

Forschungsprojekt

Hochperformante, sichere Funktechnologien und deren Systemintegration in zukünftige industrielle Closed-Loop-Automatisierungslösungen



Schlussbericht, Institut inIT

Dimitri Block, Jürgen Jasperneite, Uwe Meier, Arne Neumann, Lukasz Wisniewski

Lemgo, 31.01.2019

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Meier (uwe.meier@hs-owl.de)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jasperneite (juergen.jasperneite@hs-owl.de)

Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Institut Industrial IT - inIT
Liebigstrasse 87
D-32657 Lemgo

<https://www.hs-owl.de/init/>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuwendungsempfänger:	Hochschule Ostwestfalen-Lippe - Institut inIT
Förderkennzeichen:	16KIS0266
Laufzeit des Vorhabens:	1.02.2015 bis 31.07.2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Tabellenverzeichnis	3
2 Abbildungsverzeichnis	3
3 Kurzfassung	4
4 Aufgabenstellung des Forschungsprojekts	6
5 Voraussetzungen des Forschungsprojekts	6
6 Planung und Ablauf des Forschungsprojekts	6
7 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	7
8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
9 Ergebnisse des Forschungsprojekts	8
9.1 Aufbau des HiFlecs-Systems	8
9.2 Integration in industrielle Kommunikationssysteme	12
9.3 Netzwerk- und Koexistenzmanagement	15
9.4 Funkkanalvermessung und -modellierung	30
9.5 Demonstratoren	37
10 Verwertbarkeit der Ergebnisse	41
11 Relevante Ergebnisse seitens Dritter	41
12 Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	41
13 Verwertungsplan	41
13.1 Veröffentlichungen	41
13.2 Studentische Arbeiten	43
14 Anhang	44
14.1 Literaturverzeichnis	44
14.2 Abkürzungsverzeichnis	45

1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dienste an der Schnittstelle AT-SAP	12
Tabelle 2: Einordnung in das FCAPS Modell	15
Tabelle 3: Auszug relevanter Information Elements nach RFC-7012	18
Tabelle 4: Architektur des <i>Convolutional Neural Network</i>	21
Tabelle 5: Parameter für NFSC	23
Tabelle 6: Charakteristische Parameter der zeitinvarianten Funkkanäle	32
Tabelle 7: Charakteristische Parameter der polarisationsvarianten Funkkanäle	35

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur	7
Abbildung 2: Komponenten und Schnittstellen des HiFlecs-Systems	9
Abbildung 3: HiFlecs-Schichten-Ebenen-Modell	10
Abbildung 4: Schichten- und Ebenen-Übersicht HiFlecs	10
Abbildung 5: Integration der HiFlecs-Module in das Profinet-Gerätemodell des HiFlecs-Gateways	13
Abbildung 6: Inbetriebnahme eines HiFlecs-/Profinet-Systems	14
Abbildung 7: Synchronisation mit Profinet IRT	15
Abbildung 8: Synchronisation des Übertragungszyklusses	17
Abbildung 9: Architektur für das Monitoring von HiFlecs	18
Abbildung 10: Aufbau des Koexistenzmanagement-Moduls Cognitive Medium Utilization (CMU) im HiFlecs-Controller	19
Abbildung 11: Block-Diagramm des NFSC-Ansatzes	19
Abbildung 12: Spektrale zu identifizierenden Klassen der Störsignale des CNN-Ansatzes	22
Abbildung 13: Erkennungsraten des CNN-Ansatzes für die Testdaten	23
Abbildung 14: Vergleichende Leistungsbewertung der CNN und NFSC basierten <i>Interference Classification</i> Ansätze mit gemittelten Genauigkeit der Klassifizierung von IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 konformen Störsignalen für variierende SNR	24
Abbildung 15: Distanzgewinn bei typische Pfadverlustexponent in industriellen Funkumgebungen	24
Abbildung 16: Interaktion zwischen dem Agenten und der Umgebung beim <i>Reinforcement Learning</i>	25
Abbildung 17: Architektur eines DQNs	26
Abbildung 18: Koexistenz-Management-Umgebung beinhaltet vier nicht-überlappende Frequenzkanäle	27
Abbildung 19: Szenario mit statischen Funkkanalwahl des Störsystems (links) und mit sequentiellen Funkkanalwechsel des Störsystems (rechts)	28
Abbildung 20: DQN-Agent mit statische Funkkanalwahl des Störsystems	28
Abbildung 21: DDQN-Agent mit statische Funkkanalwahl des Störsystems	29
Abbildung 22: DQN-Agent mit sequentieller Funkkanalwechsel des Störsystems	29
Abbildung 23: DDQN-Agent mit sequentieller Funkkanalwechsel des Störsystems	29
Abbildung 24: Messaufbau der drei Funkkanäle in einer Fabrikhalle	30
Abbildung 25: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 1	31
Abbildung 26: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 2	31
Abbildung 27: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 3	31

Abbildung 28: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 1	32
Abbildung 29: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 2	32
Abbildung 30: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 3	32
Abbildung 31: Pfadverlust in Abhängigkeit des Antennenabstands	33
Abbildung 32: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 1 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne	34
Abbildung 33: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 2 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne	34
Abbildung 34: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 3 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne	34
Abbildung 35: Messaufbau mit den Antennenpositionen in der Roboterzelle	35
Abbildung 36: Sicht der Sende- (links) und Empfangsantenne (rechts)	36
Abbildung 37: Median, Perzentile 90% und 10% (Fläche) der Impulsantwort (links) und dessen Varianz über die Messzeit (rechts)	36
Abbildung 38: Median H_{median} , Perzentile 90% und 10% (Fläche) des Frequenzgangs über die Messzeit (links) und dessen Frequenzvarianz (rechts)	37
Abbildung 39: Normierte Autokorrelation der Dämpfung des Funkkanals des Abschnitt $t \in (5 s, 6 s)$ mit der größten Varianz	37
Abbildung 40: Echtzeitfähiger Koexistenzdemonstrator	38
Abbildung 41: Mikrocontroller-Mainboard mit dem LiPo Charger (oben links), dem Mikrocontroller Arduino Pro Mini 328 (mittig), dem Transceiver NRF24L01+ (rechts) und den LED-Leisten-Schnittstellen (unten)	38
Abbildung 42: Sequenzdiagramm der Funkkommunikation mit der echtzeitfähigen Adaption des Funkkanals	39
Abbildung 43: Prinzipskizze des HiFlecs-Gesamtdemonstrators	40
Abbildung 44: HiFlecs Gesamtdemonstrator	40

3 Kurzfassung

Zukünftige Industrieanlagen zeichnen sich durch eine komplexe Ad-Hoc-Vernetzung von Sensoren und Aktoren, Maschinen, sowie Steuer- und Regeleinheiten aus. Funkkommunikation ist längst als Problemlöser für diese Vernetzung in der industriellen Automation identifiziert worden. Allerdings erfüllen derzeitige Funklösungen die auf ZigBee, Bluetooth, WirelessHart oder WLAN basieren nicht die hohen Anforderungen an Echtzeitfähigkeit und Determinismus zur Anwendung in hochdynamischen regelungstechnischen Anwendungen. Um einen Durchbruch bei der Anwendung von Funkkommunikation in Fertigungsanlagen mit hohen Anforderungen an das Zeit- und Fehlverhalten zu erreichen, ist ein aufeinander abgestimmtes und durchgängiges Design der Kommunikationsschichten des Funksystems erforderlich. Eine besondere Herausforderung besteht darin, für die im Zukunftsprojekt Industrie 4.0 adressierten Anforderungen an Flexibilität, Modularität, Mobilität und Dynamik eine adäquate Kommunikationsinfrastruktur bereitzustellen. Darüber hinaus kann eine effiziente industrielle Funkkommunikation völlig neuartige Automatisierungskonzepte und Anwendungsbereiche erschließen.

Als Ziel dieses Vorhabens sollten innovative Technologien für ein neues industrielles Funksystem erarbeitet werden, welches weit über den heutigen Stand der Technik hinaus neue Funktionalität und Eigenschaften in der Funkkommunikation zum Beispiel für neue regelungstechnische Echtzeitanwendungen bietet. Hierbei hat sich das Institut inIT speziell mit der Systemarchitektur und -integration in die bestehende industrielle Umgebung mit einer Fokussierung auf Koexistenz- und Netzmanagementmechanismen beschäftigt. Zusätzlich war der Funkkanal geeignet zu charakterisieren.

Der HiFlecs-Controller einer HiFlecs-Funkzelle wird mittels eines industriellen Ethernet-Adapters als Gateway in ein übergeordnetes industrielles Kommunikationssystem (SPS) eingebunden. Der HiFlecs-Controller verantwortet den Datenaustausch zwischen den per HiFlecs-Funk als Clients angebotenen

Sensoren und Aktoren und der übergeordneten Steuerung. Hierbei sind die folgenden Aufgaben zu erfüllen: (i) Identifikation der HiFlecs-Clients und Zuordnung ihrer Modellbeschreibungen; (ii) Bereitstellung des Prozess-, Parameter- und Management-Datenkanals; (iii) Engineering und Beschreibung der Verwaltungsschale; (iv) Taktsynchronisation für den echtzeitfähigen Prozessdatenkanal.

Die HiFlecs-Funkkommunikation wird durch das HiFlecs-Netzmanagement koordiniert. Es verwaltet und überwacht die Kommunikation in einer HiFlecs-Funkzelle während der verschiedenen Betriebsphasen und ermöglicht die dynamische Anpassung des HiFlecs-Systems an sich ändernde Systemzustände, Umgebungsbedingungen und Nutzeranforderungen. Es beinhaltet das Monitoring des HiFlecs-Systems zur Ermittlung von Systemzuständen und Kennwerten und verfügt über Eingriffsmöglichkeiten, um Systemparameter zu beeinflussen. Weiterhin besitzt es eine Eingabeschnittstelle zur Applikation, um Anforderungsprofile und Sollwerte zu erhalten und erstellt Berichte an die Applikation.

HiFlecs verfügt über eine automatische Plug&Play-Funktionalität, um neue HiFlecs-Clients nahtlos und sicher zu integrieren. Der HiFlecs-Controller sucht kontinuierlich neue HiFlecs-Clients (discovery mode). Ein neuer Client übermittelt seine Eigenschaften mittels des Management-Datenkanals als IP-basiertes Protokoll zum Controller. Im zweiten Schritt übermittelt der Controller die relevanten Informationen zur übergeordneten Konfigurations-Instanz und im dritten Schritt wird der neue Client in das HiFlecs-System eingebunden.

Ein hochverfügbares Funksystem in Gegenwart parasitärer Funksysteme und Funkstörer erfordert ein automatisches Koexistenzmanagement. Hierbei wird aus den Quality-of-Service-Parametern (QoS) ein Koexistenzzustand abgeleitet (quality of coexistence, QoC). Im Fall eines verschlechterten QoC-Zustands muss ein neues Ressourcen-Triple 'Frequenzkanal, Zeitschlitz, Sendeleistung' gefunden und zugeordnet werden. Das Koexistenzmanagement-System stellt somit einen Regelkreis dar. Die Ressourcenzuordnung basiert auf einer zuvor durchgeführten proaktiven kognitiven und / oder kooperativen Ressourcempfehlung. Hierfür ist eine Abtast- und Klassifizierungseinheit erforderlich, die fremde Funksysteme und Funkstörer erkennt. Im Rahmen des Vorhabens konnte die Überlegenheit selbstlernender faltungsbasierter neuronaler Strukturen (convolutional neural networks, CNN) gegenüber expertenbasierten Systemen gezeigt werden. Bezüglich der Ressourcenzuordnung wurden Ansätze des Reinforcement Learning (RL) untersucht. Hierbei wird das selbstständige Erlernen des Fremdstörrerhaltens ohne Vorwissen über die jeweilige Funkumgebung ausgenutzt.

Bei der Funkkanalvermessung und -modellierung wurden zeitinvariante, zeitvariante und polarisationsvariante 5,8-GHz-Funkkanäle innerhalb einer Funkzelle in der Umgebung der Anwendungs-Demonstration mit dem maximalen Abstand 20 m unter Verwendung von Halbwellendipolantennen charakterisiert. Es ergaben sich im ungünstigsten Fall mittlere Dämpfungen < 73 dB, Delay-Spread < 140 ns, 90-%-Kohärenzbandbreiten > 1 MHz. Zeitvariante Beeinflussungen durch Roboterbewegungen bewirkten 90-%-Kohärenzzeiten > 63 ms.

Zur Demonstration des echtzeitfähigen Koexistenzmanagements wurde ein Persistence-of-Vision-Demonstrator aufgebaut. Zwei rotierende Scheiben enthalten jeweils drei LED-Zeilen mit denen ein stehendes Bild dargestellt werden kann. Ein ausgewähltes Bild auf einer Master-Scheibe (Alice) wird per Echtzeit-Funksystem zur anderen Slave-Scheibe (Bob) übertragen. Im ungestörten Fall sind die Bilder synchron zueinander. Durch die Aktivierung eines Funkstörers wird die Kommunikation zwischen Alice und Bob gestört und damit geht die Synchronität verloren. Mit Aktivierung des Koexistenzmanagements wählt das Funksystem einen ungestörten Funkkanal für die Übertragung der Bildinformation und somit werden trotz Funkstörers die Bilder wieder als identisch und synchron zueinander dargestellt. Damit kann das erfolgreiche echtzeitfähige Koexistenzmanagement visualisiert werden.

Der HiFlecs-Gesamtdemonstrator veranschaulicht die Ergebnisse der einzelnen HiFlecs-Teilaspekte bei einer industriellen Verpackungsmaschine. Die Teilaspekte umfassen Echtzeitfähigkeit, Zuverlässigkeit, Informationssicherheit, Energieeffizienz, Plug&Play und Adaption. Die Installation erfolgte in der SmartFactoryOWL in Lemgo, einer gemeinsamen Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft und der Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Der Aufbau besteht aus einer linearen Transportstrecke mit drei Transmodulen (HiFlecs Clients), die induktiv mit Energie und per HiFlecs-Funk mit Daten versorgt werden. Die Daten-Ansteuerung erfolgt über eine zentrale Steuerung, in welche der HiFlecs-Controller

integriert ist. Als weitere HiFlecs-Clients sind ein Monitoring sowie ein Linearmesssystem vorgesehen. Das Monitoring wird über ein PROFINET-Netzwerk mit S7-Steuerung (Siemens) und PROFINET-HiFlecs-Gateway eingebunden. Über die Visualisierung werden Informationen zum Systemaufbau, Grafiken zum Systemverhalten und Details zur Performance der HiFlecs-Funkstrecke darstellbar.

4 Aufgabenstellung des Forschungsprojekts

Der Schwerpunkt des HiFlecs-Projekts war die Erforschung neuer Technologien der PHY/MAC-Ebene, der Netzmanagement-Ebene und der Applikationsebene für hochperformante und echtzeitfähige Funklösungen. Hierbei ist die Netzmanagement-Ebene die Schnittstelle zur industriellen Anwendungsfunktion. Das Institut inIT hat sich speziell mit der **Systemarchitektur und -integration mit Fokussierung auf Koexistenz- und Netzmanagementmechanismen** beschäftigt. Zusätzlich sollte der Funkkanal charakterisiert werden.

Zur Selbstkonfiguration sollte ein neuartiges Multifaktor-Authentifizierungsprotokoll entwickelt werden, das mittels eines Cross-Layer-Ansatzes umgesetzt werden sollte. Zum anderen war eine Abstraktionsschicht zu entwickeln, die eine einfache Integration von echtzeitbasierten drahtgebundenen Netzwerken erlaubt. Dieses ermöglicht eine technologieunabhängige Einbuchung ins Funknetz mit minimalem manuellem Aufwand.

Weiterhin waren kognitive Algorithmen bezüglich des Koexistenzverhaltens zu erforschen, welche die Zeit- und Frequenzabbildung der Information, die aktuellen Übertragungsbedingungen und die Anforderungen der Anwendung mitberücksichtigen. Die Koordination mehrerer Funkzellen untereinander erfolgt mittels Verfahren, welche die Kommunikationsanforderungen eines gesamten Produktionsablaufs mit einbeziehen. Das Koexistenzmanagement sollte automatisiert auf Basis einer autonomen Erfassung der Funkumgebung unter Berücksichtigung weiterer vorhandener Funksysteme im Anwendungsbereich erfolgen.

Neben dem Einsatz in dynamischen Produktionsstraßen sind weitere Anwendungsfälle des HiFlecs-Funksystems denkbar. Beispiele sind insbesondere Anwendungen unter Ersatz von Signalübertragungen per Schleifringen und Schleppkabel bei drehenden/rotierenden Maschinenteilen wie sie z. B. in Verseilmaschinen, bei Maschinenkarussellen für Flaschenfüllanlagen oder Knickarmrobotern vorkommen. Darüber hinaus kann eine hochperformante, energieeffiziente, industrietaugliche Funkkommunikation völlig neuartige Automatisierungskonzepte und Anwendungsbereiche ermöglichen.

5 Voraussetzungen des Forschungsprojekts

Die Arbeiten wurden im Forschungsinstitut für industrielle Informationstechnik (inIT, www.inIT-owl.de) der Hochschule OWL durchgeführt. Es ist ein In-Institut des Fachbereichs Elektrotechnik und Technische Informatik. Es ist eine der führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der industriellen Informationstechnik und beschäftigt derzeit mehr als 60 Mitarbeiter. Hier arbeiten sieben Professoren mit teilweise überlappenden Arbeitsgebieten in den Bereichen industrielle Echtzeitkommunikation, industrielle Bildverarbeitung und verteilte Echtzeit-Software. Im Forschungsschwerpunkt "Industrial Wireless" beschäftigen sich zurzeit vier Professoren und 20 wissenschaftliche Mitarbeiter mit aktuellen forschungsbasierten Fragestellungen.

Das Institut inIT ist zugleich eines der führenden Institute im BMBF-Spitzencluster „Intelligente technische Systeme OstwestfalenLippe – it's OWL“. Es ist beheimatet unter dem Dach des Forschungs- und Entwicklungszentrums CENTRUM INDUSTRIAL IT (CIIT) auf dem Campus der Hochschule OWL in Lemgo. Das CIIT ist Deutschlands erstes Science-to-Business-Center im Bereich der industriellen Automation. Unter einem Dach arbeiten und forschen voneinander unabhängige Unternehmen und Institute an der Verknüpfung von Informations- und Automatisierungswelt. (www.ciit-owl.de)

6 Planung und Ablauf des Forschungsprojekts

Das Vorhaben verfolgte in der Erforschung der Technologien einen integrativen Ansatz, bei dem keine technologischen Insellösungen, sondern ein durchgängiges Konzept erarbeitet werden sollte. Diese Aufgabe erfordert die ganzheitliche Betrachtung von der physikalischen Übertragungsschicht bis zur

Anwendungsschicht unter zusätzlicher Beachtung des industriellen Anwendungsumfelds. Entsprechend waren alle Teilaufgaben untereinander abgestimmt zu erarbeiten. Zur Umsetzung dieser Aufgabe wurde das Projekt in vier technische Arbeitspakete mit zugehörigen Schnittstellen strukturiert, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

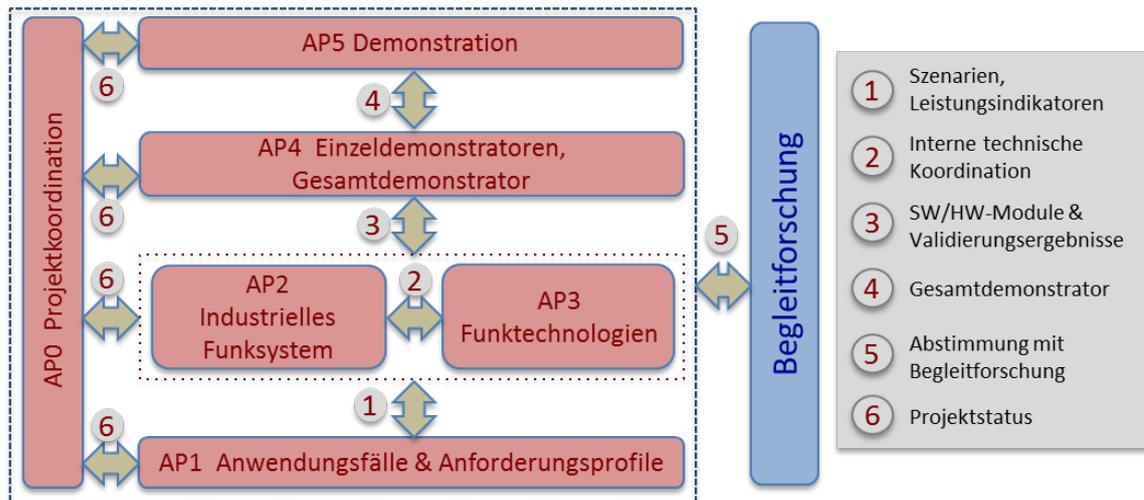


Abbildung 1: Projektstruktur

7 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zu industriellen drahtlosen Kommunikationssystemen für die Automation gab es viele Vorarbeiten. Sie zeigten, dass aktuelle Funklösungen die Anforderungen hochdynamischer regelungstechnischer Anwendungen, z. B. zentral geregelte Antriebskonzepte, nicht erfüllten. Im Projekt „Funklösungen in zeit- und fehlertoleranten geschlossenen Regelkreisen“ (WiControl) wurde ein Verfahren zum Reglerentwurf unter Berücksichtigung des Zeit- und Fehlerverhaltens industrieller Funklösungen in der Regelstrecke entwickelt. Demnach ist Closed-Loop-Control im ms-Bereich über Funk nur mit sehr aufwändigen Regelalgorithmen möglich. Das DFG-Schwerpunktprogramm 1305 „Regelungstheorie digital vernetzter dynamischer Systeme“ betrachtete vernetzte dynamische Systeme mit Schwerpunkt auf der Regelungstechnik, nicht jedoch der Optimierung der Kommunikation. Im Projekt „High Performance Wireless Fieldbus In Industrial Related Multi-Media Environment“ (RFieldBus) wurde eine Funktechnologie für PROFIBUS-DP entwickelt, die jedoch die hier betrachteten Anforderungen bei weitem nicht erfüllt.

