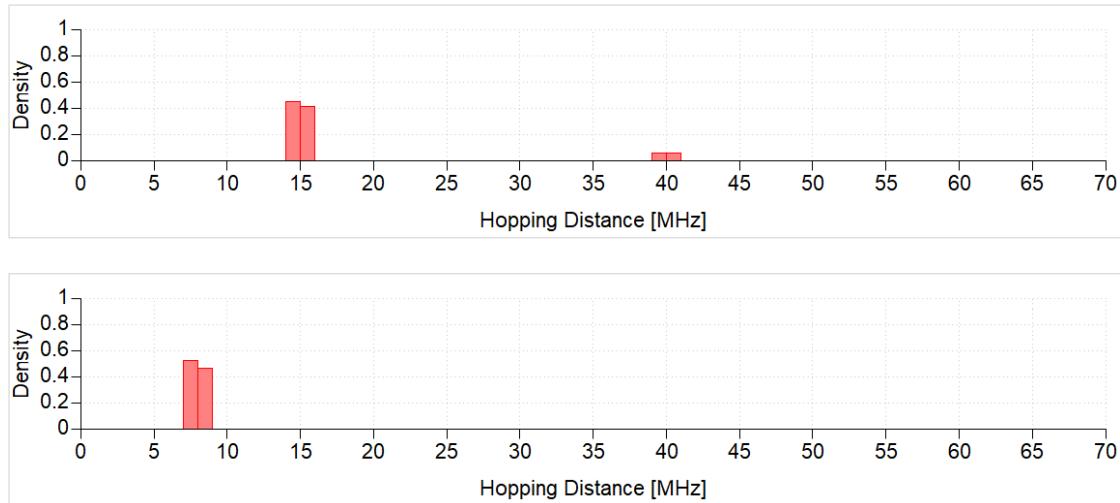


Abbildung 4-33: Histogramm der Sprungweiten von Hopping-Sequenzen

Das Verfahren zur Bestimmung disjunkter Hopping-Sequenzen wurde mittels des oben beschriebenen Versuchsaufbaus für den Proof of Concept verifiziert, siehe Abbildung 4-34.