Compressed Sensing (CS) ist ein Forschungsfeld zur effizienten Verarbeitung dünnbesetzter Signale. Für Maschine-zu-Maschine-Kommunikation bietet es die Grundlage für einen flexiblen Medienzugriff in der Kommunikation von Sensoren zur Steuereinheit und vermeidet Signalisierung. Das erlaubt die effiziente Anbindung von Sensoren. CS bietet Vorteile bei der Schätzung von Übertragungskanälen und erhöht die Robustheit gegenüber Asynchronität. Es ist damit ein wichtiger Lösungsansatz für eine neue Funkschnittstelle. Dabei ist die rechenintensive Signalrekonstruktion eine Herausforderung für die Hardwarerealisierung. Erste Ansätze wurden vorgestellt, jedoch noch keine echtzeitfähige Demonstration.

Medienzugriffsverfahren der Funktechnologien, die im industriellen Bereich eingesetzt wurden, nutzten mögliche Effizienzsteigerungen, die sich durch eine stärkere Berücksichtigung von Multicast- bzw. Broadcast-Kanälen in der Gestaltung des Zugriffsverfahrens (z. B. bei CTDMA) ergeben können, nicht aus. Im Rahmen der Entwicklung der HiFlecs-Funktechnologie ist ein neuartiges Zugriffsverfahren (unter Berücksichtigung anderer Entwicklungen der Übertragungs- und Sicherungsschicht) umgesetzt worden, das auch auf entsprechende Vorarbeiten der Projektpartner zurückgreift.

Koexistenzmanagement auf Basis kognitiver Verfahren ist ein neuer Forschungsansatz. Kognitive Verfahren wurden im Wesentlichen zur Verbesserung der Spektrumeffizienz eingesetzt. Dabei konzentrierten sich die Forschungsansätze im Wesentlichen auf Spektrumsabtastung (sensing), Signalklassifizierung und dynamische Ressourcenzuweisung. Im industriellen Bereich gab es lediglich manuelle Verfahren zur Koexistenzoptimierung.

8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben HiFlecs, in welches sich dieses Teilvorhaben eingliedert, verfolgte einen integrativen Ansatz, bei dem keine technologischen Insellösungen, sondern ein durchgängiges Konzept für industrielle Funklösungen erarbeitet werden sollte. Es erfolgte eine ganzheitliche Betrachtung von der physikalischen Übertragungsschicht bis zur Anwendungsschicht unter zusätzlicher Beachtung des industriellen Anwendungsumfelds. Entsprechend gab es eine enge Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern aus Forschung und Industrie. Zu den einzelnen Partnern ergaben sich insbesondere folgende Berührungspunkte:

Institut ITH der Universität Bremen

Die vom ITH bearbeiteten PHY/MAC-Konzepte bilden die Basis für die höheren Schichten. Es erfolgten Abstimmungen bzgl. der Systemarchitektur, der Schnittstellen, des Netzwerk- und Koexistenzmanagements und der Systemintegration.

IMST

Bezüglich des RF-Frontends erfolgten Abstimmungen hinsichtlich der Funkkanalemulation und der Integration in den Gesamtdemonstrator.

UKL - Universität Kaiserslautern

Mit UKL erfolgten Abstimmungen bezüglich der automatischen Plug&Play-Mechanismen und des kooperativen und kognitiven Koexistenzmanagements.

ifak

Mit dem Institut ifak gab es eine enge Zusammenarbeit im Bereich der Anwendungsfälle, der Anforderungsprofile und deren Integration in das Netzwerkmanagement. Außerdem wurden das Validierungskonzept und die Abbildung der verteilten Anwendungsfunktionen abgestimmt.

NXP

Mit NXP wurden die Wechselwirkungen zwischen den Konzepten Plug&Trust und Plug&Play erarbeitet.

Institut ITEM der Universität Bremen, Götting, Lenze, assoziierte Partner

Mit diesen Industriepartnern sowie den assoziierten Partnern gab es Berührungspunkte in der Definition der Anforderungsprofile und die Auswertung der Anwendungsfälle. Mit diesen Industriepartnern sowie ITEM erfolgte die Implementierung des Demonstrators.

Externe Projekte

Das Institut inIT suchte im Rahmen von HiFlecs den Austausch über die Forschungstätigkeiten mit externen Projekten und Partnern im Rahmen der Begleitforschung ZDKI. Dabei sind Aktivitäten zur Funkkanalvermessung und –modellierung sowie zur Systemintegration, insbesondere mit dem Projekt PARSEC, hervorzuheben. Dieser Austausch erfolgte auch durch den Besuch von Konferenzen, wie IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa), IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN) oder Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KomMA).

9 Ergebnisse des Forschungsprojekts

9.1 Aufbau des HiFlecs-Systems

In Abbildung 2 sind die verschiedenen Komponenten des HiFlecs-Systems sowie deren Schnittstellen dargestellt. Die zentrale Instanz des Systems stellt der HiFlecs-Controller dar. Dieser agiert als Access-Point (AP) für die verteilten Funkmodule. In dieser Eigenschaft zeichnet sich der Controller für das Management der HiFlecs-Funkzelle aus. Der Controller besitzt eine externe Schnittstelle (S₃) für die Integration in drahtgebundene industrielle Automatisierungsanlagen.

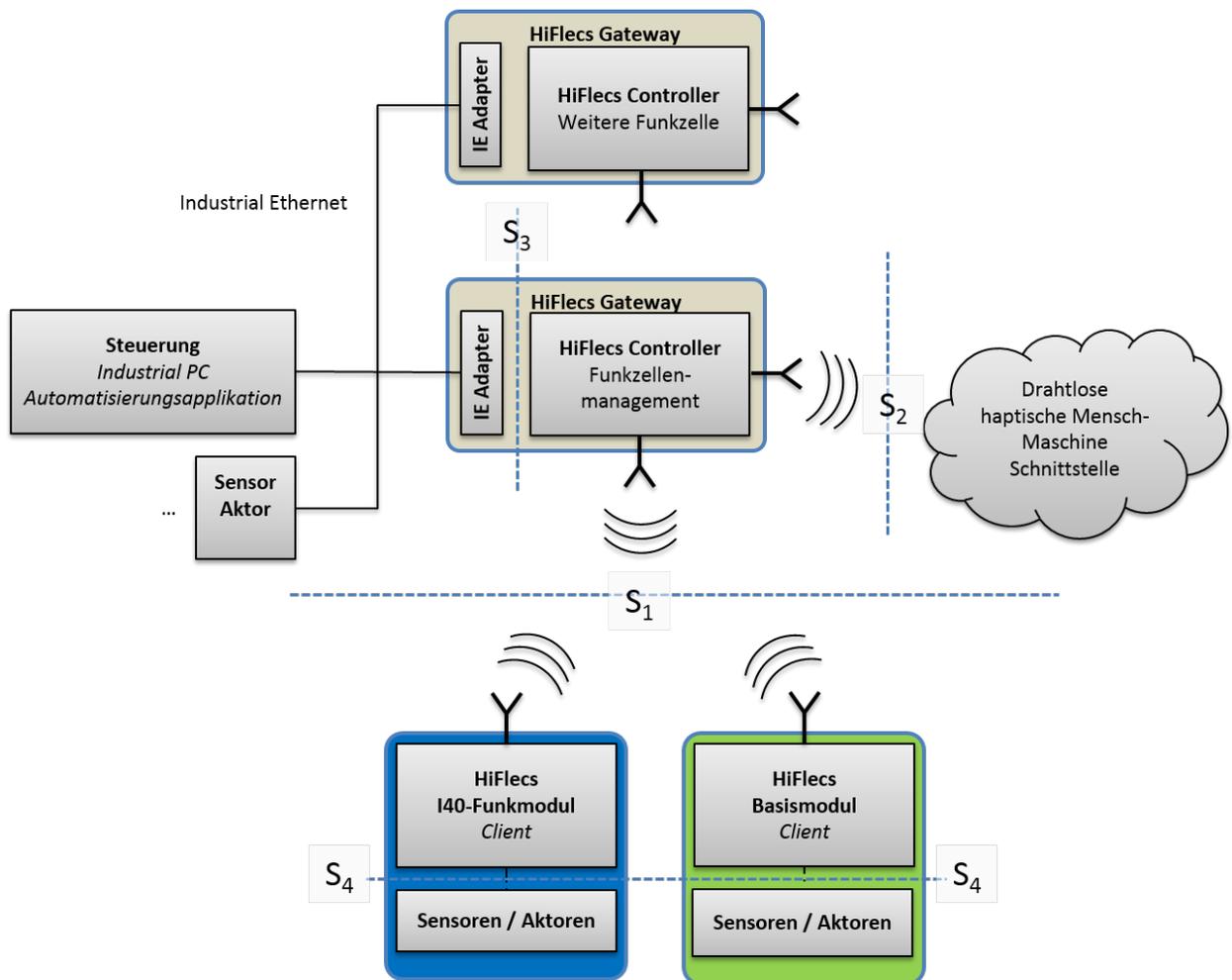


Abbildung 2: Komponenten und Schnittstellen des HiFlecs-Systems

Die weiteren Schnittstellen (S_1 , S_2 , und S_4) dienen zur Anbindung der weiteren HiFlecs-Systemkomponenten.

S_2 stellt eine drahtlose haptische Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Darüber könnte eine Diagnose und Wartung erfolgen. Die Clients (HiFlecs-I40-Funkmodul und HiFlecs-Basismodul) werden über die Schnittstelle S_1 in das System integriert. Das Basismodul stellt im Wesentlichen einfache Ein-/Ausgabefunktionalitäten über eine drahtlose Verbindung bereit. Die Ein-/Ausgabefunktionalitäten binden Sensoren und Aktoren über die Schnittstelle S_4 an. Darüber hinaus können innerhalb des I40-Funkmoduls zusätzliche Funktionen realisiert werden. Eine direkte Kommunikation zwischen den Clients ist nicht vorgesehen. Zusätzlich werden keine Mechanismen für einen Wechsel der Clients zwischen HiFlecs-Funkzellen geplant.

Das HiFlecs-System kann analog zum OSI-Modell anhand eines Schichten-Ebenen-Modells erläutert werden. Daraus werden benötigte Protokolle abgeleitet. Grundsätzlich können die Ebenen Data-Plane, Control-Plane und Management-Plane unterschieden werden (siehe Abbildung 3).

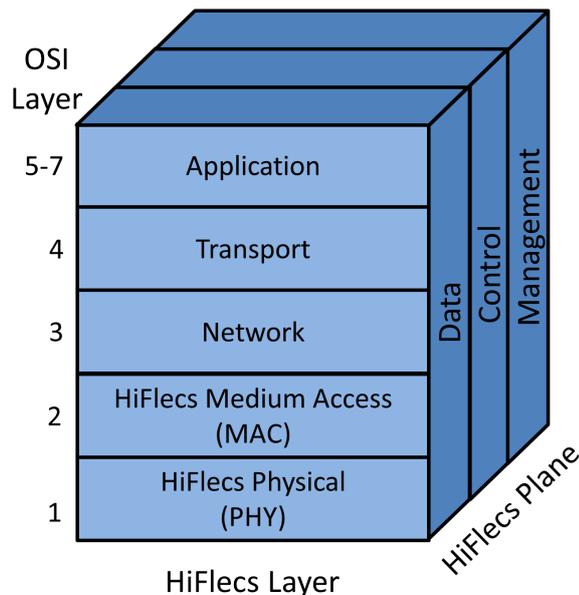


Abbildung 3: HiFlecs-Schichten-Ebenen-Modell

Im Gegensatz zum PHY- und MAC-Layer, die unabhängig von der Ebene (Plane) sind, können alle weiteren im HiFlecs-System verwendeten Protokolle einer bestimmten Ebene zugeordnet werden. Eine Übersicht über die verwendeten Protokolle und die Schnittstellen zwischen ihnen wird in Abbildung 4 gezeigt.

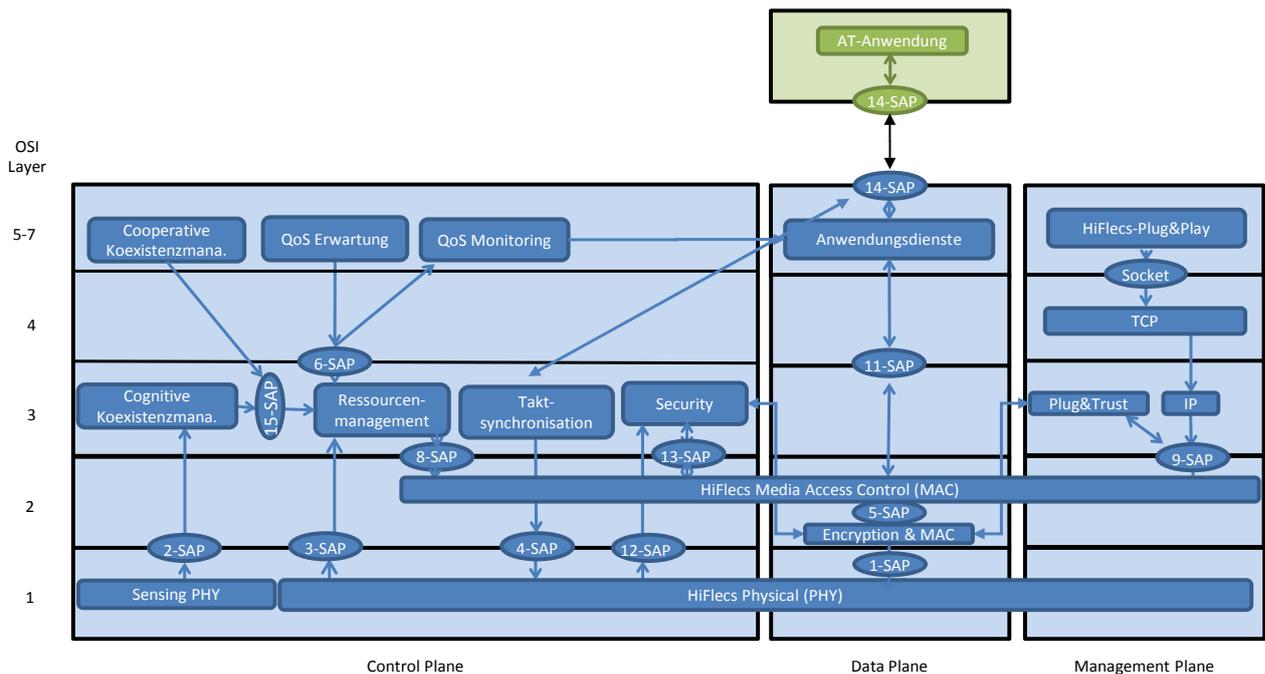


Abbildung 4: Schichten- und Ebenen-Übersicht HiFlecs

9.1.1 HiFlecs Physical-Layer

Das physikalische Zugriffsverfahren folgt einem Mehrträger-CDMA-Ansatz, da so ein hoher Grad an Flexibilität und Robustheit im Zusammenspiel mit angepassten Mehrträger-Wellenformen erreicht werden kann (Diversität, Processing Gain). Hierbei ist von einer Mischform der Ressourcenvergabe auszugehen, so dass Nutzer abhängig von der Klasse des Datenverkehrs sowohl auf mehrere Unterträger (nicht-)orthogonal aufgespreizt werden können, als auch nur über einen Mehrträgeransatz getrennt werden können. Als Mehrträgereverfahren wird Generalized Frequency Division Multiplex (GFDM) verwendet, bei dem im Gegensatz zur Symbolsichtweise klassischer OFDM-Systemen ein Sendeframe in Zeit und Frequenz entworfen wird.

9.1.2 HiFlecs MAC-Layer

Die MAC-Funktionalität des HiFlecs-Funksystems muss gemäß den Anforderungen an Echtzeit- und Nicht-Echtzeitübertragung mindestens zwei logische Kanäle bereitstellen. Darüber hinaus soll die Möglichkeit vorgesehen werden, über ein einfaches Random Access-Verfahren Anmeldungen von neuen Teilnehmern zu ermöglichen.

Jeder Teilnehmer, der echtzeitfähige Übertragungen durchführen muss, wird ein dedizierter Code zugeordnet. Außerdem teilen sich alle nicht-echtzeitfähigen Teilnehmer einen gemeinsamen Code, mit dem Best-Effort-Traffic abgewickelt werden kann. Das Vielfachzugriffsfahren innerhalb dieses Best-Effort-Codes ist CSMA/CA. Sollte es innerhalb dieses Codes zu einer Kollision kommen, so wäre nur nicht-echtzeitfähige Information betroffen, die erneut angefordert werden könnte (ARQ). Dies wiederum wäre bei Regelungsinformationen nicht zweckmäßig, da ein veralteter Sensorwert zum gegebenen Zeitpunkt ohnehin keine Relevanz mehr besitzen würde.

Zur Umsetzung harter Echtzeitanforderungen werden Ressourcenvergabeverfahren / Scheduler verwendet, so dass orthogonale Spreizcodes dediziert an Funkteilnehmer vergeben werden.

9.1.3 Data Plane

Diese Ebene dient zum echtzeitfähigen Prozessdatenaustausch zwischen Client (Sensor, Aktor) und Controller und stellt damit die HiFlecs-Funktionalität einer Automatisierungsanwendung zur Verfügung. In Anlehnung an drahtgebundene Echtzeitsysteme werden die Layer 3 und 4 nicht berücksichtigt, stattdessen greift das AT-Protokoll direkt auf den MAC-Layer zu. Die Schnittstelle zum HiFlecs-System soll dabei auf die Art der zu übertragenden Daten optimiert werden. Es sind insbesondere zyklische/azyklische Daten sowie Alarmmeldungen zu unterscheiden. Zyklische Daten werden dabei in einem von der Anwendung vorgegebenen festen Zeitintervall zwischen Controller und den HiFlecs-Clients ausgetauscht. Neben der Zykluszeit kann die Anwendung auch weitere Anforderungen an die Datenübertragung wie maximale Übertragungszeit oder Jitter stellen.

Um eine synchronisierte Ausführung der Applikation zu gewährleisten, erfolgt die Übertragung der zyklischen Datenpakete gekoppelt an einen Kommunikationstakt des HiFlecs-Systems. Das Taktsignal wird entweder im HiFlecs-Controller erzeugt oder über die HiFlecs-Gateway-Funktion vom übergeordneten Industrial Ethernet-System übernommen. Dieser Takt wird bis in die Applikationen der HiFlecs-Clients weitergeleitet, um eine zu konfigurierende, definierte Phasenlage der Applikationsfunktionen (Erfassungszeitpunkt für Sensordaten, Ausführungszeitpunkt für Aktordaten) sicherstellen zu können. Damit entfällt die Notwendigkeit der Übertragung von Zeitstempelinformationen innerhalb der zyklischen Prozessdaten und die Kommunikationslast des HiFlecs-Systems wird nicht weiter erhöht. Weiterhin ist keine (z. B. an IEEE 1588 orientierte) Uhrzeitsynchronisation erforderlich.

Zyklische Daten müssen vom Empfänger nicht bestätigt werden. Bei azyklischen Daten kann es sich entweder um nicht-zeitkritische Statusmeldungen, welche über den Best-Effort-Traffic übertragen werden können oder um Alarmmeldungen handeln, die möglichst schnell über die Luftschnittstelle übertragen werden müssen. Für die Realisierung der zeitkritischen bzw. nicht-zeitkritischen Übertragung werden zwei unterschiedliche Übertragungskanäle verwendet.

9.1.4 Control Plane

In der Control-Plane finden sich die für die Kontrolle der HiFlecs-Funkkommunikation notwendigen Funktionalitäten wie die Taktsynchronisierung sowie das Netz- und Koexistenzmanagement wieder. Die Taktsynchronisation stellt sicher, dass alle HiFlecs-Knoten ein gemeinsames Zeitverständnis relativ zu einem im HiFlecs-System einheitlich verfügbaren Taktsignal haben, was für die Realisierung bestimmter Automatisierungsanwendungen notwendig ist. Im HiFlecs-System ist vorgesehen, dass der Funktakt entweder als Zeitbasis für ein angegliedertes Bussystem dienen kann oder dass die Uplink-/Downlink-Zyklen des HiFlecs-Systems an die Buszyklen gekoppelt werden, so dass eine einfache Ableitung des Taktes möglich ist.

Das Koexistenzmanagement wird im HiFlecs-Controller realisiert, es führt eine ständige Qualitätsbewertung der Funkkommunikation durch. Zu diesem Zweck muss es ebenfalls auf den HiFlecs-Layer 1 zugreifen, von dem es die Daten der Leistungsdichtebewertung erhält. Die Resultate

werden zur Ermittlung von koexistierenden Störern sowie zur Modellierung des Störverhaltens verwendet.

Das Netzmanagement bildet die Dienstgüteanforderungen (QoS) der AT-Anwendung auf das Funkmedium ab. Es wurden QoS-Klassen definiert, die von der Anwendung angefordert werden können und dann vom HiFlecs-System zur Verfügung gestellt werden müssen. Insbesondere muss die Anwendung Vorgaben für genau einzuhaltende Zykluszeiten mit einem maximal zulässigen Jitter definieren. Es bleibt dann dem Netzmanagement überlassen, ob sie den entsprechenden HiFlecs-Knoten dynamisch Ressourcen zuweist oder eine statische Planung der gesamten HiFlecs-Kommunikation erforderlich wird. Die Ergebnisse des Netzmanagements werden an den HiFlecs-MAC-Layer übermittelt, welches diese bei der Planung des Medienzugriffes berücksichtigt. Ein kurzzeitiger Verbindungsabbruch zu einem Client wird ebenfalls vom Netzmanagement behandelt.

9.1.5 Management Plane

Über die Management Plane erfolgt die Anmeldung der HiFlecs-Clients am zentralen Controller. Zu diesem Zweck muss die Management Plane einen Adhoc-Kommunikationskanal zur Verfügung stellen, der nicht echtzeitfähig sein muss und vorzugsweise das IP-Protokoll unterstützt um darauf aufsetzend Standardprotokolle (z.B. OPC UA) auf der Applikationsebene verwenden zu können. Die Anmeldung der Clients erfolgt kryptographisch gesichert durch ein Plug&Trust-Verfahren.

9.2 Integration in industrielle Kommunikationssysteme

HiFlecs beschränkt sich auf die Implementierung der drahtlosen Kommunikation zwischen den einzelnen Sensoren/Aktoren und einem zentralen HiFlecs-Controller. Dem Controller obliegt dabei das Management der HiFlecs-internen Kommunikation. Die Steuerungsapplikation, welche den unterliegenden physikalischen Automatisierungsprozess überwacht und regelt, wird üblicherweise auf einer externen SPS ausgeführt. Die Aufgabe des HiFlecs-Controllers besteht deshalb auch darin, die Kommunikation zwischen der SPS und den HiFlecs-Modulen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck stellt er an der Systemschnittstelle S3 eine Gateway-Funktionalität zur Verfügung.

9.2.1 Integrationsmodell

Es wurde ein Modell für die Integration des HiFlecs-Systems in ein übergeordnetes industrielles Netzwerk aufgestellt, welches die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Abbildung der Gerätesicht
- Identifikation
- Datenkanäle der Clients
- Daten des Controllers bzw. des HiFlecs-Netzes
- Zeit- und Taktsynchronisation
- Engineering-Aspekte, Gerätebeschreibung

Für die Integration in Industrial Ethernet-Systeme wurde der HiFlecs-Controller um eine AT-Anwendung zu einem HiFlecs-Gateway erweitert und interagiert über die Schnittstelle *AT-SAP* mit einem IE-Adapter. Die Interaktion dient vorrangig der periodischen Übertragung von Prozessdaten. Zusätzlich werden Parameter- und Konfigurationsdaten sowie Managementdaten (Zustandsinformationen, Alarmer, Identifikationsdaten, etc.) übertragen. Für diese Schnittstelle wurden die notwendigen Dienste und deren Parameter definiert.

Tabelle 1: Dienste an der Schnittstelle AT-SAP

Dienst	Beschreibung
InputData	Prozessdatenübertragung von den HiFlecs-Clients zum IE-Adapter, z.B. Sensormesswerte
OutputData	Prozessdatenübertragung vom IE-Adapter zu den HiFlecs-Clients, z.B. Aktuatorstellwerte

RegisterClientProcessDataFormat	Übertragung von Informationen über die Struktur und Herkunft von Prozessdaten
RequestParameterData	Anforderung der Übertragung von Parameterdaten (einmalig oder unter Angabe eines Aktualisierungsintervalls)
ProvideParameterData	Übertragung von Parameterwerten (als Reaktion auf die Anforderung oder spontan)
NotifyEvent	Anzeige von Ereignissen, d.h. insbesondere Diagnosen und Fehlerzustände der einzelnen Geräte oder des Gesamtsystems, die die Qualität der Prozesswerte beeinträchtigen oder einen Eingriff erfordern

Das Modell wurde beispielhaft für die Integration eines HiFlecs-Systems in ein Profinet-basiertes Automatisierungssystem angewendet. Dabei dient das HiFlecs-Gateway als Proxy für das HiFlecs-System und stellt in Profinet ein modulares IO-Gerät dar, wobei jeder Slot einen HiFlecs-Client repräsentiert, siehe Abbildung 5. Ein weiterer Slot wird angelegt, um ein Modul zur Abbildung der Eigenschaften des Controllers bzw. des Funksystems aufzunehmen. Dieses Modul wird in Slot 0 platziert, es verfügt über keine Input- oder Output-Daten.

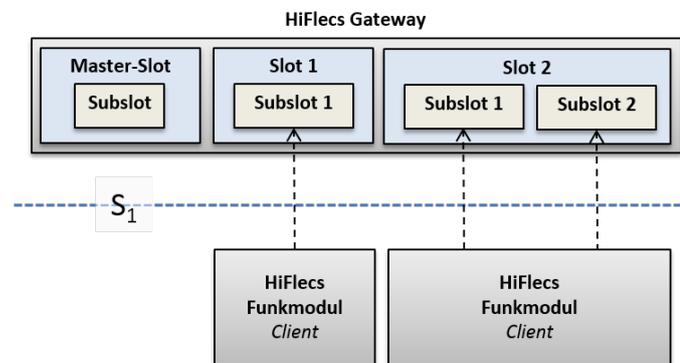


Abbildung 5: Integration der HiFlecs-Module in das Profinet-Gerätemodell des HiFlecs-Gateways

9.2.2 Konfiguration

Für das Engineering eines solchen Systems sind die folgenden Schritte entsprechend der Abbildung 6 zu durchlaufen [1]:

- Erkundung aller verfügbaren HiFlecs-Module
- Übermittlung der HiFlecs-Module inklusive ihrer Eigenschaften durch den HiFle3cs-Controller
- Verarbeitung durch das Engineering-Tool des Automatisierungssystems

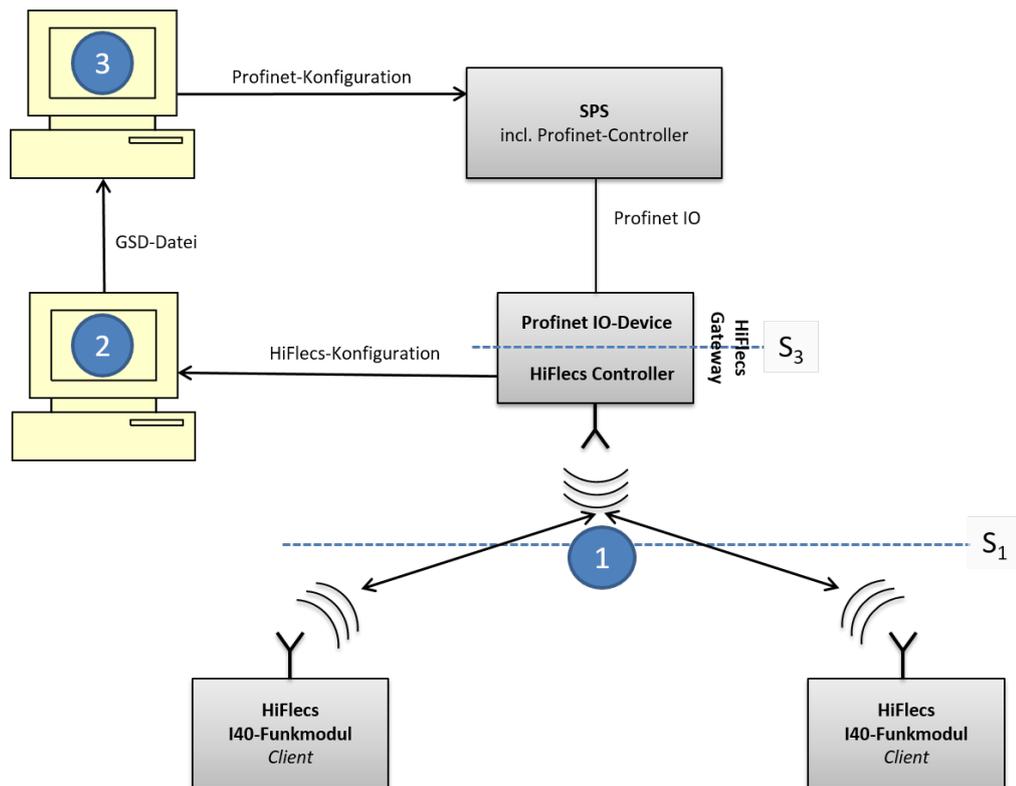


Abbildung 6: Inbetriebnahme eines HiFlecs-/Profinet-Systems

Für eine einfache Integration von HiFlecs-Komponenten in ein Profinet-System im Sinne von Plug&Play wurde ein Konzept für die folgenden Anforderungen erarbeitet:

- Automatische Erkennung aller HiFlecs-Module durch einen Melde-Kanal (Management Plane)
- Abruf der Moduleigenschaften durch direkten Zugriff auf die Geräteinformationen
- Erzeugung einer GSD-Datei in einer externen Rechnerkomponente

9.2.3 Synchronisierter Betrieb

Einige Automatisierungssysteme bieten in Geräten einen geplanten, äquidistant getakteten Echtzeitbetrieb für Prozessdaten an. Ein Beispiel dafür ist Profinet nach Conformance Class 3 (Profinet IRT), an Hand dessen ein Verfahren zur taktsynchronen Integration von HiFlecs aufgestellt wurde. Ziel dieser Profinet-Betriebsart ist die Synchronisation der Applikationen in den Endgeräten (Profinet Controller und Profinet Devices). Dabei wird den dezentralen Feldgeräten die Information übermittelt, zu welchem Zeitpunkt relativ zum Buszyklus die Messdaten abgetastet und die Stelldaten an die Peripherie ausgegeben werden. Für die Planung dieser Betriebsart ist es daher notwendig, neben dem Zeitbedarf für die Kommunikation auch den Zeitbedarf der Applikationen zu betrachten.

Für die HiFlecs-Integration bedeutet das, dass dem Planungsprozess Informationen über die Dauer der Funkkommunikation und die Verarbeitungsdauer im HiFlecs-Controller und den HiFlecs-Clients zur Verfügung gestellt werden muss. Konkret erfolgt dies bei Profinet in Form der auf der Submodule-Ebene befindlichen GSD-Parameter $T_{IO_InputMin}$ für die Eingabezeit und $T_{IO_OutputMin}$ für die Ausgabezeit. Der Wert für $T_{IO_InputMin}$ wird aus der Summe der Eingabezeit im HiFlecs-Client, einer HiFlecs-Übertragungszeit (Client zu Controller) und der Verarbeitungszeit im HiFlecs-Controller gebildet. Der Wert für $T_{IO_OutputMin}$ wird aus der Summe der Verarbeitungszeit im HiFlecs-Controller, einer HiFlecs-Übertragungszeit (Controller zu Client) und der Ausgabezeit im HiFlecs-Client gebildet.

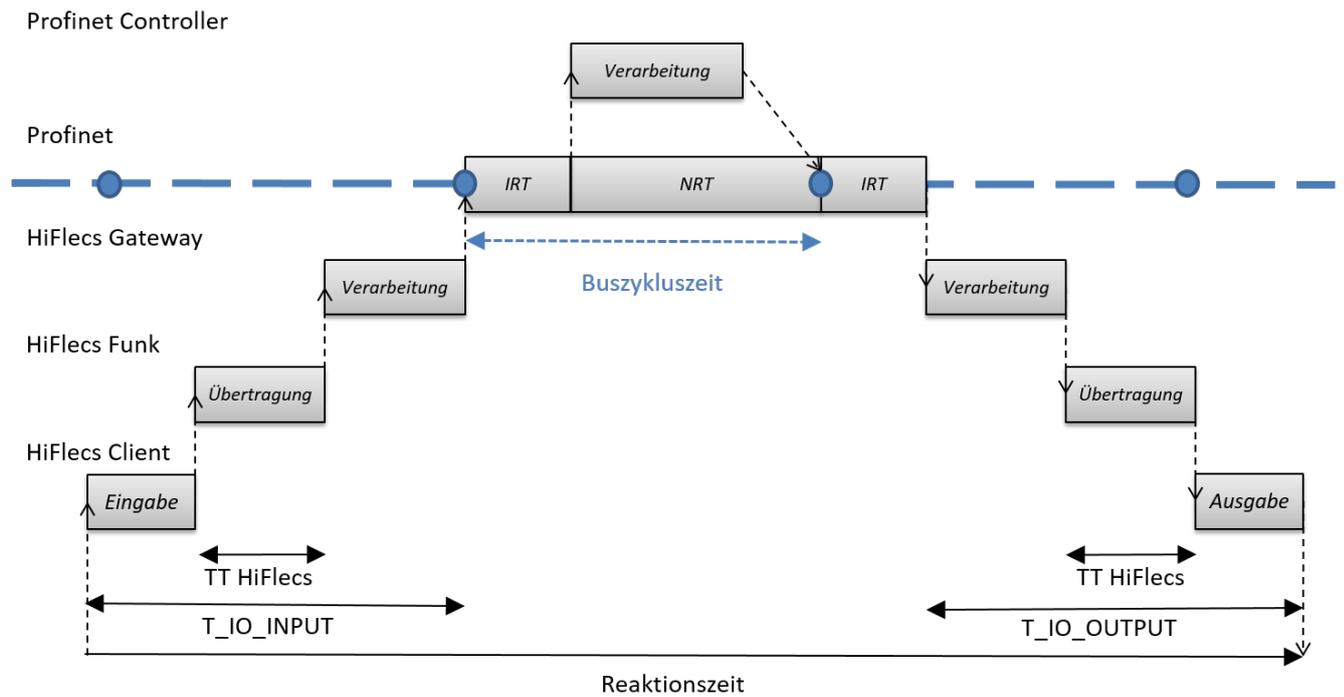


Abbildung 7: Synchronisation mit Profinet IRT

Ausschlaggebend für die Planung und die erreichbare Gesamtreaktionszeit des Gesamtsystems ist der jeweils größte dieser Werte bei Betrachtung aller angeschlossenen Clients. Dabei soll ein Profinet IRT System als Mindestanforderung eine Zykluszeit von 1 ms unterstützen können. Die Ein- und Ausgabezeiten dürfen die Zykluszeit nicht überschreiten.

9.3 Netzwerk- und Koexistenzmanagement

Die HiFlecs Funkkommunikation wird durch das HiFlecs-Netzmanagement koordiniert. Es bildet die Anforderungen des AT-Protokolls dynamisch auf die verfügbaren temporalen und spektralen Ressourcen ab. Diese werden durch das HiFlecs-Koexistenzmanagement limitiert.

Das HiFlecs-Netzwerk- und Koexistenzmanagement umfasst vielfältige Aufgaben, die verschiedene Ebenen des HiFlecs-Kommunikationssystems betreffen und deshalb verschiedenen Modulen zugewiesen wurden. Tabelle 2 benennt die im Projekt behandelten Module und beschreibt deren Einordnung in das FCAPS Modell der International Telecommunication Union (ITU).

Tabelle 2: Einordnung in das FCAPS Modell

	Fault Management	Configuration Management	Accounting Management	Performance Management	Security Management
Anforderungsmanagement		X		X	X
Monitoring und Diagnose	X			X	
Applikationstakt-synchronisation		X		X	
Übertragungssynchronisation		X			
Koexistenzmanagement	X	X			
Ressourcenmanagement	X	X		X	X

9.3.1 Netzwerkmanagement

Das Netzwerkmanagement verwaltet und überwacht die Kommunikation in einer HiFlecs-Funkzelle während der verschiedenen Betriebsphasen. Es ermöglicht die dynamische Anpassung des HiFlecs-Systems an sich ändernde Systemzustände, Umgebungsbedingungen und Nutzeranforderungen. Es beinhaltet das Monitoring des HiFlecs-Systems zur Ermittlung von Systemzuständen und Kennwerten und verfügt über Eingriffsmöglichkeiten, um Systemparameter zu beeinflussen. Weiterhin besitzt es eine Eingabeschnittstelle zur Applikation um Anforderungsprofile und Sollwerte zu erhalten und erstellt Berichte an die Applikation. Neben der in Abschnitt 9.3 vorgestellten Modellierung des Netzwerkmanagements und der Kategorisierung seiner Module sowie dem in Abschnitt 9.3.2 beschriebenen Koexistenzmanagement sollen hier die Ergebnisse der im Projekt bearbeiteten die Module Applikationstaktsynchronisation und Monitoring und Diagnose behandelt werden.

9.3.1.1 Verfahren zur Applikationstaktsynchronisation

Innerhalb des HiFlecs-Funksystems ist der HiFlecs-Controller für die Bereitstellung und Verteilung des dem Übertragungszyklus zu Grunde liegenden Taktsignals verantwortlich. Anwendungsabhängig kann er das Taktsignal selbst generieren oder es von einem übergeordneten Automatisierungssystem (aus einem Echtzeit-Ethernet-System) übernehmen. In der Betriebsart mit selbst generiertem Taktsignal läuft das HiFlecs-System ohne zeitliche Koordination zum überlagerten Automatisierungssystem. Das heißt, es wird in dieser Betriebsart weder gewährleistet, dass die IO-Daten nach jedem Buszyklus verarbeitet werden, noch, dass sie im gleichen Buszyklus aktualisiert werden. Durch die fehlende zeitliche Koordination ergeben sich Anforderungen an die Zugriffssteuerung auf gemeinsam vom Automatisierungssystem und HiFlecs genutzte Datenbereiche. Der synchronisierte Betrieb mit Übernahme des Takts aus einem überlagerten Automatisierungssystem wurde in Kapitel 9.2 beschrieben.

Der im HiFlecs-Controller vorliegende Takt muss nun an das gesamte HiFlecs-System und dessen Applikationen weitergeleitet werden. Der Takt wird dazu implizit in Form des Startzeitpunkts des Broadcasts der Prozessdaten im Downlink verteilt. Die HiFlecs-Clients synchronisieren sich auf dieses Signal.

In der Initialisierungsphase gelten vorkonfigurierte Grundeinstellungen für die Dauer eines Übertragungszyklusses (z.B. 1000 μs), für den Umschaltzeitpunkt zwischen Downlink und Uplink innerhalb des Zyklusses (z.B. 500 μs) und für den Aktualisierungszeitpunkt für Input- und Output-Werte in den Applikationen der Funkteilnehmer (z.B. jeweils 0 μs).

Der HiFlecs-Controller soll in der Lage sein, diese Werte innerhalb der Betriebsphase umzukonfigurieren. Das erfolgt über Parameterdaten an die HiFlecs-Clients.

Durch unterschiedliche Übertragungs- und Verarbeitungszeiten geht die Einheitlichkeit des Bezugspunktes der Synchronisation (Startzeitpunkt des Downlinks) im System verloren. Um dies zu kompensieren soll der HiFlecs-Controller den Zeitpunkt des Beginns des Uplink-Empfangs messen und daraus einen Korrekturwert berechnen, siehe Abbildung 8. Der Korrekturwert beträgt unter der vereinfachenden Annahme der Symmetrie von Downlink- und Uplink-Kanal die Hälfte der Differenz aus gemessenem und konfiguriertem Uplink-Zeitpunkt. Dieser Korrekturwert wird ebenfalls als Parameterdatum an die HiFlecs-Clients gesendet, woraufhin diese ihren Sendezeitpunkt und den Aktualisierungszeitpunkt für Input- und Output-Werte justieren sollen.

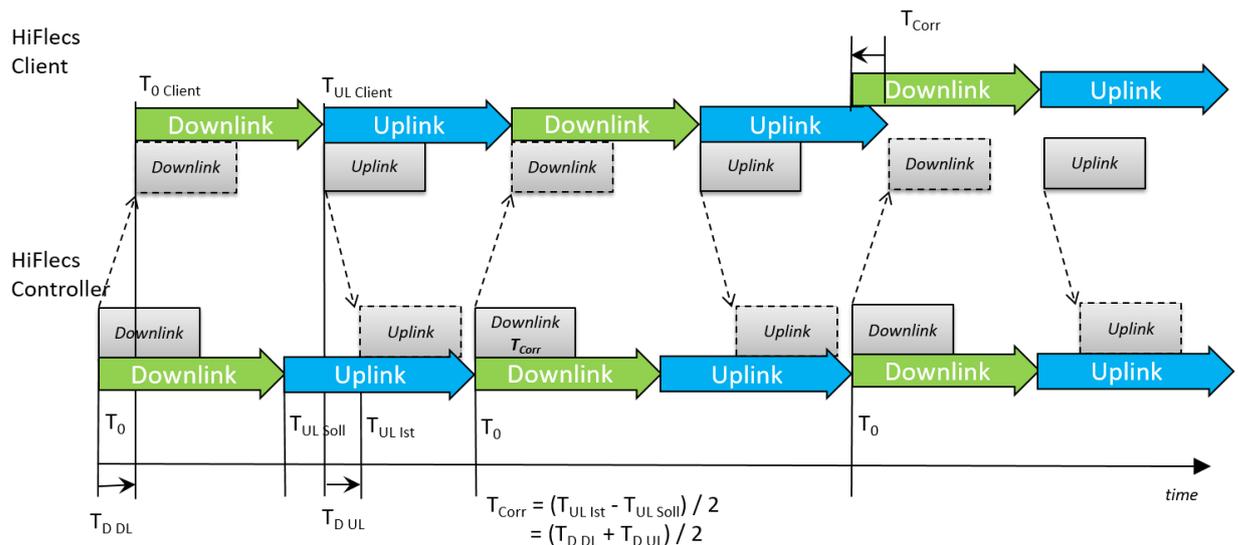


Abbildung 8: Synchronisation des Übertragungszyklus

9.3.1.2 Monitoring und Diagnose

Die kontinuierliche Überwachung der Qualität der Kommunikationsverbindungen ist unverzichtbar, insbesondere wenn es um die Gewährleistung einer hohen Echtzeitfähigkeit und Zuverlässigkeit von Netzwerken geht. Die Bereitstellung dieser Zustandsinformationen ist ein wichtiger Aspekt des Netzwerkmanagements [2]. Im Bereich der Netzwerküberwachung lassen sich prinzipiell aktive und passive Methoden unterscheiden. Aktive Methoden, zu denen beispielsweise die ICMP-Tools Ping und Traceroute gehören, gewinnen die Zustandsinformation durch zusätzlich erzeugten Datenverkehr, während passive Methoden sich ausschließlich auf das Mithören der vorhandenen Datenpakete beschränken. Insbesondere für drahtlose Systeme, die im Allgemeinen in der Übertragungskapazität stärker beschränkt sind, gilt es den jeweils notwendigen Detaillierungsgrad der zu erfassenden Leistungsparameter gegenüber der für deren Ermittlung zusätzlich zu übertragenden Datenmenge sorgfältig abzuwägen.