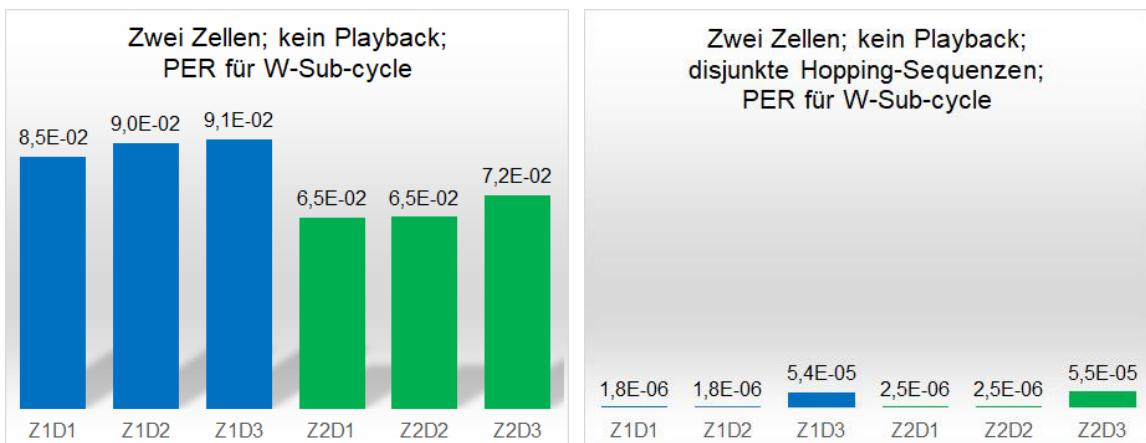


Abbildung 4-34: Verifikation des Verfahrens für disjunkte Hopping-Sequenzen

Die linke Seite von Abbildung 4-34 repräsentiert die Ergebnisse der durchgeführten Messungen mit Hopping-Sequenzen gemäß des in den »IO-Link Wireless System Extension« beschriebenen Verfahrens, die rechte Seite die Ergebnisse auf Basis des modifizierten Verfahrens mit disjunkten Hopping-Sequenzen. In beiden Fällen wurde das System nicht mit WLAN-Signalen beaufschlagt (»kein Playback«) und entsprechend erfolgte auch kein Blacklisting. Mit  $ZmDn$  auf der x-Achse ist jeweils die Zelle  $m$  und das W-Device  $n$  bezeichnet, mit PER die Paketfehlerrate (Packet Error Rate). Abbildung 4-34 ist zu entnehmen, dass sich die Paketfehlerrate mittels des gewählten Verfahrens um mehr als drei Größenordnungen reduzierten ließ.

Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die weitere Durchführung des Proof of Concept. So wurden die Software-Komponenten des AMEIDA-Systems entsprechend der Modifikation zur Bestimmung disjunkter Hopping-Sequenzen angepasst. Anschließend wurde der oben beschriebene Messaufbau mittels der aufgezeichneten Messdaten mit WLAN-Signalen

beaufschlagt, um die Eigenschaften des entwickelten Systems zur Adaption des Blacklistings bezüglich der WLAN-Nutzung des 2,4-GHz-Bands zu untersuchen. In Abbildung 4-35 ist stellvertretend ein Ausschnitt der an Messstelle 6 aufgezeichneten Messwerte als Wasserfalldiagramm dargestellt (siehe Abschnitt 4.2).

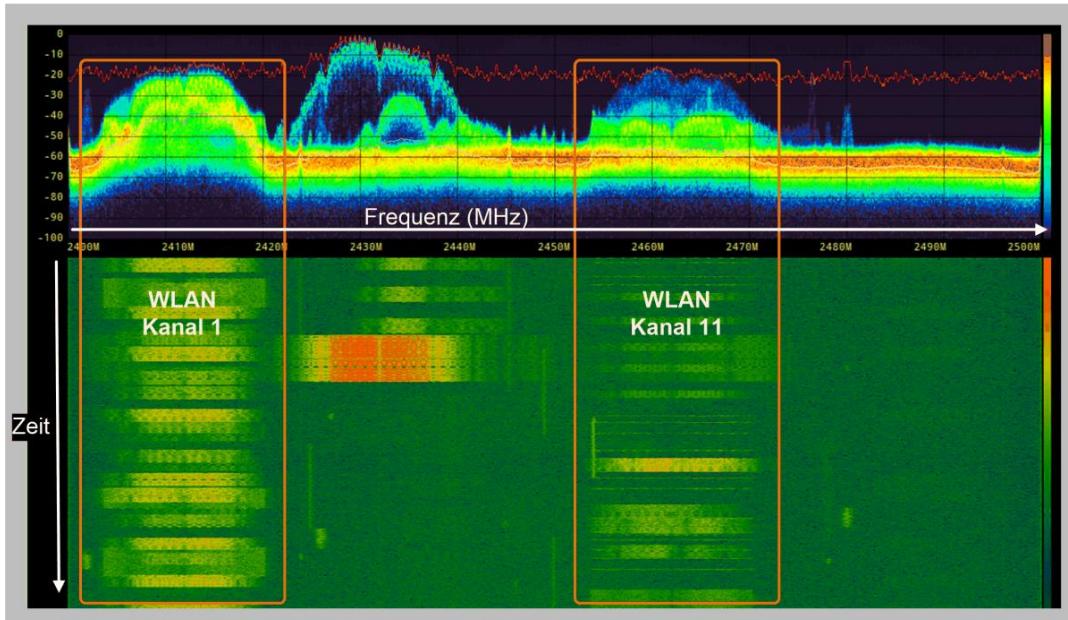


Abbildung 4-35: Messdaten an Messstelle 6 (Ausschnitt, Wasserfalldiagramm)

Am Ort der Messstelle 6 erfolgte die WLAN-Nutzung überwiegend auf den WLAN-Kanälen 1 und 11, gelegentlich auch auf Kanal 6.