Viele Methoden zielen auf die Erfassung von Diagnoseinformationen der Netzwerkknoten und der Netzwerktopologien. Das Flow-Monitoring geht über die Analyse einzelner Datenpakete deutlich hinaus, in dem es Datenflüsse zwischen Endpunkten untersucht. Damit bildet es die Grundlage für eine dynamische und adaptive Netzwerkplanung. IPFIX ist ein weit verbreitetes Flow-Export Protokoll aus diesem Bereich und ist in RFC-7011 standardisiert.

Bei der Anwendung von Flow-Export in einem industriellen Funknetzwerk kommt der Modellierung der Datenflüsse, das heißt der Zuordnung von Datenpaketen zu Datenströmen, große Bedeutung zu. Spezielle Anforderungen ergeben sich hier beispielsweise aus der im Vergleich zu Ethernet reduzierten Länge der Protokollkontrollinformation in den Datenpaketen (PCI) aufgrund von Latenz- und Energieoptimierungen im Funksystem. Im Fall von HiFlecs werden bei der Flow-Zuordnung in einem ersten Schritt Prozessdaten von den übrigen Daten unterschieden, da für diese Datenströme unterschiedliche Metriken von Interesse sind. Die Prozessdaten sind zyklisch und je nach übergeordnetem Automatisierungssystem vorkonfiguriert bzw. statisch geplant. Deshalb sind Kenngrößen, wie Aktualisierungsintervalle, Jitter und Paketverlustraten eine wichtige Planungsgrundlage. Für weniger zeitkritische und ereignisgesteuerte Datenströme hingegen ist der Datendurchsatz eine wichtige Kenngröße, um beispielsweise Netzwerkressourcen zuzuordnen, während Paketverluste durch Übertragungswiederholung leicht auszugleichen sind [3]. Abbildung 9 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines HiFlecs-Monitorings auf Basis des IPFIX-Protokolls.

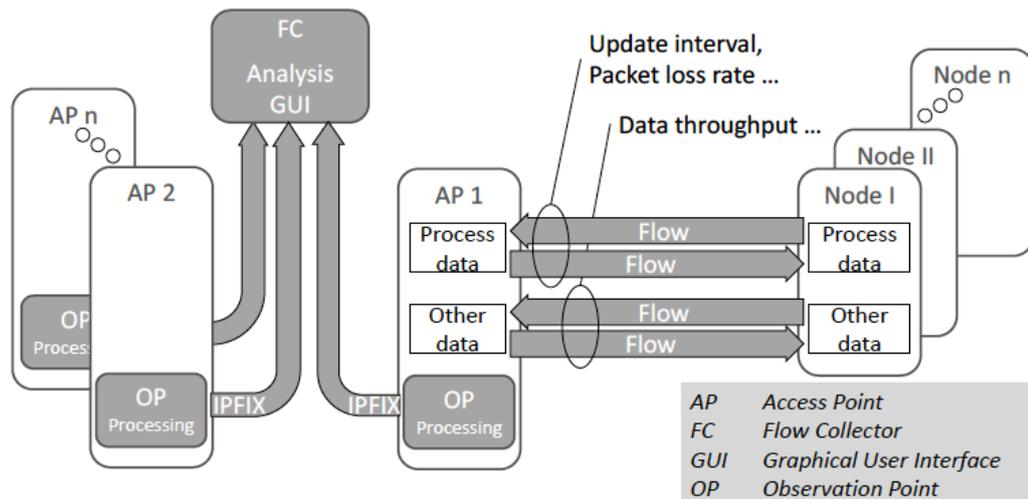


Abbildung 9: Architektur für das Monitoring von HiFlecs

In diesem Konzept erfolgt die Messung der Datenflüsse ausschließlich im HiFlecs-Controller, was bei einem Infrastrukturnetzwerk als ausreichend erachtet wird. Trotzdem ist Sorgfalt bei der Filterung und Aggregation der Monitoring-Information notwendig, um auch das übergeordnete drahtgebundene Kommunikationsmedium nicht unnötig durch den Flow Export zu belasten. IPFIX ermöglicht die Darstellung der Metriken für Datenflüsse auf der Basis der von der IANA in RFC-7012 standardisierten Informationselemente, von denen ein Auszug in Tabelle 3 aufgelistet ist.

Tabelle 3: Auszug relevanter Information Elements nach RFC-7012

Element ID	Name	Beschreibung
2	packetDeltaCount	Number of incoming packets since the previous report
21	flowEndSysUpTime	Relative time stamp of the last packet of this Flow
86	packetTotalCount	Total number of incoming packets for this Flow since the (re-)initialization
133	droppedPacketDeltaCount	Number of packets since the previous report dropped
135	droppedPacketTotalCount	Number of packets dropped since the (re-)initialization
160	systemInitTimeMilliseconds	Absolute time stamp of the last (re-)initialization of the device

Für HiFlecs erforderliche Metriken, die nicht direkt standardisiert sind, können unter Umständen berechnet werden. Beispielsweise kann die aktuelle Paketfehlerrate aus den Informationselementen ID 2 (packetDeltaCount) und ID 133 (droppedPacketDeltaCount) abgeleitet werden.

9.3.2 Koexistenzmanagement

Die Auswertungen des Koexistenzmanagements werden dem Netzmanagement zur Verfügung gestellt. Wie auch das Netzmanagement ist das Koexistenzmanagement der *Control Plane* zuzuordnen.

Die HiFlecs Anforderungen spezifizieren relativ geringe Abstände zwischen Funkgeräten. Des Weiteren hat das HiFlecs-Funksystem eine physikalische sternförmige Netztopologie mit dem zentralen HiFlecs Controller. Aufgrund dieser räumlichen Bündelung wird das Koexistenzmanagement-Modul *CMU* zusammen mit der dedizierten HiFlecs PHY für die spektrale Abtastung (*Sensing-PHY*) zentral spezifiziert. Somit sind die HiFlecs Module *Sensing-PHY* als auch *CMU* nur im zentralen HiFlecs-Controller angeordnet.

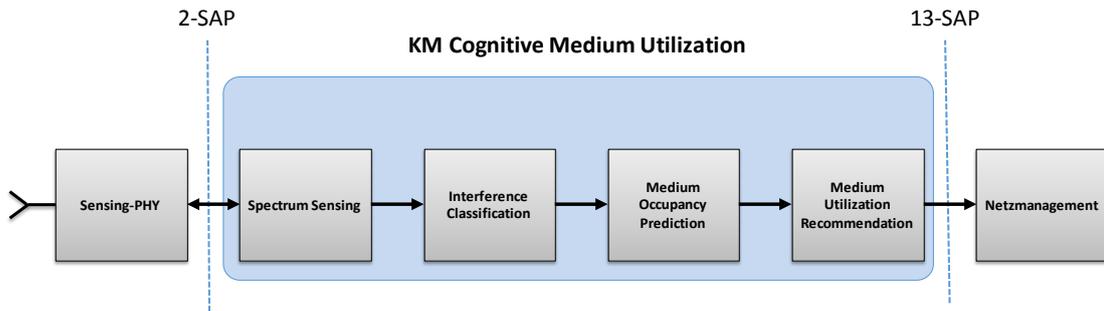


Abbildung 10: Aufbau des Koexistenzmanagement-Moduls Cognitive Medium Utilization (CMU) im HiFlecs-Controller

Das Koexistenzmanagement hat eine Schnittstelle zur genannten dedizierten HiFlecs PHY *Sensing-PHY* (2-SAP) und eine Schnittstelle zum HiFlecs-Modul Netzmanagement (KM-SAP). Der Aufbau und die Schnittstellen sind in Abbildung 10 dargestellt.

9.3.2.1 *Spectrum Sensing* und *Interference Classification*

In der Verarbeitungseinheit *Spectrum Sensing* werden der Frequenzkanal ausgewählt und die *Sensing-Snapshots* angefordert. Anschließend erfolgt die *Interference Classification*, mit der mögliche Störsysteme klassifiziert werden. Dabei werden zwei Ansätze realisiert, die im Folgenden näher erläutert werden.

9.3.2.1.1 *Neuro-Fuzzy Signal Classifier*

Der erste *Interference Classification* Ansatz heißt *Neuro-Fuzzy Signal Classifier* (NFSC) [4]. NFSC klassifiziert mögliche Störsysteme aus den periodischen *Sensing Snapshots* basierend auf der Verknüpfung von Fuzzy Logik und künstlicher neuronaler Netze. Anhand definierter Merkmale werden angelegerte mögliche Störsysteme unterschieden. Die verwendeten Merkmale sind die Mittenfrequenz, die Bandbreite, die spektrale Pulsform und die zeitliche bzw. spektrale Belegung eines überlagerten Signals in den *Sensing Snapshots*.

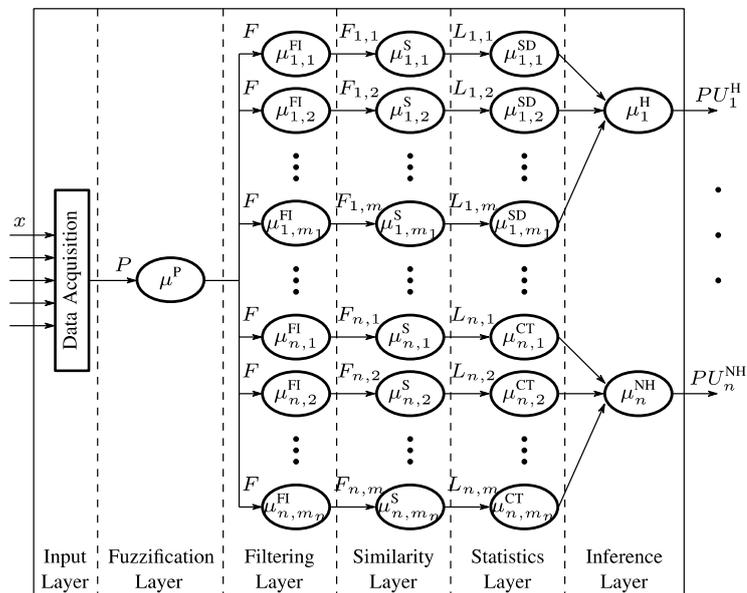


Abbildung 11: Block-Diagramm des NFSC-Ansatzes

Der NFSC besteht aus sechs neuronalen Schichten, wie in Abbildung 11 dargestellt. Die Verknüpfungen der Neuronen sind unidirektional, sodass die Eingangsdaten der Neuronen jeder Schicht aus den Ausgangsdaten von Neuronen der vorangestellten Schicht resultiert.

In der ersten Schicht *Input Layer* wird der Betrag eines diskreten logarithmischen Leistungsdichtespektrums des *Sensing Snapshot* ermittelt. Für *Sensing Snapshot* dargestellt als komplexer Vektor $x \in \mathbb{C}^m$ und dessen diskrete Fouriertransformierte $X[k] \in \mathbb{C}^m$ resultiert daraus:

$$P[k] = 20 \log_{10}(|X[k]|)$$

Der normierte Index $k \in K$ repräsentiert die diskrete Frequenz $f(k) = f_c - f_{BW}/2 + \Delta f \cdot k$ mit der Mittenfrequenz f_c , der Messbandbreite f_{BW} und der spektralen Auflösungsbandbreite $\Delta f = f_{BW}/(m - 1)$.

In der nachfolgenden Schicht *Fuzzification Layer* wird mithilfe einer Zugehörigkeitsfunktion eine Fuzzifizierung durchgeführt. Die Zugehörigkeitsfunktion bildet den Wertebereich von $P[k]$ auf einem normierten Intervall wie folgt ab:

$$F[k] = \mu^P[P[k]] = \left| \frac{\min(P[k]) - P[k]}{\min(P[k]) - \max(P[k])} \right|$$

In der anschließenden Schicht *Filtering Layer* findet eine spektrale Selektion zur Sondierung überlagerter Signale statt. Die Selektion wird durch eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{i,j}^{F1}$ für das i -te Störsystem mit dem j -te Frequenzkanal mit der spezifischen Bandbreite f_i^{BW} und den zugehörigen Mittenfrequenzen $f_{i,j}^0$ realisiert:

$$F_{i,j}[k] = \mu_{i,j}^{F1}[F[k]] = F[k] \cdot \text{rect}\left(\frac{f(k) - f_{i,j}^0}{D_i \cdot f_i^{BW}}\right)$$

Der störsystemabhängige Parameter D_i skaliert die Bandbreite des Bandpassfilters. Schmalbandige Filter erschweren die Ermittlung der Bandbreite von Störsystemen wogegen breitbandige Filter den Anteil weiterer überlagerter Signale bzw. Rauschen erhöht.

Nach der spektralen Selektion, erfolgt der Vergleich mit einer spektralen Referenz-Pulsform in der nächsten Schicht *Similarity Layer*. Die für das Störsystem i und den Frequenzkanal j resultierende Messgröße *Similarity Measure* $S_{i,j}$ stellt dabei die Schnittfläche von $F_{i,j}[k]$ und der Referenz-Pulsform $\mu_{i,j}^{PS}[k]$, die ins Verhältnis zur jeweils größeren Fläche gesetzt wird, dar:

$$S_{i,j} = \mu_{i,j}^S = \frac{\sum_{k \in K} \min(F_{i,j}[k], \mu_{i,j}^{PS}[k])}{\max\left(\sum_{k \in K} F_{i,j}[k], \sum_{k \in K} \mu_{i,j}^{PS}[k]\right)}$$

Similarity Measure ist eine relative Messgröße mit dem Wertebereich $S_{i,j} \in [0, 1]$.

In der vorletzten Schicht, *Statistics Layer*, werden zeitlich äquidistant aufeinanderfolgende *Sensing Snapshots* zur Detektion einer Frequenzspreizung mittels *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) ausgewertet. Dazu wird der *Similarity Measure* $S_{i,j}$ mittels Schwellwert γ_i^S diskretisiert:

$$L_{i,j} = \mu_{i,j}^L[S_{i,j}] = \begin{cases} 1, & \text{wenn } S_{i,j} \geq \gamma_i^S \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Anschließend wird für die letzten q *Sensing Snapshots* (Zeitfenster) die Kenngröße *Central Tendency* $CT_{i,j}[t]$ für die zeitliche Belegung jedes Frequenzkanals ermittelt:

$$CT_{i,j}[t] = \frac{1}{q} \sum_{n=0}^{q-1} L_{i,j}[t - n]$$

Zusätzlich wird für das Zeitfenster die Frequenzspreizung von m_j Frequenzkanälen des Störsystems i mittels der Kenngröße *Statistical Dispersion* SD_i ermittelt:

$$SD_i[t] = \frac{1}{m_j} \sum_{j=0}^{m_j-1} \max(L_{i,j}[t], L_{i,j}[t - 1], \dots, L_{i,j}[t - q + 1])$$

Statistical Dispersion stellt den Anteil der genutzten Funkkanäle während der letzten q *Sensing Snapshots* dar.

In der abschließenden Schicht, *Inference Layer*, findet die Unterscheidung zwischen Störsysteme ohne FHSS PU_i^{NH} und FHSS-basierte Störsysteme PU_i^H anhand der CT- und SD-Schwellwerte:

$$PU_i^{\text{NH}} = \mu_i^{\text{NH}}[CT_{i,j}] = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \max_{i=\text{const.}}(CT_{i,j}) \geq \gamma_i^{\text{CT}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$PU_i^{\text{H}} = \mu_i^{\text{H}}[SD_i] = \begin{cases} 1, & \text{wenn } SD_i \geq \gamma_i^{\text{CT}} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Final wird überprüft, dass für jedes Störsystem i gilt:

$$PU_i^{\text{NH}} + PU_i^{\text{H}} \leq 1$$

Ist diese Annahme nicht erfüllt, deutet es auf eine Überlagerung von Funknetzwerken mit nicht-differenzierbaren Emissionen hin.

9.3.2.1.2 Klassifizierung mit Convolutional Neural Networks

Der zweite *Interference Classification* Ansatz basiert auf *Convolutional Neural Networks* (CNNs) [5]. Dieser Ansatz klassifiziert mögliche Störsysteme ebenfalls aus den periodischen *Sensing Snapshots*. Aber im Vergleich zu einem Expertensystem wie das NFSC wird zur Identifikation ein mehrschichtiges neuronales Netzwerk verwendet, wobei die Merkmale selbständig trainiert und optimiert werden (Merkmalgewinnung). Trainierte neuronale Netzwerke sind in der Lage, Zuordnungen für Lerndaten durchzuführen. Sie sind aber nicht darauf beschränkt sondern besitzen eine Generalisierungsfähigkeit und können so auch zuvor unbekannte Daten zuordnen.

Die Architektur des neuronalen Netzwerkes wurde vom Funkmodulationserkennung-Ansatz von O'Shea et al. [6] abgeleitet. Es ist ein faltungsbasiertes vorwärtsgerichtetes Netzwerk (*feed forward network*). Die fünf Schichten der Architektur, wie in Tabelle 4 dargestellt, werden im Folgenden betrachtet.

Tabelle 4: Architektur des *Convolutional Neural Network*

#	Layer type	Input size	Parameters	Dropout	Activation fct.
1	Preprocessing layer	128 x 2	FFT	-	-
2	Convolutional layer	128 x 2	8 feature maps with 3x1 filter kernel	-	Rectified linear
3	Convolutional layer	8 x 126 x 2	16 feature maps with 3x2 filter kernel	60%	Rectified linear
4	Dense layer	1984 x 1	64 neurons	60%	Rectified linear
5	Dense layer	64 x 1	15 neurons	-	Softmax

Preprocessing Layer

Durch die ausgeprägte spektrale Zuordnung der Störsignale findet eine diskrete schnelle Fouriertransformation (FFT) als Vorverarbeitung statt. Die gewählte Eingangsgröße von $2^7 = 128$ IQ-Werten entspricht bei einer Messbandbreite von 10 MHz einer Messdauer von 12.8 μs .

Convolutional Layer

Die anschließenden zwei Schichten sind faltungsbasiert, angelehnt an [6]. Faltungsbasierte Schichten ermöglichen Merkmalextraktion mit Rotations-, Verschiebungs-, Skalierungs- und Störungsinvarianzen durch lokale rezeptive Felder, gemeinsame Gewichte und *Subsampling* (Reduktion der Dimension). Die erste und zweite faltungsbasierte Schicht haben jeweils Filter der Größe 3×1 und 3×2 .

Für die Ausgabe werden gängige begrenzt-lineare Funktionen verwendet, die für die skalaren Wert x definiert ist als:

$$Act_{ReLU}(x) = \max(0, x)$$

Neuronen, die diese Funktion als Ausgabefunktion besitzen, werden als *Rectified Linear Unit* (ReLU) bezeichnet. Durch die einfache boolesche Operation lernen Netzwerke mit ReLUs schnell an.

Damit die Generalisierungsfähigkeit eines neuronalen Signals gefördert wird, gibt es verschiedene Regulierungsmöglichkeiten, um eine Überanpassung an die Trainingsdaten zu verhindern. In unserem Ansatz wird *Dropout* verwendet. Bei der *Dropout*-Technik wird das Ausgangssignal jedes Neurons mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zeitweise während der Trainingsphase auf null gesetzt und trägt so nicht zum aktuellen Vorwärtsfluss und der Fehlerrückübertragung bei. Neuronen können sich nicht auf die Anwesenheit anderer Neuronen verlassen. Dadurch sollen die Neuronen robustere Merkmale in Kombination mit zufälligen anderen Neuronen lernen und die Abhängigkeit der Neuronen untereinander reduziert werden.

Dense Layer

Die abschließenden Schichten sind vollvernetzt und dienen der Klassifizierung anhand der extrahierten Merkmale.

Die Größe der finalen Schicht entspricht der zu identifizierbaren Klassen. Für die Ausgabe wurde die *Softmax*-Funktion gewählt, die für das Element i im Vektor $x = (x_0, x_1, \dots, x_{M-1})^T$ definiert ist als:

$$Act_{Softmax}(x, i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_j e^{x_j}}$$

Oft wird als Ausgabefunktion der letzten Schicht die *Softmax*-Funktion eingesetzt. Die *Softmax*-Funktion normalisiert das Ausgangssignal über alle Klassen. Diese Ausgabefunktion eignet sich nur, wenn in jedem *Sensing Snapshot* jeweils nur eine Klasse vorhanden ist, da die Zugehörigkeit zu einer Klasse in Relation mit allen anderen Klassen betrachtet wird und nicht eine absolute Abschätzung stattfindet.

Training

Die Test- und Trainingsdatensätze sind mit dem Vektorsignalgenerator (VSG) SMBV100A von Rohde & Schwarz erzeugt und mit dem Echtzeit-Spektrumanalysator (RSA) RSA6114A von Tektronix aufgenommen worden. Die beiden Geräte sind über ein Koaxialkabel miteinander verbunden worden, um die Kanaleinflüsse zu minimieren. Die beiden Geräte sind über einen gemeinsamen Oszillator synchronisiert und die Messungen sind getriggert, sodass sichergestellt wird, dass in jedem *Sensing Snapshot* ein Störsignal vorhanden ist. Als Kanaleinfluss wird weißes Rauschen zum Signal addiert. Es sind SNRs von -20 dB bis 20 dB mit einer Schrittweite von 2 dB eingestellt worden.