In der folgenden Abbildung 4-36 ist ein Ausschnitt der Messergebnisse dargestellt, die bei der Beaufschlagung des Versuchsaufbaus mit WLAN-Signalen von Messstelle 6 erzielt wurden. Die Zellen 1 beziehungsweise 2 sind wieder durch blaue Balken beziehungsweise grüne Balken gekennzeichnet. Auch hier ist mit  $ZmDn$  auf der x-Achse jeweils die Zelle  $m$  und das W-Device  $n$  bezeichnet, mit PER die Paketfehlerrate (Packet Error Rate). Die linke Seite repräsentiert die Ergebnisse ohne adaptives Blacklisting (»ohne AMEIDA«), die rechte Seite die Ergebnisse mit adaptivem Blacklisting (»mit AMEIDA«).

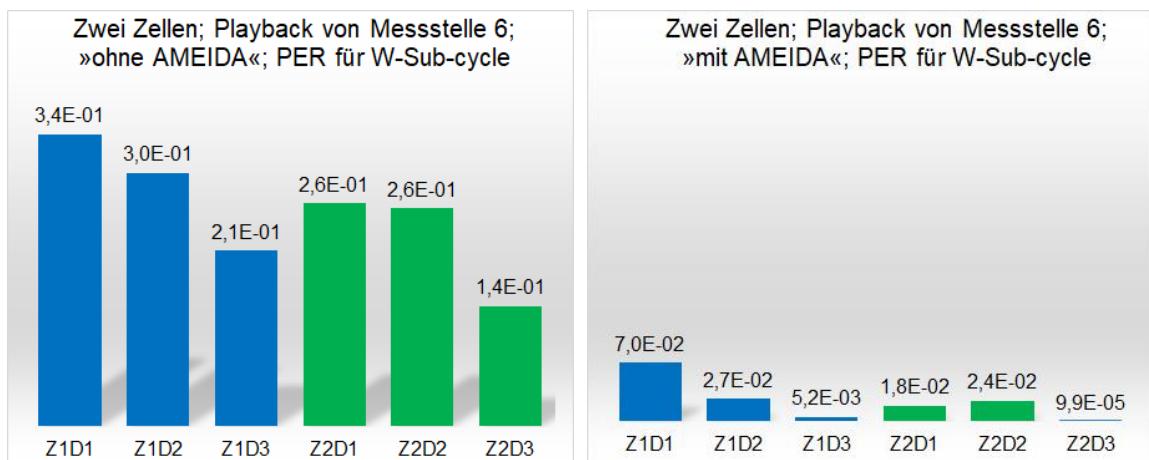


Abbildung 4-36: Messergebnisse der Messstelle 6 für zwei Zellen

Die in Abbildung 4-36 dargestellten Ergebnisse basieren auf ca. einer Million übertragenen IO-Link Wireless Datenpaketen (W-Sub-cycle). Offenkundig wurde die Paketfehlerrate (Packet Error Rate, PER) um mindestens einen Faktor fünf reduziert. Dies kann als eine deutliche Verbesserung bezeichnet werden.

Ein Vergleich der rechten Seite von Abbildung 4-36 mit der rechten Seite von Abbildung 4-34 weist einen signifikanten Unterschied bezüglich der Paketfehlerrate auf. Dies ist zum einen der Tatsache geschuldet, dass Letztere den ungestörten Fall (ohne WLAN-Beaufschlagung) repräsentiert und zum anderen, dass durch das erfolgte Blacklisting die Anzahl der verfügbaren Datenkanäle von 78 auf 31 reduziert wurde. Darüber hinaus zeigt hier die reduzierte Sprungweite eine gewisse Wirkung, da wie beschrieben bei Messstelle 6 überwiegend die WLAN-Kanäle 1 und 11 genutzt wurden, sporadisch jedoch auch WLAN-Kanal 6. Das umgesetzte Verfahren zum adaptiven Blacklisting kann und soll jedoch solche kurzzeitigen »Störungen« nicht adaptieren. Auf der anderen Seite zeigt ein Vergleich der rechten Seite von Abbildung 4-36 mit der linken Seite von Abbildung 4-34, dass die Paketfehlerrate unter Beaufschlagung mit WLAN-Signalen zum Teil erheblich geringere Werte aufweist, als die Paketfehlerrate im ungestörten Fall mit nicht disjunkten Hopping-Sequenzen.