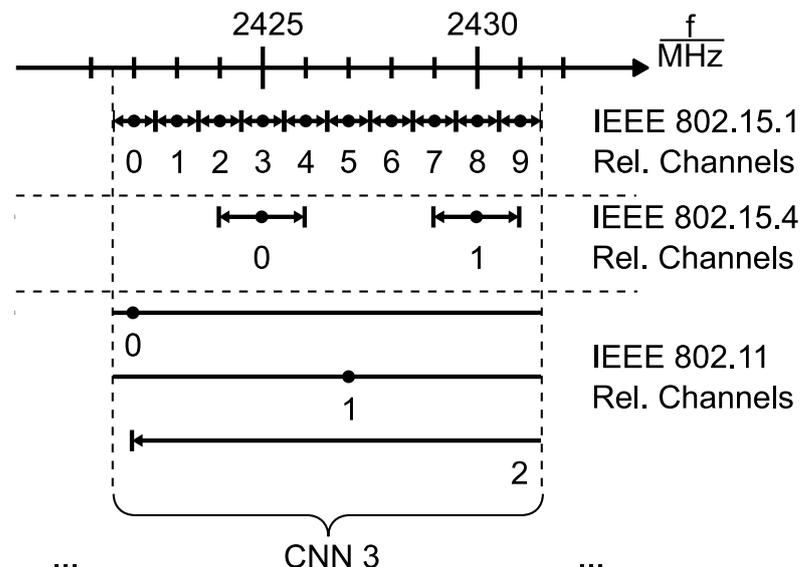


Abbildung 12: Spektrale zu identifizierenden Klassen der Störsignale des CNN-Ansatzes

Die Test- und Trainingsdatensätze beinhalten insgesamt 15 zu unterscheidende Klassen an Störsignale, wie in Abbildung 12 dargestellt ist. Die Datensätze wurden mit dem VSG mit pseudozufälligen Nutzdatenlast erzeugt. Die erzeugten IEEE 802.15.1-Frames beinhaltet die Transport Modi ACL, eSCO und SCO mit den Packet Typen DH5, DM5, 2-DH5, 3-DH5, EV5, 2-EV5, 3-EV5 und HV1. Für IEEE 802.11 Störsignale wurden IEEE 802.11b/g-Frames erzeugt mit den *Physical Layer* Modi

CCK, PBCC, OFDM und allen möglichen Bitratenvariationen. Für den Standard IEEE 802.15.4 ist ein ACK-Frame als Frametype gewählt und keine Einstellung variiert worden. Insgesamt sind 151200 Trainings- und 74025 Testdatensätze verwendet worden.

Für das Training des Netzwerks wurde das Adam-Optimierungsverfahrens mit einer Batch-Größe von 1024, Lernrate $\alpha = 10^{-3}$, Abfallrate $\beta_1 = 0.9$, Abfallrate $\beta_2 = 0.999$ und ein Fuzz-Faktor $\varepsilon = 10^{-8}$ verwendet.

Evaluation

Die Erkennungsraten mit den Testdaten sind in Abbildung 13 dargestellt.

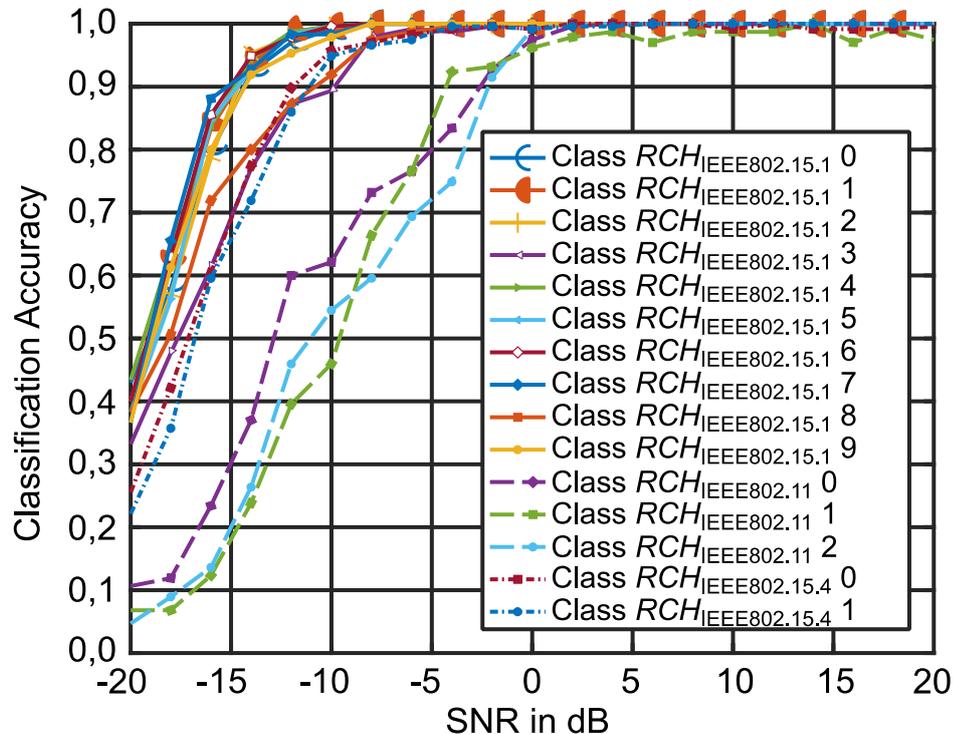


Abbildung 13: Erkennungsraten des CNN-Ansatzes für die Testdaten

Die schmalbandige IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 konforme Störsignale erreichen Erkennungsraten über 97% für SNR von mindestens -5 dB. Lediglich die breitbandigen IEEE 802.11 konforme Störsignale können diese Performance nicht erreichen.

Außerdem ist zu sehen, dass die beiden IEEE 802.15.1-Kanäle, die Klassen 3 und 8, die die gleiche Mittenfrequenz wie die IEEE 802.15.4-Kanäle besitzen, schlechter erkannt werden als die übrigen IEEE 802.15.1-Kanäle.

9.3.2.1.3 Vergleich

Der NFSC und der CNN-Ansatz bieten beide Lösungskonzepte für die Anforderungen der *Interference Classification*.

Tabelle 5: Parameter für NFSC

Parameter	Symbol	Wert
Messbandbreite	f_{BW}	10 MHz
Mittenfrequenz	f_c	2426.5 MHz
Auflösungsbandbreite	Δf	9.77 MHz
Skalierung der Filter	D_i	2
Referenz-Pulsform	$\mu_{i,j}^{PS}$	IEEE 802.15.1: Rectangular 1 MHz IEEE 802.15.4: Rectangular 3 MHz

Similarity Measure Schwellwert	γ_i^s	0.5
Zeitfenster	q	10
CT-Schwellwerte	γ_i^{CT}	0.75

Für eine vergleichende Leistungsbewertung wurde die NFSC Parameter entsprechend angepasst, wie in Tabelle 5 gelistet. Mit den eingesetzten Referenz-Pulsformen können breitbandige Störsignale nicht bzw. nicht geeignet identifiziert werden. Deshalb werden bei der Leistungsbewertung nur IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 konforme Störsignale berücksichtigt.

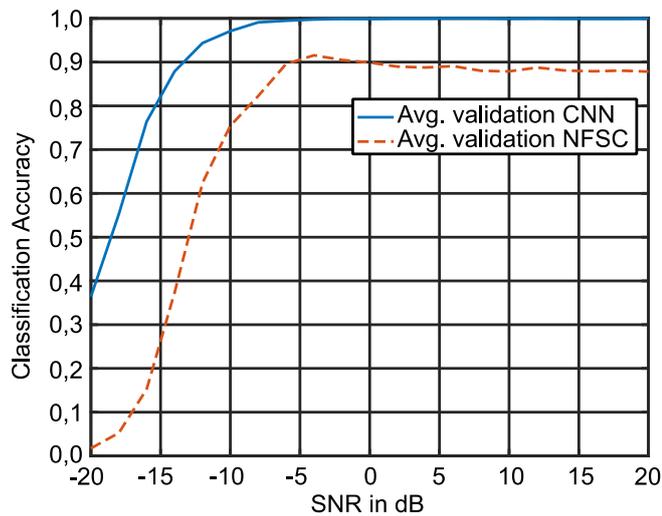


Abbildung 14: Vergleichende Leistungsbewertung der CNN und NFSC basierten *Interference Classification* Ansätze mit gemittelten Genauigkeit der Klassifizierung von IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4 konformen Störsignalen für variierende SNR

In der Abbildung 14 werden die Erkennungsraten der CNN und NFSC basierten *Interference Classification* Ansätze dargestellt. Dabei werden die Erkennungsraten arithmetisch gemittelt über allen Klassen.

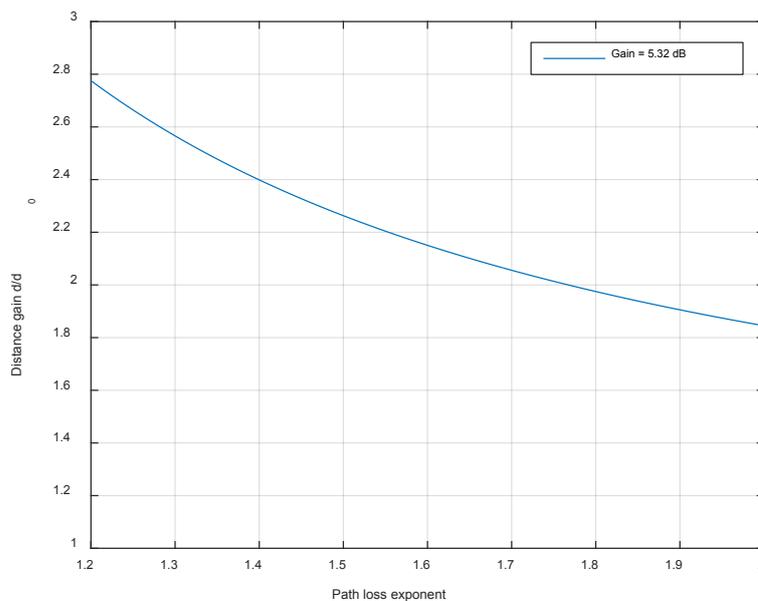


Abbildung 15: Distanzgewinn bei typische Pfadverlustexponent in industriellen Funkumgebungen

Der CNN-Ansatz zeigt im Mittel eine deutlich erhöhte Erkennungsrate unabhängig vom SNR. Der CNN-Ansatz erreicht einen Verarbeitungsgewinn von mindestens 5.32 dB bzw. eine erhöhte Erkennungsrate von mindestens 8.19 % bei gleichem SNR. Der erreichte Verarbeitungsgewinn erweitert die Distanz zur Störsignal-Identifikation um mindestens den Faktor 1,85, wie in Abbildung 15 dargestellt.

9.3.2.2 *Medium Occupancy Prediction* und *Utilization Recommendation*

In der Verarbeitungseinheit *Medium Occupancy Prediction* findet eine Prädiktion der zukünftigen Mediumbelegung statt. Anschließend findet in der *Medium Utilization Recommendation* Verarbeitungseinheit eine Funkkanalbewertung und -empfehlung statt. Diese wird dem Netzmanagement mitgeteilt.

Zur Prädiktion der zukünftigen Mediumbelegung und anschließender Funkkanalempfehlung existieren bereits einige Ansätze. Dabei kann grundsätzlich zwischen vorwärtsgerichteten und rückgekoppelten Modellierungen unterschieden werden. Bei den rückgekoppelten Modellierungen erfolgt eine zusätzliche Bewertung durch die beteiligten Funkssysteme. Daher sind diese rückgekoppelten Modellierungen selbstoptimierend. Die Modellierung der Verarbeitungseinheiten *Medium Occupancy Prediction* und *Utilization Recommendation* erfolgen somit auf Basis eines rückgekoppelten Ansatzes. Der Ansatz und die simulative Evaluierung werden in [7] detailliert diskutiert.

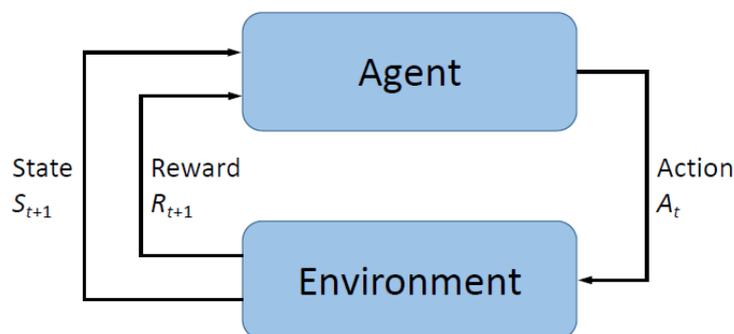


Abbildung 16: Interaktion zwischen dem Agenten und der Umgebung beim *Reinforcement Learning*

Die rückgekoppelten Modellierungen erfolgen mit der Methode des sogenannten bestärkenden Lernens, besser bekannt als *Reinforcement Learning* (RL). Beim RL geht es darum, dass aus Handlungen etwas gelernt wird, um ein Ziel zu erreichen. Formal ist das Prinzip von RL in Abbildung 16 dargestellt. Der Lernende ist der Agent. Dieser Agent interagiert über eine Aktionen A_t zum Zeitpunkt t mit seiner Umgebung. Die Handlungen des Agenten werden von der Umgebung mit der Belohnung R_{t+1} zum nächsten Zeitschritt $t + 1$ belohnt. Zusätzlich gibt die Umgebung dem Agenten den Zustand S_{t+1} der Umgebung zurück. Dieser zurückgegebene Zustand wird auch als Beobachtung der Umgebung bezeichnet. Auf Grundlage dieser Beobachtungen und Belohnungen entscheidet der Agent, welche Aktionen im nächsten Zeitschritt $t + 1$ ausgeführt werden. Das Ziel beim RL ist die Maximierung der Belohnung.

9.3.2.2.1 *Koexistenz-Management-Umgebung*

Die Umgebung bildet die reale Funkumgebung ab, wie z.B. eine Fabrikhalle. In dieser Umgebung befinden sich die Funksysteme, Produktionsanlagen usw. Die Funkumgebung ist häufig mit metallischen Objekten ausgestattet die Reflektionen, Absorptionen und Streuungen hervorrufen, wie z.B. Fertigungsstraßen. Zudem befinden sich in einer solchen Umgebung weitere nicht-kooperative Funknetzwerke welche teilweise unterschiedliche Funktechnologie verwenden.

Das Netzmanagement-Modul liefert die Belohnung. Diese ist ein skalarer Qualitätsindikator des Koexistenzzustands:

$$R_{t+1} = 1 - \text{BER}_{t+1}$$

Dabei ist BER_{t+1} die Bitfehlerrate des Zeitintervalls $(t, t + 1]$. Durch die inhärente RL-Eigenschaft der Maximierung der Belohnung, minimiert der Agent die Paketverluste und hat dadurch das Ziel einer störungsfreien Kommunikation.

Der aktuelle Zustand der Koexistenz-Management-Umgebung wird dem Agent von der Verarbeitungseinheit *Interference Classification* mitgeteilt. Zum Beispiel für den NFSC-Ansatz entspricht der Koexistenzzustand

$$S_{t+1} = \{SM_{i,j} \forall i, j\}_{t+1}$$

mit den *Similarity Measures* $SM_{i,j}$ für das Störsystem i und den Frequenzkanal j zu dem Zeitpunkt $t + 1$.

9.3.2.2 Reinforcement Learning Agent

Die Verarbeitungseinheiten *Medium Occupancy Prediction* und *Utilization Recommendation* bilden damit den RL Agent. Die Aktionen eines Agenten sind die Ressourcenempfehlungen.

Zu Beginn hat der Agent kein Vorwissen über die Koexistenz-Management-Umgebung. Er weiß nicht wie sich die Funknetzwerke oder die Störsysteme verhalten und er weiß nicht was seine Aktionen in der Umgebung bewirken. Daher muss er seine Umgebung mithilfe von Interaktionen erforschen und lernen, sich in dieser Umgebung möglichst gut zurecht zu finden.

Der Trainingsprozess erfolgt in Episoden. Jede Episode hat eine bestimmte Anzahl an Schritten, d.h. je Schritt kann der Agent einmal Ressourcen empfehlen. Die einzelnen Episoden sind unabhängig voneinander welches einer nicht definierten Pause des Trainingsprozess entspricht. Das bis dahin erlernte Wissen des Agenten bleibt erhalten. Die Länge des erforderlichen Trainingsprozesses hängt von den stochastischen Freiheitsgraden der Problemstellung ab.

Deep-Q Network Agent

Der Deep-Q Network (DQN) Agent basiert auf das tabellarisches *Q-Learning*-Verfahren welches mit einem iterativen Lernverfahren eine Aktions-Werte-Funktion, besser bekannt als *Action-Value Function*, anlernt. Diese Funktion modelliert die Abschätzung der Belohnung die bei einer definierten Aktion in einem bestimmten Zustand erfolgen könnte. Allerdings kommt das *Q-Learning*-Verfahren bei großen Zustandsräumen an seine Grenzen. Das DQN-Verfahren löst dieses Problem durch Funktionsapproximatoren mit nicht-linearen mehr-schichtigen neuronalen Netzwerken. Mithilfe dieser Funktionsapproximatoren können Aktions-Werte-Funktionen abgeschätzt werden wie in Abbildung 17 dargestellt.

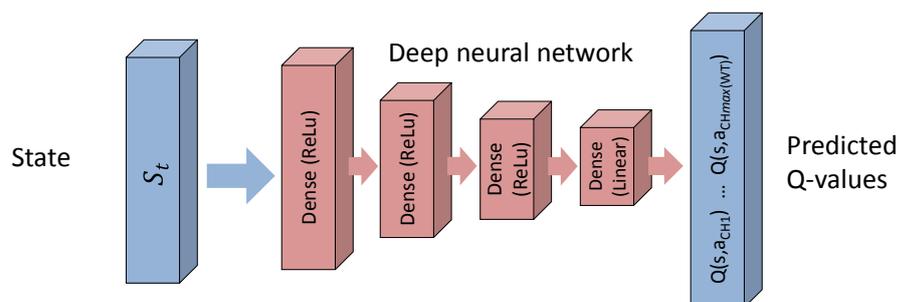


Abbildung 17: Architektur eines DQNs

Double-Deep-Q Network Agent

Die Auswahl einer Aktion und die Abschätzung der Aktions-Werte-Funktion sind abhängig voneinander. Diese Abhängigkeit führt zu ungleichmäßigen Abschätzungen der Aktions-Werte-Funktion. Sie treten besonders mit rauschenden Umgebungen und damit in der Koexistenz-Management-Umgebung auf. Das Problem wird durch eine Auswahl einer Aktion, die unabhängig von der Abschätzung der Aktions-Werte-Funktion ist, vermindert bzw. vermieden. Das Verfahren verwendet hierzu zwei Aktions-Werte-Funktionen. Es nennt sich *Double Q-Learning* bzw. *Double Deep-Q Network* (DDQN) mit entsprechender Funktionsapproximatoren-Erweiterung.

9.3.2.2.3 Simulation

In einer Simulation wurde die Koexistenz-Management-Umgebung mit einem Stör- als auch einem Nutzsistem nachgestellt. Beide Systeme verwenden eine identische BPSK-Modulation.

Da häufig Funknetzwerke im industriellen Bereich Frequenzkanal-basiert verwaltet werden, beschränken sich die zu empfehlenden Ressourcen auf Funkkanäle (siehe Abbildung 18). Es werden vier nicht-überlappende Frequenzkanäle abgebildet.

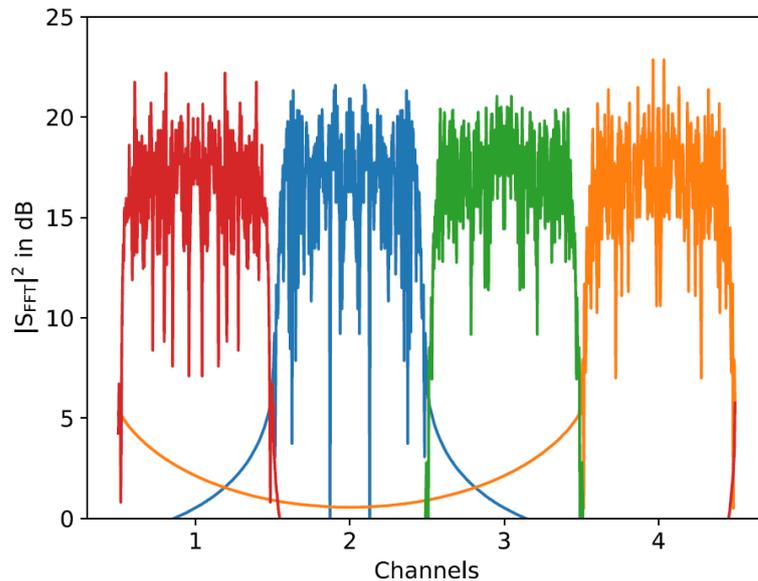


Abbildung 18: Koexistenz-Management-Umgebung beinhaltet vier nicht-überlappende Frequenzkanäle

Jede Ressourcen- bzw. Funkkanalempfehlung wird unmittelbar angewandt welches den Idealfall für den Agenten abbildet. Als Zustand wird vereinfachend das Betragsspektrum $|S_{FFT}|$ über alle vier Funkkanäle angenommen und einer Länge von 1024 Samples.

Eine Episode besteht aus 20 Schritten. Innerhalb von jedem Schritt werden 256 BPSK-Symbole übertragen. Die Belohnung resultiert aus den erfolgreich übertragenen Symbolen eines Schrittes zum Zeitpunkt t :

$$R_t = 1 - \text{BER}_t$$

Nach jeder Episode wird die Umgebung zurückgesetzt. Insgesamt wurden 250 Episoden simuliert.