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das adaptive Blacklisting ohne jede Interaktion seitens des Anwenders erfolgt, sondern vollständig autonom unmittelbar nach Inbetriebnahme. Zudem stellt das System über das Web-Interface dem Anwender alle relevanten Informationen zur Verfügung (siehe auch Abschnitt 4.6), die den aktuellen Zustand des IO-Link Wireless Systems sowie mögliche Beeinträchtigungen durch aktive WLAN-Systeme in unmittelbarer Nähe charakterisieren.

#### **4.8. Arbeitspaket 8 – Standardisierung**

Gegenstand dieses Arbeitspakets war die Erarbeitung eines Vorschlags zur Ergänzung der »IO-Link Wireless System Extensions Version« [8] hinsichtlich eines adaptiven Medienzugriffs. Wesentliche Aspekte waren aus Systemsicht die automatische Generierung und Verteilung von »Frequency Hopping«-Tabellen sowie die Mechanismen für den Informationsaustausch gemäß des spezifizierten Zellkonzepts

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine Protokoll-Erweiterung erarbeitet (siehe Abschnitt 4.5) und erprobt (siehe Abschnitt 4.7). Die Ausgestaltung der erforderlichen Detaillierungstiefe sowie die entsprechende Modifikation der »IO-Link Wireless System Extensions Version« obliegt der »Technical Working Group IO-Link Wireless« innerhalb der IO-Link Community, der das Fraunhofer IMS angehört.

Die erarbeitete Protokoll-Erweiterung wurde im März 2020 mit Mitgliedern der »Technical Working Group IO-Link Wireless« diskutiert. Gegenstand waren Fragestellungen hinsichtlich der Nutzbarkeit bereits spezifizierter Mechanismen auf höheren Protokollsichten. Die dazu notwendigen Protokollsichten waren im Kontext des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht implementiert worden. Vielmehr stand ein möglichst agiler Austausch von Hopping-Sequenzen im Vordergrund, um die schnelle Adaption WLAN-Nutzungen zu ermöglichen.

## 5. Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
  - Stufe HPA-A: 26,23 Personenmonate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Es wurde eine Beschaffung eines »Bundle für ein Software Defined Radio« (gemäß den Erläuterungen zum Einzelfinanzierungsplan) durchgeführt;  
Lieferant: National Instruments Germany GmbH; Preis: 6.178,91 €
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - Keine

## 6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Ausgaben im Berichtszeitraum waren für die Durchführung der geleisteten Arbeit notwendig und angemessen. Die durchgeführten Arbeiten stellen die Umsetzung der im Forschungsantrag vorgesehenen Arbeitsschritte dar und waren für die Erreichung des Forschungsziels unabdingbar. Die geleisteten Arbeiten waren zur Bearbeitung der in Abschnitt 4 beschriebenen Arbeitspakete erforderlich.

## 7. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt ist die Kommunikationsfähigkeit aller Komponenten in der industriellen Fertigung eine Voraussetzung für eine hoch dynamische und flexible Industrie 4.0-Produktion. Die Verknüpfung aller Komponenten lässt sich bei verteilter Informationsverarbeitung drahtloser Datenübertragung sinnvoll realisieren. In vielen Fällen stellen die in der Produktion eingesetzten Maschinen und Komponenten Produktionsdaten, Zustandsdaten, etc. nicht in hinreichendem Umfang zur Verfügung. Entsprechend sind diese Maschinen mit Sensoren und einer adäquaten Vernetzung nachzurüsten, um die Potenziale von Industrie 4.0 auch in KMUs zu erschließen.