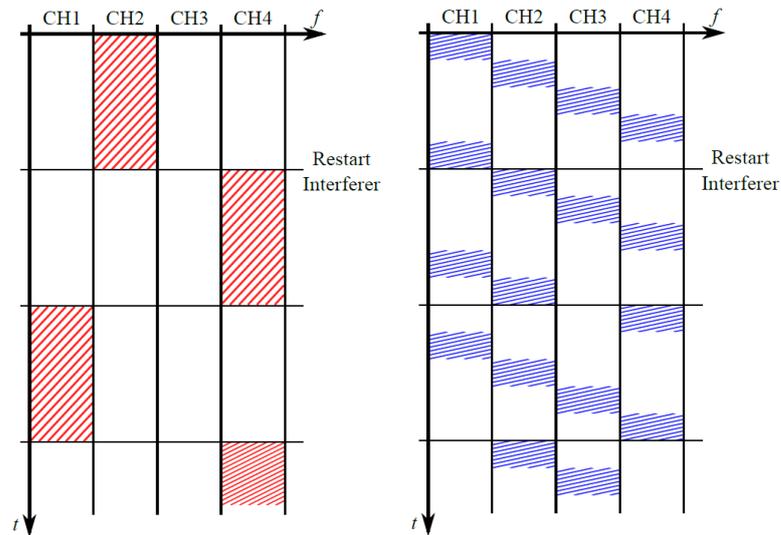


Abbildung 19: Szenario mit statischen Funkkanalwahl des Störsystems (links) und mit sequentiellen Funkkanalwechsel des Störsystems (rechts)

Die Agenten wurden in zwei Störszenarien evaluiert. Bei beiden Szenarien werden die Funkkanäle für jede Episode zufällig initiiert. Beim ersten Szenario findet daraufhin keine weiterer Funkkanalwechsel des Störsystems für die Dauer einer Episode statt. Hingegen wechselt beim zweiten Szenario das Störsystem Funkkanal sequentiellen mit jedem Schritt. Die Szenarien sind in der Abbildung 19 schematisch dargestellt.

Für das Anlernen der Agenten wurde die Lernrate $\alpha = 10^{-4}$, ein Diskontierungsfaktor $\gamma = 0.96$ und ein Erkundungsfaktor, der mit $\epsilon_0 = 1$ initialisiert wird, verwendet und anschließend mit dem ϵ -greedy Verfahren den Endwert $\epsilon_{100} = 0.01$ nach 100 Episode erreicht. Die Simulationen wurden jeweils 15 Mal wiederholt.

Die maximale Belohnung von $R_{max} = 20$ resultiert aus der Anzahl der Schritte für jede Episode. Eine zufällige Funkkanalauswahl mit einem gestörten Funkkanal führt im Mittel zu einer Belohnung von $R_{min} = 3/4 * 20 = 15$ und markiert somit die untere Grenze.

Das Anlernverhalten weist ein exponentielles Lernverhalten auf und kann deshalb für die Episode t angenähert werden:

$$R \cong R_{\infty} + (R_{min} - R_{\infty})e^{-t(R_{\infty}-R_{min})/\dot{R}_0}$$

mit den charakteristischen Kenngrößen der Anfangssteigung \dot{R}_0 während der Trainingsphase und der mittlere Belohnung R_{∞} in der anschließenden Betriebsphase.

Störszenario: Statische Funkkanalwahl

Für das erste Störszenario ist die Belohnung des DQN- sowie des DDQN-Agenten jeweils in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt. Die dunkle Linie in den einzelnen Abbildungen stellt dabei den Mittelwert und die Fläche den Bereich zwischen der 10%- und 90%-Perzentile der Belohnung dar.

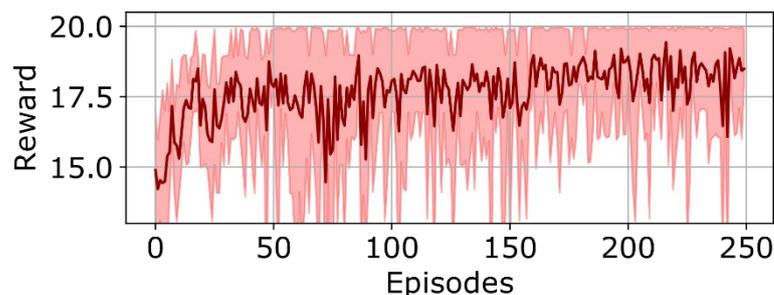


Abbildung 20: DQN-Agent mit statische Funkkanalwahl des Störsystems

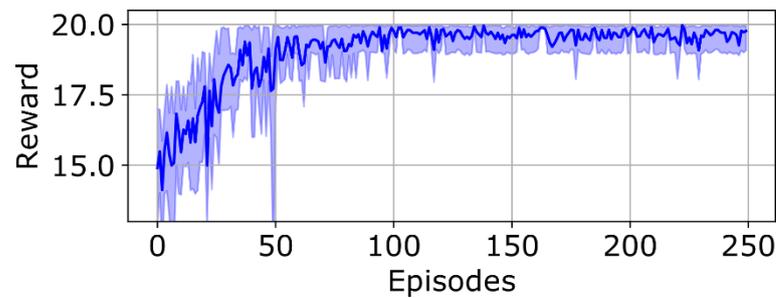


Abbildung 21: DDQN-Agent mit statische Funkkanalwahl des Störsystems

Die Anfangssteigung der Belohnung des DQN-Agenten beträgt $\dot{R}_0 = 0,108$. Der Agent resultiert in eine mittleren Belohnung von $R_\infty = 18,08$ und erreicht damit 90,42% der maximalen Belohnung R_{max} . Der DDQN-Agent weist eine 41,7% größere Anfangssteigung der Belohnung von $\dot{R}_0 = 0,153$ auf. Zusätzlich resultiert der DDQN-Agent in eine mittlere Belohnung von $R_\infty = 19,63$, was einer Steigerung von 7,75% entspricht.

Störszenario: Sequentieller Funkkanalwechsel

Die Belohnungen des DQN- sowie des DDQN-Agenten für das zweite Störszenario sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Der DDQN-Agent weist im Vergleich zum ersten Störszenario ähnliche Resultate auf. Dagegen steigert sich die mittlere Belohnung vom DQN-Agent deutlich.

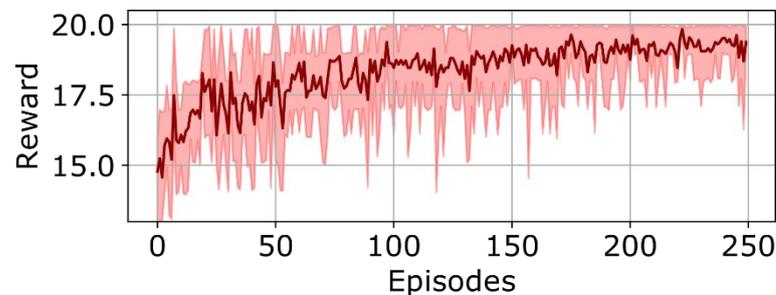


Abbildung 22: DQN-Agent mit sequentieller Funkkanalwechsel des Störsystems

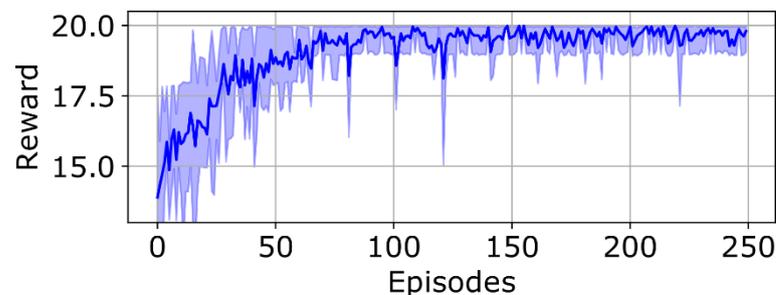


Abbildung 23: DDQN-Agent mit sequentieller Funkkanalwechsel des Störsystems

Die Anfangssteigung der Belohnung des DQN-Agenten beträgt $\dot{R}_0 = 0,097$. Der Agent resultiert in eine mittleren Belohnung von $R_\infty = 18,94$ und erreicht damit 94,7% der maximalen Belohnung. Der DDQN-Agent weist eine 49,5% größere Anfangssteigung der Belohnung mit $\dot{R}_0 = 0,145$ auf. Zusätzlich resultiert der DDQN-Agent in eine mittlere Belohnung von $R_\infty = 19,62$, was einer Steigerung von 3,4% entspricht.

9.3.2.2.4 Zusammenfassung

Das selbstständige Erlernen von Fremdstörerverhalten, ohne Vorwissen über die Funkumgebung, und die daraus resultierende Möglichkeit einer Prädiktion- und Empfehlung freier Ressourcen, ist der Vorteil eines Reinforcement Learning (RL) basierten Koexistenz-Management-Systems.

Ein solches Koexistenz-Management-Verfahren hat insbesondere im industriellen Umfeld den Vorteil, dass es keine Rolle spielt, ob die Störsysteme eine statische oder eine dynamische Kanalwahl verwenden. Das wurde in einer Simulation von zwei auf mehrschichtigen neuronalen Netzen

basierenden RL-Agenten, genannt *Deep-Q Network (DQN)* und *Double Deep-Q Network (DDQN)*, in exemplarischen, praxisnahen Koexistenzszenarien nachgewiesen.

Der DDQN-Agent zeigt dabei ein gutes Lernverhalten im Vergleich zur DQN-Variante auf. Der DDQN-Agent weist eine über 40% steilere Trainingsphase auf und erreicht in der Betriebsphase eine mindestens 3% höhere Belohnung. Der DDQN-Agent erreicht in allen Koexistenzszenarien eine Prädiktionsgenauigkeit von mindestens 90% nach spätestens 2517 Schritten. Dabei beinhaltet ein Schritt jeweils eine Zustandsinformation der Koexistenz-Management-Umgebung (Spectrum Sensing/ Interference Classification) und einen Qualitätsindikator des aktuellen Koexistenzzustandes des Funksystems (z.B. Bitfehlerrate).

9.4 Funkkanalvermessung und -modellierung

Es wurden sowohl zeitinvariante als auch –variante und polarisationsvariante Funkkanäle in der Umgebung der Anwendungs-Demonstration charakterisiert.

9.4.1 Zeitinvariante Funkkanäle

In einer Fabrikhalle wurden drei zeitinvariante Funkkanäle vermessen. Die Antennenpositionen in der Fabrikhalle sind der Abbildung 24 zu entnehmen.

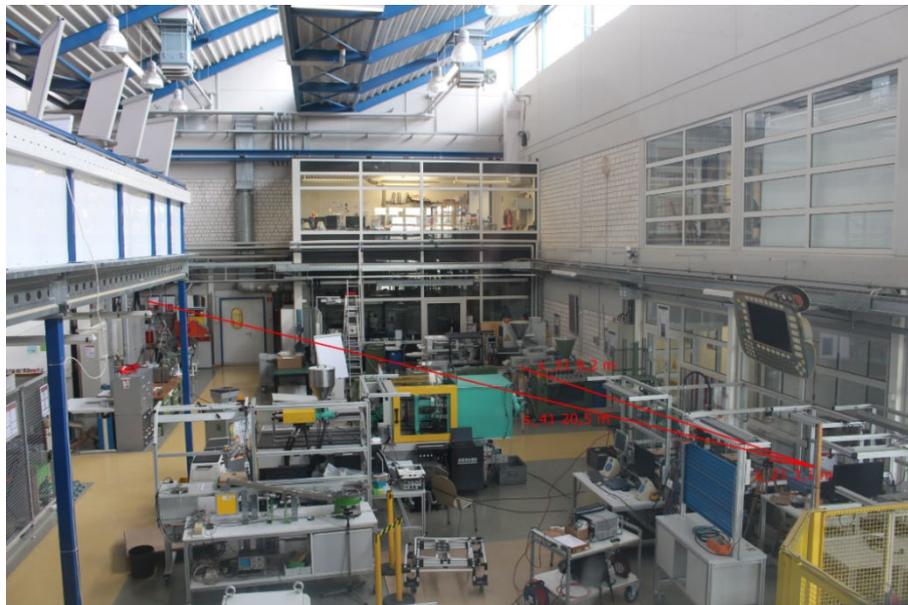


Abbildung 24: Messaufbau der drei Funkkanäle in einer Fabrikhalle

Es wurden drei Distanzen von 3 m (Funkkanal 1), 10 m (Funkkanal 2) und 20 m (Funkkanal 3) angenähert. Es werden $\lambda/2$ -Dipolantennen verwendet, die copolar zueinander ausgerichtet sind. Der Antennengewinn beträgt 3 dBi. Es wurde mit vertikaler Polarisation gesendet. Bei allen Funkkanälen ist eine eingeschränkte Sichtverbindung (O-LOS) vorhanden.

Die Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Sichtverbindung aus der Perspektive der jeweiligen Empfangsantennen.

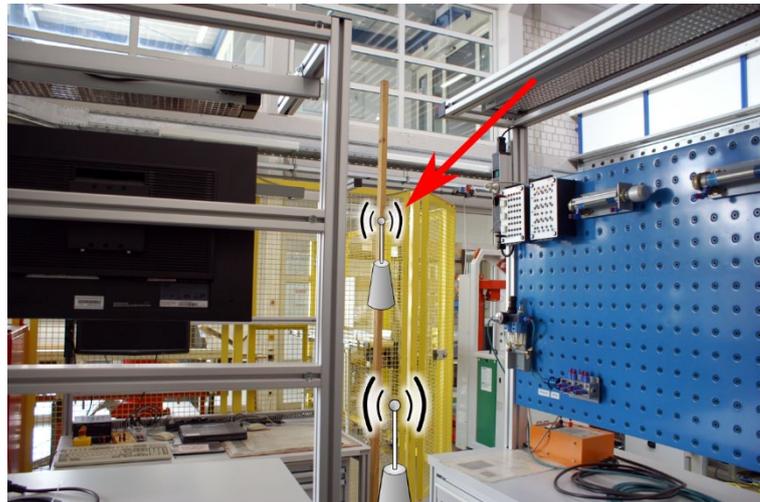


Abbildung 25: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 1



Abbildung 26: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 2



Abbildung 27: Sicht der Empfangsantenne vom Funkkanal 3

Die Funkkanäle wurden zeitgleich mit dem Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) Rohde & Schwarz ZVB-8 als Streuparameter s_{21} , s_{31} und s_{41} im Frequenzbereich vermessen. Die Funkkanäle wurden für das Frequenzband von 5,725 GHz bis 5,875 GHz mit einer spektralen Schrittweite von 1 MHz analysiert.

Ausgewertet wurden statistische Parameter des gemessenen Frequenzgangs und der berechneten Impulsantwort. Die Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 stellen den Frequenzgang und die Impulsantwort der jeweiligen Funkkanäle 1, 2 und 3 dar.

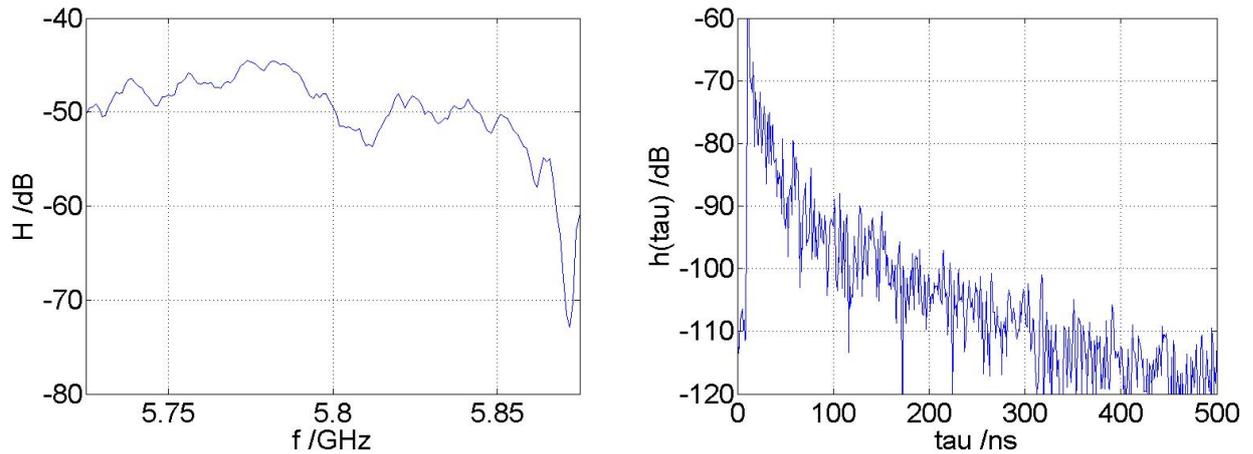


Abbildung 28: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 1

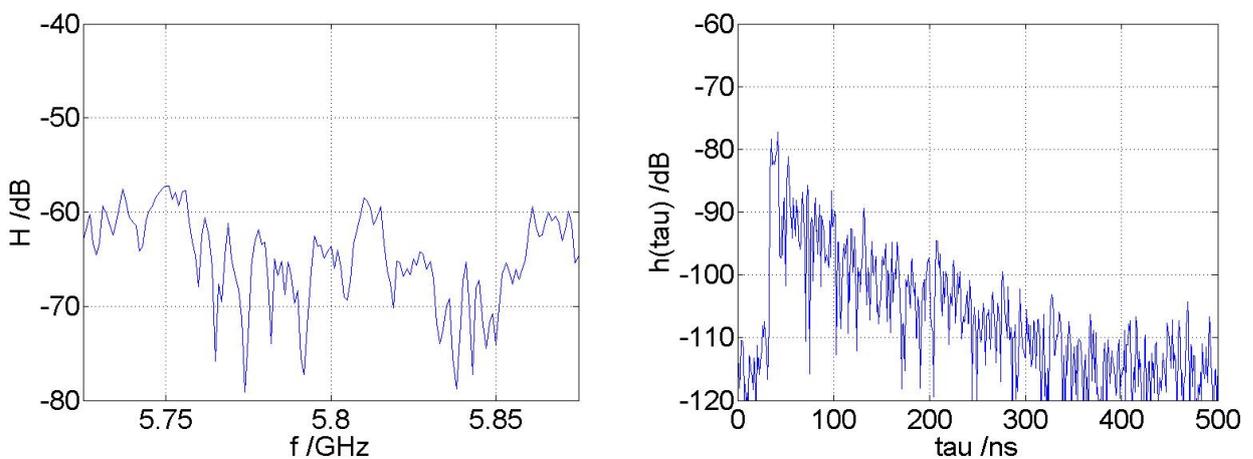


Abbildung 29: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 2

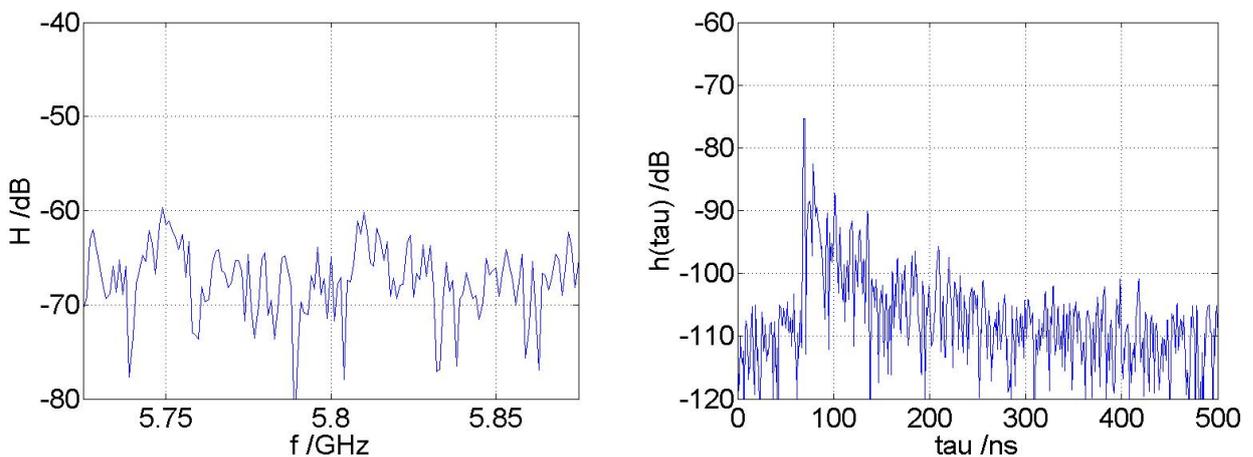


Abbildung 30: Frequenzgang und Impulsantwort des Funkkanals 3

Die charakteristischen Parameter der vermessenen Funkkanäle sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Sie beinhalten charakteristische Werte des Frequenzgangs und der Impulsantwort.

Tabelle 6: Charakteristische Parameter der zeitinvarianten Funkkanäle

Parameter	Funkkanal 1	Funkkanal 2	Funkkanal 3
Δd	3,1 m	9,2 m	20,5 m
Verbindungsart	Obstructed LOS	Obstructed LOS	Obstructed LOS
Antennenausrichtung	Copolar	Copolar	Copolar

H_{median}	-49,25 dB	-64,59 dB	-67,04 dB
H_{10}	-54,89 dB	-71,91 dB	-72,55 dB
H_{90}	-45,53 dB	-59,35 dB	-62,77 dB
ΔH	9,36 dB	12,57 dB	9,78 dB
B_{C90}	12 MHz	2 MHz	1 MHz
B_{C50}	62 MHz	14 MHz	24 MHz
τ_0	12 ns	42 ns	69 ns
τ_{mean}	14,91 ns	65,46 ns	95,13 ns
τ_{rms}	13,86 ns	50,91 ns	63,39 ns

Der Frequenzgang wird durch den Median H_{median} , Perzentile 10% H_{10} , Perzentile 90% H_{90} , der Differenz von H_{10} und H_{90} genannt ΔH charakterisiert. Die Kohärenzbandbreiten B_{C90} und B_{C50} drücken die Bandbreiten aus, bei der die Autokorrelation des Frequenzgangs 90% bzw. 50% des Maximums unterschreitet.

Die Impulsantworten werden durch die Ausbreitungsverzögerung τ_0 , den temporalen arithmetischen Mittelwert τ_{mean} und den temporalen RMS Delay Spread τ_{rms} charakterisiert.

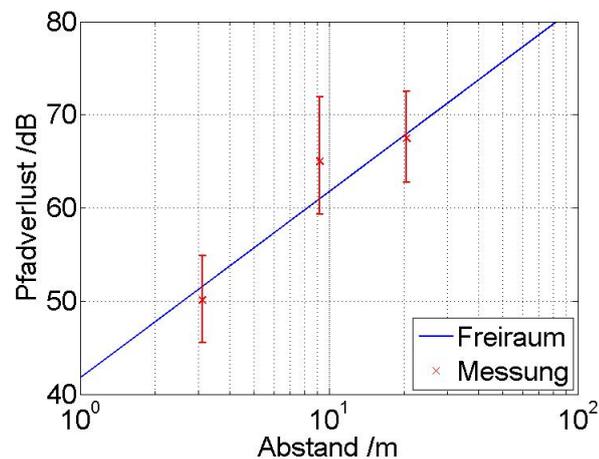


Abbildung 31: Pfadverlust in Abhängigkeit des Antennenabstands

Abbildung 31 stellt den Pfadverlust H_{median} (rot) der vermessenen Funkkanäle in Abhängigkeit des Antennenabstands dar. Zusätzlich werden die Werte H_{10} und H_{90} als obere und untere Pfadverlustgrenzwerte abgebildet. Die rohen Messdaten sind online abrufbar [8].

9.4.2 Polarisationsvariante Funkkanäle

In der identischen Fabrikhalle wurden des Weiteren mit identischen Antennenpositionen aus Abschnitt 9.4.1 die Varianz der Funkkanäle bezüglich der Antennenausrichtung vermessen. Die Funkkanäle wurden zeitgleich mit dem VNA Rohde & Schwarz ZVB-8 als Streuparameter s_{21} , s_{31} und s_{41} im Frequenzbereich vermessen. Die Funkkanäle wurden für das Frequenzband von 5,725 GHz bis 5,875 GHz mit einer spektralen Schrittweite von 1 MHz sequentiell abgetastet (Sweep). Vor der Messung wurde der VNA normiert.

Es wurden zwei Messreihen mit copolarer und kreuzpolarer Antennenausrichtung durchgeführt. Bei der ersten Messreihe wurden alle Antennen senkrecht ausgerichtet. Für die zweite Messreihe wurde die Sendeantenne horizontal ausgerichtet. Die Ausrichtung der Empfangsantennen wurde dabei nicht geändert.

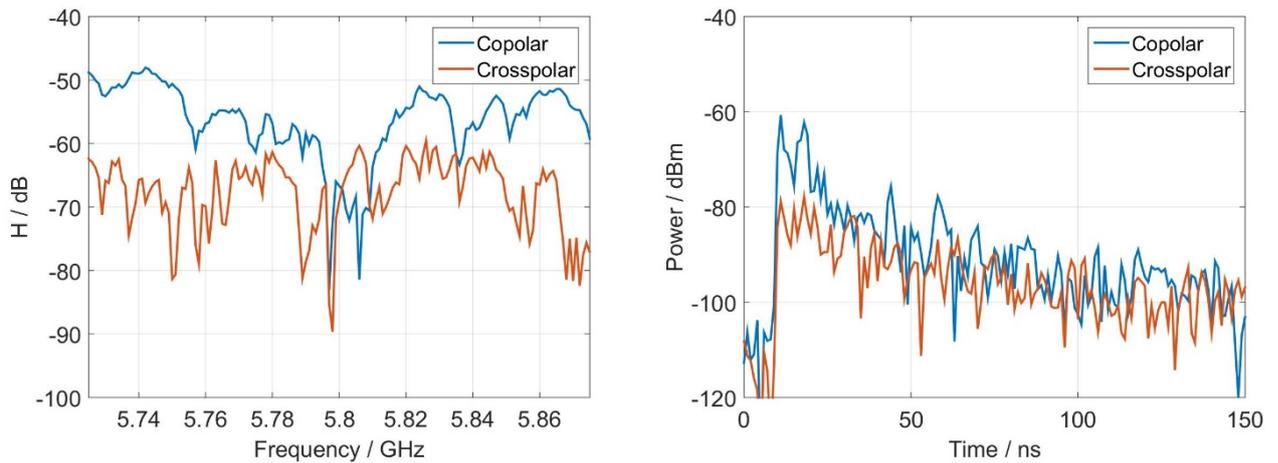


Abbildung 32: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 1 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne

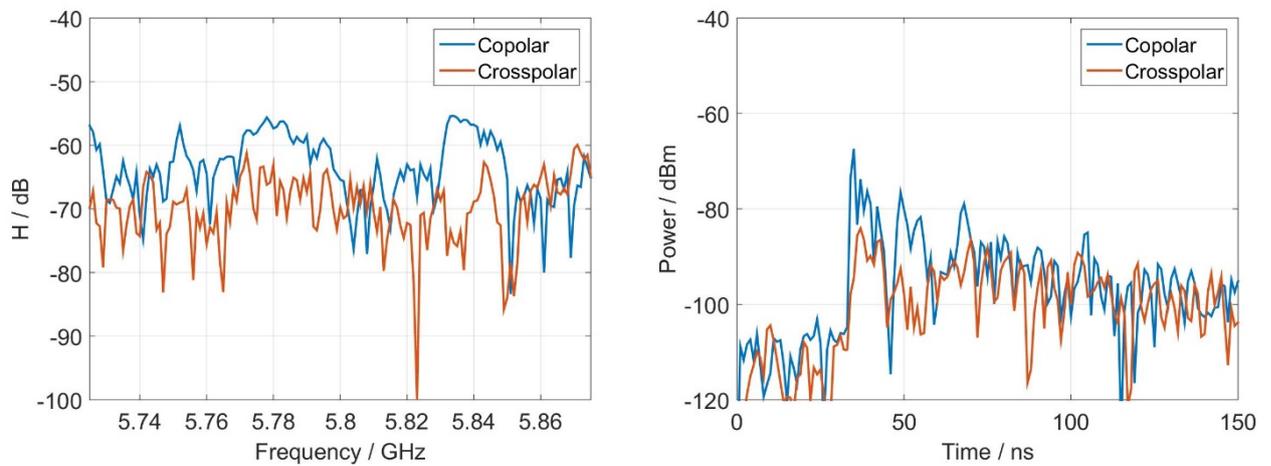


Abbildung 33: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 2 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne

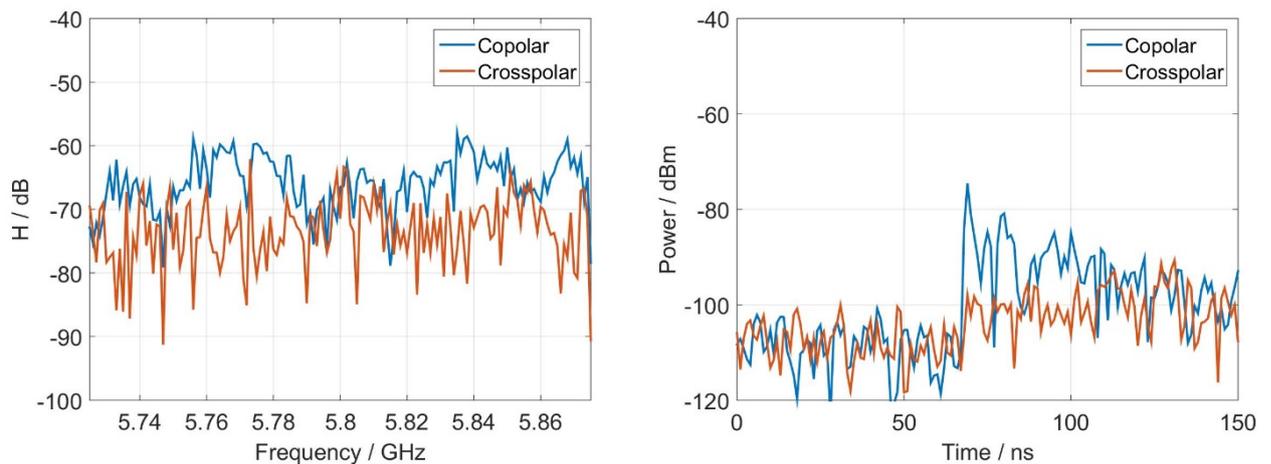


Abbildung 34: Frequenzgänge (links) und Impulsantworten (rechts) des Funkkanals 3 mit copolare (blau) und kreuzpolare (orange) Ausrichtung der Sende- bzw. Empfangs-Antenne

Die vermessenen Frequenzgänge und Impulsantworten mit copolarer und kreuzpolarer Antennenausrichtung können der Abbildung 32, Abbildung 33 und der Abbildung 34 entnommen werden.

Die charakteristischen Parameter der vermessenen Funkkanäle sind in der Tabelle 7 aufgeführt. Sie beinhalten charakteristische Werte des Frequenzgangs und der Impulsantwort.

Tabelle 7: Charakteristische Parameter der polarisationsvarianten Funkkanäle

Parameter	Funkkanal 1		Funkkanal 2		Funkkanal 3	
	Copolar	Kreuzpolar	Copolar	Kreuzpolar	Copolar	Kreuzpolar
Δd	3,1 m		9,2 m		20,5 m	
Verbindungsart	Obstructed LOS		Obstructed LOS		Obstructed LOS	
Antennen-ausrichtung	Copolar	Kreuzpolar	Copolar	Kreuzpolar	Copolar	Kreuzpolar
H_{median}	-52,2 dB	-65,6 dB	-60,3 dB	-70,1 dB	-66,0 dB	-72,5 dB
H_{10}	-60,6 dB	-74,3 dB	-60,3 dB	-78,6 dB	-74,0 dB	-80,3 dB
H_{90}	-46,5 dB	-60,4 dB	-55,4 dB	-64,9 dB	-61,0 dB	-67,4 dB
ΔH	14,1 dB	13,9 dB	12,3 dB	13,7 dB	12,9 dB	12,9 dB
B_{C90}	9 MHz	2 MHz	3 MHz	1 MHz	1 MHz	1 MHz
B_{C50}	165 MHz	12 MHz	156 MHz	4 MHz	12 MHz	1 MHz
τ_0	484 ns	281 ns	237 ns	409 ns	483 ns	410 ns
τ_{mean}	259 ns	249 ns	237 ns	250 ns	265 ns	258 ns
τ_{rms}	149 ns	143 ns	154 ns	138 ns	152 ns	136 ns

9.4.3 Zeitvariante Funkkanäle

Zusätzlich wurde in der Fabrikhalle ein zeitvarianter Funkkanal mit periodischen Bewegungen des Roboterarms Reis RV16 vermessen. Die zwei Antennenpositionen in der Roboterzelle mit einer Distanz von 3,8 m und einer Höhe von 1,5 m sind der Abbildung 35 zu entnehmen. Es werden $\lambda/2$ -Dipolantennen verwendet, die copolar zueinander ausgerichtet sind und einen Antennengewinn von 3 dBi haben. Dabei wurde mit vertikaler Polarisation gesendet. Durch den Roboterarm ist eine eingeschränkte (O-LOS) bzw. zeitweise eine Nicht-Sichtverbindung (N-LOS) vorhanden.

Das Bewegungsprofil weist eine Periodendauer von ca. 7,09 s auf und durchkreuzt mehrfach die Sichtverbindung. Die Messdauer beträgt 12 s. Die Abbildung 36 zeigt die Sichtverbindung aus der Perspektive der Sende- und Empfangsantenne.

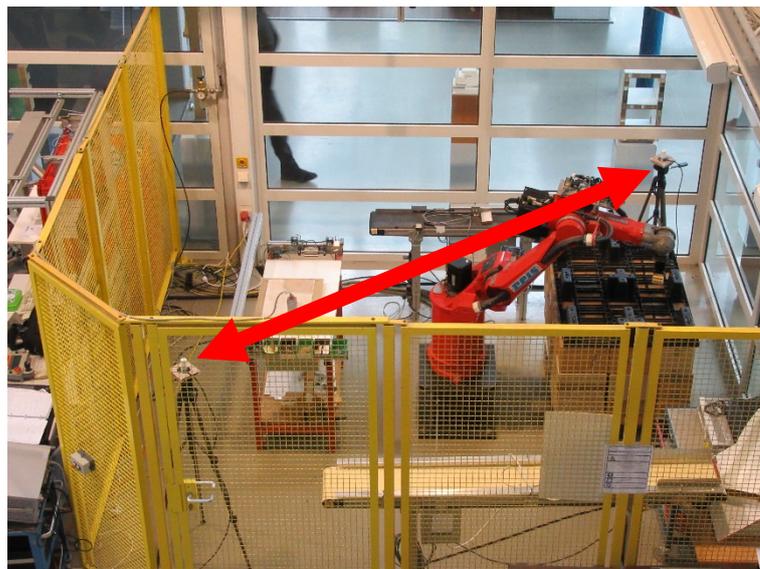


Abbildung 35: Messaufbau mit den Antennenpositionen in der Roboterzelle



Abbildung 36: Sicht der Sende- (links) und Empfangsantenne (rechts)

Die schnelle Zeitvarianz erfordert eine echtzeitfähige Messung mit einem korrelativen Channel Sounder. Der Entwurf des Ansatzes und eine exemplarische Validierung wurde dafür veröffentlicht [9]. Dafür stimulierte der Vektor-Signalgenerator (VSG) Rohde & Schwarz SMBV100A den Funkkanal mit einer korrelativen Sequenz. Dafür wurde eine Frank-Zadoff-Chu Sequenz mit dem Parameter $q = 7$ und der Länge von 1024 gewählt. Mit der gewählten Samplingrate von 100 MHz resultiert eine Messzeitauflösung von $10.24 \mu\text{s}$ und eine räumliche Auflösung von 3 m.

Anschließend korreliert das Software-Defined Radio (SDR) Ettus Research USRP X300 das empfangene Signal mit der identischen Sequenz um die Impulsantwort zu extrahieren.

Für die zeitvariante Messung wurde das SDR normiert. Außerdem wurden die Oszillatoren vom VSG und SDR mit einem 10-MHz-Referenzsignal synchronisiert. Zusätzlich wurde das empfangene Signal auf die 3-dB-Messbandbreite von 93,07 MHz reduziert und eine Bandsperrung mit einer Bandbreite von 390,5 kHz für die Unterdrückung des DC Bias verwendet. Die resultierende Impulsantwort ist in der Abbildung 37 dargestellt. Der resultierende zeitvariante Frequenzgang und dessen Median H_{median} ist in der Abbildung 38 dargestellt.

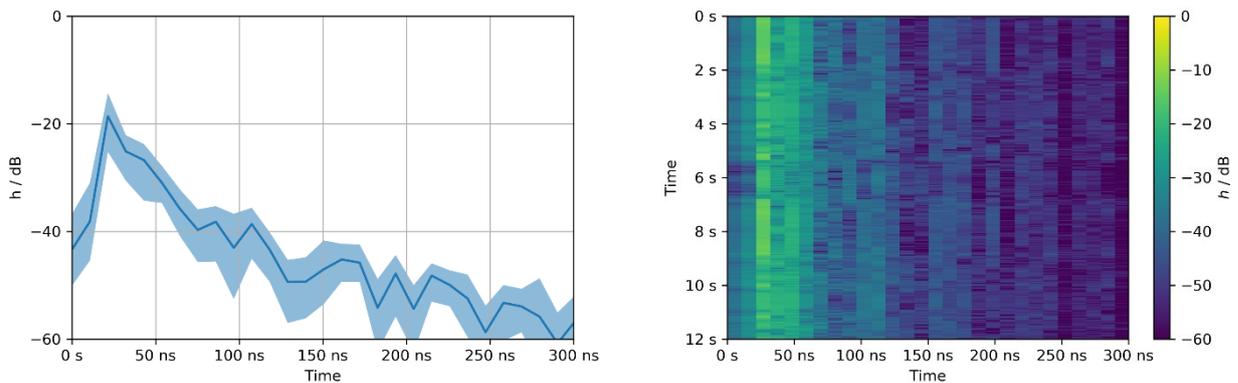


Abbildung 37: Median, Perzentile 90% und 10% (Fläche) der Impulsantwort (links) und dessen Varianz über die Messzeit (rechts)

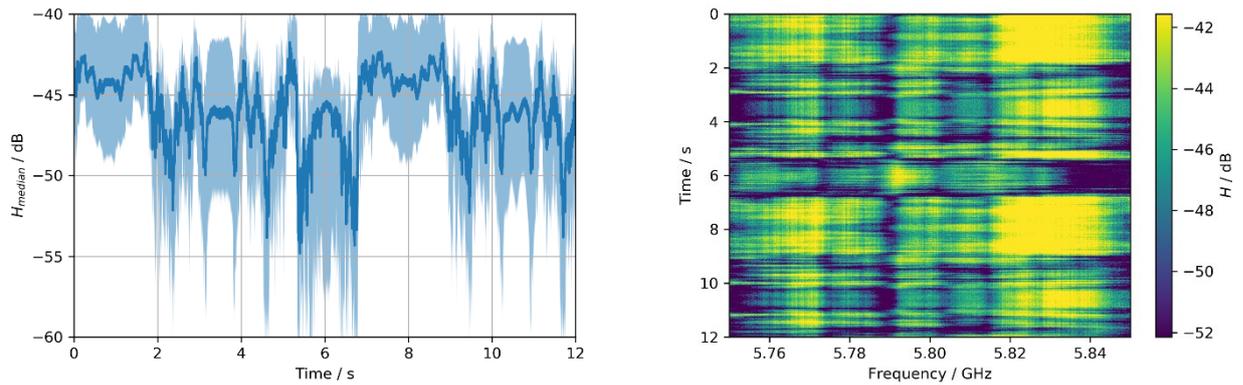


Abbildung 38: Median H_{median} , Perzentile 90% und 10% (Fläche) des Frequenzgangs über die Messzeit (links) und dessen Frequenzvarianz (rechts)

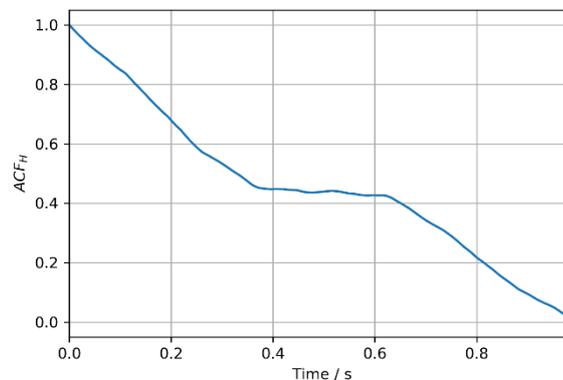


Abbildung 39: Normierte Autokorrelation der Dämpfung des Funkkanals des Abschnitt $t \in (5 \text{ s}, 6 \text{ s})$ mit der größten Varianz

Die Zeitvarianz wird mit der Kohärenzzeit charakterisiert, die aus der Autokorrelation der Dämpfung der Funkkanäle, wie in Abbildung 39 dargestellt, abgeleitet wird. Dafür wurde von dem gemittelten (Median) Frequenzgänge aus Abbildung 38 der Abschnitt $t \in (5 \text{ s}, 6 \text{ s})$ mit der größten Varianz ausgewertet. Daraus resultieren die Kohärenzzeiten $T_{C90} = 63 \text{ ms}$ und $T_{C50} = 329 \text{ ms}$.

9.5 Demonstratoren

9.5.1 Echtzeitfähiger Koexistenzdemonstrator

Zur Demonstration des echtzeitfähigen Koexistenzmanagements wurde ein geeigneter Demonstrator aufgebaut (Abbildung 40). Es besteht aus einer Aluprofil-Plattform mit der Länge von 1,5 m und der Breite von 0,5 m. Aus dieser Plattform ragen zwei senkrechte Aluprofile mit einer Höhe von 0,5 m raus. An den höchsten Enden ist jeweils ein Gleichstrommotor befestigt, welcher eine Scheibe mit montierten Mikrocontroller-Mainboard rotieren lässt.

Zusätzlich sind auf der Aluprofil-Plattform zwei unabhängige Systeme angebracht: Das Funkstörsystem (IX) und das System für das Koexistenzmanagement (KM). Beide Systeme können durch Bedienungsschalter aktiviert bzw. deaktiviert werden.

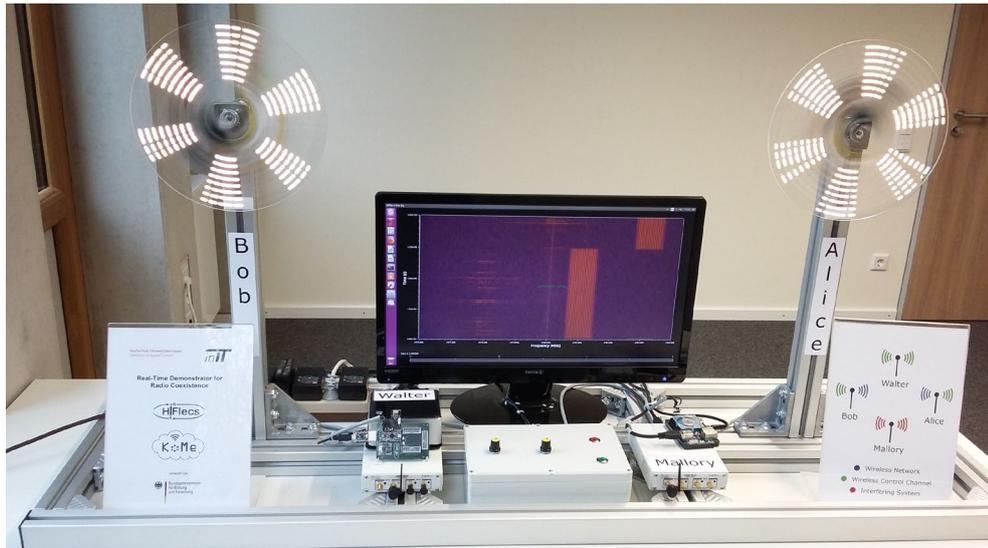


Abbildung 40: Echtzeitfähiger Koexistenzdemonstrator

Ausgehend von dem Mikrocontroller-Mainboard werden drei LED-Leisten in Abhängigkeit des Rotationswinkels angesteuert. Die LED-Leisten sind rotationssymmetrisch auf der Scheibe angebracht und beinhalten jeweils acht LEDs. Mit angemessener Rotationsgeschwindigkeit entsteht ein stehendes Bild für einen Beobachter. Dieser bilddarstellende Stroboskopeffekt wird *persistence of vision* (POV) genannt. Die jeweilige darzustellende Bildfolge wird vom rechten Mikrocontroller-Mainboard (Alice) zum linken Mikrocontroller-Mainboard (Bob) über eine Funkschnittstelle unidirektional mitgeteilt.