Hinsichtlich des Einsatzes von drahtlosen Systemen sind gerade für KMUs Aspekte der Akzeptanz wie hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, einfache Installation, Handhabung und Wartung sowie Investitionssicherheit hinsichtlich drahtloser Systeme von essentieller Bedeutung. Dies schließt die Umsetzung von Plug-and-Play- beziehungsweise Plug-and-Produce-Konzepten in der Produktion sowie die transparente Zustands-Präsentation eines drahtlosen Systems (»Quality of Service«, aktuell belegte Bereiche im 2,4 GHz-Band, etc.) ein.

Das Forschungsvorhaben AMEIDA adressierte dezidiert die oben genannte Aspekte und leistet einen unmittelbaren Beitrag zur Umsetzbarkeit von Industrie 4.0 für KMU bezüglich Echtzeit-Funksystemen, wie die erzielten Ergebnisse insbesondere der Arbeitspakete 6 und 7 ausweisen (siehe Abschnitt 4.6 und Abschnitt 4.7). Mit dem konkreten Anwendungsfall IO-Link Wireless wurde der Investitionssicherheit im Kontext einer industriellen Umsetzung der Forschungsergebnisse Rechnung getragen, da IO-Link Wireless einen modernen Stand zur drahtlosen Vernetzung von Sensoren und Aktuatoren in industriellen Anwendungen repräsentiert.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 7 wurden zudem intensiv mit denjenigen Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses diskutiert, die zugleich in der »Technical Working Group IO-Link Wireless« vertreten sind. Die Ergebnisse waren auf eine sehr positive Resonanz gestoßen. Dies ist insofern von Bedeutung, als diese Unternehmen als Systemanbieter wirtschaftliche Beziehungen zu KMUs sowohl als Zulieferer als auch als Kunden unterhalten.

## 8. Fortschreibung des mit dem Antrag vorgelegten Plans zum Ergebnis-transfer

Die bisher durchgeführten sowie die geplanten Transfermaßnahmen sind in Tabelle 3 und in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Kontinuierliche Diskussion der Ergebnisse	Kick-Off-Treffen, Frankfurt Zweite Sitzung, Duisburg Dritte Sitzung, Neuhausen Vierte Sitzung, Online-Meeting Fünfte Sitzung, Online-Meeting	6.9.2018 6.3.2019 5.9.2019 18.6.2020 23.7.2020
Wireless Congress	Transfer in die Wirtschaft	Konferenz - Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	22.10.2019
Technical Working Group IO-Link Wireless	Transfer in die Wirtschaft	Diskussion der entwickelten Protokoll-Erweiterung	30.3.2020
Technical Working Group IO-Link Wireless	Transfer in die Wirtschaft	Diskussion Ergebnisse des Proof of Concept	16.6.2020 23.6.2020 29.6.2020

### Wireless Congress 2019

Es wurde ein Beitrag mit dem Titel »Cognitive radio method for adaptive media access in IO-Link Wireless based real-time wireless systems« eingereicht und vorgetragen. Gegenstand war die Vorstellung des Vorhabens AMEIDA, die die Motivation ebenso umfasste, wie den damaligen aktuellen Stand der Bearbeitung (November 2019).

### Technical Working Group IO-Link Wireless

Mit den im Projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Mitgliedern der Technical Working Group IO-Link Wireless wurden im Juni 2020 die Methodik sowie die Ergebnisse des Proof of Concept intensiv diskutiert (vergleiche Abschnitt 4.7). Schwerpunkt hierbei waren Fragestellungen hinsichtlich des in den »IO-Link Wireless System Extensions Version« [8] definierten und beschriebenen Zellkonzepts.

Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
PROFIBUS Nutzerorganisation	Transfer in die Wirtschaft	Darstellung der Ergebnisse	Nicht mehr geplant <sup>1)</sup>
SPS 2020	Transfer in die Wirtschaft	Messe, Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	Nicht mehr geplant <sup>2)</sup>
IO-Link Member Meeting	Transfer in die Wirtschaft	Präsentation der Ergebnisse	Nicht mehr geplant <sup>1)</sup>

Journal of Sensors and Sensor Systems	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	2021
Sitzung der ZVEI-Forschungsgemeinschaft Automation	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	November 2020
Sensor and Measurement Science International 2021	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung des Projekts und wesentlicher Ergebnisse	Mai 2021
Konferenz SmartSystech (VDE)	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	2. Quartal 2021
Fraunhofer IMS Jahresbericht 2020	Transfer in die Wirtschaft	Zusammenfassung der Ergebnisse	2021
European Test and Telemetry Conference	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse	Nicht mehr geplant <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Die Projektergebnisse wurden wie oben beschrieben mit der Technical Working Group IO-Link Wireless intensiv diskutiert. Die Technical Working Group IO-Link Wireless gehört der IO-Link Community an. Diese gehört wiederum der PROFIBUS Nutzerorganisation an. Diese Diskussionen haben vor dem Hintergrund einer möglichen Standardisierung eine gewisse Relevanz.

<sup>2)</sup> Die SPS 2020 findet aufgrund der Corona-bedingten Einschränkungen nicht als Präsenzmesse statt.

<sup>3)</sup> Die nächste »European Test and Telemetry Conference« findet vermutlich erst im Jahr 2022 statt.

Alle sonstigen in Tabelle 4 aufgeführten Transfermaßnahmen sollen wie geplant im angegebenen Zeitraum durchgeführt werden. Sollte es Corona-bedingt zu unerwarteten Verzögerungen, Einschränkungen oder Ausfällen kommen, werden spätere Durchführungstermine geprüft.

## 9. Schlusswort

Das Vorhaben konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Dies wäre ohne die umfassende Unterstützung der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V., der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses, der Festo AG & Co. KG sowie der Mitglieder der »Technical Working Group IO-Link Wireless« nicht möglich gewesen. Gerade auch im Kontext der Corona-bedingten Beeinträchtigungen in der Endphase des Vorhabens konnten gemeinsam stets pragmatische und zielgerichtete Lösungen gefunden werden, die einen erfolgreichen Abschluss des Vorhabens gewährleisteten.

Das Projektteam möchte sich an dieser Stelle ausdrücklich für diese Unterstützung bedanken.

## 10. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), *Industrie 4.0 - Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland*, Berlin, 2015.
- [2] VDE (ITG), *Positionspapier "Funktechnologien für Industrie 4.0"*, Frankfurt a.M., 2017.
- [3] ZVEI, *Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik*, Frankfurt a.M., 2008.
- [4] ZVEI, *Consumer-Geräte im Industrie-4.0-Umfeld*, Frankfurt a.M., 2017.
- [5] VDI/VDE, *Richtlinie 2185, Koexistenzmanagement von Funklösungen - Blatt 2*, Düsseldorf, 2009.
- [6] J. Bischoff, *Studie "Erschließen der Potenziale der Anwendung von „Industrie 4.0“ im Mittelstand"*, agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH, Mülheim a.d.R., 2015.
- [7] ZVEI, *Industrie 4.0: Auf dem Weg zur smarten Fabrik*, Frankfurt a.M., 2015.
- [8] IO-Link Community, *IO-Link Wireless System Extensions Version 1.1*, Karlsruhe, 2018.
- [9] DIN/DKE, *Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0 Version 3*, Berlin, Frankfurt, 2018.
- [10] Bluetooth SIG, Inc., *Bluetooth Core Specification - Version 5.0*, 2016.
- [11] D. Block und U. Meier, *Koexistennoptimierte industrielle Funksysteme - KOSYS*, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, 2015.
- [12] T. M. Chiwewe, C. F. Mbuya und G. P. Hancke, *Using Cognitive Radio for Interference-Resistant Industrial Wireless Sensor Networks*, University of Pretoria, Pretoria, 2016.
- [13] F. HESSAR, *Spectrum Sharing in White Spaces*, University of Washington, Washington, 2015.
- [14] ETSI, *EN 300 328 V2.2.2 - Wideband transmission systems*, Sophia Antipolis Cedex, 2019.
- [15] IO-Link Community, „IO-Link Planungsrichtlinie Version 1.1,“ Karlsruhe, 2018.
- [16] IEEE Computer Society, *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) Specifications*, 2016.