Abbildung 41: Mikrocontroller-Mainboard mit dem LiPo Charger (oben links), dem Mikrokontroller Arduino Pro Mini 328 (mittig), dem Transceiver NRF24L01+ (rechts) und den LED-Leisten-Schnittstellen (unten)

Das Mikrocontroller-Mainboard beinhaltet den Mikrokontroller Arduino Pro Mini 328 wie in Abbildung 41 dargestellt. Zur Ansteuerung der LEDs beinhaltet es zusätzlich einen LED-Treiber und drei LED-Leisten-Schnittstellen. Des Weiteren beinhaltet es einen LiPo Charger für den Batteriebetrieb. Für die Funkkommunikation wird der Transceiver NRF24L01+ verwendet. Es wird eine BFSK-Modulation mit einer Bruttodatenrate von 2 Mbit/s in Funkkanälen im Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,525 GHz verwendet.

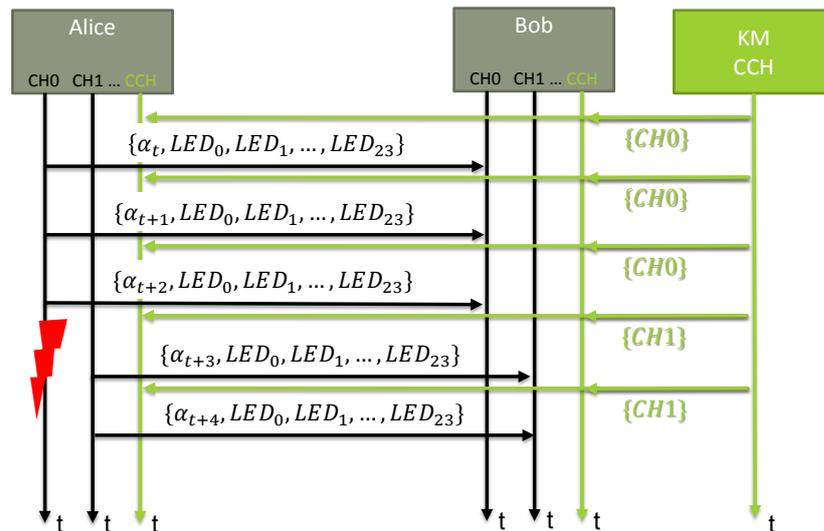


Abbildung 42: Sequenzdiagramm der Funkkommunikation mit der echtzeitfähigen Adaption des Funkkanals

Die Abbildung 42 zeigt schematisch die unidirektionale Mitteilung zwischen Alice und Bob mit den Helligkeitswerten der insgesamt 24 LEDs $LED_0 \dots LED_{23}$ bei den Rotationswinkel α_t zum Zeitpunkt t . Wenn sowohl das IX als auch das KM deaktiviert sind, erfolgt die Mitteilung auf den initialen Funkkanal CH0 und es kommt zu keinen Paketverlusten. Für den Beobachter wird somit die Bildfolge bei beiden Rotoren als identisch und synchronisiert wahrgenommen.

Durch die Aktivierung des IX wird die Kommunikation zwischen Alice und Bob gestört und es kommt daher zu Paketverlusten. Das führt bei Bob zu einer teilweise statischen Bilddarstellung der erfolgreich übertragenen Mitteilung welche für den Beobachter als Verzerrung der Bildfolge wahrnehmbar wird.

Durch die Aktivierung des KM werden die Verarbeitungsschritte *Spectrum Sensing*, *Interference Classification*, *Medium Occupancy Prediction* und *Utilization Recommendation* ausgeführt. Die Empfehlung des optimalen Funkkanals wird Alice und Bob in einem dedizierten ungestörten Funkkanal mitgeteilt. Anschließend erfolgt die Kommunikation zwischen Alice und Bob in dem empfohlenen Funkkanal. Es findet daher kein Paketverlust statt. Für den Beobachter wird somit die Bildfolge bei beiden Rotoren wieder als identisch und synchronisiert wahrgenommen. Damit kann das erfolgreiche echtzeitfähige Koexistenzmanagement gezeigt werden.

9.5.2 Monitoring am Gesamtdemonstrator

Die Umsetzung konnte wegen der verzögerten Fertigstellung des Gesamtdemonstrators nicht mehr erfolgen. Es ist jedoch beabsichtigt, die geplanten Monitoringaufgaben 2019 durchzuführen.

Der Gesamtdemonstrator des Projekts veranschaulicht die Ergebnisse der einzelnen HiFlecs-Teilaspekte in einem Gesamtsystem. Die nachzuweisenden Aspekte umfassen Echtzeitfähigkeit, Zuverlässigkeit, Informationssicherheit, Energieeffizienz, Plug&Play und Adaption.

Die Installation erfolgte in der SmartFactoryOWL am Standort des inIT in Lemgo. Der Aufbau besteht aus einer linearen Transportstrecke mit 3 Transmodulen (HiFlecs Clients) und 2 Wendestationen, die drahtlos mit Leistung und Daten versorgt werden. Die Daten-Ansteuerung erfolgt über eine zentrale Steuerung, in welche der HiFlecs-Controller integriert ist. Als weitere HiFlecs-Clients sind ein Monitoring sowie ein Linearmesssystem vorgesehen, siehe Abbildung 43.

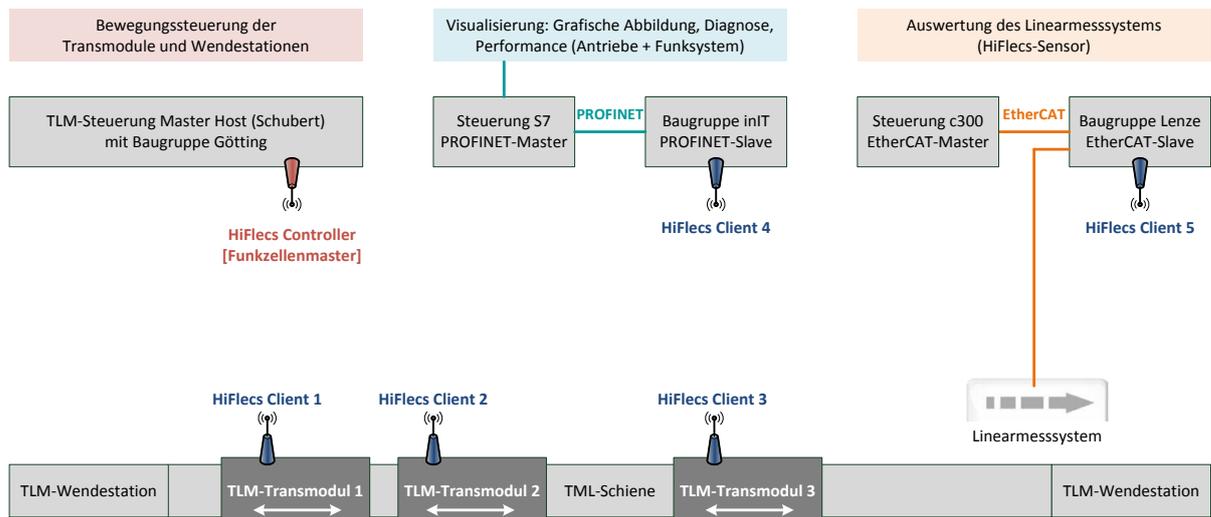


Abbildung 43: Prinzipskizze des HiFlecs-Gesamtdemonstrators

Das Monitoring wird über ein PROFINET-Netzwerk mit Steuerung S7 (Siemens) und PROFINET-HiFlecs-Gateway eingebunden. Über die Visualisierung werden Informationen zum Systemaufbau, Grafiken zum Systemverhalten und Details zur Performance der HiFlecs-Funkstrecke darstellbar. Die Abbildung 44 zeigt ein Foto des Demonstrators.



Abbildung 44: HiFlecs Gesamtdemonstrator

10 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Alle relevanten Ergebnisse wurden auf Konferenzen und in Fachzeitschriften publiziert (siehe Abschnitt 13.1). Der Schlussbericht wird über die Homepage des Instituts für industrielle Informationstechnik (inIT, www.init-owl.de) der Hochschule OWL verfügbar sein.

Folgende Transfermaßnahmen sind nach der Projektlaufzeit geplant:

- Einreichung einer Projektskizze im BMBF-Förderprogramm „Forschung für neue Mikroelektronik (ForMikro)“ zusammen mit drei Partnern aus dem HiFlecs-Konsortium.
- Vorstellung der Ergebnisse im GMA-Fachausschuss 5.21 'Funkgestützte Kommunikation' im Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)
- Vorstellung der Ergebnisse im Lenkungskreis 'Industrielle Kommunikation', ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.
- Einbringung von relevanten HiFlecs-Ergebnissen in den Verband ACIA: '5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA)', (<https://www.5g-acia.org/>)
- Gemeinsame Veröffentlichung aller Konsortialpartner in einem IEEE-Journal im Februar 2019. Arbeitstitel: HiFlecs - High Performance Real-Time Radio Technology for Closed-Loop Automation Solutions
- Einbeziehung der Forschungsergebnisse in die Lehrveranstaltungen von Prof. Jürgen Jasperneite und Prof. Uwe Meier an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe
- Präsentation des Gesamtdemonstrators in der Lemgoer Forschungsfabrik SmartFactoryOWL (www.smartfactory-owl.de), einer gemeinsamen Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft und der Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

11 Relevante Ergebnisse seitens Dritter

Im 3. Jahr der HiFlecs-Laufzeit wurde im April 2018 die '5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA)' gegründet (<https://www.5g-acia.org/>). Inhaltlich gibt es signifikante Überschneidungen mit den HiFlecs-Forschungszielen.

Das Institut inIT ist zusammen mit weiteren HiFlecs-Konsortialpartnern bei den Mitgliedern vertreten. Diese Mitgliedschaft gewährleistet, dass relevante Ergebnisse des HiFlecs-Fördervorhabens in das ACIA-Konsortium eingebracht werden.

12 Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Relevante veröffentlichte Ergebnisse anderer Forschungsgruppen wurden in die laufenden Forschungsarbeiten einbezogen. Insbesondere erfolgte ein regelmäßiger Austausch im Rahmen der Begleitforschung des BMBF-Förderprogramms IKT-2020 'Zuverlässige, drahtlose Kommunikation in der Industrie (ZDKI)' mit Forschern der Projekte KOI und ParSec.

Darüber hinaus wurden die Forschungsansätze und erzielten Ergebnisse mit Wissenschaftlern anderer Forschungsgruppen auf Konferenzen diskutiert.

13 Verwertungsplan

13.1 Veröffentlichungen

L. Dürkop, J. Jasperneite, A. Fay: An Analysis of Real-Time Ethernets With Regards to Their Automatic Configuration. 11th IEEE World Conference on Factory Communication Systems – WFCS 2015, Palma de Mallorca, Spain, 2015

Y. Naderpour, D. Block, U. Meier: Evaluation of Deterministic Medium Access Based on a Cooperative Cognitive Radio Approach (Best Paper Award). The Fifth International Conference on Advances in Cognitive Radio - COCORA 2015, Barcelona, Spain, 2015

- L. Dürkop, L. Wisniewski, S. Heymann, B. Lücke, J. Jasperneite: Analyzing the engineering effort for the commissioning of industrial automation systems. 20th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation – ETFA, Luxembourg, 2015
- D. Block, N. H. Fliedner, D. Toews, U. Meier: Wireless Channel Measurement Data Sets for Reproducible Performance Evaluation in Industrial Environments. 20th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA, Luxembourg, 2015
- L. Dürkop, L. Wisniewski, S. Heymann, B. Lücke, P. Priss, J. Jasperneite: Analyse des Inbetriebnahmeaufwandes von industriellen Produktionsanlagen anhand von Anwendungsbeispielen. KomMA 2015 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Magdeburg
- D. Block, U. Meier: Coexistence Performance of WSA: Simulative Evaluation. KomMA 2015 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Magdeburg, 2015
- P. Söffker, D. Block, U. Meier: Deterministischer Medienzugriff für industrielle Funkssysteme durch eine zentrale und verteilte kooperative Ressourcenallokation. KomMA 2015 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Magdeburg, 2015
- D. Block, D. Töws, U. Meier: Implementation of Efficient Real-Time Industrial Wireless Interference Identification Algorithms with Fuzzified Neural Networks. EUSIPCO 2016 - European Signal Processing Conference, Budapest, Hungary, Aug. 29 - Sep. 2
- D. Block, M. Schmidt, L. Dürkop, N. Wiebusch, U. Meier: Coexistence of Wireless Control Systems: An Integral Event-based Simulation Approach. 21st IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA 2016, Berlin, Germany, September 6 - 9, 2016
- L. S. Karsthof, M. Hao, J. Rust, S. Paul, U. Meier, D. Block: Dynamically Reconfigurable Real-Time Hardware Architecture for Channel Utilisation Analysis in Industrial Wireless Communication
IEEE Nordic Circuits and Systems Conference - NORCAS 2016, Copenhagen, Denmark, November 1 - 2, 2016
- D. Block, U. Meier: Discrete-Event Simulation of Wireless Coexistence for Industrial Applications: Requirements and Solutions. KomMA 2016 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Lemgo, Germany, Nov. 30 - Dez. 1, 2016
- Mingjie Hao, Ludwig Karsthof, Jochen Rust, Dimitri Block, Uwe Meier and Steffen Paul: Hardwarebasiertes Koexistenzmanagement für echtzeitfähige, industrielle Funkssysteme. KomMA 2016 – Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation, Lemgo, Germany, Nov. 30 - Dez. 1
- L. Dürkop: Automatische Konfiguration von Echtzeit-Ethernet. Springer, Berlin Heidelberg, Feb. 2017
- C. Bockelmann, A. Dekorsy, A. Gnad, L. Rauchhaupt, A. Neumann, D. Block, U. Meier, J. Rust, St. Paul, F. Mackenthun, A. Weinand, H. Schotten, J. Siemons, T. Neugebauer, M. Ehrlich: HiFlecs: Innovative Technologies for Low-Latency Wireless Closed-Loop Industrial Automation Systems. 22. VDE/ITG Fachtagung Mobilkommunikation, Osnabrück, 9. - 10. Mai 2017
- N. Wiebusch, D. Block, U. Meier: A Centralized Cooperative SNMP-based Coexistence Management Approach for Industrial Wireless Systems. 13th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, WFCS 2017, Trondheim, Norway, May 31 - June 2, 2017
- A. Neumann, M. Ehrlich, L. Wisniewski, J. Jasperneite: Towards monitoring of hybrid industrial networks. 13th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, WFCS 2017 (best WIP paper award), Trondheim, Norway, May 31 - June 2, 2017
- Malte Schmidt, Dimitri Block, Uwe Meier: Wireless Interference Identification with Convolutional Neural Networks. 15th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2017, Emden, Germany, 24-26 July, 2017
- Nico Wiebusch, Philip Söffker, Dimitri Block, Uwe Meier: A Multidimensional Resource Allocation Concept for Wireless Coexistence Management. 22nd IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA 2017, Limassol, Cyprus, September 13 - 15, 2017
- Jürgen Jasperneite, Uwe Meier, Arne Neumann, Nico Wiebusch: Industrial Wireless - Koexistenz und hybride Systeme. VDE Verlag, open automation, Ausgabe 5/2017, 50 - 53

Sergej Grunau, Dimitri Block, Uwe Meier: Multi-Label Wireless Interference Classification with Convolutional Neural Networks. 16th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2018, Porto, Portugal, July 18 - 20, 2018

Niels Hendrik Fliedner, Dimitri Block, Uwe Meier: A Software-Defined Channel Sounder for Industrial Environments with Fast Time Variance. 15th International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS 2018, Lisbon, Portugal, August 28 - 31, 2018

Marco Ehrlich, Arne Neumann, Alexander Biendarra, Jürgen Jasperneite: Quality-of-Service Monitoring of Hybrid Industrial Communication Networks. In: at - Automatisierungstechnik 67 (1), Special Issue: Methods for a reliable wireless communication in the industry S.: 69-78, De Gruyter, January 2019.

Nico Wiebusch, Uwe Meier: Evolutionary Resource Allocation Optimization for Wireless Coexistence Management. 23rd IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA 2018, Torino, Italy, September 4 - 7, 2018

Philip Söffker, Dimitri Block, Nico Wiebusch, Uwe Meier: Resource Allocation for a Wireless Coexistence Management System Based on Reinforcement Learning. 23rd IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - ETFA 2018, Torino, Italy, September 4 - 7, 2018

Monique Dungen, Thomas Hansen, Ramona Croonenbroeck, Rüdiger Kays, Bernd Holfeld, Dennis Wieruch, Pablo Wilke Berenguer, Volker Jungnickel, Dimitri Block, Uwe Meier and Henrik Schulze: Channel Measurement Campaigns for Wireless Industrial Automation - Funkkanalmessungen für die drahtlose industrielle Kommunikation. at – Automatisierungstechnik 2019; Vol. 67, No. 1, 7 - 28

13.2 Studentische Arbeiten

Tobias Graeske: Aufbau und Evaluation eines echtzeitfähigen Demonstrators für die Koexistenz von Funksystemen (Studienarbeit Master)

Philip Söffker: Ressourcenzuweisung für ein Koexistenz-Management-System auf Basis prädiktiver Modellierung (Masterarbeit)

Marco Ehrlich: Monitoring of network connections regarding QoS parameters (Studienarbeit Master)

Sergej Grunau: Klassifizierung überlagerter Funksignale mit Convolutional Neural Networks (Studien- und Bachelorarbeit)

Philip Söffker: Informationsfusion für ein mehrdimensionales Koexistenz-Management industrieller Funksysteme (Studienarbeit Master)

Abdulrahman Abdulhabeab: Entwurf und Aufbau eines software-parametrierbaren Antriebssystems (Studienarbeit Bachelor)

Niels Fliedner: Entwicklung eines Verfahrens zur korrelativen Vermessung industrieller Funkkanäle mit schneller Zeitvarianz (Bachelorarbeit)

Ibrahim Dali: Entwurf und Integration eines Gateway-Konzepts zur Anbindung industrieller Funksysteme an ein Real-Time-Ethernet-Backbone (Bachelorarbeit)

Praveen Suresh: Discrete-Event Simulation of Industrial Ethernet Based Coexistence Management (Master thesis)

Aditya Wuyyuru: Coexistence Management for Industrial Heterogeneous Wireless Networks Based on Software-Defined Networks (Master thesis)

Pierre Aubriet Hioufang Meladjie: Implementierung einer Neuro-Fuzzy-Funksignalklassifizierung in ein GNU-Radio-System (Bachelorarbeit)

14 Anhang

14.1 Literaturverzeichnis

- [1] L. Dürkop, J. Jasperneite und A. Fay, „An analysis of real-time Ethernets with regardsto their automatic configuration,“ in *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS 2015)*, Palma de Mallorca, Spain, 2015.
- [2] M. Ehrlich, A. Neumann, A. Biendarra und J. Jasperneite, „Quality-of-Service monitoring of hybrid industrial communication networks,“ *at - Automatisierungstechnik*, 67 (1), pp. 69-78, January 2019.
- [3] A. Neumann, M. Ehrlich, L. Wisniewski und J. Jasperneite, „Towards monitoring of hybrid industrial networks,“ in *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS 2017)*, Trondheim, Norway, 2017.
- [4] D. Block, U. Meier und D. Töws, „Implementation of Efficient Real-Time Industrial Wireless Interference Identification Algorithms with Fuzzified Neural Networks,“ in *EUSIPCO*, Hungary, Budapest, 2016.
- [5] M. Schmidt, D. Block und U. Meier, „Wireless Interference Identification with Convolutional Neural Networks,“ in *15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN`2017)*, Emden, Germany, 2017.
- [6] T. J. O’Shea, J. Corgan und T. C. Clancy, „Convolutional radio modulation recognition networks,“ in *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, Aberdeen, UK, 2016.
- [7] P. Soeffker, D. Block, N. Wiebusch und U. Meier, „Resource Allocation for a Wireless Coexistence Management System Based on Reinforcement Learning,“ in *arxiv*, 2018.
- [8] D. Block, N. H. Fliedner und U. Meier, „5.8 GHz channel gain within a factory environment,“ *CRAWDAD*, <http://dx.doi.org/10.15783/C7N01X>, 2015.
- [9] N. H. Fliedner, D. Block und U. Meier, „A Software-Defined Channel Sounder for Industrial Environments with Fast Time Variance,“ in *International Symposium on Wireless Communication Systems ISWCS2018*, Lisabon, Portugal, 2018.

14.2 Abkürzungsverzeichnis

AP	Access Point
ARQ	Automatic Repeat Request
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCP	Central Coordination Point
CDMA	Code Division Multiple Access
CESS	Compressed Edge Spectrum Sensing
CMU	Cognitive Medium Utilization
CNN	Convolutional Neural Network
CNR	Channel-to-Noise-Ratio
CS	Compressive Sensing
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CT	Central Tendency
CTDMA	Code Time Division Multiple Access
DDQN	Double-Deep-Q Network
DQN	Deep-Q Network
ES	Edge Spectrum
FCAPS	Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security Management
FFT	Fast Fourier Transformation
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplex
GSD	General Station Description
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
ICMP	Internet Control Message Protocol
IE	Industrial Ethernet
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IO	Input/Output
IPFIX	Internet Protocol Flow Information eXport
ITU	International Telecommunication Union
KM	Koexistenzmanagement
LOS	Line of Sight
MCS	Modulation und Coding Schemes
NFSC	Neuro-Fuzzy Signal Classifier
NRT	Non-Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture

OSI	Open Systems Interconnection
PCI	Protocol Control Information
PSD	Power Spectral Density
QoC	Quality of Coexistence
QoS	Quality of Service
ReLU	Rectified Linear Unit
RFC	Request for Comments
RL	Reinforcement Learning
RMS	Root Mean Square
RT	Real Time
SAP	Service Access Point
SD	Statistical Dispersion
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal Noise Ratio
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSU	Spectral Sensing Unit
WLAN	Wireless Local Area Network
ZDKI	Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie